

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)
Факультет «Высшая школа электроники и компьютерных наук»
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, начальник участка
производства датчиков давления
АО «ПГ Метран»
_____/ А.В. Егоров /
« ____ » _____ 2018г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор
_____/ А.Л. Шестаков /
« ____ » _____ 2018г.

Исследование методов оценки погрешности и неопределенности результата косвенных измерений

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР

Руководитель, к.т.н, доцент

_____/ Е.В. Юрасова /
« ____ » _____ 2018 г.

Автор

студент группы КЭ–225
_____/ А.Ф. Жилкин /
« ____ » _____ 2018г.

Нормоконтролер, к.т.н, доцент

_____/ А.С. Волосников /
« ____ » _____ 2018г.

АННОТАЦИЯ

Жилкин А.Ф. Исследование методов оценки погрешности и неопределенности результата косвенных измерений. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-225, 2018, 137 с, 25 ил., 12 табл., 3 прилож., библиогр. список – 58 наим.

Повышение качества обработки результатов измерений требует снижения погрешности, поэтому проведение сравнительного анализа методов оценки погрешности результата косвенных измерений является важным процессом обработки данных. Это вполне объяснимо, поскольку недостоверные результаты измерений могут привести к нештатным, а порой и аварийным ситуациям на объектах.

В выпускной квалификационной работе были рассмотрены следующие вопросы:

- 1) информационный поиск источников по теме оценки погрешности результата косвенных измерений;
- 2) спланирован измерительный эксперимент для накопления данных, разработана методика выполнения измерений;
- 3) проведен измерительный эксперимент для накопления данных;
- 4) разработано программное обеспечение для трех методов обработки данных косвенных измерений;
- 5) выполнена обработка экспериментальных данных косвенных некоррелированных измерений с помощью разработанного программного обеспечения;
- 6) выполнен сравнительный анализ результатов обработки экспериментальных данных.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР			
Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.	А.Ф.Жилкин				Исследование методов оценки погрешности и неопределенности результата косвенных измерений	Лит.	Лист	Листов
Пров.	Е.В.Юрасова						4	137
Т. Контр.	А.В.Егоров					ЮУрГУ Кафедра ИнИТ		
Н. Контр.	А.С.Волосников							
Утв.	А.Л. Шестаков							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	14
1.1 Обработка результатов измерений	14
1.2 Исследования в области измерительного эксперимента	23
1.3 Применение косвенных измерений на объектах промышленности	31
1.4 Методы обработки данных косвенных измерений	39
2 ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ	57
2.1 Резонансный метод измерения	57
2.2 Оборудование экспериментального стенда	61
2.3 Планирование измерительного эксперимента	66
2.4 Методика выполнения измерений	68
2.5 Получение экспериментальных данных измерения аргумента косвенного измерения	78
2.6 Нахождение результата измерения аргумента	81
3 РЕАЛИЗАЦИЯ ТРАДИЦИОННОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	89
3.1 Описание метода	89
3.2 Реализация интерфейса в среде MatLab и методы тестирования программного обеспечения	91
3.3 Описание программы по ГОСТ 19.402-78	94
3.4 Экспериментальное исследование метода	98
4 МОДИФИКАЦИЯ ТРАДИЦИОННОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	101
4.1 Описание метода	101
4.2 Описание программы по ГОСТ 19.402-78	103
4.3 Экспериментальное исследование метода	107

5 РЕАЛИЗАЦИЯ БУТСТРЕП МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	109
5.1 Описание метода	109
5.2 Описание программы по ГОСТ 19.402-78	112
5.3 Экспериментальное исследование метода	116
6 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНОК ПОГРЕШНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	121
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	122
ПРИЛОЖЕНИЯ	128
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Листинг программы. Традиционный метод.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Листинг программы. Модификация традиционного метода	132
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Листинг программы. Бутстреп метод	136

ВВЕДЕНИЕ

Теоретические основы создания современных автоматизированных систем управления и систем поддержки принятия решений сложными технологическими процессами и системами должны формироваться на базе эффективного сочетания различных путей накопления информации, главным из которых является измерение. В настоящее время принято следующее определение измерения: измерение – это процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны к величине [28].

Большое разнообразие явлений, с которыми приходится сталкиваться, имеет огромный спектр величин, которые необходимо измерить. Во всех случаях проведения измерений, независимо от измеряемой величины, метода и средства измерений, есть общее, что составляет основу измерений – это сравнение опытным путем данной величины с другой, подобной ей, принятой за единицу. При всяком измерении с помощью эксперимента оценивается физическая величина в виде некоторого числа принятых для нее единиц, то есть находится ее значение [33].

Косвенные измерения широко применяются в технических системах при решении задач диагностики и управления [28]. Системы диагностики используют преобразователи при формировании баз данных [39]. Естественно, данные преобразователи обладают сравнительно большой погрешностью, что приводит к недостоверности информации, хранимой в базах данных. Следствием этого является в ряде случаев недостоверные выводы по принятию решений на основе используемых в диагностике логических выводов.

Поэтому вопросы достоверности результатов измерений при решении задач технологического и коммерческого характера привлекают все больше и больше внимания с учетом прогрессирующего числа устанавливаемых приборов на объектах промышленности. Это вполне объяснимо, поскольку недостоверные

результаты являются источником нештатных, а порой и аварийных ситуаций при технологических измерениях и приводят к существенным перекосам в финансовых отношениях между поставщиком и потребителем энергоресурсов при коммерческих измерениях [40].

В реальных условиях эксплуатации технологических объектов, как правило, накладываются существенные ограничения на получение информационных данных измерений, на планирование и проведение эксперимента, идентификацию и моделирование объекта. Такие ограничения связаны с трудностями физической реализации определенных контрольно-измерительных приборов, особенностями технологического процесса, отсутствием адекватных методов измерений, дороговизной измерительной аппаратуры и тому подобное.

Эксплуатация технологических объектов в любой отрасли промышленности свидетельствует о том, что лишь незначительная часть технологических параметров подвергается прямым измерениям: часть параметров объекта определяется методом косвенных измерений с использованием известных законов, закономерностей, либо согласно эмпирически установленным зависимостям [16].

Косвенное измерение – измерение, при котором искомое значение величины определяют на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с другой величиной. Во многих случаях вместо термина «косвенное измерение» применяют термин «косвенный метод измерения» [31].

Существенный вклад в развитие теории обработки данных косвенных измерений внесли З.Ф. Кудряшова, С.К. Савин, У.Л. Пим, Б. Эфрон, С.Г. Рабинович, И.П. Захаров, В. А. Грановский и другие ученые.

В настоящее время основным и самым распространенным методом обработки данных косвенных измерений является традиционный метод, отраженный в МИ 2083-90 [21].

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Традиционный метод представлен в большом количестве работ, например, С.Г. Рабиновича [56], И.Н. Сафина [33], С.Г. Абрамова [1]. Наиболее полно этот метод представлен в МИ 2083-90. Данный метод прост в применении. Его достоинством является универсальность. Однако этот метод имеет ряд недостатков. Несмотря на общепризнанность, достоверность результатов обработки данных косвенных измерений традиционным методом в ряде случаев вызывает сомнение. Это привело к поиску других методов оценки погрешности результатов косвенных измерений.

Метод приведения основан на приведении ряда отдельных значений косвенно измеряемой величины к ряду прямых измерений. Получаемые сочетания отдельных результатов измерений аргументов по известной зависимости вычисляют отдельные значения измеряемой величины. Он представлен в работах таких авторов, как М.В. Бержинская, Г.С. Ранченко, С.Г. Толстых.

Он предполагает наличие ряда отдельных значений измеряемых аргументов, полученных в результате многократных измерений. Этот метод можно также применять при неизвестных распределениях погрешностей измерений аргументов.

Метод Монте-Карло широк в применении. Он используется в таких областях, как математика, физика, биология, экономика и другие. Данный метод пользуется огромной популярностью и отражен в работах В.А. Баранова, И.П. Захарова, М.В. Соболя и множества других авторов.

Метод Монте-Карло прост в структуре вычислительного алгоритма. Он позволяет моделировать любой процесс, на который влияют внешние факторы.

Большую популярность набирает метод статистического бутстрепа, отраженный в работах таких авторов, как Б. Эфрон, У.Л. Пим, Г. Крамер, В.К. Шитиков и других авторов. Идея Бутстрепа заключается генерировании большого числа подобных выборок и использовании результатов вычислений по

выборкам как «фиктивную популяцию» для того, чтобы получить выборочное распределение статистики.

Учитывая сказанное, задача нахождения наиболее точного метода обработки данных косвенных измерений является весьма актуальной. Ее успешное решение может улучшить метрологические характеристики и эффективность технических систем на различных технологических объектах без значительных материальных затрат за счет математической обработки результатов измерений.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Целью выпускной квалификационной является исследование результата косвенных измерений путем проведения сравнительного анализа результатов обработки различными методами экспериментальных данных косвенных измерений.

ЗАДАЧИ РАБОТЫ. Для достижения цели выпускной квалификационной работы необходимо решить следующие задачи.

1. Провести информационный поиск источников по теме оценки погрешности результата косвенных измерений. Изучить современные методы обработки данных косвенных некоррелированных измерений.

2. Спланировать и провести измерительный эксперимент для накопления данных.

3. Последовательно разработать программное обеспечение методов обработки экспериментальных данных косвенных некоррелированных измерений. Реализовать программное обеспечение традиционного метода, модифицированного традиционного метода, бутстреп метода.

4. Выполнить сравнительный анализ результатов обработки экспериментальных данных.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Для выполнения работы использовались методы теории вероятности, параметрической и непараметрической статистики. Разработка структурной схемы измерительной системы проводилась на основе метода резонанса. Исключение грубых погрешностей выполнено

согласно критерию Граббса. Проверка на наличие постоянно возрастающей или постоянно убывающей систематической погрешности проводится по критерию Аббе. Для косвенных измерений при нелинейных зависимостях и некоррелированных погрешностях измерений аргументов используют метод линеаризации, основанный на разложении нелинейной функции в ряд Тейлора. Исследование методов обработки данных косвенных измерений выполнены с помощью компьютерного моделирования.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Научная новизна выпускной квалификационной работы заключается в исследовании методов обработки данных косвенных измерений, разработке нового алгоритма обработки данных косвенных измерений, базирующегося на уточненной модели оценки случайной погрешности и выполнении сопоставительного анализа результатов обработки различными методами экспериментальных данных косвенных измерений.

Практическая ценность полученных результатов заключается в разработке программного обеспечения трех методов обработки данных косвенных измерений.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения и результаты работы докладывались на:

- второй международной научно-практической конференции «Мехатроника, автоматика и робототехника» (г. Новокузнецк, 2018);
- семидесятой научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников ЮУрГУ (г. Челябинск, 2018).

ПУБЛИКАЦИИ. По результатам выполненных исследований и разработок опубликована 1 печатная работа:

Жилкин, А.Ф. Исследование методов оценки погрешности результата косвенных измерений / А.Ф. Жилкин // Материалы II международной научно-практической конференции «Мехатроника, автоматика и робототехника». – Новокузнецк. 22 февраля 2018 г. Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – №2. – С. 181 – 183.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы (58 наименований) и приложения. Основная часть работы состоит из 121 страницы, 25 рисунков, 12 таблиц.

В первой главе работы рассматриваются особенности обработки результатов измерений, классификация погрешностей и неопределенностей, исследования в области измерительного эксперимента, применение косвенных измерений на объектах промышленности. Рассмотрены методы обработки данных косвенных измерений.

Во второй главе представлен процесс проведения измерительного эксперимента для накопления экспериментальных данных. Рассмотрен и описан резонансный метод измерения. Представлено оборудование измерительного эксперимента, разработана методика выполнения измерений, спланирован измерительный эксперимент. Получены экспериментальные данные измерения аргумента косвенного измерения. Найден результат измерения аргумента.

В третьей главе рассмотрена реализация традиционного метода обработки данных косвенных измерений. Описан данный метод обработки данных косвенных измерений. Рассмотрены реализация интерфейса в среде MatLab и методы тестирования программного обеспечения. Разработано программное обеспечение для данного метода с описанием программы. Представлено экспериментальное исследование метода.

В четвертой главе рассмотрена реализация модификации традиционного метода обработки данных косвенных измерений. Описан данный метод обработки данных косвенных измерений. Разработано программное обеспечение для метода с описанием программы. Представлено экспериментальное исследование метода.

В пятой главе рассмотрена реализация бутстреп метода обработки данных косвенных измерений. Описан данный метод обработки данных косвенных

измерений. Разработано программное обеспечение для данного метода с описанием программы. Представлено экспериментальное исследование метода.

В шестой главе проводится сравнительный анализ оценки погрешности и неопределенности результатов обработки данных.

Работа выполнена на кафедре «Информационно-измерительная техника» Южно-Уральского государственного университета (НИУ).

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1 Обработка результатов измерений

Измерения являются одним из важнейших путей познания природы человеком. В практической жизни человек всюду имеет дело с ними. На каждом шагу встречаются измерения таких величин, как длина, объем, вес, время и др. Они дают количественную характеристику окружающего мира, раскрывая человеку действующие в природе закономерности. Все отрасли техники не могут существовать без развернутой системы измерений, определяющих как технологические процессы, контроль и управление ими, так и свойства и качество выпускаемой продукции [35].

Ввиду неизбежных несовершенств методов и средств измерений результаты измерений содержат погрешности, которые обработкой должны быть уменьшены и оценены [26].

В настоящее время действуют три документа, устанавливающих методы оценивания погрешностей результатов измерений: МИ 2091-90 [22], ГОСТ 8.736-11 [6] и МИ 2083-90 [21]. И формально, и по существу все три документа тесно связаны друг с другом.

Результат измерения – множество значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной информацией с указанием соответствующего показателя точности [40].

Быстрыми темпами развивается теория точности измерений.

Основной задачей этой теории является оценка степени приближения результата измерения к истинному значению измеряемой величины X .

Общая теория точности измерений включает:

– теорию точности априори, содержанием которой является анализ погрешностей средств измерения в статике и динамике, методы повышения

точности средств измерений. Основной целью является оценивание и снижение погрешности каждого отдельного результата наблюдения;

– теорию точности апостериори, т.е. теорию точности оценивания результата измерений, содержанием которой является анализ погрешностей измерения, методы обработки результатов многократных наблюдений, повышающих точность результата измерений. Основной целью является оценивание и снижение погрешности конечного результата измерений.

Сформулируем общие принципы повышения точности измерений, сущность которых определяется характером погрешностей СИ и погрешностей измерений.

При преобладании случайной составляющей погрешности общим принципом повышения точности измерений является усреднение.

При преобладании систематических и относительно медленно изменяющихся случайных погрешностей принципами повышения точности измерений являются:

- 1) предотвращение возникновения погрешностей в средствах измерений конструктивно-технологическими и защитно-предохранительными методами;
- 2) выявление существующих погрешностей и преобразование их в воздействие, компенсирующее выявленную погрешность, на основе образцовых прямых и обратных измерительных преобразователей и мер;
- 3) функциональная обработка результатов измерений, выполненных по специальной методике с целью уменьшения погрешностей [52].

Как известно на погрешность результата измерений оказывают влияние ряд факторов: применяемый метод измерений, инструментальная погрешность средства измерений, факторы окружающей среды, квалификация оператора, выполняющего измерительную процедуру и последующую обработку полученных результатов [38].

Обработка результатов измерений – обработка измерительной информации с целью получения достоверных данных.

Целью обработки результатов измерений является установление значения измеряемой величины и оценка погрешности полученного результата измерения [2].

Обработка результатов измерений статистическими методами применяется на практике для решения следующих задач:

- определение погрешности средств измерений;
- определение соответствия параметров технологического процесса заданной точности изделия;
- установление технологического допуска при обработке;
- определение точностных характеристик установочных и выборочных партий деталей, с целью контроля и управления качеством продукции;
- установление рассеяния показателей качества однотипных изделий [17].

Обработка результатов измерений используется для повышения точности измерений с многократными наблюдениями, а также определения статистических характеристик случайной погрешности.

Опыт показывает, что вследствие неточности измерительных приборов, несовершенства наших органов чувств, неполноты наших знаний, трудности учета всех побочных явлений, при многократном повторении одного и того же измерения получаются разные числовые значения изучаемой физической величины. Так бывает, даже если измерения производить в совершенно одинаковых условиях (равноточные измерения). При практическом использовании результатов тех или иных измерений возникает вопрос об истинном значении изучаемой физической величины, о точности измерения.

Термин «точность измерения», т.е. степень приближения результатов измерения к некоторому действительному значению, используется для качественного сравнения измерительных операций. Для количественной оценки используется понятие «погрешность (ошибка) измерений». Эти термины тесно связаны друг с другом: чем меньше погрешность, тем выше точность. Оценка погрешности

измерений – одно из важных мероприятий по обеспечению достоверности измерений.

Количество факторов, влияющих на точность измерений, достаточно велико, и любая классификация погрешностей измерений в известной мере условна. На схеме, изображенной на рисунке 1.1, приведена одна из возможных классификаций, которая может служить основой для оценки погрешности измерений в учебной физической лаборатории.

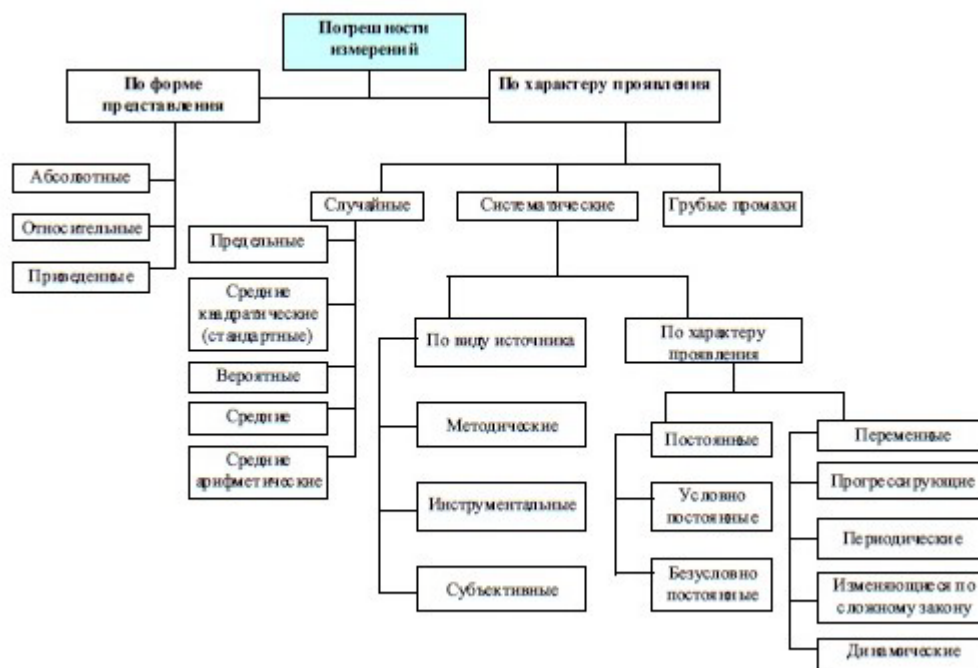


Рисунок 1.1 – Классификация погрешностей

Помимо понятия погрешности измерений используется понятие «неопределенность измерений».

Термин «неопределенность» означает сомнение, таким образом «неопределенность измерения» означает сомнение в достоверности результата измерения.

Согласно ГОСТ Р 54500.3-2011 [7], неопределенность – это параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Параметром может быть, например, стандартное отклонение или полуширина интервала, которому соответствует заданный уровень доверия.

Неопределенность измерения включает в себя много составляющих. Некоторые из них могут быть оценены из статистического распределения результатов ряда измерений и описаны выборочными стандартными отклонениями.

Неопределенность измерения делится на стандартную неопределенность и расширенную неопределенность [7]. Стандартная неопределенность подразделяется на неопределенность типа А, неопределенность типа В и суммарную неопределенность.

Стандартная неопределенность – это неопределенность результата измерения, выраженная в виде стандартного отклонения.

Оценивание неопределенности типа А подразумевает метод оценивания неопределенности путем статистического анализа ряда наблюдений.

Оценивание неопределенности типа В означает использование метода оценивания неопределенности, отличного от статистического анализа ряда наблюдений.

Суммарная стандартная неопределенность результата измерений равна положительному квадратному корню взвешенной суммы дисперсий или ковариации этих величин, весовые коэффициенты при которых определяются зависимостью изменения результата измерения от изменений этих величин.

Расширенной неопределенностью называется величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, который, как ожидается, содержит в себе большую часть распределения значений, что с достаточным основанием могут быть приписаны измеряемой величине.

Используя такие характеристики, как результат измерения y , доверительные границы погрешности измерения Δ_p , доверительная вероятность $p_{дов}$, можно вычислить характеристики, используемые в международных документах:

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

- результат измерения y ;
- оценка расширенной неопределенности \hat{U}_p :

$$\hat{U}_p = \Delta_p ; \quad (1.1)$$

- Оценка суммарной стандартной неопределенности \hat{u}_c :

$$\hat{u}_c = \frac{\Delta_p}{t_p} , \quad (1.2)$$

где t_p – доверительный коэффициент (коэффициент охвата) для нормального распределения, соответствующий вероятности $p_{\text{доп}}$ [15].

Методы обработки результатов измерений могут быть разными в зависимости от предварительной информации, которой располагает экспериментатор об источниках и характере проявления погрешностей, условиях эксперимента, свойствах используемых средств измерений, от вида измерений, числа выполненных наблюдений и других причин [2].

Существует несколько видов измерений. При их классификации обычно исходят из характера зависимости измеряемой величины от времени, вида уравнения измерений, условий, определяющих точность результата измерений, и способов выражения этих результатов.

Существует несколько видов измерений. Они определяются физическим характером измеряемой величины: от времени, вида уравнения измерений, условий, определяющих точность результата измерений, и способов выражения этих результатов, требуемой точностью измерения, необходимой скоростью измерения, условиями и режимом измерений и т.д. Классификация видов измерений приведена на рисунке 1.2. Несмотря на то, что существует множество видов измерений, число их постоянно увеличивается [18].



Рисунок 1.2 – Классификация видов измерений

По условиям измерений различают равноточные и неравноточные измерения. Если измерения какой-либо физической величины выполняются одинаковыми по точности приборами в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью, такие измерения считают равноточными. Измерения, выполненные различающимися по точности приборами и (или) при разных условиях, называют неравноточными. В учебной физической лаборатории, как правило, все измерения являются равноточными. Это связано с фиксированным набором приборов и ограниченным временем выполнения.

В соответствии с РМГ 29-13 [31] (рекомендации по межгосударственной стандартизации ГСИ) по методу измерений различают:

- 1) метод непосредственной оценки, при котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора;
- 2) метод сравнения с мерой, где измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Например, измерение массы на рычажных весах с уравниванием гирей;

3) метод дополнения, если значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению;

4) дифференциальный метод характеризуется измерением разности между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. Если разность между измеряемой величиной и мерой сводится к нулю, то такой метод измерений называется нулевым;

5) метод замещения – метод сравнения с мерой, в которой измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой;

б) нестандартизованные методы измерения. К ним можно отнести метод противопоставления (при котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения), а также метод совпадений (где разность между сравниваемыми величинами измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов).

По способу получения результатов измерений их разделяют на прямые, совокупные, косвенные и совместные [11].

Обработка прямых многократных производится в случаях, когда средними квадратическими отклонениями погрешностей нельзя пренебречь по сравнению с не исключенными остатками систематических погрешностей. Обработка производится по методике ГОСТ 8.736-11 «ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения» [6]. Необходимость выполнения прямых многократных измерений устанавливаются в конкретных методиках измерения.

Для производственных процессов характерны однократные измерения. За результат прямого однократного измерения принимается полученная величина. При определении доверительных границ погрешности результата измерения доверительная вероятность принимается равной 0,95. Методика обработки прямых результатов прямых однократных измерений приведена в рекомендациях

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

МИ 1552-86 «ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей результатов измерений» [12].

Совокупные измерения – это измерения, при которых значения измеряемых величин определяют по результатам повторных измерений одной или нескольких одноименных величин при различных сочетаниях мер или этих величин. Значение искомой величины определяют решением системы уравнений, составляемых по результатам нескольких прямых измерений. Примером совокупных измерений является определение массы отдельных гирь набора, то есть проведение калибровки по известной массе одной из них и по результатам прямых измерений и сравнения масс различных сочетаний гирь [17].

