

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
в г. Нижневартовске

Кафедра «Информатика»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

И.о. зав.кафедрой «Информатика»

к.т.н., доцент

Пономарева / С.Г. Пономарева /

« 30 » МАЯ 2016 г.

## Сравнительный анализ методов обработки экспериментальных данных косвенных измерений

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ- 200100.2016.168.ПЗ ВКР

Консультанты

Экономическая часть

к.э.н., доцент

Проккопьев / А. В. Проккопьев /

« 20 » апреля 2016 г.

Безопасность жизнедеятельности

к.т.н., доцент

Тряпицын / А. Б. Тряпицын /

« 22 » мая 2016 г.

Руководитель работы

к.т.н., доцент

Юрасова / Е.В. Юрасова /

« 30 » мая 2016 г.

Автор работы

студент группы НвФл-431

Серещин / Г.В. Серещин /

« 30 » мая 2016 г.

Нормоконтролер

старший преподаватель

Буйлушкина / Л.Н. Буйлушкина /

« 30 » МАЯ 2016 г.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФИЛИАЛ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
В Г. НИЖНЕВАРТОВСКЕ  
КАФЕДРА «ИНФОРМАТИКА»

НАПРАВЛЕНИЕ 200100.62 Приборостроение

*(шифр и полное наименование