При косвенных измерениях искомое значение величины находят расчетом на основе изменения других величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью:

$$A = f(a_1, \dots, a_n). \quad (1.3)$$

Результатом косвенного измерения является оценка величины A , которую находят при подстановке в формулу (1) оценок аргументов a_i . Поскольку каждый из аргументов a_i измеряется с некоторой погрешностью, то задача оценивания погрешности результата сводится к суммированию погрешностей измерения аргументов. Методика обработки результатов косвенных измерений приведена в документе МИ 2083-90 «ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание погрешностей» [12].

Для оценки погрешностей существенно разделить косвенных измерений на линейные и нелинейные.

Линейная функциональная зависимость является простейшей формой связи между измеряемой величиной и находимыми посредством прямых измерений аргументами. Корреляция между погрешностями измерений аргументов отсутствует.

Для обработки результатов измерений при нелинейных зависимостях между аргументами и некоррелированных погрешностях используется метод линеаризации. Он состоит в том, что нелинейная функция, связывающая измеряемую величину с аргументами, разлагается в ряд Тейлора.

Совместные измерения – это измерения, производимые одновременно двух или нескольких разноименных величин для нахождения функциональной зависимости между ними. Примерами совместных измерений являются определение длины стержня в зависимости от его температуры или зависимости электрического сопротивления проводника от давления и температуры.

1.2 Исследования в области измерительного эксперимента

Получение необходимой измерительной информации с минимальными или ограниченными материальными и временными затратами требует внимательного подхода к подготовке и проведению эксперимента при измерении физических величин, особенно косвенным способом. Особую значимость это приобретает при постановке сложных дорогостоящих экспериментов. В связи с этим при подготовке измерительного эксперимента прежде всего решается вопрос: для чего и как измерять [2].

Так С.А. Слинкин [37] полагает, что низкое качество ремонта и быстрое изнашивание элементов подвижного состава железнодорожного транспорта напрямую связано с измерениями. В настоящее время при измерении диаметров применяются методы и средства измерения, не отвечающие заданным требованиям.

В большинстве применяемых измерительных приборов для контроля геометрических размеров колесных пар в качестве измерительных преобразователей, хранящих единицу длины, применены шкальные преобразователи с ценой деления 1 мм. По существу, все эти приборы являются

измерительными линейками, которые с помощью измерительных наконечников превращены в специальные штангенциркули.

При этом автор считает, что появление современных трехточечных средств измерений с цифровым отсчетом частично решает проблему повышения точности измерений. Принцип действия прибора основан на косвенном методе измерения диаметра по высоте стрелы сегмента на постоянной хорде трехточечным способом. Настройка скобы производится по набору мер. Результат измерения диаметра определяется по калибровочной характеристике и цифровому отсчету. Средство измерения состоит из двух преобразователей: первичного трехточечного роликового преобразователя и вторичного измерительного цифрового преобразователя. Первичный преобразователь преобразует входной сигнал – диаметр круга катания колеса в выходной сигнал – высоту стрелы сегмента колеса, а вторичный преобразователь преобразует высоту в измерительную цифровую информацию об измеренном значении диаметра круга катания колес [37].

Достаточно важной проблемой в современном мире является эксплуатация трубопроводов. Одним из необходимых условий эффективной эксплуатации современных трубопроводов, предназначенных для перекачки нефти, нефтепродуктов, и других жидкостей насосными агрегатами, является знание значений расхода перекачиваемой жидкости через заданные сечения трубопровода в тот или иной момент времени. Значение данных величин позволяет формулировать и решать целый ряд задач, связанных с построением математических моделей и численным моделированием различных технологических процессов и оборудования трубопроводов, а также управления данными процессами и оборудованием в реальном масштабе времени., и решать другие задачи.

Однако чрезмерно высокая стоимость расходомеров перекачиваемых жидкостей не позволяет оснастить реальные трубопроводы достаточным

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

количеством данных приборов. Следствием данной причины является и то, что расходомеры устанавливаются только на определенных участках трубопроводов и на больших расстояниях друг от друга. Такое размещение расходомеров приводит к недостаточности информации о расходах перекачиваемой нефти и нефтепродуктов через различные участки трубопровода.

Разработанная в настоящее время оснащенность насосных агрегатов достаточно надежными, дешевыми и простыми в эксплуатации манометрами и другими датчиками давления, позволяющими с высокой точностью измерять развиваемое ими давление, а также имеющиеся возможности построения мощностных характеристик данных агрегатов, достаточно адекватно описывающих зависимость развиваемого давления от расхода перекачиваемой им жидкости, открывают широкие возможности для практической реализации рассматриваемого в работе метода косвенного измерения расхода жидкости, перекачиваемой насосным агрегатом.

Данный метод может найти применение в современных нефтепроводах и газопроводах, водопроводных системах водоснабжения ЖКХ и другое. Содержательная сущность задачи косвенного измерения расхода перекачиваемой жидкости с использованием напорных характеристик заключается в определении неизвестного численного значения расхода перекачиваемой жидкости, соответствующего измеренному и, таким образом, известному численному значению развиваемого им давления с использованием его напорной характеристики [20].

В технике измерений часто решается задача отдельного определения параметров электрических цепей. Для этих целей используются методы уравнивающего преобразования – мосты переменного тока, и прямого преобразования.

Мосты переменного тока обладают высокой точностью измерения параметров из-за отсутствия методической погрешности после уравнивания. В тоже

время им присущ ряд недостатков, связанных с взаимным влиянием измерительных каналов, сложностью получения точных мер реактивных элементов и длительностью процесса измерения.

Метод прямого преобразования параметров электрических цепей основан на использовании операционных усилителей и сложной формы входного сигнала. Это позволяет по анализу реакции измерительной цепи на входное воздействие получить отдельные значения искомых параметров цепи применением операций дифференцирования, интегрирования, усиления и аналого-цифрового преобразования. Однако данный метод имеет относительно невысокую точность.

Таким образом, предварительно измерив и отсимметрировав значения активных и реактивных составляющих входной проводимости опорного и измерительного каналов измерений и введя в измерительную цепь замещающего комплексного входного сопротивления можно скомпенсировать все составляющие методической погрешности косвенных совокупных измерений. При этом погрешность косвенных совокупных измерений определяется точностью измерений входных параметров используемых средств измерений и соответствует точности мостов переменного тока, но без их недостатков [13].

Сахава А.А. в своей статье описывает применение нового метода получения вебер-амперных характеристик. Электромагнитные механизмы являются одними из основных узлов многих устройств управления и защиты и широко используются в автоматических выключателях и в системах дистанционного привода. При этом они служат для управления электрическими контактами непосредственно или через промежуточные устройства. Такая служебная функция электромагнитного механизма часто незаслуженно ставит его в ряд второстепенных узлов, характеристиками которых не всегда уделяют достаточно внимания. Между тем, эти характеристики существенно влияют на рабочие параметры устройства в целом, на его работоспособность и другие технико-экономические показатели [34].

В последнее время разрабатывается система бессенсорной диагностики и контроля магнитных и механических свойств электромагнитных механизмов с идентификацией их возможных неисправностей. Главное преимущество такой системы заключается в использовании внутренних «сенсорных» свойств электромагнита, когда не требуются подключения дополнительных магнитометрических датчиков, а первичным источником служит собственная обмотка электромагнитного механизма. Таким образом, его вебер-амперная характеристика определяется не в результате прямых измерений магнитного потока, а косвенным образом с применением специальных вычислений.

Аппаратной компонентой системы бессенсорных диагностики электромагнитных механизмов служит автоматизированная измерительная система MagHyst. С ее помощью осуществляется определение вебер-амперной характеристики электромагнитного механизма путем измерения временных зависимостей напряжения, тока и активной составляющей сопротивления обмотки электромагнитного механизма.

Метод косвенного определения вебер-амперных характеристик испытуемых электромагнитных механизмов реализован в программном обеспечении для персонального компьютера, включенного в автоматизированную систему диагностики [25].

П.С. Серенков и Е.Н. Савкова обосновывают необходимость разработки системного подхода к моделированию измерений с целью обеспечения заданного уровня доверия к их результатам. Ими предложена реализация системного подхода в виде линейки моделей: модели процесса измерений и комплексной модели измерительного канала. Последняя в свою очередь имеет двухуровневую структуру, что позволяет упорядочить методы планирования, сбора обработки и анализа измерительной информации и подходы к описанию результата измерений.

Основное преимущество предлагаемого подхода заключается в том, что он на основе принципов системного и процессорного подходов, а также критериев полноты и избыточности обеспечивает доказательную базу для оценки степени доверия к результату измерений [54].

С. Ф. Левин [52] описывает свое исследование, заключающееся в использовании схемы уменьшения для нелинейных моделей при косвенных измерениях. В его работе представлена процедура анализа точности измерительных систем, реализующих метод косвенного измерения.

Канадские ученые С. G. Ball и A.W. Kirkpatrick [44] рассказывают о новом методе измерения внутрибрюшного давления.

Синдром брюшной полости – это состояние серьезной дисфункции органа. Синдром обусловлен устойчивой внутрибрюшной гипертензией, которая косвенно определяется путем измерения внутрибрюшинного давления с использованием различных объемов грунтолки. Этот метод плохо стандартизирован для всех опубликованных данных. Malbrain и Deeren определили огромные риски в связи с большим количеством закапывания. Эта переоценка, по-видимому, увеличивается с увеличением алиментов грунтолки. В результате ошибочные измерения ПБП могут неправильно обозначить пациенту синдромом брюшного отсека и, следовательно, подвергнуть его потенциальным осложнениям хирургических и/или медицинских методов декомпрессии. Поэтому обсуждается полезность и преимущества использования косвенных измерений. Эти данные требуют подтверждения в других подгруппах пациентов с более молодыми возрастами, измененными индексами массы тела и различными диагнозами.

Ученые из университета штата Оклахома призывают использовать косвенные измерения для измерения сухого остатка в жидкости.

Осадки над лесным водоразделом изменяются взаимодействием с поверхностями растений, которые действуют в качестве фильтра для

атмосферных газов и частиц. Это приводит к крупному переносу на лесной пол материалов, захваченных, вымытых и выщелоченных из лесного навеса. В статье собраны и химически проанализированы последовательные образцы водопада и последовательные образцы водопада под лиственными и хвойными деревьями для крупных анионов и катионов. Используя косвенные измерения, получаем простую модель смыва, смешивания, основанную на индексе площади листьев, использовалась для моделирования проходимости химикатов и расчленения лиственных выделений от сухого осаждения. Результаты моделирования дали отличные прогнозы измеренного последовательного осаждения с использованием расчетных значений сухого осаждения. Модель также может использоваться для расчета сухого осаждения, если в качестве входных переменных используются последовательные данные о перепаде и данные о перепаде [49].

Е. Hoseinkani, М. Mehdipour, Н. Schollahi из иранского университета технологий используют косвенные измерения для определения намагниченности синтезированных соосаждений при химических реакциях.

В статье сравниваются магнитные свойства порошка гексаферрита бария, синтезированного методом копреципитации, определяемого теорией рассеяния двух магнитов (косвенным методом измерения) и прямым методом (вибрационно-пробная магнитометрия). Микроструктурные, структурные, потери и магнитные свойства измерялись рентгеновской дифрактометрией, электронной спектроскопией поля-излучения, сетевым анализом и вибрационно-образцовой магнитометрией соответственно. Используя теорию рассеяния двух магнитов и данные о потери отражения, была рассчитана намагниченность насыщения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что намагниченность насыщения, определяемая с помощью теории рассеяния двух магнитов, составляет около 54,75 эму/г, что тесно соответствует экспериментальному значению 55,00 эму/г, полученному с помощью вибрационно-образцовой магнитометрии [48].

З. Ф. Кудряшова и С. Г. Рабинович описывают достоинства и недостатки различных методов обработки данных косвенных измерений [50].

С. К. Савин рассказывает некоторые аспекты повышения точности результата косвенных измерений.

Характерной особенностью современных сложных технических систем (например, электронных аэронавигационных систем) является то, что информационные измерительные каналы, реализующие метод косвенных измерений, являются частью этих систем. Косвенные измерения используются довольно часто при метрологическом обслуживании технических систем. Сложная задача здесь заключается в уменьшении погрешностей в результатах косвенных измерений. В связи с этим, выявление причин возникновения ошибок в косвенных измерениях и повышения их точности является проблемой весьма актуальной. Этот конкретный вопрос рассматривается ниже, где дается оценка погрешностей в измерительных аргументах для случая, когда общая погрешность в косвенных измерениях известна. Для решения этих задач используются известные методы максимальной вероятности и неопределенные множители Лагранжа [58].

В. А. Грановский в своей работе описывает исследование проблемы расчета погрешностей косвенных динамических измерений с использованием линейной модели [47].

Группа итальянских и немецких ученых [55] рассказывает о необходимости косвенных измерений в астрофизических средах.

В последние годы были предприняты большие усилия по изучению обилия легких элементов с помощью косвенных измерений. Определенно их значение тесно связано как с космологией, так и со звездной структурой и эволюцией. На самом деле намеки на первичного нуклеосинтеза можно добиться от Li, Be и B в изначальное содержание. Более того, эти исследования могут стать ценным

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

инструментом для тестирования и понимания внутренней звездной структуры, особенно в том, что касается процессов смешивания в звездных конвертах.

Косвенные измерения необходимы для измерений в конечных полях, что подтверждает статья П. А. Арутюмова [43].

В ней показано, что применение арифметики остаточных классов обладает рядом интересных и полезных свойств для построения алгоритмов измерения и процедур косвенных измерений. Это требует внимания, поскольку определенные измерительные задачи цифровой обработки могут быть решены на качественно новом уровне, особенно в связи с общей тенденцией развития мощных параллельных систем.

Р. А. Лабутиным и М. В. Пугиным [51] предложено решение задачи статистического анализа суммы случайных погрешностей измерений или результата косвенных измерений на основе метода Монте-Карло с использованием алгоритма, генерирующего коррелированные образцы случайных величин с различными распределениями.

В. В. Пицук [54] предложил бесконтактный метод косвенного измерения расстояния между точками отражающей поверхности в оптике.

Предложен метод дистанционного измерения расстояния между фиксированными точками отражающей поверхности. Метод основан на диффузном или зеркальном отражении падающей электромагнитной энергии от поверхности. Описаны системы реализации метода одно-и многолучевого приема отраженных сигналов.

1.3 Применение косвенных измерений на объектах промышленности

Постоянное повышение требований к уровню автоматизации и качеству испытаний технических приборов обусловило поиск новых методов проверки

параметров автоматизации систем управления технологическими процессами. Такие методы должны обладать следующими обязательными качествами:

- обеспечивать полноту и объективность получения информации;
- требовать минимум трудозатрат персонала при проведении исследований;
- максимально сокращать время проведения исследований;
- решать задачу исследований широкого круга объектов.

Инженер конструкторского бюро «Элемент», кандидат технических наук, Ранченко Г.С. [29] считает, что современные требования к метрологическому обеспечению автоматизированных систем управления технологическими процессами испытаний газотурбинных двигателей предполагают проведение экспериментальных исследований, направленных на определение метрологических характеристик измерительных каналов автоматизированных систем управления. Причем, если методика исследований каналов, предназначенных для проведения прямых измерений, подробно изложенная в отраслевом стандарте [27], давно и широко применяется при аттестации автоматизированных систем управления технологическими процессами испытаний газотурбинных двигателей, то отраслевой документ, регламентирующий исследования каналов, обеспечивающих косвенные измерения, на сегодняшний день отсутствует. Оценка погрешностей косвенных измерений при испытаниях газотурбинных двигателей до сих пор проводится преимущественно расчетными методами в соответствии с [21].

Канал, предназначенный для косвенных измерений, представленный на рисунке 1.3, состоит из ряда каналов прямых измерений (далее – измерительных компонентов), результаты которых необходимы для расчета значения искомой величины, и вычислительного компонента, обеспечивающего расчет. Погрешность каждого конкретного результата косвенных измерений определяется погрешностями прямых измерений, видом функции:

$$Y = F (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1.4)$$

и сочетанием значений X_1, X_2, \dots, X_n .

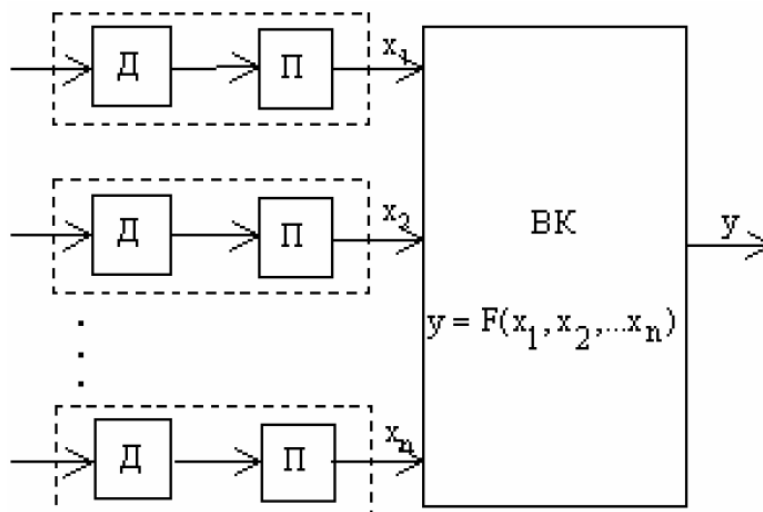


Рисунок 1.3 – Структура измерительного канала для косвенных измерений

Д – датчик;

П – преобразователь сигнала;

ВК – вычислительный компонент.

Данные рекомендации реализованы КБ «Элемент» при создании автоматизированной системы сбора и обработки данных, предназначенной для испытания двигателя ВК-1500, а затем при создании программно-технического комплекса автоматизированной системы управления технологическими процессами испытаний вертолетных двигателей малой размерности, для чего разработана и включена в состав программного обеспечения специальная программа, обеспечивающая проведение эксперимента и обработку результатов косвенных измерений методом приведения [21]. Схема проведения исследований, реализованная в разработанной программе представлена на рисунке 1.4.

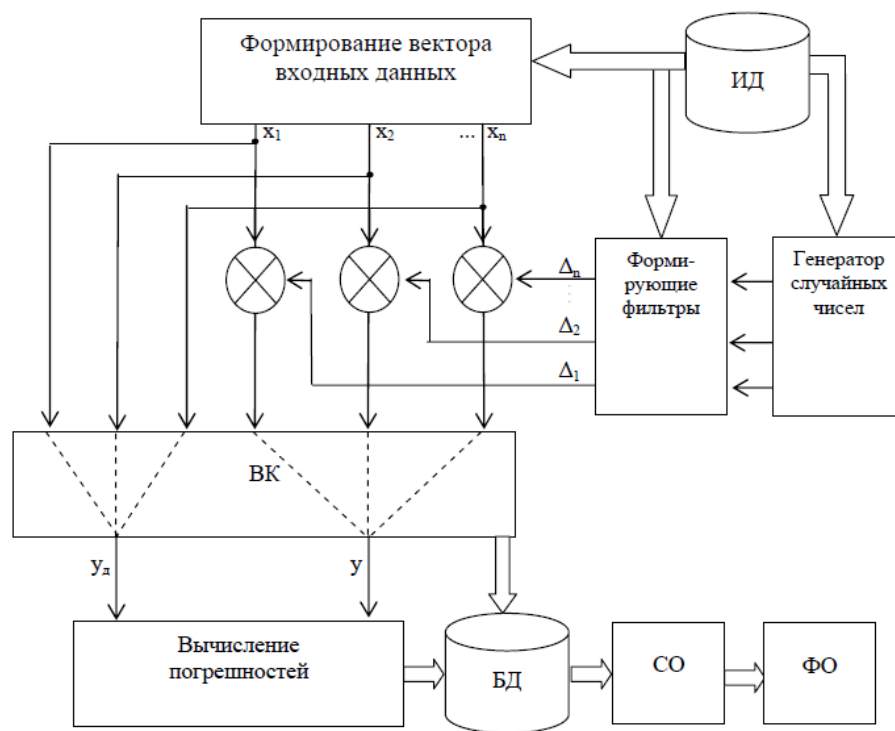


Рисунок 1.4 – Схема проведения исследований

Эксперимент заключается в том, что с помощью генератора случайных чисел в соответствии с исходными данными о диапазонах изменения результатов прямых измерений и характеристиках их погрешностей моделируются наборы значений входных (для вычислительного компонента) величин, реализуемые при испытаниях двигателя. Результаты расчетов, выполненных вычислительным компонентом для каждого набора, есть результаты косвенных измерений, в которых присутствует погрешность, обусловленная погрешностями прямых измерений. Поскольку генератор случайных чисел формирует ряд значений каждой из входных величин вокруг некоторой наперед заданной точки – действительного значения (значения «без погрешности»), то действительное значение результата косвенного измерения для каждой комбинации известно, что позволяет вычислить погрешность каждого из полученных результатов. При достижении заданного объема выборки проводится дальнейшая статистическая

обработка, обусловленная знанием законов распределения и наличием сведений о наиболее вероятных сочетаниях значений входных величин.

Такой учет обеспечен в разработанной программе – последовательность значений погрешности каждого прямого измерения получают от стандартного генератора случайных чисел через специальный фильтр, который формирует заданный в исходных данных каждого измерительного компонента закон распределения.

Результаты исследования показали отсутствие однозначной зависимости между значением результата косвенного измерения и его погрешностью (в то время, как при прямых измерениях такая зависимость всегда определена). Это обстоятельство делает особо актуальной задачу оценки погрешности каждого полученного при проведении косвенных измерений результата с учетом исходного набора данных, поскольку если известен только результат, то, даже зная характеристики канала, далеко не всегда можно сказать, в каких границах лежит погрешность.

Проведенные с помощью разработанной программы исследования подтвердили перспективность как самого метода, так и разработанного КБ «Элемент» специального программного обеспечения для его реализации. Разработанное программное обеспечение позволяет быстро и эффективно провести исследования для любой заданной функции. Дальнейшие перспективы заключаются в совершенствовании программного обеспечения в целях повышения удобства в использовании.

Разработка и опробование специального программного обеспечения является одним из первых шагов на пути внедрения метода определения характеристик погрешности косвенных измерений, выполняемых измерительными каналами автоматизированных систем управления испытаний газотурбинных двигателей, который основан на моделировании электрических сигналов измерительных компонентов, поступающих в вычислительный компонент. После

совершенствования программного обеспечения этот метод безусловно найдет широкое применение в области создания таких автоматизированных систем управления [29].

Г.С. Абрамов в своей статье [1] рассказывает о необходимости косвенных измерений в нефтяной промышленности.

За последние годы было изучено немало методик выполнения измерений групповыми замерными установками, предназначенных для измерения расходных параметров продукции нефтяных скважин. Можно констатировать факт, что в большинстве измерений используется общепринятая модель оценки относительной погрешности вычисления массы нефти при любых методах измерений, основанная на зависимости типа:

$$\delta M_H = \pm 1,1 \sqrt{(\delta M_{см})^2 + (\delta \rho_{см})^2 + \dots + (\delta W)^2} \quad (1.5)$$

Однако, автор считает что выбор такой модели для оценки относительной погрешности не обоснован, так как вычисление массы нефти M_H при любом приборном оснащении измерительных установок есть нечто иное, как реализация косвенного метода измерений, для которых используются другие модели оценок погрешностей измерений.

Обратимся к наиболее встречающейся формуле вычисления массы нефти M_H с помощью массомера, плотномера и влагомера:

$$M_H = M_{см} \left(1 - W \frac{\rho_B}{\rho_{см}}\right), \quad (1.6)$$

где $M_{см}$ – масса смеси;

$\rho_{см}$ – плотность смеси;

W – относительная объемная обводненность смеси;

ρ_B – плотность воды в смеси.

Однако более надежной и более точной для таких сложных нелинейных функциональных зависимостей является методология оценки среднеквадратичных отклонений через частные производные функции по каждому аргументу.

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial a_i}\right)^2 * S^2(\tilde{a}_i)}, \quad (1.7)$$

где $S(\tilde{A})$ - среднеквадратичное отклонение;

$\frac{\partial f}{\partial a_i}$ - частные производные функции;

$S(\tilde{a}_i)$ – среднеквадратичное отклонение каждого метода или средства измерения.

Выполнив набор преобразований, получили следующую формулу среднеквадратического отклонения измерения массы нефти:

$$SM_H = \pm 0,5 \sqrt{(\delta M_{cm})^2 + \left(\frac{\rho_B}{\rho_H} * \frac{W}{1-W}\right)^2 [(\delta W)^2 + (\delta \rho_{cm})^2]} \quad (1.8)$$

На основании этого, автор делает вывод о необходимости внесения изменений в методики измерений в часть характеристик нормируемых погрешностей, то есть заменить «предельные относительные погрешности» на «среднеквадратичное отклонение относительных погрешностей» [1].

Ученые из Тайваня W. L. Peam, Y. C. Chang, Chien-Wei Wu описывают использование бутстреп метода для измерения производительности процесса в аграрном комплексе. Специалисты по качеству широко используют индексы технологических возможностей. Хотя производительность процесса – это наиболее общий критерий, используемый в промышленности для измерения производительности процесса, более продвинутые измерения Tq, называемый показателем качества урожая, был предложен в качестве альтернативы измерения производительности процесса. Выход качества можно рассматривать как классический выход процесса за вычетом ожидаемой относительной потери процесса, в рамках спецификаций, которая фокусируется на удовлетворенности клиентов. Принимая во внимание потери клиентов, преимущество использования меры качества – выхода в качестве производительности процесса заключается в том, что формула может применяться к процессам с произвольными распределениями. К сожалению, статистические свойства расчета Tq математически неразрешимы. Поэтому тестирование возможностей не может

быть выполнено. В данной работе непараметрический, но компьютерно-интенсивный метод под названием бутстреп используется для получения более низкого уровня доверия, связанного с выходом качества для целей тестирования возможностей [53].

L. A. Geddes рассказывает о плюсах и минусах использования прямых и косвенных измерений в медицине, а в частности при измерении кровяного давления [46].

C. Ferregut, S. Nazarian, K. Venalaganti, C. C. Chang, V. Kreinovich из университета штата Техас рассказывают об использовании косвенных измерений при строительстве дорог.

Во многих реальных ситуациях у есть следующая проблема: необходимо знать значение некоторых характеристик, которые трудно измерить непосредственно (например, срок службы тротуара, эффективность двигателя и т.д.). Для оценки, мы должны знать отношения между y и некоторой непосредственно измеренной физической величиной x_1, \dots, x_n . Из этого отношения, мы можем извлечь алгоритм f , что позволяет нам, получить x_i , чтобы рассчитать величину y : $y = F(x_1, \dots, x_n)$. Итак, мы измеряем, применяем алгоритм и получаем желаемую оценку.

Существующие алгоритмы оценки погрешности (интервальная математика, методы Монте-Карло, численное дифференцирование и др.). Для этого требуется время вычисления, которое в несколько раз больше времени, необходимого для вычисления $y = f(x_1, \dots, x_n)$. Таким образом, если алгоритм f уже занимает много времени, оценка ошибок займет слишком много времени.

Во многих случаях этот алгоритм состоит из двух частей: во-первых, мы используем для определения параметров модели, описывающей измеряемый объект, и во-вторых, мы используем эти параметры для оценки. Наиболее трудоемкой части – поиска; это делается путем решения системы нелинейных уравнений; обычно используется метод наименьших квадратов.

Показано, что для такого рода ошибок можно оценить, повторяя эту трудоемкую часть только один раз. Таким образом, мы можем вычислить как фору, так и оценку погрешности, практически не увеличив общее время вычисления. В качестве примера этой методологии мы приводим оценки продолжительности жизни дорожного покрытия [45].

С.Г. Рабинович [56] рассказывает о преимуществах косвенных измерений при измерении сопротивления резистора.

Моисеева Н. П. в своей статье описывает метод определения неопределенность измерения температур косвенным методом [24].

1.4 Методы обработки данных косвенных измерений

1.4.1 Традиционный метод

Для косвенных измерений при нелинейных зависимостях и некоррелированных погрешностях измерений используют традиционный метод обработки данных косвенных измерений. Этот метод основан на том, что погрешность измерения значительно меньше измеряемой величины, и поэтому вблизи средних значений аргументов нелинейная функциональная зависимость линеаризуется и раскладывается в ряд Тейлора. Линеаризуя функцию нескольких случайных аргументов можно получить достаточно простое выражение для вычисления оценок среднего значения и среднеквадратического отклонения функции.

Достоинствами традиционного метода обработки данных косвенных измерений является его универсальность, простота применения и широкая распространенность [21].

Полное описание традиционного метода представлено в последующих разделах работы.

1.4.2 Метод приведения

Метод приведения применяется для определения результатов косвенного измерения и его погрешности. Он предполагает наличие ряда отдельных значений измеряемых аргументов, полученных в результате многократных измерений. Этот метод можно также применять при неизвестных распределениях погрешностей измерений аргументов.

Метод приведения основан на приведении ряда отдельных значений косвенно измеряемой величины к ряду прямых измерений. Получаемые сочетания отдельных результатов измерений аргументов по известной зависимости вычисляют отдельные значения измеряемой величины.

Результат косвенного измерения вычисляют по формуле:

$$\tilde{A} = \sum_{j=1}^L \frac{A_j}{L}, \quad (1.9)$$

где L – число отдельных значений измеряемой величины;

A_j – j -ое отдельное значение измеряемой величины, полученное в результате вычисления по известной зависимости из результатов аргументов.

Среднее квадратическое отклонение случайных погрешностей результата косвенного измерения вычисляют по формуле:

$$S(A) = \sqrt{\sum_{i=1}^L \frac{(A_j - \tilde{A})^2}{L(L-1)}}. \quad (1.10)$$

Доверительные границы случайной погрешности для результата измерения вычисляют по формуле:

$$\Delta = TS(\tilde{A}), \quad (1.11)$$

где T – коэффициент, зависящий от вида распределения отдельных значений измерений величины A и выбранной доверительной вероятности [21].

1.4.3 Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло – это численный метод решения математических задач при помощи моделирования случайных величин. Он используется в различных

областях: математике, физике, биологии, экономике и не только. Датой рождения метода Монте-Карло принято считать 1949 год, когда появилась статья под названием «The Monte Carlo method». Создателями этого метода считают американских математиков Дж. Неймана и С. Улама. В Советском союзе статьи о методе Монте-Карло были опубликованы в 1955-1956 годах.

До появления электронных вычислительных машин этот метод не мог получить широкого применения, так как моделирование случайных величин вручную – долгий и трудоемкий процесс. Таким образом появление метода Монте-Карло как вполне универсального численного метода стало возможным благодаря возникновению и развитию ЭВМ. Само название метода «Монте-Карло» берет свое происхождение от одноименного города Монте-Карло в княжестве Монако, знаменитого своим игорным домом. Суть в том, что один из самых простых механических устройств для получения случайных величин является рулетка.

Метод Монте-Карло имеет две особенности. Первая особенность заключается в простой структуре вычислительного алгоритма. В большинстве случаев составляется программа для осуществления одного случайного испытания. Затем это испытание повторяется N раз, при чем каждый опыт не зависит от всех остальных и результаты всех опытов усредняются. Второй особенностью является ошибкой вычисления: она пропорциональна $\sqrt{\frac{D}{N}}$, где D – некоторая постоянная, а N – число испытаний. Из формулы видно, что для того, чтобы уменьшить ошибку в 10 раз (получить в ответе еще один точный десятичный знак), необходимо увеличить N в 100 раз. Добиться высокой точности по такому пути невозможно, поэтому метод Монте-Карло эффективен при решении задач, в которых результат нежен с небольшой точностью: 5-10%.

Однако одну и ту же задачу можно решать различными вариантами метода Монте-Карло, которым отвечают различные значения постоянной D . Во многих

задачах удастся значительно увеличить точность, выбрав способ расчета, которому соответствует наименьшее значение постоянной D.

Во-вторых, для многих математических задач, не связанных с какими-либо случайностями, можно искусственно придумать одну или несколько вероятностных моделей, позволяющих решать данную задачу[12].

Суть метода состоит в генерации случайных чисел с требуемым законом распределения и вычислении того или иного результата, зависящего от значений случайной величины. Пусть требуется вычислить некоторое значение a . Для его вычисления вводят такую случайную величину X , чтобы ее математическое ожидание было:

$$MX=a. \quad (1.12)$$

Далее вводится некоторое количество испытаний, в результате которых рассчитываются значения этой случайной величины и в качестве оценки неизвестной берется среднее арифметическое значений x_i . Это трактуется следующим образом: из генеральной совокупности с генеральным средним a делается выборка из объектов и неизвестное значение a оценивается как выборочное среднее. Если генеральная совокупность имеет нормальное распределение, то на основании интервальных оценок мы можем определить доверительный интервал, который показывает неизвестное a с вероятностью γ :

$$P(|\bar{x} - a| < \delta) = \gamma. \quad (1.13)$$

Если среднее квадратическое отклонение σ нормального распределения генеральной совокупности известно то доверительный интервал:

$$\delta = \frac{t\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1.14)$$

где t – аргумент функции Лапласа в уравнении:

$$\Phi(t) = \frac{\gamma}{2}. \quad (1.15)$$

В случае, когда σ неизвестно, то в качестве него берут «исправленное» выборочное среднее квадратическое отклонение и доверительный интервал вычисляется по (2.17), но только величина t определяется из распределения

Стьюдента. Если закон генеральной совокупности имеет вид отличный от нормального, то при достаточно большой выборке: объемом более 30 – можно пользоваться указанными формулами, причем различие между ними становится несущественным.

Для разрывания случайной величины используют компьютерные генераторы случайных чисел. Строго говоря, они не являются генераторами истинно случайных чисел, поскольку через некоторой, пускай и достаточно большой период, они будут повторяться. Поэтому иногда говорят о псевдослучайных числах. Если розыгрышей проводится меньше, чем период повторения, как чаще всего и бывает, то эти числа практически неотличимы от случайных и в дальнейшем мы будем говорить о них как о случайных числах. Обычно генератор выдает случайные числа ξ с равномерным распределением в диапазоне от 0 до 1. Если требуется другой диапазон, то делают линейное преобразование:

$$x = a\xi + b. \quad (1.16)$$

Эти случайные числа имеют так же равномерное распределение, но уже в диапазоне от b до $a+b$. Выбирая постоянные a и b , можем получить любой диапазон изменения значений случайной величины.

Для моделирования дискретной случайной величины с законом распределения, отличным от равномерного ($x_i \rightarrow p_i$), поступают следующим образом: диапазон $[0, 1)$ разбивают на примыкающие друг к другу участки длиной p_i ($\sum_i p_i = 1$), и если генератор случайных чисел выдает число в i -м диапазоне, то случайной величине X присваивают значение x_i . В частности, для моделирования случайной величины имеющей вероятность успеха p и вероятность неудачи $q = 1 - p$, диапазон $[0, 1)$ нужно разбить на два участка $(0, p)$ и $(p, 1)$ с длинами p и q соответственно. Если генератор случайных чисел выдаст число в 1 диапазоне, то это моделируется как удача, если число из 2 диапазона, то как неудача. Если требуется смоделировать непрерывную случайную величину с функцией распределения $F(x)$, исходя из равномерно распределенной

последовательности случайных чисел в диапазоне $[0, 1)$, то это делают на основании следующей теоремы.

Теорема. Если ξ случайные числа из диапазона $[0, 1)$ с равномерным распределением, то значения непрерывной случайной величины x с функцией распределения $F(x)$ могут быть получены как решения уравнения $F(x) = \xi$.

Доказательство. Функция распределения непрерывной случайной величины это монотонно возрастающая от 0 до 1 функция. Поэтому, используя обозначение F^{-1} для обратной функции, можем записать решение:

$$x = F^{-1}(\xi), \quad (1.17)$$

причем в силу монотонности функции это решение – единственное. Покажем, что значения случайной величины X , определяемые таким образом, будут соответствовать функции распределения $F(x)$. Если случайная величина – $c < X < d$, то в силу монотонного возрастания $F(x)$ случайная величина

$$\xi = F(X) \quad (1.18)$$

удовлетворяет неравенству

$$F(c) < \xi < F(d). \quad (1.19)$$

Отсюда имеем, что:

$$P(c < X < d) = F(d) - F(c). \quad (1.20)$$

Так как ξ имеет равномерное распределение в диапазоне от 0 до 1, то

$$P(F(c) < \xi < F(d)) = F(d) - F(c), \quad (1.21)$$

а, значит (1.21) означает, что случайная величина X имеет функцию распределения $F(x)$. Теорема доказана.

Таким образом, для получения случайной величины с функцией распределения $F(x)$ достаточно посчитать значения (1.26), где ξ — случайные числа из диапазона $(0, 1)$ с равномерным распределением, выдаваемые компьютером.

Отдельно рассмотрим разыгрывание нормально распределенной случайной величины. В случае равномерного распределения в диапазоне от 0 до 1 математическое ожидание:

$$M\xi = \int_0^1 \xi * 1d\xi = \frac{1}{2}, \quad (1.22)$$

дисперсия:

$$D\xi = M\xi^2 - (M\xi)^2 = \int_0^1 \xi^2 d\xi - (\int_0^1 \xi d\xi)^2 = \frac{1}{12}. \quad (1.23)$$

Составим сумму независимых, равномерно распределенных на $[0, 1)$ случайных величин $\sum_{i=1}^n \xi_i$. Используя свойства математического ожидания и дисперсии, легко получить, что математическое ожидание суммы равно $\frac{1}{2}$, а дисперсия суммы равна $\frac{1}{12}$.

Введем в рассмотрение случайную величину:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\xi_i - \frac{1}{2})}{\sqrt{\frac{n}{12}}}, \quad (1.24)$$

которая имеет нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию. В силу центральной предельной теоремы при $n \rightarrow \infty$ распределение этой случайной величины будет стремиться к нормальному с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Взяв n порядка 10 и более, будем иметь распределение близкое к нормальному. Если требуется получить нормальное распределение с математическим ожиданием a и среднеквадратичным отклонением σ , то в качестве случайной величины берут

$$y_i = \sigma x_i + a. \quad (1.25)$$

Легко проверить, что распределение случайной величины Y действительно будет нормальным с математическим ожиданием a и среднеквадратичным отклонением σ [32].

Недостатками этого метода является влияние недостоверных исходных данных (оценок входных величин и их погрешностей, а также предполагаемых видов закона распределения) [14].

1.4.4 Бутстреп метод

При анализе эмпирических данных недостаточно получить точечную выборочную оценку параметра числовой случайной величины. Необходимо изучить его статистические свойства, в первую очередь распределение статистической оценки, что является основой для построения доверительных интервалов и тестирования статистических гипотез. Классическая теория обработки данных основывается на асимптотическом методе и использует то или иное стандартное предельное распределение выборочных параметров. Современной альтернативой асимптотическому методу является моделирование эмпирического распределения данных с использованием методов генерации повторных выборок.

Понятие «повторные выборки» отличается от обычного представления, применяемого в методах выборочного анализа. В том случае если нет возможности получения истинных повторностей наблюдений, разработаны методы, которые формируют так называемые «псевдовыборки» и на их основе можно получить необходимые характеристики искомого параметра: оценки математического ожидания, дисперсии, доверительного интервала. Методы «численного ресамплинга» или, иными словами, «методы генерации повторных выборок» объединяют три разных подхода, отличающихся по алгоритму, но близких по сути: рандомизация, бутстреп и метод «складного ножа».

Идеи численного ресамплинга не являются новыми и берут свое происхождение в 1935 году. Практическое применение этих выборок связано с вынужденным ожиданием, поскольку не было разработано достаточно быстрых компьютеров для этого.

Bootstrap процедура или «бутстреп» была предложена известным американским статистиком профессором Стэнфордского университета Б. Эфроном. В 1977 году в своей статье «Бутстреп-методы: новый взгляд на методы складного ножа» описал алгоритм выбора с возвращением, в котором формально

сохраняются неизменными степени свободы на каждом этапе обработки данных. Он предложил строить новые выборки, моделируя выборки из эмпирического распределения, или иными словами взять конечную совокупность из n элементов исходной выборки и с помощью датчика случайных чисел сформировать из нее любое число изложенных выборок. Процедура хотя и не реальна без ЭВМ, но проста с точки зрения программирования.

Применение рандомизационного теста оправдано, если ставится задача оценить степень упорядоченности структуры данных или взаимосвязи между отдельными ее фрагментами. При подсчете же обычной выборочной статистики порядок следования элементов выборки не имеет значения и каждая итерация рандомизации будет возвращать одну и ту же величину, поскольку сами по себе данные не изменяются. В этом заключается фундаментальное различие между рандомизацией и бутстрепом: если рандомизация формирует распределение тестовой статистики при справедливости H_0 , то бутстреп используется для получения наиболее корректной оценки параметров распределения случайной величины.

Пусть дана выборка x_1, x_2, \dots, x_n и предполагается, что это – набор независимых и одинаково распределенных реализаций случайной величины, извлеченных из генеральной совокупности X . Задача заключается в изучении свойств некоторой статистики $f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$, которую мы трактуем как выборочную оценку произвольного параметра $\hat{\theta}$ распределения X . Обычно мы имеем некоторый сдвиг $b = E(\theta - \hat{\theta})$ вычисленного значения параметра $\hat{\theta}$ относительно его истинной величины θ , который вызывается многими причинами. Во-первых, выборочные значения имеют погрешность измерений, во-вторых, нет особенных гарантий, что выборка состоит из независимых и случайных значений, и, наконец, при оценке параметра мы обычно задаемся какими-то предположениями о законе распределения X .

Например, в случае нормального распределения X оценкой меры положения случайной величины является арифметическое среднее, а несмещенной оценкой дисперсии σ^2 – квадрат стандартного отклонения S^2 . Однако так ли это на самом деле и справедливо ли наше предположение? Один из способов проверить вычисления заключается в том, чтобы извлекать из нашей генеральной совокупности все новые и новые повторные выборки, пересчитывать на этой основе оценки параметров и анализировать дрейф $\hat{\theta}$. Но нет ли иного более экономного способа, позволяющего обойтись без дополнительных измерений?

Метод «складного ножа» первого порядка состоит в том, чтобы из одной выборки сделать n новых, исключая каждый раз по одному наблюдению. Для каждой из сгенерированных выборок объемом $(n - 1)$ можно рассчитать псевдозначение интересующей нас статистики:

$$\hat{\theta}_{n-1,k} = f_{n-1}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_{n-1}, x_n). \quad (1.26)$$

Среднее из всех возможных псевдозначений дает нам оценку S-1 «складного ножа» первого порядка $\hat{\theta}_{-1}$, а разность $(\theta - \hat{\theta})$ определяет полное смещение первоначальной выборочной оценки $\hat{\theta}$, т. е. отражает возможное искажение оценки параметра, если, например, наше распределение X не слишком «похоже» на гауссиану.

Основная идея бутстрепа по Б. Эфрону состоит в том, что методом статистических испытаний Монте-Карло многократно извлекать повторные выборки из эмпирического распределения. А именно, берется конечная совокупность из n элементов исходной выборки $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, \dots, x_{n-1}, x_n$ и из нее на каждом шаге итерации «замены с возвращением» с помощью датчика случайных чисел формируется любое, сколь угодно большое число размноженных выборок. Например, при $n = 8$ одна из наших псевдовыборок могла бы иметь вид $x_4, x_2, x_8, x_2, x_1, x_2, x_4, x_5$, т.е. отдельные элементы могут повторяться. Как и в случае «складного ножа», в результате легкой модификации частотного распределения реализаций исходных данных можно ожидать, что

каждая следующая бутстреп-выборка будет возвращать значение параметра, немного отличающееся от вычисленного для первоначальной выборки. Образующийся разброс показателя дает возможность построения доверительных интервалов анализируемой статистики.

И так, в основе бутстреповского подхода лежит действительно очень простая идея, что истинное распределение статистик можно получить эмпирически, не опираясь ни на какие предварительные предположения. Возможность гибкой настройки и использование идей самоорганизации выгодно отличает бутстреп от метода «складного ножа» с его плоским и менее интенсивным вычислительным подходом, а существование самостоятельных выборочных процессов для разных уровней воздействия внешних факторов делает бутстреп менее зависимым от выборочных эффектов.

Трудности начинаются, когда мы практически столкнемся с тонкостями отдельных ситуаций, чтобы качественно устранить сдвиг и/или скомпенсировать неустойчивость конкретного параметра. Например, есть много способов развития идеи размножения выборок, внеся в переборную стохастичку некоторое зерно детерминизма. Можно, например, по исходной выборке построить эмпирическую функцию распределения, а затем тем или иным образом от кусочно-постоянной функции перейти к непрерывной функции распределения, например, соединив точки $[x(i); i/n]$, $i = 1, 2, \dots, n$, отрезками прямых. Другой вариант построения размноженных выборок - к исходным данным добавляются малые независимые одинаково распределенные погрешности.

Существует несколько различных методов, чтобы скомпенсировать сдвиг единственного параметра. Самым простым является метод процентилей. Предположим, что имеется выборка из 20 элементов с выборочным средним, равным 15. Сгенерируем из эмпирических данных 1000 псевдовыборок, используя алгоритм замены с возвращением, вычислим для каждой из них оценку математического ожидания и восстановим функцию распределения выборочного

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

среднего. В методе процентилей в качестве границ 95% доверительного интервала среднего будут приняты считанные с гистограммы 25-ое (0.025×1000) и 975-ое (0.975×1000) значения статистических величин, полученных в ходе имитации.

Метод процентилей кажется разумными, но фактически мы находим здесь доверительные интервалы выборочных реализаций среднего, а не доверительные интервалы для искомого параметра. Иными словами, если эти границы окажутся равными 11 и 19, мы можем сделать заключение, что среднее из любой комбинации наших эмпирических данных с вероятностью 95% укладывается в пределах между 11 и 19, тогда как мы собирались оценить уверенность относительно значения параметра m .

Эта оговорка не составляет серьезной проблемы для оценки математического ожидания, поскольку для разумных эмпирических выборок распределение этого параметра приблизительно симметрично. Однако предположим для общности рассуждений, что распределение выборочного среднего, полученное бутстреппингом, имеет отчетливую асимметрию:

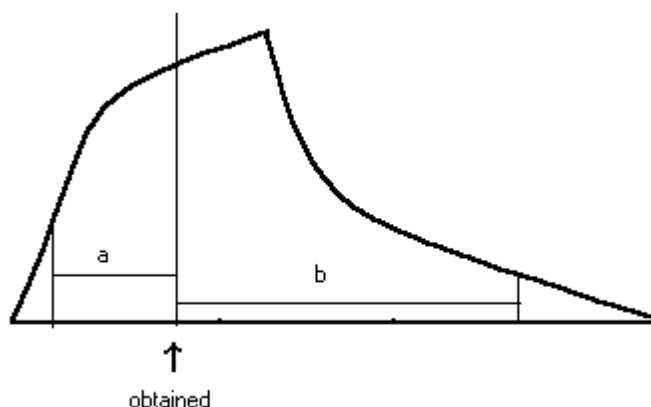


Рисунок 1.5 – Пример распределения выборочного среднего

Здесь a представляет собой расстояние от меры положения, за которую мы принимаем среднее для оригинальной выборки, до нижней 2,5-ой процентили, и b – аналогичное расстояние до верхней 97,5-ой процентили, причем $a < b$.

Если использовать среднее X как анализируемую статистику, её доверительные пределы будут от $X - (0,975\%-е значение X)$ до $X + (X - 0.025\%-е значение)$. Иными словами, при заданной доверительной вероятности оценка параметра будет статистически значима в пределах от $(X - b)$ до $(X + a)$, тогда как с использованием метода процентилей эти границы вычисляются с точностью до наоборот, т.е. от $(X - a)$ до $(X + b)$. Еще раз отметим, что для симметрично распределенных параметров $a = b$ и эта проблема не имеет практического значения, однако в иных случаях на нее следует обратить самое пристальное внимание.

Сконцентрируемся на классическом понятии доверительных интервалов относительно оцениваемого параметра m математического ожидания. При использовании параметрических методов выборочные оценки стандартных доверительных границ могут быть найдены как:

$$CI_{\alpha/2} = \bar{X} \pm t_{\alpha/2} S_{\bar{X}}, \quad (1.27)$$

т.е. пределы симметричны ($a = b$) и вычисляются как произведение критического значения t -критерия на стандартную ошибку среднего. Заметим, что Госсет первоначально получил t -распределение при условии, что анализируемая выборка распределена нормально, поэтому истинные доверительные границы могут иметь некоторый сдвиг, пропорциональный тому, насколько конкретная эмпирическая выборка отклоняется от этого предположения.

Попробуем скомпенсировать этот сдвиг, отказавшись от предположения о нормальности эмпирического ряда, и скорректировать критические значения $ta/2$. Выполним B итераций бутстрепа, вычисляя для каждой i -й сгенерированной псевдовыборки значения среднего \bar{X}_i^* и стандартного отклонения S^* . На основе этих статистических данных мы можем вычислить бутстреппированные значения:

$$t_i^* = \frac{(\bar{X}_i^* - \bar{X})}{S_{\bar{X}}^*} \quad (1.28)$$

и восстановить функцию распределения t^* , не использующую предположения о нормальности. Нам теперь остается только найти по гистограмме характерные

значения t^* для 97.5 % и 2.5 %-х вероятностей и заменить ими критическую величину $t_{\alpha/2}$ в традиционной формуле. Мы получаем доверительные границы:

$$CI_{\alpha/2} = \bar{X} + t_{0,975}S_{\bar{X}} \text{ и } \bar{X} + t_{0,025}S_{\bar{X}}. \quad (1.29)$$

Заметим, что мы поменяли местами 2.5 и 97.5-ые процентиля t^* по той же причине, по которой это сделал Лунненборг.

Надо сказать, что приведен не самый лучший вариант решения по компенсации сдвига. Эфрон 20 лет посвятил этой проблеме и разработал процедуру bias correction and acceleration (BCA) коррекции доверительных границ, которая учитывает различные выбросы, дрейф стандартной ошибки среднего и другие факторы. Процедура слишком громоздка, чтобы обсуждать ее здесь, но ясно представлена в одном из самых полных учебных пособий по бутстрепу. Завершим рассуждения конкретным примером.

К. Маккойли с использованием нейробихавиорального теста когнитивной способности оценила значение ментального статуса у 123 пожилых людей в возрасте от 60 до 95 лет. Распределение характеризуется сильной асимметрией, поскольку некоторая часть обследованных пациентов серьезно потеряла способность к логическому мышлению.

Маккойли проводила оценку доверительного интервала для медианы, но мы используем этот пример, чтобы сформировать 95%-ые доверительные интервалы для среднего. Найденные бутстреппированные граничные значения симметричны относительно оценки математического ожидания: нижняя граница 8.65 на 0.489 единиц меньше среднего, а верхняя граница 9.60 превысила его на 0.465 единиц. Можно также увидеть, что бутстреп-распределение оценок среднего приблизительно нормально, а его стандартное отклонение равно 0.241.

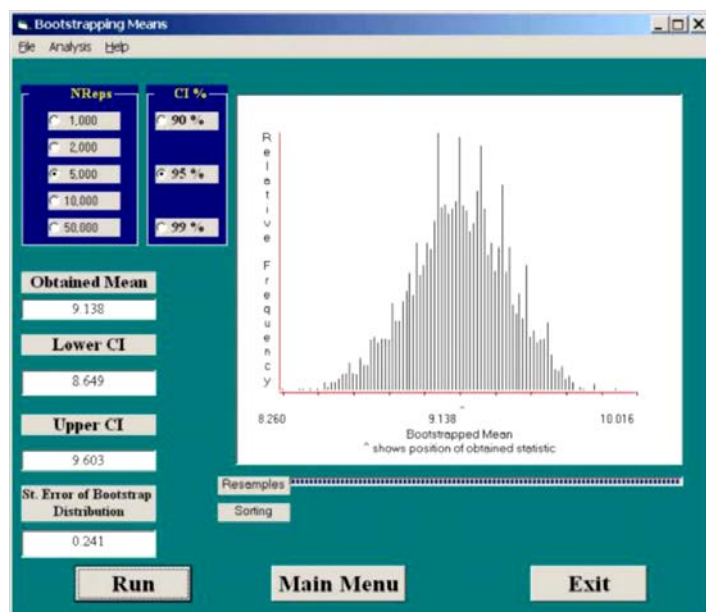


Рисунок 1.6– Пример работы программы Resampling

Если игнорировать тот факт, что распределение измеренных данных имеет сильную отрицательную асимметрию, то использование параметрических формул дает результаты, весьма близкие к полученным бутстрепом: стандартную ошибку 0.247 и 95%-ые доверительный интервал от 8.65 до 9.63. Приходится признать, что, если мы имеем относительно большие выборки, нормальная асимптотика работает даже тогда, когда распределение эмпирического ряда заметно отличается от гауссового[41].

Метод очень прост, дает надежные оценки параметров виртуальных наблюдений измеряемой величины и возможность построить функцию их распределения [14].

1.4.5 Метод перебора

Суть метода перебора заключается в получении всех возможных значений измеряемой величины y_i , получаемых при переборе всех значений входных величин, подставляемых в уравнение измерения (15). Количество получаемых

таким образом значений y_i определяется как произведение всех количеств значений аргументов:

$$N = \prod_{i=1}^m n_i. \quad (1.30)$$

По полученному массиву измеряемой величины можно получить результат измерения (формула 16), а его стандартное отклонение:

$$S(y) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (1.31)$$

и его погрешность.

Метод перебора дает несмещенную оценку измеряемой величины. Метод не нуждается в предположениях о форме распределений данных измерений аргументов или в построении этих распределений, не используется распределение Тейлора, он опирается исключительно на имеющиеся экспериментальные данные и использует всю содержащуюся в них информацию. Метод перебора сводит к минимум неточность оценивания дисперсии построенного распределения из-за ограниченного числа измерений аргументов. Поэтому погрешность результата измерения, которую дает этот метод, соответствует заданной вероятности и является надежной [14].

1.4.6 Метод трансформации

Алгоритм метода трансформации состоит в следующем. Все входные величины в уравнении измерения, за исключением одной, заменяются их средними значениями. Затем в это уравнение подставляют последовательно все наблюдения, полученные при измерении входной величины, которая не была заменена. Каждое наблюдение дает одно значение измеряемой величины. Таким образом получаем столько реализаций измеряемой величины (n_j), сколько было наблюдений при измерении этой j -ой величины:

$$y_i = f(x_{1i}, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m). \quad (1.32)$$

Затем переменной делают другую входную величину и для нее тем же путем получают другую группу реализаций измеряемой величины. В итоге получается столько групп, сколько входных величин имеет уравнение измерения. Все они объединяются в одну группу, число членов которой равно:

$$N = \sum_{j=1}^m n_j. \quad (1.33)$$

Полученная группа данных обрабатывается как группа наблюдений при прямых измерениях.

Между группами реализаций измеряемой величины имеется некоторая зависимость. Эта зависимость возникает из-за того, что наблюдения при измерении одного аргумента используются для построения двух групп, одной – как среднее этих наблюдений, а в другой – как переменная величина. Однако среднее значение остается постоянным для всей группы, а возможные изменения этого среднего в случае повторных измерений учитываются оценкой его неточности. Тем самым устраняется влияние его неточности.

Достоинство метода трансформации состоит в том, что он при объединении групп позволяет избежать применение в разложения в ряд Тейлора и связанных с ним неточностей [14].

Выводы по главе

Задача обработки данных косвенных измерений является актуальной, поскольку проведение измерений не используя косвенные измерения порой просто невозможна.

Косвенные измерения широко распространены в тех случаях, когда искомую величину невозможно или слишком сложно измерить непосредственно, или когда прямое измерение дает менее точный результат. Роль их особенно велика при измерении величин, недоступных непосредственному экспериментальному сравнению, например размеров астрономического или внутриатомного порядка.

Известны различные методы обработки данных косвенных измерений:

- 1) традиционный;
- 2) модификация традиционного метода;
- 3) метод приведения;
- 4) метод Монте-Карло;
- 5) метод трансформации;
- 6) метод перебора;
- 7) бутстреп метод.

2 ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

2.1 Резонансный метод измерения

Резонансный метод основан на измерении параметров колебательного контура, составленного из рабочего (образцового) элемента и исследуемой цепи. В качестве образцового элемента обычно используют конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком, обладающий высокой стабильностью, малыми потерями и низким температурным коэффициентом емкости (ТКЕ). Градуировка рабочего конденсатора выполняется с высокой точностью: от этого зависит погрешность метода. Настраивая контур в резонанс и измеряя его добротность, далее по экспериментальным опытным данным рассчитывают параметры исследуемой цепи.

Достоинством резонансного метода является то, что он позволяет производить измерения в широком диапазоне частот (от долей до сотен мегагерц). Важная особенность метода – возможность определить действующие значения параметров, т. е. фактические значения сопротивления, индуктивности или емкости на зажимах исследуемой цепи с учетом паразитных составляющих ее эквивалентной схемы. Кроме того, по результатам измерений на нескольких частотах можно определить паразитные параметры измеряемых элементов – собственную (межвитковую) емкость катушки, собственную индуктивность конденсатора.

Наиболее простым резонансным методом измерения ёмкости конденсатора является метод, основанный на измерении резонансной частоты измерительного контура, состоящий из образцовой катушки индуктивности и измеряемого конденсатора.

Резонансный метод измерения параметров сосредоточенных элементов реализуется в измерителях добротности – куметрах. Упрощенная структурная схема прибора, представленная на рисунке 1, содержит диапазонный генератор

гармонических колебаний, колебательный контур, состоящий из рабочего конденсатора – C_0 , и измеряемой цепи, а также электронный вольтметр, по показаниям которого фиксируют момент настройки в резонанс колебательного контура и определяют его добротность Q . В комплект прибора входит набор образцовых (рабочих) катушек индуктивности, используемых, в основном, при измерении емкости методом замещения. На каждой катушке указан диапазон частот, в пределах которого возможен резонанс для рабочего конденсатора.

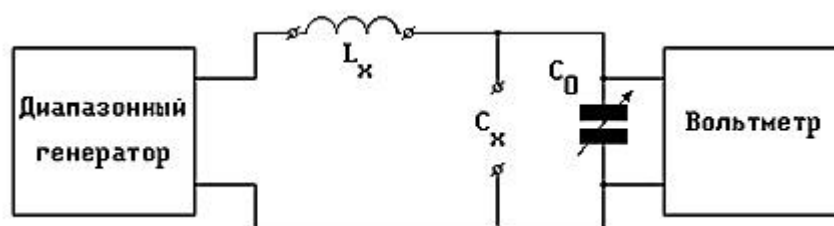


Рисунок 2.1 – Структурная схема метода резонанса

Принцип измерения методом резонанса основан на известном свойстве последовательного колебательного контура – при резонансе амплитуда напряжения на емкости в Q раз превышает амплитуду напряжения на входе цепи. Измеряемый элемент подключают либо к клеммам L_x , последовательно с рабочим конденсатором куметра, либо к клеммам C_x . В последнем случае к клеммам L_x должна быть подключена рабочая катушка индуктивности, соответствующая частоте измерения).

Основными источниками погрешностей при измерении параметров сосредоточенных элементов электрических цепей резонансным методом являются следующие:

- 1) погрешность установки частоты диапазонного генератора и нестабильность амплитуды генерируемого им колебания, которая ведет к неточности расчета индуктивностей и активных сопротивлений;
- 2) погрешность установки значения рабочей емкости;

3) погрешность настройки контура в резонанс, которая зависит от добротности контура и приводит к неточности определения резонансного значения рабочей емкости;

4) погрешности округления при обработке результатов косвенных измерений.

Следует заметить, что данный метод измерения относится к виду косвенных измерений. Поэтому погрешность измерения сложным образом зависит от всех вышеперечисленных составляющих и определяется видом схемы измерения.

При измерении электрической емкости C_x возможны два варианта применения метода. Для малых значений емкости, когда на рабочей частоте f выполняется условие

$$\frac{1}{(2\pi f)^2 L_{\max}} < C_x < \frac{1}{(2\pi f)^2 L_{\min}}, \quad (2.1)$$

где L_{\max} и L_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения индуктивности катушки, исследуемый конденсатор включают в измерительную схему параллельно. После этого настраивают контур в резонанс (момент настройки определяется по максимуму показаний вольтметра) и фиксируют резонансное значение емкости рабочего конденсатора C_1 . Действующее значение емкости рассчитывается по выражению:

$$C_x = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_1}. \quad (2.2)$$

Если же емкость велика и

$$C_x > \frac{1}{(2\pi f)^2 L_{\min}}, \quad (2.3)$$

то параллельно измеряемой катушке L_x подключают образцовую катушку L_0 из рабочего комплекта прибора. В этом случае измерение осуществляют в два этапа. Сначала в измерительную схему включают только образцовую катушку,

настраивают контур в резонанс и фиксируют резонансное значение рабочей емкости C_1 . Затем параллельно подключают измеряемую индуктивность, повторяют настройку контура и фиксируют новое резонансное значение рабочей емкости C_2 . Значение измеряемой индуктивности:

$$C_x = \frac{1}{(2\pi f)^2(L_2 - L_1)}. \quad (2.4)$$

При измерении относительно малых значений емкости C_x исследуемый конденсатор включают в измерительную схему к клеммам C_x параллельно рабочему конденсатору.

При измерении активного сопротивления R резонансным методом фиксируют изменение добротности, вызванное включением в него исследуемого резистора. Искомое значение затем находится расчетным путем.

Резонансный метод позволяет определить паразитные параметры сосредоточенных элементов электрических цепей, такие, как собственную (межвитковую) емкость катушки и ее добротность, собственную индуктивность и тангенс угла потерь конденсатора, а также собственную емкость (или индуктивность) резистора. Наличие этих параметров и их значения обусловлены особенностями конструкций конкретных элементов; их присутствие приводит к появлению частотных зависимостей параметров элементов.

Наличие сложной эквивалентной схемы у реальных компонентов приводит к тому, что резонансным способом измеряют действующие значения на рабочей частоте. Действующие значения индуктивности (емкости) определяются из условия равенства реактивных сопротивлений (проводимостей) реального элемента и идеальной индуктивности (емкости) на частоте измерения. Для резисторов действующее значение вводят, исходя из равенства активных составляющих сопротивления реального и идеального элементов. Значения паразитных реактивностей катушки и конденсатора находятся по результатам

измерений действующих значений их индуктивностей (емкостей) на двух частотах [30].

2.2 Оборудование экспериментального стенда

В состав оборудования экспериментального стенда входили следующие наименования:

1) Генератор SFG 71003

GW Instek SFG-71003 представляет собой универсальное настольное устройство, оснащенное цифровым однострочным дисплеем, поворотными переключателями, удобным кнопочным интерфейсом и специальными разъемами. SFG-71003 разработан специально для применения в различных отраслях промышленности, науки и техники. Чаще всего применяется в различных учебных учреждениях (для изучения таких наук, как физика, радиотехника и т.п.), среди радиолюбителей, а также простых любителей процессов разборки и сборки различных электронных приборов и устройств.

SFG-71003 - это функциональный генератор для получения выходных сигналов следующих форм: синусоидальный, прямоугольный, треугольный, меандровый.



Рисунок 2.2 – Генератор Instek SFG-71003

В таблице 2.1 представлены метрологические характеристики генератора.

Таблица 2.1 – Метрологические характеристики генератора

Параметры	Значения
Частотный диапазон	0,1 Гц... 3 МГц
Разрешение по частоте	0,1 Гц
Погрешность установки	$\pm(20 \cdot 10^{-6})$
Амплитуда	>10 Впик (на 50 Ом)
Выходное сопротивление	50 Ом $\pm 10\%$
Аттенюатор	40 дБ ± 1 дБ
Постоянное смещение	± 5 В (на 50 Ом)
Ассиметрия формы	0,25...0,75 для частот менее 1 МГц

2) Вольтметр APPA 303



Рисунок 2.3 – Мультиметр Appra 303

В таблице 2.2 представлены метрологические характеристики используемого вольтметра.

Таблица 2.2 – Метрологические характеристики вольтметра

Параметр	Значение
Разрядность цифровой шкалы измерения	5 или 4 разряда
Максимально индицируемое число	40000 или 4000
Базовая погрешность	$\pm 0,1 \%$
Скорость измерения по линейной шкале	20 изм./с

3) Нормированная катушка индуктивности для лабораторных работ типа Р536



Рисунок 2.4 – Катушка индуктивности Р536

В таблице 2.3 приведены метрологические характеристики катушки индуктивности Р536.

Таблица 2.3 – метрологические характеристики катушки Р536

Параметр	Значение
Максимальный ток	3 А
L1	0,0021 Гн

Продолжение таблицы 2.3

R1	0,51 Ом
L2	0,0022 Гн
R2	0,52 Ом

4) Магазин емкости P5025

Модель P5025 используется в качестве меры или элементов измерительных цепей переменного тока с частотой в пределах от 40 Гц до 60 Гц. Он может быть использован только в сухих закрытых помещениях, при температуре от +10 до 35 градусов Цельсия и относительной влажности до 80% при 25 градусов.



Рисунок 2.5 – Магазин емкости P5025

В таблице 2.4 представлены метрологические характеристики магазина емкости P5025.

Таблица 2.4 – Метрологические характеристики магазина емкости

Параметр	Значение
Максимальная емкость	111,0001 мкФ

Продолжение таблицы 2.4

Число декад	6
Класс точности	0,1 (для декад 0,0001 – 0,011; 0,001 – 0,009; 0,01 – 0,09 и 0,1 – 0,9 мкФ)
	0,5 (для 1 – 10; 10 – 100 мкФ)

5) Магазин сопротивлений Р33

Магазин сопротивления измерительный Р-33 применяется в качестве многозначной меры сопротивления в цепях постоянного тока и дает возможность получать сопротивления от 0,1 до 99999,9 Ом.

Метрологические характеристики магазина сопротивлений Р33 представлены в таблице 2.5.



Рисунок 2.6 – Магазин сопротивлений Р33

Таблица 2.5 – Метрологические характеристики магазина сопротивлений

Параметр	Значение
Класс точности	$0,2/6 \cdot 10^{-6}$

Продолжение таблицы 2.5

Предел допускаемой основной погрешности	$\delta = \pm[0,2 + 6 * 10^{-6} \left(\frac{R_K}{R} - 1\right)]$
Номинальная мощность на одну ступень: - при сопротивлении от 1 до 10^4 Ом - при сопротивлении 0,1 Ом	0,25 W 0,1 W
Максимальная мощность на одну ступень: - при сопротивлении от 1 до 10^4 Ом - при сопротивлении 0,1 Ом	0,5 W 1 W
Максимальное значение сопротивления R_K , Ом	99999,9

2.3 Планирование измерительного эксперимента

Под планированием эксперимента понимается определение цели каждого эксперимента, число серий и измерений в каждой серии, достижение оптимума соотношения экономии материалов и адекватности проведенных измерений. Однако мало спланировать – необходимо еще так провести эксперимент и оформить его результаты, чтобы они могли быть адекватно восприняты другими исследователями и могли в случае необходимости подтвердить приоритет исследователя.

Целью проведения эксперимента является накопления данных аргумента косвенных измерений для их дальнейшей обработки различными методами и проведения сравнительного анализа методов обработки косвенных измерений.

При планировании эксперимента необходимо помнить, что каждое измерение – это затраты времени и ресурсов (трудовых, материальных, финансовых). В определении числа измерений надо учитывать следующие аспекты:

1) возможность пренебрежения коэффициентом Стьюдента в вычислении погрешностей измерений. Согласно таблице №2 [42], это можно сделать при более чем 7–10 измерениях при уровне доверительной вероятности $\alpha=0,68$ (который используется по умолчанию), и при более чем 15–20 измерениях при уровне доверительной вероятности $\alpha=0,95$;

2) окончательный результат многократного измерения содержит в себе как случайную, так и приборную погрешности. Поскольку случайная погрешность уменьшается с увеличением количества измерений как $\frac{1}{\sqrt{n}}$, а приборная остается постоянной, целесообразно сделать столько измерений, чтобы

$$(\Delta x)_{\text{случ}} \ll \theta, \quad (2.5)$$

то есть чтобы случайной погрешностью можно было пренебречь по сравнению с приборной погрешностью θ .

Поскольку $\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{случ}})^2 + (\sigma_{\text{прибор}})^2}$, можно установить, что мы можем пренебречь первым слагаемым, если $\Delta x_{\text{случ}} < \frac{\sigma_{\text{прибор}}}{k}$ (часто полагают $k=2$), для чего необходимо провести N измерений. Пусть уже проведено n измерений, и получена погрешность измерений σ_n (число измерений таково, что мы пренебрегли коэффициентом Стьюдента). Погрешность отдельного измерения можно оценить как

$$\sigma = \sigma_n \sqrt{n}. \quad (2.6)$$

Поскольку $\sigma_N = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$, $\sigma_N \leq \frac{\sigma_{\text{прибор}}}{k}$, то

$$N \geq 4n \frac{\sigma_n^2}{\sigma_{\text{прибор}}^2} \quad (2.7)$$

3) Для минимизации числа измерений используется последовательный анализ, т.е. такой способ статистической проверки гипотез, при котором необходимое число наблюдений не фиксируется заранее, а определяется в процессе самой проверки. Во многих случаях для получения столь же обоснованных выводов применение надлежащим образом подобранного способа последовательного

анализа позволяет ограничиться значительно меньшим числом наблюдений (в среднем, т.к. число наблюдений при последовательном анализе есть величина случайная), чем при способах, в которых число наблюдений фиксировано заранее [42].

Для записи результатов большого количества однотипных измерений удобно использовать таблицы. С их помощью удастся избежать ненужной многократной записи обозначения измеряемой величины, единиц измерения, используемых масштабных коэффициентов и т.п. В таблицы, помимо экспериментальных данных, могут быть сведены промежуточные результаты обработки этих данных.

2.4 Методика выполнения измерений

1. Область применения

Настоящий документ устанавливает методику выполнения измерений (МВИ) емкости с помощью измерительного комплекта, из узлов:

- диапазонного генератора сигнала типа Instek SFG-71003 (далее – генератор);
- магазина электрической емкости типа P5025;
- катушки индуктивности типа P536;
- магазина сопротивлений типа P33;
- электронного вольтметра типа APPA-303;
- соединительных линий.

Положения документа распространяются на измерение емкости резонансным методом измерительными комплектами как отечественного, так и зарубежного производства, изготовленными с требованиями настоящего документа.

Настоящий документ дополняет ГОСТ 8.563-2009 [5] тем, что рассматривает практическое применение резонансного метода.

2. Нормативные документы

В настоящем документе использованы ссылки на следующие стандарты:

РМГ 29–2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

ГОСТ Р 8.736–2011 ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения

МИ 2091–90 ГСИ. Измерения физических величин. Общие требования

МИ 2083–90 ГСИ. Измерения косвенные. Определения результатов измерений и оценивание их погрешностей

ГОСТ 8.395–80 ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования

ГОСТ Р 8.563-2009 ГСИ. Методики (методы) измерений [50]

ГОСТ Р ИСО 5479. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения [8]

3. Термины и определения

Методика измерений: Совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности.

Средство измерений: Техническое средство, предназначенное для измерений и имеющее нормированные (установленные) метрологические характеристики.

Электрическая емкость: Характеристика проводника, мера его способности накапливать электрический заряд.

Резонанс: Явление, при котором амплитуда вынужденных колебаний имеет максимум при некотором значении частоты вынуждающей силы.

Результат измерения: множество значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной информацией с указанием соответствующего показателя точности.

Точность результата измерения: Близость измеренного значения к истинному значению измеряемой величины.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

Показатель точности измерения: Установленная характеристика точности любого результата измерений, полученного при соблюдении требований и правил данной методики измерений.

Погрешность результата измерения: Разность между измеренным значением величины и опорным значением величины.

Неопределенность измерений: Неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации.

Условия проведения измерений: Совокупность влияющих величин, описывающих состояние окружающей среды и средства измерений.

4. Обозначения и сокращения

Основные условные обозначения параметров приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Условные обозначения параметров

Условное обозначение	Наименование параметра	Единица физической величины
L_n	Индуктивность	Гн
C	Электрическая емкость	Ф
R_n	Электрическое сопротивление	Ом
V	Вольтметр	В
G	Генератор	–
f	Частота	Гц

Индексы, входящие в условные обозначения параметров, относят к величинам, характеризующим эти параметры.

Следующие индексы относятся к обозначениям:

n – нормированный;

ср – среднее значение контролируемого параметра;

min – минимальное значение контролируемого параметра;
 max – максимальное значение контролируемого параметра.

5. Условия проведения измерений

Условия проведения измерений должны соответствовать основным положениям разделов 1,5,6 и 7 ГОСТ 8.563-2009 [5].

Климатические условия эксплуатации средств измерений должны соответствовать условиям их применения, установленными изготовителями этих средств (см. таблицу 2.7).

Таблица 2.7 – Климатические условия эксплуатации средств измерений

Средство измерения	Условия
Генератор Instek SFG-71003	Температура окружающего воздуха: +10...+35°C; относительная влажность: 80%
Мультиметр APPA-303	Температура окружающего воздуха: 0...+40 °C; относительная влажность: 80%
Магазин емкости P5025	Температура окружающего воздуха: +10...+35°C; относительная влажность: 80%
Катушка индуктивности P536	Температура окружающего воздуха: +10...+35°C; относительная влажность: 80%
Магазин сопротивлений P33	Температура окружающего воздуха: +10...+30°C; относительная влажность: 25%...80%

Диапазоны измерений применяемых средств измерений должны соответствовать диапазонам измерений контролируемых параметров (см. таблицу 2.8).

Таблица 2.8 – Диапазоны применяемых средств измерений

Средство измерения	Диапазоны
Генератор Instek SFG-71003	0,1 Гц ... 3 МГц
Мультиметр APPA-303	1 мкВ ... 1000 В
Магазин емкости P5025	0,0001 мкФ ... 111,0001 мкФ
Катушка индуктивности P536	0,0021 Гн ... 0,0022 Гн
Магазин сопротивлений P33	0,01 Ом ... 99999,9 Ом

Погрешность средств измерений (см. таблицу 2.9) контролируемых параметров выбирают с учетом обеспечения необходимой точности измерительного комплекта.

Таблица 2.9 – Погрешность средств измерений

Средство измерения	Погрешность
Генератор Instek SFG-71003	$\pm(20 \cdot 10^{-6})$ Гц
Мультиметр APPA-303	$\pm 0,1\%$
Магазин емкости P5025	$\delta = \pm 0,1(1 + 0,0032/C)$, где C – числовое значение емкости
Магазин сопротивлений P33	$\delta = \pm [0,2 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot (R_k/R - 1)]$, где R_k – наибольшее значение сопротивления магазина, Ом; R – номинальное значение сопротивления магазина, Ом

Характеристики энергоснабжения средств измерений в условиях эксплуатации должны соответствовать характеристикам, установленным изготовителями этих средств.

Средства измерения применяют только при положительных результатах поверки, которые оформляют свидетельством о поверке и (или) клеймением.

Средства измерений следует также применять в соответствии с требованиями технической документации по эксплуатации и безопасности их применения.

6. Метод измерения

Принцип метода измерения изложен в описании резонансного метода измерения.

Резонансный метод основан на измерении параметров колебательного контура, составленного из рабочего (образцового) элемента и исследуемой цепи. В качестве образцового элемента обычно используют конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком, обладающий высокой стабильностью, малыми потерями и низким температурным коэффициентом емкости (ТКЕ). Градуировка рабочего конденсатора выполняется с высокой точностью: от этого зависит погрешность метода. Настраивая контур в резонанс и измеряя его добротность, далее по экспериментальным опытным данным рассчитывают параметры исследуемой цепи.

Основными источниками погрешностей при измерении параметров сосредоточенных элементов электрических цепей резонансным методом являются следующие:

1. погрешность установки частоты диапазонного генератора и нестабильность амплитуды генерируемого им колебания, которая ведет к неточности расчета индуктивностей и активных сопротивлений;
2. погрешность установки значения рабочей емкости;
3. погрешность настройки контура в резонанс, которая зависит от добротности контура и приводит к неточности определения резонансного значения рабочей емкости;
4. погрешности округления при обработке результатов косвенных измерений.

Допустим, при измерении емкости C возможны два варианта применения метода. Для малых значений индуктивности, когда на рабочей частоте f выполняется условие

$$\frac{1}{(2\pi f)^2 L_{\max}} < C < \frac{1}{(2\pi f)^2 L_{\min}}, \quad (2.8)$$

где L_{\max} и L_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения индуктивности катушки, исследуемую катушку включают в измерительную схему последовательно. После этого настраивают контур в резонанс (момент настройки определяется по максимуму показаний вольтметра) и фиксируют резонансное значение индуктивности. Действующее значение индуктивности рассчитывается по выражению:

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L}. \quad (2.9)$$

Если же емкость велика и

$$C > \frac{1}{(2\pi f)^2 L_{\min}}, \quad (2.10)$$

то параллельно измеряемой катушке L_x подключают образцовую катушку L_0 из рабочего комплекта прибора. В этом случае измерение осуществляют в два этапа. Сначала в измерительную схему включают только образцовую катушку, настраивают контур в резонанс и фиксируют резонансное значение рабочей емкости C_1 . Затем параллельно подключают измеряемую индуктивность, повторяют настройку контура и фиксируют новое резонансное значение рабочей емкости C_2 . Значение измеряемой индуктивности:

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 (L_2 - L_1)}. \quad (2.11)$$

При измерении относительно малых значений емкости C_x исследуемый конденсатор включают в измерительную схему к клеммам C_x параллельно рабочему конденсатору.

При измерении активного сопротивления R резонансным методом фиксируют изменение добротности, вызванное включением в него исследуемого резистора. Искомое значение затем находится расчетным путем.

7. Применяемые средства измерения

В состав измерительного комплекта входят основные узлы, перечисленные в разделе 1.

Перечень узлов определяют исходя из условий эксплуатации измерительного комплекта и технико-экономической целесообразности.

В состав электрического комплекта входят:

- генератор сигнала;
- катушка индуктивности;
- магазин электрической емкости;
- магазин сопротивлений;
- электрический вольтметр.

Генератор сигналов функционирует в полном соответствии со своим названием: генерирует сигналы, используемые в качестве воздействующих сигналов в ходе измерений параметров электронных устройств. Большинству схем требуется входной сигнал с изменяющейся во времени амплитудой. Такой сигнал может быть истинным биполярным сигналом переменного тока (пиковые значения которого попеременно поднимаются выше или опускаются ниже нулевого уровня), или он может колебаться относительно некоторого уровня постоянного напряжения (положительного или отрицательного). Форма сигнала может представлять собой синусоиду или другую периодическую функцию,

цифровой импульс, двоичную последовательность или полностью произвольную форму. Генератор сигналов может создавать «идеальные» сигналы или добавлять к сигналу известные искажения (или ошибки) нужной величины и типа. Эта возможность является одним из главных достоинств генератора сигналов, поскольку часто невозможно создать предсказуемые искажения в нужном месте и в нужное время с помощью самой исследуемой схемы. Реакция исследуемого устройства на эти искажения демонстрирует его способность работать в неблагоприятных условиях, выходящих за пределы нормального режима.

Катушка индуктивности является пассивным компонентом электронных схем, основное предназначение которой является сохранение энергии в виде магнитного поля. Свойство катушки индуктивности чем-то схоже с конденсатором, который хранит энергию в виде электрического поля.

Катушка индуктивности представляет собой обмотку из проводящего материала, как правило, медной проволоки, намотанной вокруг либо железосодержащего сердечника, либо вообще без сердечника.

Индуктивности широко используются в аналоговых схемах и схемах обработки сигналов. Они в сочетании с конденсаторами и другими радиокомпонентами образуют специальные схемы, которые могут усилить или отфильтровать сигналы определенной частоты.

Катушки индуктивности получили широкое применение начиная от больших катушек индуктивности, таких как дроссели в источниках питания, которые в сочетании с конденсаторами фильтра устраняют остаточные помехи и другие колебания на выходе источника питания, и до столь малых индуктивностей, которые располагаются внутри интегральных микросхем.

Две (или более) катушки индуктивности, которые соединены единым магнитным потоком, образуют трансформатор, являющимся основным компонентом схем работающих с электрической сетью электроснабжения. Эффективность трансформатора возрастает с увеличением частоты напряжения.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		76

Магазины емкости декадные предназначены для применения в качестве многозначных мер электрической емкости. Принцип действия магазинов основан на ручном управлении встроенным набором высокоточных и высокостабильных емкостей.

Магазин сопротивлений – это набор точных сопротивлений (резисторов) для калибровки каких либо устройств или приборов. Магазин применяется в лабораторной и цеховой практике, когда требуется менять или регулировать в измерительных схемах сопротивление с высокой точностью. Меры конструктивно объединяются в общем корпусе, на лицевой стороне которого смонтировано переключающее устройство или наборное поле для соединения мер в требуемых сочетаниях.

Вольтметр – это прибор, назначение которого измерять электродвижущую силу (ЕДС) на определенном участке электрической цепи, или проще – прибор для измерения напряжения (разность электрических потенциалов). Этот прибор всегда подключается параллельно элементу питания или нагрузке. Измеренное значение вольтметр показывает в Вольтах.

8. Подготовка к измерениям и их проведение

Перед измерениями проверяют:

- соответствие оборудования для проведения измерений в соответствии с техническим заданием;
- техническую исправность оборудования измерительного комплекта;
- правильность монтажа оборудования электрического комплекта;
- соответствие условиям проведения измерений требованиям в разделе 5.

По результатам проверки и в соответствии с требованиями к обеспечению необходимой точности измерений определяют условно-постоянные параметры, а по ним и различные постоянные коэффициенты.

После проверки все средства измерений приводят в рабочее состояние и измеряют действительные значения параметров, определяют количество измерений.

При обнаружении несоответствия измерений с требованиями принимают меры, направленные на исправление этого несоответствия.

9. Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений происходит несколькими этапами:

– проверка закона распределения полученной выборки результатов измерения в соответствии с приложением Б ГОСТ 8.736–2011 или ГОСТ Р ИСО 5479-2002;

– исключение грубой погрешности из полученной выборки по критерию Граббса в соответствии с пунктом №6 ГОСТ 8.736–2011;

– проверка выборки на постоянно возрастающую или постоянно убывающую систематическую погрешность по критерию Аббе в соответствии с приложением 2 МИ 2091–90;

– нахождение результата измерения аргумента косвенного измерения в соответствии с пунктами 7-10 ГОСТ 8.736-2011;

– нахождение результата косвенного измерения выбранным методом.

2.5 Получение экспериментальных данных измерения аргумента косвенного измерения

На данном этапе выполнения выпускной квалификационной работы магистра был проведен эксперимент для получения выборки результатов наблюдений, был проведен эксперимент.

Для измерения электрической емкости был выбран метод резонанса, в соответствии с которым номинальные значения C измерялось по схеме, представленной на рисунке 2.7, по формуле резонанса:

$$\omega^2 LC = 1; \quad (2.12)$$

$$(2\pi f)^2 LC = 1; \quad (2.13)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L}, \quad (2.14)$$

где L – значение индуктивности;

f – значение частоты.

путем прямых измерений аргументов – частоты в цепи переменного тока.

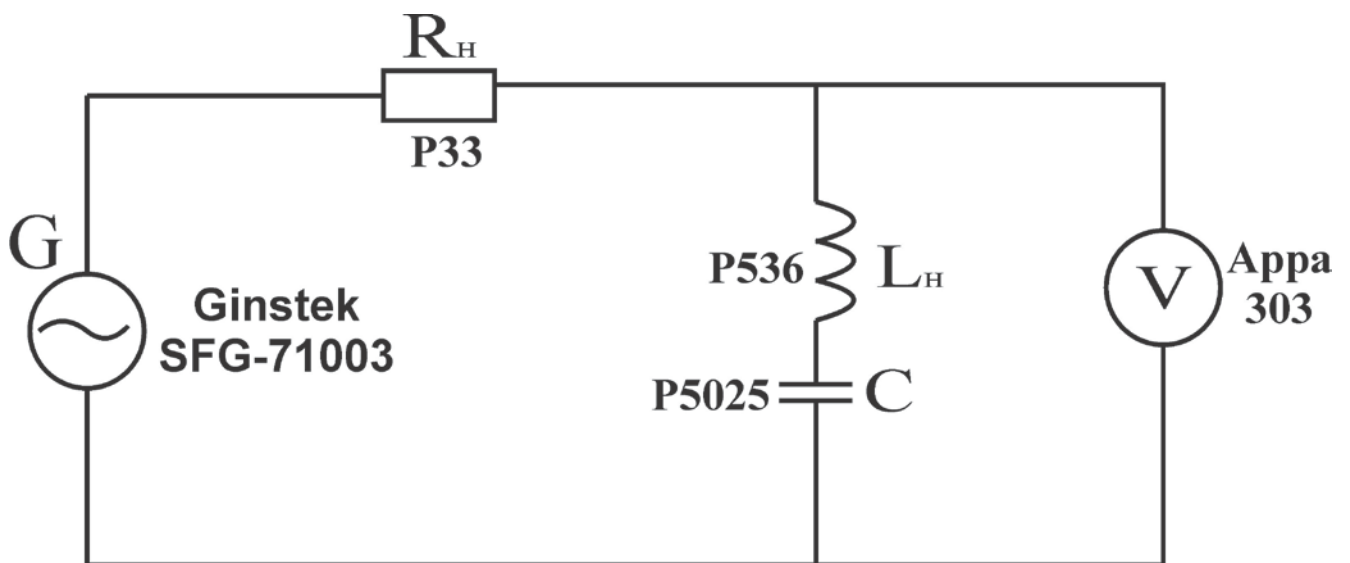


Рисунок 2.7 – Схема измерения



Рисунок 2.8 – Лабораторный стенд

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Номинальное значение индуктивности: $L=0,0022$ Гн.

Номинальное значение емкости: $C=2500$ пФ

Определим количество измерений для дальнейшей обработки данных [42].

Определим количество измерений, необходимое для дальнейшей обработки данных по МИ 2091-90 [22].

Число измерений n определяется значимостью случайных погрешностей по сравнению с пределом допускаемой погрешности предполагаемого результата:

$$n \geq \frac{t^2(q,n) \cdot S^2}{\Delta_p^2}, \quad (2.15)$$

где $t(q,n)$ – коэффициент Стьюдента, $t(0,95, 30)=2,042$;

S – среднее квадратическое отклонение группы результатов, $S=2,729$ Гц.

Таким образом

$$\Delta_p = \sqrt{\frac{t^2(q,n) \cdot S^2}{n}} = \sqrt{\frac{2,042^2 \cdot 2,729^2}{30}} = 1,017 \text{ Гц}. \quad (2.16)$$

Относительная погрешность вычисляется:

$$\delta = \frac{\Delta_p}{\bar{f}} * 100\%, \quad (2.17)$$

где \bar{f} – среднее значение частоты, $\bar{f}=67968$ Гц.

$$\delta = \frac{1,017}{67968} * 100\% = 0,0014\%$$

В результате измерения аргумента – частоты, получили следующую выборку из $n=30$ измерений.

Таблица 2.10 – Выборка аргумента косвенного измерения

№ измерения	f, Гц
1	67970,00
2	67990,00
3	67970,00
4	67970,00
5	67980,00
6	67970,00
7	67980,00
8	67970,00
9	67990,00

Продолжение таблицы 2.10

10	67950,00
11	67940,00
12	67970,00
13	67970,00
14	67970,00
15	67960,00
16	67980,00
17	67950,00
18	67980,00
19	67960,00
20	67970,00
21	67960,00
22	67980,00
23	67980,00
24	67950,00
25	67990,00
26	67970,00
27	67940,00
28	67980,00
29	67950,00
30	67960,00

2.6 Нахождение результата измерения аргумента

Обработка результат измерения аргумента выполняем в соответствии с требованиями ГОСТ 8.736-11 [6].

Среднее арифметическое результатов измерения аргумента \bar{f} :

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i = 67968 \text{ Гц} \quad . \quad (2.18)$$

Среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов наблюдения:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}{n-1}} = 14,9482 \text{ Гц.} \quad (2.19)$$

СКО среднего арифметического (результата измерения аргумента):

$$S_{\bar{f}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = 2,729 \text{ Гц.} \quad (2.20)$$

Проверка гипотезы о виде закона распределения результатов измерений при числе результатов измерений от 15 до 50 – Составной критерий [6].

H0: Результаты измерения распределены не по нормальному закону распределения

H1: Результаты измерения распределены по нормальному закону распределения

Критерий 1.

Найдем критическую статистику:

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |f_i - \bar{f}|}{nS^*}, \quad (2.21)$$

где S^* – смещенное СКО:

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}{n}} = 14,697 \text{ Гц} \quad (2.22)$$

$$\tilde{d} = 0,8165$$

Для уровня значимости $P_{\text{дов}}=0,95$ найдем квантиль распределения:

$$d_{1-q/2} = 0,7404$$

$$d_{1/2} = 0,8625$$

Составим неравенство: результаты измерений в ряду считают распределенными нормально, если:

$$d_{1-q/2} < \tilde{d} < d_{1/2}, \quad (2.23)$$

где $d_{1-q/2}$, $d_{1/2}$ – квантили распределения ($P_{\text{дов}}=0,95$).

$$0,7404 < 0,8165 < 0,8625$$

Сделаем вывод: неравенство верно, отвергаем гипотезу H0, принимаем H1: результаты измерения распределены по нормальному закону распределения.

Критерий 2.

Считают, что результаты измерений принадлежат нормальному распределению, если не более m разностей $(f_i - \bar{f})$ превысили значение $Z_{p/2}S$.

Таблица 2.11 – Сравнительная таблица

$f_i - \bar{f}$	знак	$Z_{p/2}S$
2,0	<	34,8293
22,0	<	
2,0	<	
2,0	<	
12,0	<	
2,0	<	
12,0	<	
28,0	<	
2,0	<	
2,0	<	
2,0	<	
8,0	<	
12,0	<	
18,0	<	
8,0	<	
12,0	<	
12,0	<	
18,0	<	
22,0	<	
2,0	<	
28,0	<	
12,0	<	
18,0	<	
22,0	<	
12,0	<	

Продолжение таблицы 2.11

2,0	<	34,8293
28,0	<	
12,0	<	
18,0	<	
8,0	<	

Критическая статистика: $m=0$.

Квантиль распределения ($P_{\text{дов}}=0,95$): $m'=2$.

Составим неравенство: $m \leq m'$; $0 \leq 2$.

Вывод: Отвергаем гипотезу H_0 , принимаем H_1 .

Проверка гипотезы о виде закона распределения результатов измерений при числе результатов измерений от 15 до 50 – Критерий Шапиро-Уилка [8].

H_0 : Результаты измерения распределены не по нормальному закону распределения

H_1 : Результаты измерения распределены по нормальному закону распределения

Найдем критическую статистику:

$$W = \frac{S^2}{nm_2}, \quad (2.24)$$

где S – промежуточная сумма:

$$S = \sum a_k [f_{(n+1-k)} - f_k], \quad (2.25)$$

где k – индекс, имеющий значения от 1 до $n/2$ или от 1 до $(n-1)/2$ при четном и нечетном n соответственно; a_k – коэффициент, имеющий специальное значение для выборки объемом n ;

$$S = 76,545 \text{ Гц}$$

nm_2 – произведение объема на выборочный центральный момент второго порядка:

$$nm_2 = \sum (f_i - \bar{f})^2. \quad (2.26)$$

$nm_2=6480\text{Гц}$

$W=0,904$

Квантиль распределения ($P_{\text{дов}}=0,95$): $W_{\text{кр}}=0,927$.

Составим неравенство: результаты измерений считают распределенными нормально, если:

$$W < W_{\text{кр}}. \quad (2.27)$$

$$0,904 < 0,927.$$

Сделаем вывод: неравенство верно, отвергаем гипотезу H_0 , принимаем H_1 : результаты измерения распределены по нормальному закону распределения.

Обнаружим (исключим) грубые погрешности.

Для исключения грубых погрешностей используют критерий Граббса [6]. Статистический критерий Граббса исключения грубых погрешностей основан на предположении о том, что группа результатов измерений принадлежит нормальному распределению.

Основная гипотеза – H_0 : наибольший f_{max} и наименьший f_{min} результат измерений вызван грубыми погрешностями.

Альтернативная гипотеза – H_1 : наибольший f_{max} и наименьший f_{min} результат измерений не содержит грубой погрешности.

Расчет критической статистики.

$$G_1 = \frac{|f_{\text{max}} - \bar{f}|}{s} \text{ и } G_2 = \frac{|\bar{f} - f_{\text{min}}|}{s}, \quad (2.28)$$

где G_1, G_2 – критическая статистика

Из выборки найдем: $f_{\text{max}} = 67990,0000 \text{Гц}$; $f_{\text{min}} = 67940,0000 \text{Гц}$.

Найдем критическую статистику: $G_1 = 1,4718$; $G_2 = 1,8731$.

Зададим уровень доверительной вероятности (уровень значимости): $P_{\text{дов}}=0,95$.

Найдем квантиль распределения: $G_T(P_{\text{дов}}=0,95) = 2,908$.

Составим неравенство: сравним G_1 и G_2 с теоретическим значением G_T критерия Граббса.

Если $G_1 > G_T$, то f_{\max} исключают как маловероятное значение.

$$1,4718 < 2,908$$

Если $G_2 > G_T$, то f_{\min} исключают как маловероятное значение.

$$1,8731 < 2,733$$

Сделаем выводы: неравенства неверны, следовательно принимаем гипотезу H_1 , отвергаем гипотезу H_0 . Наибольший f_{\max} и наименьший f_{\min} результат измерений не содержит грубой погрешности.

Проверка на тренды с помощью критерия Аббе [22].

Основная гипотеза – H_0 : Группа результатов содержит постоянно возрастающую или постоянно убывающую систематическую погрешность.

Альтернативная гипотеза – H_1 : Группа результатов не содержит постоянно возрастающую или постоянно убывающую систематическую погрешность.

Группа результатов измерения содержит постоянно возрастающую или постоянно убывающую систематическую погрешность, если выполняется неравенство:

$$\frac{S_d^2}{S^2} < v_T(q, n), \quad (2.29)$$

где S_d – СКО группы результатов измерений, вычисленное по формуле:

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (f_{i+1} - f_i)^2}. \quad (2.30)$$

v_T – квантиль распределения, соответствующий уровню значимости q и n числу измерений n в группе.

$$S_d = 17,1705 \text{ Гц.}$$

$$\text{Критическая статистика: } \frac{S_d^2}{S^2} = 1,3194.$$

$$\text{Квантиль распределения: } v_T = 0,71.$$

$$\text{Составим неравенство: } 1,3194 > 0,71$$

Таким образом отвергаем гипотезу H_0 , принимаем гипотезу H_1 : Группа результатов не содержит постоянно возрастающую или постоянно убывающую систематическую погрешность.

Нахождение результата измерения аргумента косвенного измерения [21].

Доверительные границы случайной погрешности оценки измеряемой величины

$$\varepsilon = tS_{\bar{f}} = 5,5811, \text{ Гц} \quad (2.31)$$

где $t(p, f_{\text{эф}}) = t(0,95; 30) = 2,045$ – коэффициент Стьюдента.

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности.

Границу НСП оценки измеряемой величины при наличии более или равном трем НСП ($m > 3$) оценивают по формуле:

$$\theta_{\Sigma} = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2}, \quad (2.32)$$

$\theta_1 = 0,002 \%$ – погрешность генератора сигналов;

$\theta_2 = 0,2 \%$ – погрешность магазина емкостей;

$\theta_3 = 0,1 \%$ – погрешность вольтметра;

$\theta_4 = 0,2 \%$ – погрешность магазина сопротивлений;

$k = 1,1$ – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью, числом составляющих НСП и их соотношением между собой.

$$\theta_{\Sigma} = 0,502 \%$$

$$\theta_{\Sigma} = \pm 1,8599 \text{ Гц}$$

Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины:

$$\Delta = kS_{\Sigma}, \quad (2.33)$$

где k – коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности НСП:

$$k = \frac{\varepsilon + \theta_{\Sigma}}{S_{\theta} + S_{\bar{f}}}. \quad (2.34)$$

S_{Σ} – суммарное СКО, вычисляемое:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\theta}^2 + S_{\bar{f}}^2}, \quad (2.35)$$

где S_{θ} – СКО НСП, вычисляемое:

$$S_{\theta} = \frac{\theta_{\Sigma}}{\sqrt{3}}. \quad (2.36)$$

$$S_{\theta}=1,0738 \text{ Гц}$$

$$S_{\Sigma} = 2,9328 \text{ Гц}$$

$$k=1,957$$

$$\Delta = 5,738481 \text{ Гц}$$

Результат измерения частоты: 67968 ± 6 , Гц при $P_{\text{дов}}=0,95$.

Выводы по главе

На данном этапе работы был проведен эксперимент.

Для его выполнения был разобран резонансный метод измерения электрической емкости, подобрано оборудование экспериментального стенда, произведено планирование эксперимента, разработана методика выполнения измерений.

В конечном итоге с помощью резонансного метода была получена выборка из 30 значения. Выбор такого объема обусловлен тем, что данный объем выборки обеспечивает предельную допустимую погрешность предполагаемого результата измерения аргумента в $\Delta_p = 1,15$ Гц или $\delta_p = 0,0017\%$, что является пренебрежимо малым с другими составляющими погрешности.

Последним шагом перед обработкой данных косвенных измерений было нахождение результата измерения аргумента, который, согласно расчетам, равен 67969 ± 6 , Гц при уровне доверительной вероятности $P_{\text{дов}}=0,95$.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		88

3 РЕАЛИЗАЦИЯ ТРАДИЦИОННОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1 Описание метода

Традиционный метод прост в применении и широко распространен. Достоинством метода является универсальность. Однако этот метод имеет ряд недостатков. Так, при традиционном методе оценку измеряемой величины находят путем подстановки в модельное уравнение оценок входных величин [57].

При многократных измерениях эти оценки принимаются равными средним арифметическим отдельных выборок результатов наблюдений аргументов. Такая оценка измеряемой величины является смещенной [14].

Искомое значение величины A находят на основании результатов измерений аргументов a_1, a_2, \dots, a_m , связанных с искомой величиной уравнением:

$$A = f(a_1, a_2, \dots, a_m) \quad (3.1)$$

При линейной зависимости между аргументами косвенного измерения искомое значение A связано с m измеряемыми аргументами уравнением:

$$A = b_1 a_1 + b_2 a_2 + \dots + b_m a_m, \quad (3.2)$$

где b_1, b_2, b_m – постоянные коэффициенты при аргументах a_1, a_2, a_m .

В основе оценивания погрешности измерений традиционным методом лежит линеаризация уравнения измерения на основе разложения Тейлора.

$$f(a_1, \dots, a_m) = f(\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_m) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial f}{\partial a_i} \Delta a_i + R, \quad (3.3)$$

где $f(a_1, \dots, a_m)$ – нелинейная функциональная зависимость измеряемой величины от измеряемых аргументов;

$\frac{\partial f}{\partial a_i}$ – первая производная от функции f по аргументу a_i , вычисленная в точке

$\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_m$;

Δa_i – отклонение результата измерения аргумента a_i от его среднего арифметического;

R – остаточный член,

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \frac{\partial^2 f}{\partial a_i \partial a_j} (\Delta a_i * \Delta a_j). \quad (3.4)$$

Метод линеаризации допустим, если можно пренебречь остаточным членом R .
Остаточным членом пренебрегают, если:

$$R < 0,8 \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial a_i}\right)^2 * S^2(\tilde{a}_i)}, \quad (3.5)$$

где $S(\tilde{a}_i)$ – среднее квадратическое отклонение случайных погрешностей результата измерения a_i -го аргумента.

Отклонение Δa_i при этом должны быть взяты из полученных значений погрешностей и такими, чтобы они максимизировали выражение для остаточного члена R .

Результат измерения вычисляют по формуле:

$$\tilde{A} = f(\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_m). \quad (3.6)$$

Среднее квадратическое отклонение случайной погрешности результата косвенного измерения вычисляют:

$$S(\tilde{A}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial a_i}\right)^2 * S^2(\tilde{a}_i)}. \quad (3.7)$$

Доверительные границы случайной погрешности результата косвенного измерения вычисляют:

$$\varepsilon(p) = t_q(f_{\text{эф}}, p) S(\tilde{A}), \quad (3.8)$$

где t_q – коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности $p=1-q$ и числу степеней свободы, вычисляемому:

$$f_{\text{эф}} = \frac{(\sum_{i=1}^m b_i^2 S^2(\tilde{a}_i))^2 - 2 * (\sum_{i=1}^m \frac{b_i^4 S^4(\tilde{a}_i)}{(n_i+1)})}{\sum_{i=1}^m \frac{b_i^4 S^4(\tilde{a}_i)}{(n_i+1)}}, \quad (3.9)$$

где b_i – коэффициент, равный:

$$b_i = \frac{\partial f}{\partial a_i}. \quad (3.10)$$

n_i – число измерений при определении аргумента a_i .

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата косвенного измерения при вероятности P вычисляют по формуле:

$$\Theta(P) = k * \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 * \Theta_i^2}, \quad (3.11)$$

где k – поправочный коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом m составляющих Θ_i .

При доверительной вероятности $P=0,95$ поправочный коэффициент k принимают равным 1,1.

Доверительная граница погрешности результата косвенного измерения вычисляют:

$$\Delta(P) = K(\varepsilon(P) + \Theta(P)), \quad (3.12)$$

где K – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности и отношения $\frac{\Theta(P)}{S(\bar{A})}$ [21].

3.2 Реализация интерфейса в среде MatLab и методы тестирования программного обеспечения

MATLAB – это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов.

MATLAB используется большим количеством инженеров и научных работников, поддерживается большинством операционных систем: Microsoft, Mac OS, Linux.

Язык MATLAB – это высокоуровневый язык программирования, в котором исходный код не преобразовывается в машинный код для выполнения процессором (исполнение происходит с помощью программы-интерпретатора, то есть происходит построчный анализ, обработка и сразу же выполнение исходного кода или запроса).

Язык основан на матричных структурах данных, содержит широкий выбор функций и интегрированную среду разработки, имеется возможность применения объектно-ориентированного подхода и использования интерфейсов к разрабатываемым программам, написанных на других языках.

Пакет предоставляет пользователю несколько сотен различных функций, используемых для анализа данных: теория поля, линейная алгебра, векторы, многочлены, интерполяция и экстраполяция, численное интегрирование, обработка данных, оптимизация, построение графиков, математическая статистика, статистическая регрессия и так далее.

В пакете имеются удобные средства создания алгоритмов, имеются необходимые инструменты среды разработки.

Программы MATLAB можно собрать с использованием MATLAB Compiler в независимые от пакета приложения. Имеется возможность создавать независимые приложения с графическим интерфейсом пользователя.

Также одним из преимуществ пакета является возможность работы с внешними интерфейсами, написанными на других языках программирования: COM, .NET, DDE, Веб-сервисы, COM-порт, MEX-файлы, DLL.

Также имеется возможность подключения к периферийным устройствам, например, к плате Arduino.

Отдельного внимания заслуживает набор инструментов Statistics Toolbox. Данный набор инструментов содержит алгоритмы и инструменты для организации, анализа, моделирования данных. Statistics Toolbox позволяет использовать регрессию, создавать случайные числа для метода Монте-Карло, использовать статистические графики для анализа, выполнять проверку гипотез.

Основные возможности Statistics Toolbox:

- создание массивов для хранения разнородных данных в одной переменной;
- регрессионные методы, линейные и нелинейные модели;
- дисперсионный анализ;

- распределение вероятностей;
- генератор случайных чисел;
- тесты гипотез;
- планирование эксперимента и статистической обработки.

Важно, что вышеперечисленные возможности реализованы в виде готовых функций, следовательно, пользователю не приходится каждый раз писать код. Программа собирается по типу «конструктора» из уже готовых блоков.

Данный факт позволяет сделать вывод, что система MATLAB идеально подходит для создания программного обеспечения компьютерных средств измерения: использование готовых функций и матричного подхода позволяет автоматизировать процесс создания программ, наличие GUI позволяет создавать удобный интерфейс для конкретного пользователя, использование готовых функций упрощает метрологическую аттестацию программного обеспечения, возможность подключения внешних интерфейсов и оборудования делает MATLAB универсальным средством для работы с различным измерительным оборудованием [19].

Тестирование программного обеспечения – это проверка соответствия между реальным и ожидаемым поведением программы, осуществляемая на конечном наборе текстов, выбранном определенным образом. В более широком смысле, тестирование – это одна из техник контроля качества, включающая в себя активность по планированию работ, проектированию тестов, выполнению тестирования и анализу полученных результатов.

Тестирование является неотъемлемой частью цикла разработки программного обеспечения.

Качество программного обеспечения – это совокупность характеристик программного обеспечения, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности.

Целью тестирования программного обеспечения является повышение вероятности того, что тестируемое приложение будет работать правильно при любых обстоятельствах, будет соответствовать всем описанным требованиям и представлять актуальную информацию о состоянии продукта на данный момент.

Широко используемыми методами тестирования являются модульное тестирование, интеграционное тестирование, приемочное тестирование и тестирование системы.

В первую очередь проводится модульный тест. Это метод испытания на объектном уровне. Отдельные программы, компоненты тестируются на наличие ошибок. Для этого теста требуется точное знание программы и каждого установленного модуля. Для этого создаются тест коды, которые проверяют правильность поведения тестируемого кода.

На втором этапе проводится интеграционное тестирование, в котором отдельные модули, которые уже были подвергнуты модульному тестированию, интегрируются друг с другом и проверяются на наличие неисправностей. Такой тип тестирования выявляет ошибки интерфейса.

Следующим этапом делается системное тестирование, в котором вся система проверяется на наличие ошибок и багов. Этот тест осуществляется путем сопряжения аппаратных и программных компонентов всей системы, и затем выполняется ее проверка.

Последний тест – это приемочные испытания, который проводится перед передачей программного обеспечения клиенту. Он проводится, чтобы гарантировать соответствие программного обеспечения всем заданным требованиям [56].

3.3 Описание программы по ГОСТ 19.402-78

Описание программы составлено согласно ГОСТ 19.402–78 [4].

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		94

1. Общие сведения

1.1 Обозначение и наименование программы

Программа «Обработка данных результата косвенных измерений традиционным методом» имеет следующие атрибуты:

- наименование файла: Trad_method.m;
- размер файла: 3 Мбайт;
- версия файла: 1.0;
- внутреннее имя файла: Trad_method;
- язык: русский.

1.2 Программное обеспечение, необходимое для функционирования программы

Системные программные средства, необходимые для функционирования программы Trad_method.m:

- операционная система: Windows 7;
- MATLAB, версия не ниже R2013b.

1.3 Языки программирования, на которых написана программа

Исходный язык программирования: MATLAB;

Среда разработки: MATLAB R2013b.

2. Функциональное назначение

2.1 Классы решаемых задач

Программа использует в качестве метода обработки измерительной информации традиционным методом. Традиционный метод – метод исследования распределения статистик, основанный на разложении нелинейной функции в ряд Тейлора.

Краткое описание работы программы: из исходного массива результатов программа, согласно описанию метода, вычисляет результат измерения, среднее квадратическое отклонение, доверительные границы случайной погрешности,

доверительный границы неисключенной систематической погрешности и полную погрешность измерения электрической емкости.

Результатом работы программы является вывод в окно интерфейса значений результата измерения, среднего квадратического отклонения и полной погрешности результата измерения.

2.2 Сведения о функциональных ограничениях

Программа предназначена для работы на операционной системе Windows 7 (тестирование проводилось только на этой версии ОС) в пакете программ MATLAB не ниже версии R2013b.

Программа имеет собственный графический интерфейс, позволяющий вводить исходные данные в специально отведенные поля.

3. Описание логической структуры

3.1 Алгоритм программы

Алгоритм отбора элементов с возвратом, на основе которого работает программа, представлен на рисунке 3.1.

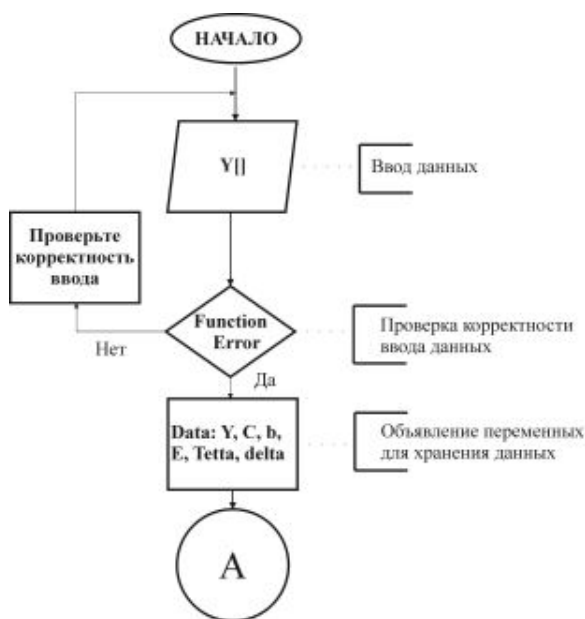


Рисунок 3.1 – Логическая структура программы

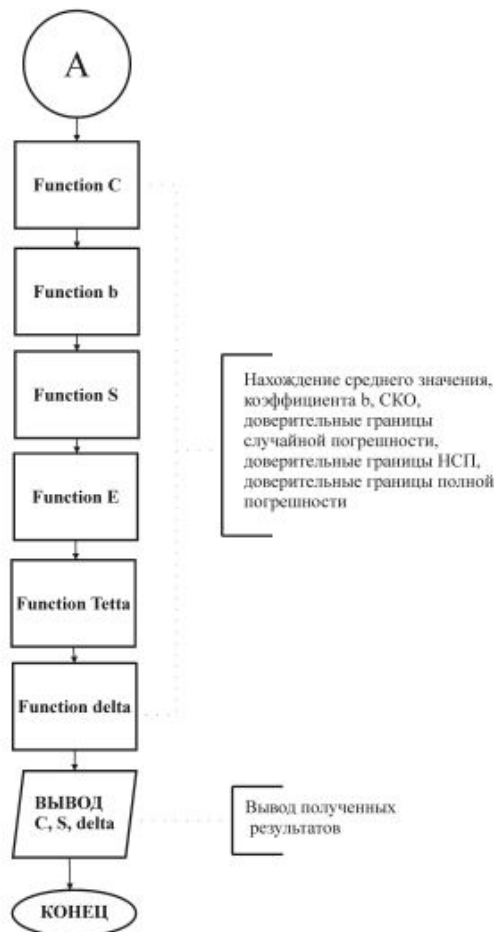


Рисунок 3.2 – Логическая структура программы

3.2 Структура программы с описанием функций составных частей и связи между ними

Программа «Trad_Method» состоит из исполняемого файла Trad_Method.m, файла с описанием интерфейса Trad_Method.fig.

Trad_Method.m обращается к:

- файлу Trad_Method.fig для вывода интерфейса на экран;
- файл-функции, содержащей алгоритм метода.

3.3 Связи программы с другими программами

Программа в ходе работы использует среду MATLAB версии не ниже R2013b.

4. Используемые технические средства

Персональный компьютер (минимальные требования): процессор Intel Pentium 2127U, ОЗУ 32 Мбайт, видеокарта 16 Мбайт, свободное место на жестком диске 10 Мбайт.

5. Вызов и загрузка

Запуск и загрузка программы «Trad_Method» осуществляется с помощью MATLAB R2013b и способами, сведения о которых описаны в руководстве пользователя операционной системы.

6. Входные данные

$Y[i]$ – массив целочисленных значений, хранящиеся в файле «Данные.txt», содержащие результаты наблюдений.

7. Выходные данные

C – вещественное значение средней электрической емкости, рассчитанное в результате работы программы.

S – вещественное значение среднего квадратического отклонения, рассчитанное в результате работы программы.

δ – вещественное значение полной погрешности, рассчитанное в результате работы программы.

3.4 Экспериментальное исследование метода

Результат работы программы Trad_Method представлен на рисунке 3.2

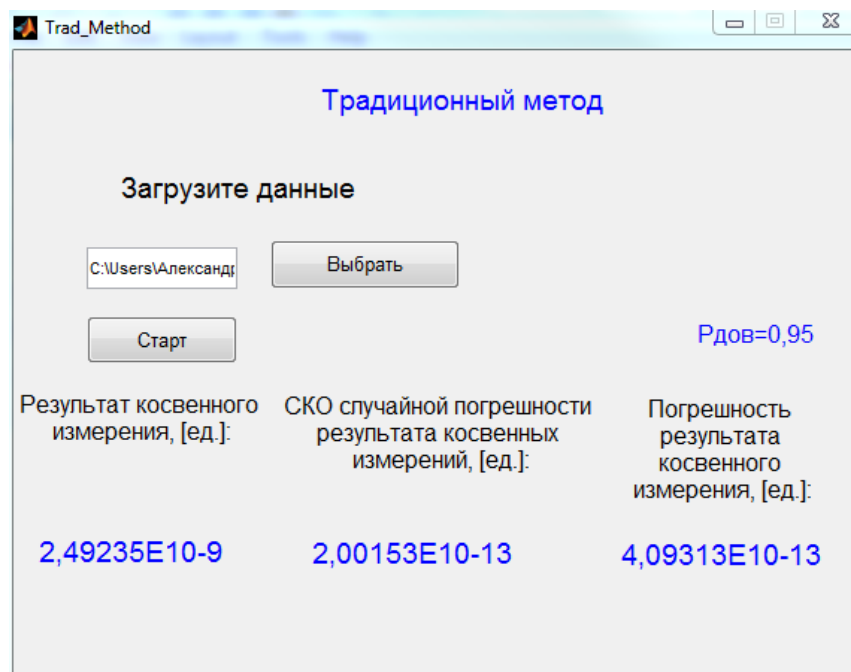


Рисунок 3.3 – Результат работы программы Trad_Method

Таким образом, значение среднего: $\bar{C} = 2,49235$ нФ;

среднее квадратическое отклонение: $S(C) = 0,000200153$ нФ;

доверительные границы погрешности: $\Delta = 0,000409313$ нФ;

оценка расширенной неопределенности, согласно формуле (1.1):

$$\hat{U}_p = \Delta = 0,000409313 \text{ нФ};$$

оценка суммарной стандартной неопределенности, согласно формуле (1.2):

$$\hat{u}_c = 0,000208833 \text{ нФ} (t_p=1,96).$$

Результат косвенного измерения: $2,49235 \pm 0,00041$, нФ ($P_{\text{дов}}=0,95$).

Выводы по главе

В третьей главе был рассмотрен традиционный метод обработки данных косвенных измерений. Рассмотрена реализация интерфейса в среде MatLab, а также методы тестирования программного обеспечения. Было разработано программное обеспечение для обработки данных традиционным методом.

Произведено экспериментальное исследование метода с помощью разработанного программного обеспечения.

Результатом являются полученные данные, необходимые для проведения сравнительного анализа: среднее значение, среднее квадратическое отклонение, доверительные границы погрешности, оценка расширенной и суммарной стандартной неопределенностей.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		100

4 МОДИФИКАЦИЯ ТРАДИЦИОННОГО МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1 Описание метода

Важной составляющей интегральной оценки погрешности косвенных измерений, являются случайные погрешности.

Оценка СКО случайной погрешности косвенного измерения определяется по формуле (4.1):

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \hat{\sigma}_i^2 + \sum_{i \neq j}^m \sum_{j \neq i}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right)^2 \cdot \hat{\sigma}_i^2 \hat{\sigma}_j^2 r_{ij}}, \quad (4.1)$$

где m – число параметров косвенных измерений; $\hat{\sigma}$ – оценка СКО параметров косвенного измерения;

r_{ij} – коэффициент корреляции, как мера статистической зависимости параметров случайных величин x_i и x_j , $r \in (-1, 1)$.

Корреляция – это статистическая зависимость между случайными величинами, не имеющими строго функционального характера, при котором изменение одной из случайных величин приводит к уменьшению математического ожидания другой.

Корреляционный момент:

$$K_{xy} = \iint_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)(y - m_y)f(x, y) dx dy, \quad (4.2)$$

где m_x, m_y – математическое ожидания величины X и Y .

Коэффициент корреляция:

$$r = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (4.3)$$

Примечания

1. Эта величина всегда будет принимать значения от минус 1 до плюс 1, включая крайние значения.

2. Если две случайные величины независимы, коэффициент корреляции между ними равен нулю только в случае двумерного нормального распределения.

Критерий отсутствия корреляционной связи между погрешностями результатов измерений аргументов является выполнение неравенства:

$$\left| \frac{\tilde{r}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\tilde{r}^2}} \right| < t_q, \quad (4.4)$$

где t_q – коэффициент Стьюдента, соответствующий уровню значимости q и числу степеней свободы $f=n-2$;

\tilde{r} – оценка коэффициента корреляции между погрешностями аргументов, вычисляемая по формуле:

$$\tilde{r} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{hi} - \tilde{f}_h)(f_{ji} - \tilde{f}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{hi} - \tilde{a}_h)^2 \sum_{i=1}^n (a_{ji} - \tilde{a}_j)^2}}, \quad (4.5)$$

где a_h и a_j – погрешности аргументов;

a_{hi} и a_{ji} – результаты измерения h -го и j -го аргументов;

Коэффициент вариации – отношение СКО случайной погрешности отклонения к абсолютному значению математического ожидания случайной величины.

Коэффициент вариации – δ , равен:

$$\delta = \frac{p}{\widehat{M}_1}, \quad (4.6)$$

где $\widehat{M}_1 = \int_0^\infty xp(x)dx$ – оценка математического ожидания случайной величины;

$p(x)$ – плотность распределения вероятностей случайной величины x .

С учетом того, что второй центральный момент равен дисперсии случайной величины x при нормальном законе распределения то:

$$\delta^2 = \frac{\hat{\sigma}^2}{\widehat{M}_1^2} = \frac{D_2 - M_1^2}{M_1^2} = \frac{D_2}{M_1^2} - 1, \quad (4.7)$$

где D_2 – второй центральный момент; M_1 – первый начальный момент.

Первой предпосылкой для модификации является то, что среднее значение фундаментальных физических величин и физических постоянных имеют не нулевые средние значения.

Если $\hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\sigma}_3 \dots \hat{\sigma}_m$ отличаются на порядки, то в [21] показано, что определяющей погрешностью будет наибольшее из $\hat{\sigma}_i$.

Тогда (4.1) с учетом (4.2) запишется в виде:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \left[\left(\frac{D_{2i}}{M_{1i}^2}\right)^2 - \frac{2D_{2i}}{M_{1i}^2} + 1\right] + \sum_{i \neq j}^m \sum_{j \neq i}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right)^2 \cdot \left[\frac{D_{2i}D_{2j}}{M_{1i}^2 M_{1j}^2} + \left(1 - \frac{D_{2i}}{M_{1i}^2} + \frac{D_{2j}}{M_{1j}^2}\right)^2\right] \cdot \hat{r}_{ij}} \quad (4.8)$$

Окончательно получим:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{D_{2i}}{M_{1i}^2}\right)^2 - \frac{2D_{2i}}{M_{1i}^2} + 1\right]} \quad (4.9)$$

4.2 Описание программы по ГОСТ 19.402-78

Описание программы составлено согласно ГОСТ 19.402–78 [4].

1. Общие сведения

1.1 Обозначение и наименование программы

Программа «Обработка данных результата косвенных измерений модификацией традиционного метода» имеет следующие атрибуты:

- наименование файла: Mod_Method.m;
- размер файла: 3,1 Мбайт;
- версия файла: 1.0;
- внутреннее имя файла: Mod_Method;

– язык: русский.

1.2 Программное обеспечение, необходимое для функционирования программы

Системные программные средства, необходимые для функционирования программы Mod_Method.m:

– операционная система: Windows 7;

– MATLAB, версия не ниже R2013b.

1.3 Языки программирования, на которых написана программа

Исходный язык программирования: MATLAB;

Среда разработки: MATLAB R2013b.

2. Функциональное назначение

2.1 Классы решаемых задач

Программа использует в качестве метода обработки измерительной информации модификацией традиционного метода. Традиционный метод – метод исследования распределения статистик, основанный на разложении нелинейной функции в ряд Тейлора.

Краткое описание работы программы: из исходного массива результатов программа, согласно описанию метода, вычисляет результат измерения, среднее квадратическое отклонение модифицированным методом, доверительные границы случайной погрешности, доверительный границы неисключенной систематической погрешности и полную погрешность измерения электрической емкости.

Результатом работы программы является вывод в окно интерфейса значений результата измерения, среднего квадратического отклонения и полной погрешности результата измерения.

2.2 Сведения о функциональных ограничениях

Программа предназначена для работы на операционной системе Windows 7 (тестирование проводилось только на этой версии ОС) в пакете программ MATLAB не ниже версии R2013b.

Программа имеет собственный графический интерфейс, позволяющий вводить исходные данные в специально отведенные поля.

3. Описание логической структуры

3.1 Алгоритм программы

Алгоритм отбора элементов с возвратом, на основе которого работает программа, представлен на рисунке 4.1.

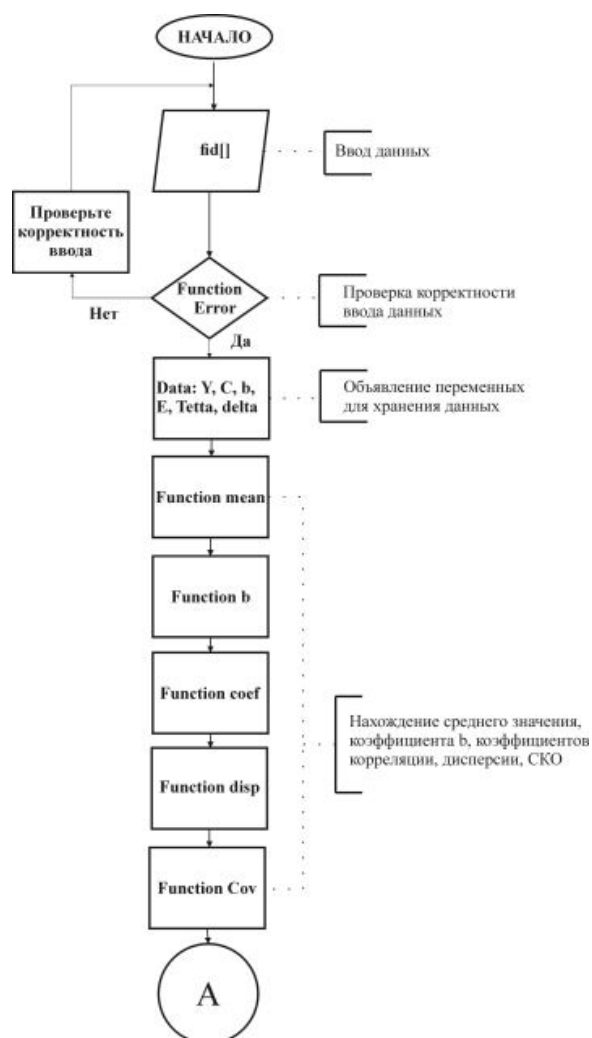


Рисунок 4.1 – Логическая структура программы

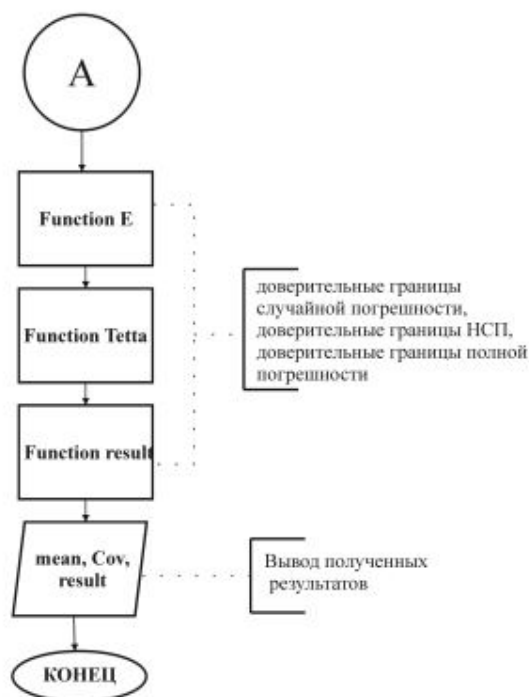


Рисунок 4.2 – Логическая структура программы

3.2 Структура программы с описанием функций составных частей и связи между ними

Программа «Mod_Method» состоит из исполняемого файла Mod_Method.m, файла с описанием интерфейса Mod_Method.fig.

Mod_Method.m обращается к:

- файлу Mod_Method.fig для вывода интерфейса на экран;
- файл-функции, содержащей алгоритм метода.

3.3 Связи программы с другими программами

Программа в ходе работы использует среду MATLAB версии не ниже R2013b.

4. Используемые технические средства

Персональный компьютер (минимальные требования): процессор Intel Pentium 2127U, ОЗУ 32 Мбайт, видеокарта 16 Мбайт, свободное место на жестком диске 10 Мбайт.

5. Вызов и загрузка

Запуск и загрузка программы «Mod_Method» осуществляется с помощью MATLAB R2013b и способами, сведения о которых описаны в руководстве пользователя операционной системы.

6. Входные данные

fid[i] – массив целочисленных значений, хранящиеся в файле «Данные.txt», содержащие результаты наблюдений.

7. Выходные данные

Mean – вещественное значение средней электрической емкости, рассчитанное в результате работы программы.

y – вещественное значение среднего квадратического отклонения, рассчитанное в результате работы программы.

Result – вещественное значение полной погрешности, рассчитанное в результате работы программы.

4.3 Экспериментальное исследование метода

Результат работы программы Trad_Method представлен на рисунке 4.3

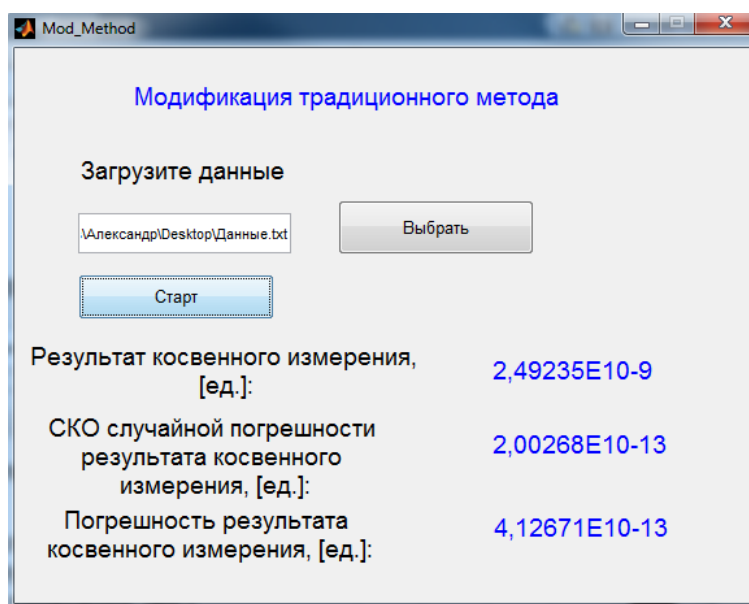


Рисунок 4.3 – Результат работы программы Mod_Method

Таким образом, значение среднего: $\bar{C} = 2,49235$ нФ;
 среднее квадратическое отклонение: $S(C) = 0,000200268$ нФ;
 доверительные границы погрешности: $\Delta = 0,000412671$ нФ;
 оценка расширенной неопределенности, согласно формуле (1.1):
 $\hat{U}_p = \Delta = 0,000412671$ нФ;
 оценка суммарной стандартной неопределенности, согласно формуле (1.2):
 $\hat{u}_c = 0,000210546$ нФ ($t_p = 1,96$).
 Результат косвенного измерения: $2,49235 \pm 0,00041$, нФ ($P_{\text{дов}} = 0,95$).

Выводы по главе

В четвертой главе была рассмотрена модификация традиционного метода обработки данных косвенных измерений. Было разработано программное обеспечение для обработки данных модификацией традиционного метода. Произведено экспериментальное исследование метода с помощью разработанного программного обеспечения.

Результатом являются полученные данные, необходимые для проведения сравнительного анализа: среднее значение, среднее квадратическое отклонение, доверительные границы погрешности, оценка расширенной и суммарной стандартной неопределенностей.

5 РЕАЛИЗАЦИЯ БУТСТРЕП МЕТОДА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1 Описание метода

Бутстреп метод [10] позволяет строить доверительный интервал для выборочного среднего следующим образом. Пусть имеются n результатов измерения случайной величины X . Запишем эти результаты в виде n -мерного вектора x_e :

$$x_e = \{ x_{e1}, x_{e2}, \dots, x_{en} \}. \quad (5.1)$$

Создадим вспомогательную выборку x_b , называемую выборкой бутстрепа. Эта новая выборка должна быть во многом похожа на нашу экспериментальную выборку x_e , а процесс ее создания – на процесс получения информации из эксперимента. Таким требованиям вполне удовлетворяет n -мерный вектор x_b :

$$x_b = \{ x_{b1}, x_{b2}, \dots, x_{bn} \}, \quad (5.2)$$

где каждый элемент вектора x_{bi} случайным образом выбирается из элементов вектора x_e . Иными словами $x_{bi} = x_{ej}$, причем j есть случайное целое число из диапазона 1- n .

Выборка бутстрепа (5.2) во многом похожа на исходную экспериментальную выборку (5.1), поскольку имеет тот же объем и состоит из тех же добытых в эксперименте результатов. Если бы мы могли еще раз повторить весь эксперимент, то он мог бы и предоставить нам не обязательно те же самые данные (5.1), но какие-то очень похожие данные. Выборка бутстрепа (5.2) содержит те же самые данные, что были получены в нашем реальном эксперименте, но некоторые из результатов могут не попасть в (5.2), а некоторые могут попасть в нескольких экземплярах. Если в (5.1) какие-то представления случайной величины X близки друг другу, то в (5.2) многократное повторение нескольких из этих представлений имитирует большую вероятность появления такого представления в условиях эксперимента. Если же в (5.1) какое-то отдельное представление случайной

величины X заметно отличается от других, то многократное повторение одного этого представления в (5.2) будет маловероятным. Тем самым возвратная выборка из (5.1) при формировании (5.2) в значительной мере имитирует природу поведения случайной величины X в эксперименте. Безвозвратная выборка объема n из (5.1) давала бы простую копию эксперимента и не несла бы никакой новой информации о свойствах измерения случайной величины X .

Рассчитаем среднее значение x_{mb} из выборки (5.2)

$$x_{mb} = \frac{\sum x_{bi}}{n} \quad (5.3)$$

Значение x_{mb} может несколько отличаться от средней величины x_{me} из экспериментальной выборки (5.1)

$$x_{me} = \frac{Sx_{ei}}{n} \quad (5.4)$$

Этот факт опять имитирует поведение случайной величины X в эксперименте. Если бы мы могли ещё раз повторить весь эксперимент, то он мог бы предоставить нам не обязательно то же самое значение x_{me} , что и в первом эксперименте.

Повторим теперь многократно весь процесс формирования выборок бутстрепа и нахождения средних из этих выборок. У нас получится новая, возможно, огромная по объёму выборка значений случайной величины x_{mb} . Каждое представление этой величины в данной выборке несёт на себе черты поведения случайной величины X в нашем реальном эксперименте, поскольку это конкретное значение чувствительно и к объёму экспериментальной выборки n , и к вероятности появления в эксперименте каждого выявленного нами значения x_{ej} заложенного в величину x_{mb} . Конечно, в выборку значений случайной величины x_{mb} не заложены те представления случайной величины X , которые не проявились в нашем эксперименте. Только этим и отличается выборка величин x_{mb} , полученных по методу бутстрепа, от значительно более представительной выборки средних значений, которую мог бы дать многократно повторенный реальный эксперимент.

В остальном выборка величин x_{mb} несёт в себе все черты случайной величины X , выявленные в эксперименте. Значит, она обладает не худшей представительностью, чем исходная выборка (5.1).

К искусственно созданной выборке величин x_{mb} можно применить все рецепты репрезентативной статистики, поскольку объем выборки велик. В частности, можно вычислить среднее значение из всех величин x_{mb} , можно построить гистограмму, по которой непосредственно определяется доверительный интервал для экспериментальной оценки среднего значения случайной величины X . При этом весьма важно, что для определения доверительного интервала не требуется знать закон распределения ни случайной величины X , ни случайной величины x_{mb} . Какой бы вид не имела гистограмма, по ней сразу видно, какую нижнюю и какую верхнюю границу значений x_{mb} нужно выбрать, чтобы надёжность попадания неизвестного значения математического ожидания случайной величины X в данный доверительный интервал была не меньше, чем это нужно исследователю [9].

В итоге на выходе получается распределение, с помощью которого можно проводить расчеты: нахождение доверительного интервала, медианы, стандартного отклонения.

Стоит обратить внимание на то, что при использовании бутстреп метода не приходится делать предположений о распределении входных аргументов. Распределение может быть несимметричными, а алгоритм останется тем же.

Число различных бутстреп выборок, полученных при отборе с возвратом, можно посчитать по следующей формуле (5.5):

$$n^n. \quad (5.5)$$

При $n=10$ число различных выборок будет равно десяти миллиардам, следовательно, при использовании случайного механизма отбора элементов бутстреп выборок появление одинаковых бутстреп выборок маловероятно.

5.2 Описание программы по ГОСТ 19.402-78

1. Общие сведения

1.1 Обозначение и наименование программы

Программа «Обработка данных результата косвенных измерений бутстреп методом» имеет следующие атрибуты:

- наименование файла: Bootstrap_method.m;
- размер файла: 5 Мбайт;
- версия файла: 1.0;
- внутреннее имя файла: Bootstrap_method;
- язык: русский.

1.2 Программное обеспечение, необходимое для функционирования программы

Системные программные средства, необходимые для функционирования программы Bootstrap_method.m:

- операционная система: Windows 7;
- MATLAB, версия не ниже R2013b.

1.3 Языки программирования, на которых написана программа

Исходный язык программирования: MATLAB;

Среда разработки: MATLAB R2013b.

2. Функциональное назначение

2.1 Классы решаемых задач

Программа использует в качестве метода обработки измерительной информации методом статистического бутстрепа. Бутстреп метод – метод исследования распределения статистик, основанные на многократной генерации выборок на базе имеющейся выборки.

Краткое описание работы программы: из исходного массива результатов отбираются значения и заносятся в новый бутстреп массив при помощи алгоритма отбора элементов с возвратом, представленном в п. 5.1. Число новых массивов

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		112

равно одной тысяче. Для каждого массива рассчитывается среднее значение и неопределенность. В итоге получается два массива: массив средних значений и массив неопределенностей. По массиву средних значений программа строит гистограмму распределения. По массиву неопределенностей программа производит оценку точности.

Результатом работы программы является получение результата косвенных измерений с его оценкой точности в виде неопределенности.

2.2 Сведения о функциональных ограничениях

Программа предназначена для работы на операционной системе Windows 7 (тестирование проводилось только на этой версии ОС) в пакете программ MATLAB не ниже версии R2013b.

Программа имеет собственный графический интерфейс, позволяющий вводить исходные данные в специально отведенные поля.

3. Описание логической структуры

3.1 Алгоритм программы

Алгоритм отбора элементов с возвратом, на основе которого работает программа, представлен на рисунке 5.1.

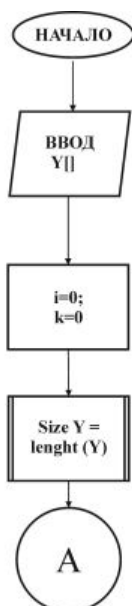


Рисунок 5.1 – Формирование бутстреп выбора

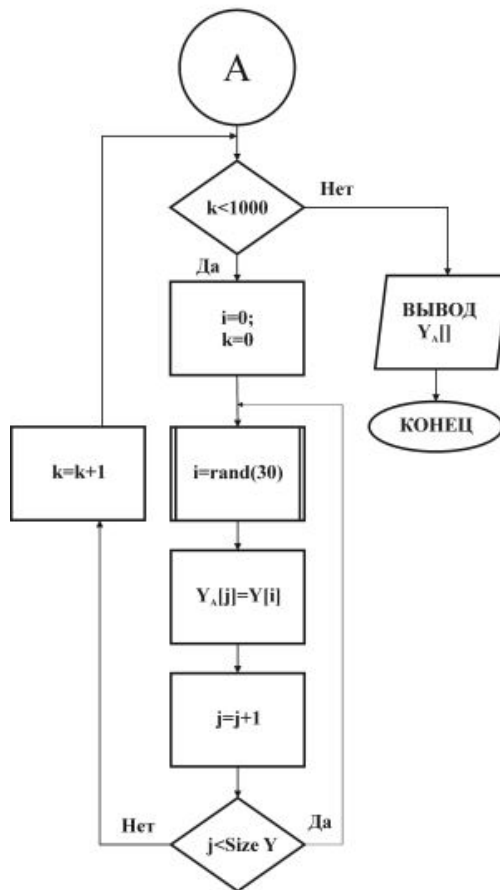


Рисунок 5.2 – Формирование бутстреп выбора

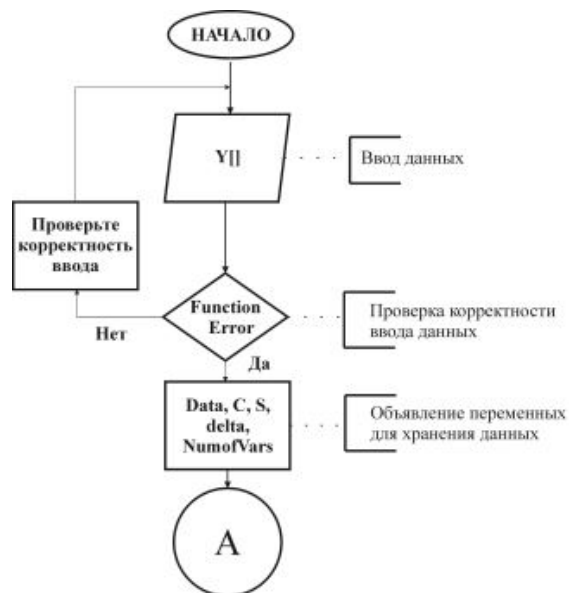


Рисунок 5.3 – Логическая структура программы



Рисунок 5.4 – Логическая структура программы

3.2 Структура программы с описанием функций составных частей и связи между ними

Программа «Bootstrap_Method» состоит из исполняемого файла Bootstrap_Method.m, файла с описанием интерфейса Bootstrap_Method.fig и файл-функции бутстреп метода.

Bootstrap_Method.m обращается к:

- файлу Bootstrap_Method.fig для вывода интерфейса на экран;
- файл-функции, содержащей алгоритм метода.

3.3 Связи программы с другими программами

Программа в ходе работы использует среду MATLAB версии не ниже R2013b.

4. Используемые технические средства

Персональный компьютер (минимальные требования): процессор Intel Pentium 2127U, ОЗУ 32 Мбайт, видеокарта 16 Мбайт, свободное место на жестком диске 10 Мбайт.

5. Вызов и загрузка

Запуск и загрузка программы «Bootstrap_Method» осуществляется с помощью MATLAB R2013b и способами, сведения о которых описаны в руководству пользователя операционной системы.

6. Входные данные

$Y[i]$ – массив целочисленных значений, хранящиеся в файле «Данные.txt», содержащие результаты наблюдений.

7. Выходные данные

C – вещественное значение средней электрической емкости, рассчитанное в результате работы программы.

S – вещественное значение среднего квадратического отклонения, рассчитанное в результате работы программы.

δ – вещественное значение полной погрешности, рассчитанное в результате работы программы.

5.3 Экспериментальное исследование метода

Результат работы программы Bootstrap_Method представлен на рисунке 5.2

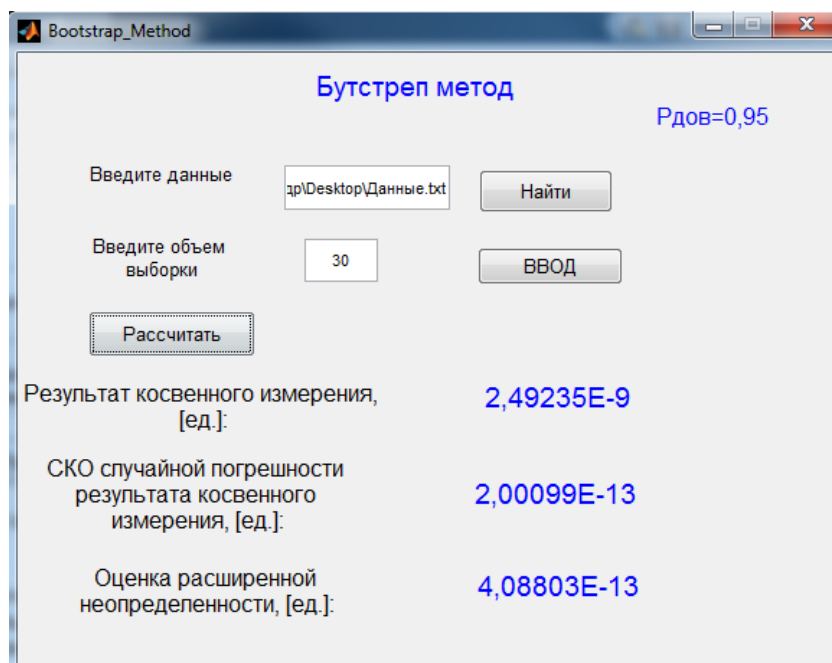


Рисунок 5.5 – Результат работы программы Bootstrap_Method

Таким образом, значение среднего: $\bar{C} = 2,49235$ нФ;
 среднее квадратическое отклонение: $S(C) = 0,000200099$ нФ;
 доверительные границы погрешности: $\Delta=0,000408803$ нФ;
 оценка расширенной неопределенности, согласно формуле (1.1):
 $\hat{U}_p = \Delta = 0,000408803$ нФ;
 оценка суммарной стандартной неопределенности, согласно формуле (1.2):
 $\hat{u}_c = 0,000208572$ нФ ($t_p=1,96$).

На основе бутстрепованных данных, полученных в результате имитации, построена гистограмма частотного распределения (рисунок 5.3).

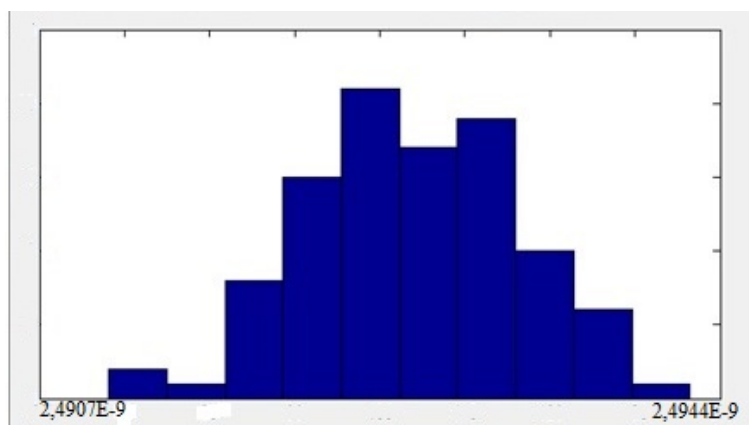


Рисунок 5.6 – Гистограмма частотного распределения

Результат косвенного измерения: $2,49235 \pm 0,00041$, нФ ($P_{\text{дов}}=0,95$)

Выводы по главе

В пятой главе был рассмотрен бутстреп метод обработки данных косвенных измерений. Рассмотрена реализация интерфейса в среде MatLab, а также методы тестирования программного обеспечения. Было разработано программное обеспечение для обработки данных бутстреп методом. Произведено экспериментальное исследование метода с помощью разработанного программного обеспечения.

Результатом являются полученные данные, необходимые для проведения сравнительного анализа: среднее значение, среднее квадратическое отклонение, доверительные границы погрешности, оценка расширенной и суммарной стандартной неопределенностей. Также была получена гистограмма частотного распределения.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		118

6 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНОК ПОГРЕШНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В ходе обработки результатов косвенного измерения традиционным методом, модификацией традиционного метода и методом бутстреп, полученные результаты, а именно: оценка среднего, среднее квадратическое отклонение, доверительные границы истинного значения, оценка расширенной неопределенности и оценка суммарной стандартной неопределенности были сведены в таблицу 6.1. $P_{\text{дов}}=0,95$, $t_p = 1,96$.

Таблица 6.1 – Итоговая таблица

Метод	Традиционный метод	Модификация традиционного метода	Метод бутстреп
Оценка среднего, нФ	2,49235	2,49235	2,49235
Среднее квадратическое отклонение, нФ	0,000200153	0,000200268	0,00020099
Доверительные границы погрешности, нФ	0,000409313	0,000412671	0,000408803
Оценка расширенной неопределенности, нФ	0,000409313	0,000412671	0,000408803
Оценка суммарной стандартной неопределенности, нФ	0,000208833	0,000210546	0,000208572

Проанализировав таблицу 6.1, можно сделать вывод, что определение электрической емкости традиционным методом дало приемлемые результаты. Однако этот метод является приближенным методом и неточность приближения не учитывается. Модификация традиционного метода дала чуть менее точные результаты за счет увеличения надежности метода: модифицированный расчет увеличивает число факторов, влияющих на погрешность, но поскольку алгоритм получения результатов идентичен традиционному методу, неточность приближения в данном методе также не учитывается. Бутстреп метод является самым точным из использованных нами методов.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		120

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был решен ряд задач, связанных с обработкой данных косвенных измерений.

На первом этапе был проведен информационный поиск по теме работы, который показал современные методы обработки косвенных измерений. Из этих методов были выбраны три метода, которые подлежали дальнейшему более глубокому изучению.

На втором этапе работы был спланирован и проведен эксперимент по косвенному измерению электрической емкости с помощью частоты. При проведении данного эксперимента прошло ознакомление с резонансным методом снятия данных. Также была разработана методика выполнения измерений.

На третьем и последующих этапах работы производилась непосредственно обработка данных, полученных в результате эксперимента. На этих этапах производилось практическое применение отобранных и изученных методов: традиционного, модификации традиционного метода и бутстреп-метода.

Исследование показало, что результаты косвенных измерений сопоставимы по точности. Это объясняется малыми неопределенностями измерения частоты, при которых нет заметного смещения результата измерения электрической емкости.

Наибольшее значение погрешности дал традиционный метод. Это объясняется тем, что метод является приближенным и не учитывает неточность приближения.

Анализ показал, что наиболее надежным методом является метод бутстреп. Это объясняется получением на выходе распределения с неограниченным числом членов.

Все методы легко реализуются на компьютере. Для их распространения следует разработать и стандартизировать соответствующие специализированные программные средства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов, Г.С. Подход к оценке погрешности вычисления массы нефти как к косвенному методу измерения / Г.С. Абрамов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2010. – Вып. 3. - №3. – с. 1-3
2. Авдеев, Б.Я. Основы метрологии и электрические измерения / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин. – Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
3. Глухова, Н.В. Fuzzy-обработка результатов косвенных измерений / Н.В. Глухова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – Вып. 2. – №2 (11). – С. 165–168
4. ГОСТ 19.402–78 ЕСПД. Описание программы. – М.:Стандартинформ, 2010. – 4 с.
5. ГОСТ 8.563-2009 ГСИ. Методики (методы) измерений. – М.: Стандартинформ, 2011. – 16 с.
6. ГОСТ 8.736-2011 ГСИ. Измерения прямые многократные. – М.: Стандартинформ, 2011. – 18 с.
7. ГОСТ Р 8.54500.3-2011 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 101 с.
8. ГОСТ Р ИСО 5279-2002 Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. – М.: Госстандарт России, 2002. – 70 с.
9. Дементьев, В.А. Особенности применения метода бутстрепа при нахождении сложных статистических функций от малых выборок в биологических и медицинских исследованиях / В.А. Дементьев, А.В. Сорока, Т.Г. Химочко // Биомедицинская химия. – 2004. – Т. 50, №1. – С. 117–126

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		122

10. Диаконис, П. Статистические методы с интенсивным использованием ЭВМ / П. Диаконис, Б. Эфрон // В мире науки. – 1983. №7. – С. 60–73
11. Димов, В.Ю. Метрология, стандартизация и сертификация / В.Ю. Димов. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2005. – 432 с.
12. Дмитриева, О.В. Обработка результатов измерений. Учебное пособие / О.В. Дмитриева. – Курган, 2013. – 31 с.
13. Добровинский, И.Р. Перспективы использования косвенных совокупных измерений для определения параметров электрических цепей / И.Р. Добровинский. Е.А. Ломтев, К.В. Громиков // Мир измерений. – 2007. – Вып. 1. – №2. – С. 45–48
14. Захаров, И.П. Сравнительный анализ методов обработки экспериментальных данных при косвенных некоррелированных измерениях. Учебное пособие для ВУЗов / И.П. Захаров, С.Г. Рабинович. – Краснодар, 2008. – 20 с.
15. Зинкина, А.В. Взаимный перерасчет характеристик погрешности в характеристики неопределенности / А.В. Зинкина. – Пенза: ФГБОУ «Пензинский государственный университет», 2014. – 5 с
16. Кирилловский, В.К. Оптические измерения сборник вопросов и задач. Часть 2. Оценка качества оптического изображения. Учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму по дисциплине «Оптические измерения» / В.К. Кириллов, Т.В. Точилина. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 158 с.
17. Колчков, В.И. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебное пособие / В.И. Колчков. – Москва, 2015. – 312 с.
18. Кравченко, Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская. – Изд-во: Томский политехнич. унив. – 2011. – 88с.
19. Лазарев, Ю.Ф. Начала программирования в среде MatLAB: Учебное пособие / Ю.Ф. Лазарев. – К.: НТУУ «КПИ», 2003. – 424 с.

20. Майстренко, А.В. Косвенное измерение расхода жидкости / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков // Доклады Томского Государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – Вып. 2. - №2 (34). – С. 215–219

21. МИ 2083-1990 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – М.: ВНИИМС, 1992. – 11 с.

22. МИ 2091-1990 ГСИ. Измерение физических величин. Общие требования. – М.: ВНИИМС, 1992. – 19 с.

23. МИ 2955 – 2010. Типовая методика аттестации программного обеспечения средств измерений. – М.: ВНИИМС, 2010. – 22 с.

24. Моисеева, Н.П. Неопределенность измерения температуры косвенным методом / Н.П. Моисеева. – 2010. – №11. – с. 41-44

25. Намиток, К.К. Испытание аппаратов низкого напряжения / К.К. Намиток. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 164 с.

26. Орнатский, П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. – Киев: Головное изд-во, 1983. – 455 с.

27. ОСТ 1 00487-1983 Метрологическое обеспечение испытаний газотурбинных двигателей. Метрологическая аттестация измерительных каналов информационно-измерительных систем. – М.: Стандартинформ, 1983. – 19 с.

28. Пархоменко, П.П. Основы технической диагностики / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян. – М.: Энергия, 1981. – 320с.

29. Ранченко, Г.С. Оценка погрешностей косвенных измерений при испытаниях газотурбинных двигателей / Г.С. Ранченко, А.Г. Буряченко, Д.И. Волков // Доклады Томского Государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – Вып. 4. - №1 (22). – С. 174–177

30. Резонансный метод. –

<http://www.intuit.ru/studies/courses/3442/684/lecture/16315?page=2>

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		124

31. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2014. – 60 с.
32. Рудяк, Ю.В. Теория вероятностей и математическая статистика / Ю.В. Рудяк. – М.: Наука, 2002. – 57 с.
33. Сафин, И.Н. Обработка результатов косвенных измерений / И. Н. Сафин. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2015. – 26 с.
34. Сахавова, А.А. Применение метода косвенного определения вебер-амперных характеристик в автоматизированной системе бессенсорной диагностики электромагнитных механизмов / А.А. Сахавова, К.М. Широков, С.Г. Январев // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – Вып 2. - №5. – С. 63–70
35. Сергеев, А.Г. Метрология, стандартизация, сертификация: учебное пособие / А.Г Сергеев, М.В. Латышев, В.В. Терегеря. – М.: Логос, 2008. – 536 с.
36. Серенков, П.С. Системный подход к моделированию измерительного канала как механизм обеспечения доверия к результатам измерений / П.С. Серенков, Е.Н. Савкова // Приборы и методы измерений. – 2012. – Вып. 1. - №1 (4). – С. 127–133
37. Слинкин, С. А. Измерение больших диаметров косвенными методами измерения. Перспективы развития средств измерения / С. А. Слинкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Т.14, №2. – С. 111–115.
38. Третьяк, Л.Н. Обработка результатов измерений / Л.Н. Третьяк // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – №2 (11). – С. 78–80.
39. Цапенко, М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование / М.П. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 438с.

40. Чипулис, В.П. Сравнительная оценка двух методов косвенных измерений разности расходов теплоносителя / В.П. Чипулис // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2012. – Т. 2, №7. – С. 33–36
41. Шитиков, В.К. Статистические методы ресамплинга: рандомизация и бутстреп / В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг. – Тольятти: Кассандра, 2013. – 305 с.
42. Яворский, В.А. Планирование измерительного эксперимента и обработка экспериментальных данных / В.А. Яворский. – М.: Долгопрудный. – 2006. – 24 с.
43. Arutyumov, P.A. Indirect measurements in finite fields / P.A. Arutyumov // J. Measurement techniques. – 2009. – V.42, №4. – P. 324-331
44. Ball, C.G. Progression towards the minimum: the importance of standardizing the priming volume during the indirect measurement of intra-abdominal pressures / C.G. Ball, A.W. Kirkpatrick // J. Critical Care. – 2006. – №43. – P. 207–211
45. Ferregut, C. Fast error estimates for indirect measurements: applications to pavement engineering / C. Ferregut, S. Nazarian, K. Venalaganti, C. C. Chang, V. Kreinovich // J. Reliable computing. – 2006. V.2, №3. – P.291-228
46. Geddes, L.A. The direct and indirect measurement of blood pressure / L.A. Geddes // J. Medical and biological engineering. – 1970. – V.8, №6. – P. 605-606
47. Granovskii, V.A. Errors of indirect dynamic measurements: Linear model Measurement techniques / V.A. Granovskii. – 2004. – V.37, №8. – P. 854-858
48. Hoseinkani, E. Comparison of direct and indirect measurements of the saturation magnetization of barium hexaferrite synthesized by coprecipitation / E. Hoseinkani, M. Mehdipour, H. Schollahi // J: Journal of electronic materials. – 2013. – V.42, №4. – P. 739-744
49. Johannes, A.H. Modeling of through fall chemistry and indirect measurement of Dry Deposition / A.H. Johannes, Y.L. Chen, K. Dackson, T. Suleski // J. Acidic Precipitation. – 1996. – V.27, №6. – P. 211–216
50. Kudryshova, Z. F. Methods of experimental data processing in indirect measurements, in Methods of experimental data processing in measurements /

Z.F. Kudryshova , S.G. Rabinovich // J. Proceedings of the Metrological Institutes of the USSR D.I. Mendeleev All-Union Scientific Institute of Metrology. – 1975. – № 172 (232)

51. Labutin, S.A. Summation of Random Measurement Errors and Analysis of Indirect-Measurement Errors by Monte-Carlo Method / S.A. Labutin, M.V. Pugin // J. Measurement techniques. – 2010. – V.43, №11. – P. 918-922

52. Levin, S.F. Reduction scheme in the method of indirect measurement / S.F. Levin // J. Measurement techniques. – 2004. – V. 47, №3. – P. 216–233

53. Peam, W.L. Bootstrap approach for estimating process quality yield with application to light emitting diodes. / W.L. Peam, Y.C. Chang, Chien-Wei Wu // J. Springer-Verlag. – 2009. – P. 560-565

54. Pitsyk, V.V. Contactless Method of Indirect Measurement of the Distance between Points of a Reflecting Surface / V.V. Pitsyk // J. Measurement techniques. – 2011. – V.44, №3. – P. 261-264

55. Pizzone, R.G. Li, Be and B Destruction in Astrophysical Environments: Indirect Cross Section Measurements / R.G. Pizzone, C. Spitaleri, L. Lamia, S. Cherubini, M. la Cognata, A. Mussumara M.G. Pellegriti, S. Romano, A. Tumino // J. Chemical Abundances and Mixing in Stars in the Milky Way and its Satellites. – 2004. P. 171-172

56. Rabinovich, S.G. Examples of Measurements and Measurement Data Processing / S.G. Rabinovich // J. Measurement techniques. – 2014. – V.87, №5. – P. 234 – 256

57. Rabinovich, S.G. Indirect measurements / S.G. Rabinovich // J. Measurement techniques. – 2013. – V.76, №7. – P. 214 – 223

58. Savin, S.K. Some aspects of enhancement of accuracy in results of indirect measurements / S.K. Savin //J. Measurement techniques. – 2002. – V.35, №3. – P. 253-258

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(Текст программы)

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДАННЫХ
КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТРАДИЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Текст программы

ИНИТ.00001

4 листа

2018

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		128

```

function varargout = Bootstrap(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Bootstrap_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Bootstrap_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Trad_Method_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user uitable1 (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function volume_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% Ввод данных
volOfSel = str2double(get(handles.volume, 'String'));
if (volOfSel ~= fix(volOfSel) || volOfSel<1)
    errordlg('Ошибка ввода');
else
format long;
set(handles.pushEnter, 'Visible', 'off');
set(handles.uitable1, 'Visible', 'on');

% Кнопка для расчета измеренного значения, СКО и неопределенности
function calculate_Callback(hObject, eventdata, handles)
Y = get(handles.uitable1, 'Data');
if (~ismember(Y,inf))
    errordlg('Ошибка ввода');
else
set(handles.pushCalculate, 'Visible', 'off');
set(handles.mean, 'Visible', 'on');
set(handles.uncert, 'Visible', 'on');
set(handles.axes1, 'Visible', 'on');
set(handles.pushCalculate2, 'Visible', 'off');
set(handles.axX, 'Visible', 'on');
set(handles.axY, 'Visible', 'on');

[Trad1, Tradsam] = Tr (1000, 'mean', Y);
X1 = mean(Trad1);
set(handles.meas, 'String', num2str(X1), 'Visible', 'on');

[Trad2, Tradsam] = Tr(1000, 'var', Y);
X2 = sqrt(mean(bootstat2));
set(handles.error, 'String', num2str(X2), 'Visible', 'on');

histfit(Trad1)
grid on
end
% _____

% функции для метрик
Tradstat = feval(Trfun,Trargs{:});
Tradstat = bootstat(:);
catch ME

```



```

m = message('stats:Tr:BadBootFun');
MEboot = MException(m.Identifier,'%s',getString(m));
ME = addCause(ME,MEboot);
rethrow(ME);
end

% записываем результаты расчета метрик
Tradstat(nboot,1:numel(bootstat)) = Tradstat;

if haveallsamples
    [Tradstat,Tradsam] = internal.stats.parallel.smartForSliceout( ...
        nboot, @loopBody, useParallel, RNGscheme);
else
    bootstat = internal.stats.parallel.smartForSliceout( ...
        nboot, @loopBody, useParallel, RNGscheme);
end

function [weights,options,Trargs] = extractNameValuePairPairs(varargin)

weights = [];
options = statset('Tr');

defSpecialArgs = {'weights' 'options'};
defSpecialValues = {weights options};

if length(varargin)>1
    screen = @(arg) (ischar(arg) && size(arg,1)==1);
    isspecial = cellfun(screen,varargin);
    newOptions = [];
    if any(isspecial)
        firstspecial = find(isspecial,1,'first');
        specialArgs = varargin(firstspecial:end);
        varargin = varargin(1:firstspecial-1);
        [weights,newOptions] ...
            = internal.stats.parseArgs(defSpecialArgs,defSpecialValues,specialArgs{:});
    end
end

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(Текст программы)

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДАННЫХ
КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МОДИФИЦИРОВАННЫМ ТРАДИЦИОННЫМ
МЕТОДОМ

Текст программы

ИНИТ.00002

3 листа

2018

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		132

```

function Mod_Method
char min = 0;
char max = 0;
char String = 0;
    %Создание окна "Second"
    Second = figure('MenuBar', 'None',...
        'Name', 'Programa',...
        'Color', [0.94 0.94 0.94],...
        'Resize', 'off',...
        'Position', [700 400 340 180],...
        'NumberTitle', 'Off');

    %Создание кнопки (Окно: Second)
    pushbutton_vvod = uicontrol('Style', 'pushbutton',...
        'String', 'Ввод',...
        'Position', [20,20,100,20],...
        'Callback', @Vvod);

    %Создание статического текста "Ср. арифметическое:" (Окно:
Second)
        uicontrol('Style', 'Text',...
            'String', 'Ср. арифметическое:',...
            'HorizontalAlignment', 'left',...
            'Position', [20,80,110,20]);
    %Создание статического текста "СКО:" (Окно: Second)
        uicontrol('Style', 'Text',...
            'String', 'Дисперсия:',...
            'HorizontalAlignment', 'left',...
            'Position', [20,50,80,20]);
    %Создание статического текста "Значение СКО" (Окно: Second)
        Cov = uicontrol('Style', 'Text',...
            'String', ' ',...
            'HorizontalAlignment', 'left',...
            'Position', [85,50,80,20]);
    %Создание статического текста "Значение Ср. арифметического"
(Окно: Second)
        Mean = uicontrol('Style', 'Text',...
            'String', ' ',...
            'HorizontalAlignment', 'left',...
            'Position', [135,80,110,20]);

function Vvod(pushbutton_vvod, eventdata)
    Result = GetCoefficients(get(EditCof,'string'));
    y = F(2, Result, min);
    Values = GetValue();
    set(Mean, 'string', mean(Values));
    set(Cov, 'string', cov(Values));
end
end
% скрипт для функции

```

```

function y = F(x, Result, min)
    f = 0;
    for j = 1:length(Result)
        f = f + Result(j)*x^(min);
        min = min + 1;
    end
    y = f;
end
% скрипт для коэффициентов
function Result = GetCoefficients(String)
    Result = 0;
    b = 1;
    count = 0;
    for i = 1:length(String)
        if String(i) == ' '
            count = count + 1;
        end
    end
    for i = 1:length(String) - count
        if String(i) == ' '
            for j = i:length(String)-1
                String(j) = String(j+1);
            end
        end
    end
    j = 1;
    for i = 1:length(String)-count
        if String(i) == ';'
            a = 1;
            Data = '0';
            for k = j:i-1
                Data(a) = String(k);
                a = a + 1;
            end
            Result(b) = str2double(Data);
            j = i+1;
            b = b + 1;
        end;
        a = 1;
        Data = '0';
        for i = j:length(String)-count
            Data(a) = String(i);
            a = a + 1;
        end
        Result(b) = str2double(Data);
    end
end
% скрипт для чисел из файла
function Values = GetValue()
    fid=fopen('c:\Данные.txt');

```

```

b = 1;
Values = 0;
while feof(fid)== 0
    Mas = fgetl(fid);
    j = 1;
    for i = 1:length(Mas)
        if Mas(i) == ' '
            a = 1;
            Data = '0';
            for k = j:i-1
                Data(a) = Mas(k);
                a = a + 1;
            end
            Value(b) = str2double(Data);
            j = i+1;
            b = b + 1;
        end
    end
    a = 1;
    Data = '0';
    for i = j:length(Mas)
        Data(a) = Mas(i);
        a = a + 1;
    end
    Value(b) = str2double(Data);
    b = b + 1;
end
fclose(fid);
Values = Value;
end
end

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(Текст программы)

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДАННЫХ
КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ БУТСТРЕП МЕТОДОМ

Текст программы

ИНИТ.00003

7 листов

2018

					ЮУрГУ – 12.04.01.2018.308-512.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		136

```

function varargout = Bootstrap(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Bootstrap_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Bootstrap_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Bootstrap is made visible.
function Bootstrap_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Bootstrap_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user uitable1 (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% Окно для ввода объема выборки
function volume_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function volume_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% Кнопка ввода данных: делает видимой таблицу ввода данных и невидимым
% текст в поле ввода данных
function enterVolume_Callback(hObject, eventdata, handles)
% Забираем число объема выборки из окна для ввода объема выборки
volOfSel = str2double(get(handles.volume, 'String'));
if (volOfSel ~= fix(volOfSel) || volOfSel<1)
    errordlg('Ошибка ввода');
else
    format long;
    set(handles.pushEnter, 'Visible', 'off');
    set(handles.uitable1, 'Visible', 'on');

% Формируем таблицу для ввода данных
Zero = zeros(1,volOfSel);
Data = true(1,volOfSel);
set(handles.uitable1, 'Data', Zero, 'ColumnEditable', Data);
end
% _____

% Кнопка для расчета измеренного значения и его неопределенности
function calculate_Callback(hObject, eventdata, handles)
Y = get(handles.uitable1, 'Data');
if (~ismember(Y,inf))
    errordlg('Ошибка ввода');
else
    set(handles.pushCalculate, 'Visible', 'off');
    set(handles.mean, 'Visible', 'on');
    set(handles.uncert, 'Visible', 'on');
    set(handles.axes1, 'Visible', 'on');
    set(handles.pushCalculate2, 'Visible', 'off');
    set(handles.axX, 'Visible', 'on');
    set(handles.axY, 'Visible', 'on');

[bootstat1, bootsam] = bootstrp(1000, 'mean', Y);

```



```

X1 = mean(bootstat1);
set(handles.meas, 'String', num2str(X1), 'Visible', 'on');

[bootstat2, bootsam] = bootstrp(1000, 'var', Y);
X2 = sqrt(mean(bootstat2));
set(handles.error, 'String', num2str(X2), 'Visible', 'on');

histfit(bootstat1)
grid on
end
% _____

function [bootstat, bootsam] = bootstrp(nboot,bootfun,varargin)

if nargin<2
    error(message('stats:bootstrp:TooFewInputs'));
end
if nboot<=0 || nboot~=round(nboot)
    error(message('stats:bootstrp:BadNboot'))
end

[weights, options, bootargs] = extractNameValuePairPairs(varargin{:});

[n,booteval] = bootEvalCommand(bootfun,bootargs{:});

[myrand,randargs] = defineRNGcall(RNGscheme, usePool, n, weights);

haveallsamples = (nargout>=2);

if isempty(bootfun)
    bootstat = zeros(nboot,0);
    if haveallsamples
        bootsam = internal.stats.parallel.smartForSliceout( ...
            nboot, @loopBodyEmptyBootfun, useParallel, RNGscheme);
    end
    return
end

% функции для метрик
bootstat = feval(bootfun,bootargs{:});
bootstat = bootstat(:);
catch ME

```

```

m = message('stats:bootstrp:BadBootFun');
MEboot = MException(m.Identifier,'%s',getString(m));
ME = addCause(ME,MEboot);
rethrow(ME);
end

% записываем результаты расчета метрик
bootstat(nboot,1:numel(bootstat)) = bootstat;

if haveallsamples
    [bootstat,bootsam] = internal.stats.parallel.smartForSliceout( ...
        nboot, @loopBody, useParallel, RNGscheme);
else
    bootstat = internal.stats.parallel.smartForSliceout( ...
        nboot, @loopBody, useParallel, RNGscheme);
end

% ресемплируем

function onesample = loopBodyEmptyBootfun(~,~)
    onesample = myrand(randargs{:});
end

function [onebootstat,onebootsam] = loopBody(~,~)
    onesample = myrand(randargs{:});
    tmp = booteval(onesample);
    onebootstat = (tmp(:))';
    if nargout > 1
        onebootsam = onesample;
    end
end

function [myrand,randargs] = defineRNGcall(RNGscheme,usePool,n,weights)
    uuid = RNGscheme.uuid;
    streams = RNGscheme.streams;
    useSubstreams = RNGscheme.useSubstreams;

    if isempty(streams)
        if isempty(weights)
            myrand = @randi;
            randargs = {n,n,1};
        end
    end
end

```

```

else
    myrand = @randsample;
    randargs = {n,n,true,weights};
end
else
    S = streams{1};
    if isempty(weights)
        myrand = @randi;
        if ~usePool || useSubstreams
            % a single stream is in use throughout
            randargs = {S,n,n,1};
        else
            myrand = @(streams,useSubstreams,usePool) ...
                randi(internal.stats.parallel.workerGetValue(uuid),n,n,1);
            randargs = {streams,useSubstreams,usePool};
        end
    else
        if ~usePool || useSubstreams
            % a single stream is in use throughout
            myrand = @randsample;
            randargs = {S,n,n,true,weights};
        else
            myrand = @(streams,useSubstreams,usePool) ...
                randsample(internal.stats.parallel.workerGetValue(uuid),n,n,true,weights);
            randargs = {streams,useSubstreams,usePool};
        end
    end
end
end % -defineRNGcall

function tmp = generalEval(onesample,bootfun,la,scalard,varargin)
db = cell(la,1);
for k = 1:la
    if scalard(k) == 0
        db{k} = varargin{k}(onesample,:);
    else
        db{k} = varargin{k};
    end
end
tmp = feval(bootfun,db{:});
end % -generalEval

```

```

function [n,anonfun] = bootEvalCommand(bootfun,varargin)

% Находим аргументы
la = length(varargin);
if la == 0
    error(message('stats:bootstrp:NotEnoughBootfunArgs'));
end
scalard = zeros(la,1);

n = 1;
for k = 1:la
    [row,col] = size(varargin{k});
    if max(row,col) == 1
        scalard(k) = 1;
    end
    if row == 1 && col ~= 1
        row = col;
        varargin{k} = varargin{k}(:);
    end
    if n>1 && row>1 && row~=n
        error(message('stats:bootstrp:SizeMismatchBootfunArgs'));
    end
    n = max(n,row);
end
if n<2
    error(message('stats:bootstrp:OnlyScalarBootfunArgs'));
end

if la==1 && ~any(scalard)
    X1 = varargin{1};
    anonfun = @(onesample) feval(bootfun,X1(onesample,:));
elseif la==2 && ~any(scalard)
    X1 = varargin{1};
    X2 = varargin{2};
    anonfun = @(onesample) feval(bootfun,X1(onesample,:),X2(onesample,:));
else
    anonfun = @(onesample) generalEval(onesample,bootfun,la,scalard,varargin{:});
end
end %-bootEval

function [weights,options,bootargs] = extractNameValuePairPairs(varargin)

```

```

weights = [];
options = statset('bootstrp');

defSpecialArgs = {'weights' 'options'};
defSpecialValues = {weights options};

if length(varargin)>1
    screen = @(arg) (ischar(arg) && size(arg,1)==1);
    isspecial = cellfun(screen,varargin);
    newOptions = [];
    if any(isspecial)
        firstspecial = find(isspecial,1,'first');
        specialArgs = varargin(firstspecial:end);
        varargin = varargin(1:firstspecial-1);
        [weights,newOptions] ...
            = internal.stats.parseArgs(defSpecialArgs,defSpecialValues,specialArgs{:});
    end
end

```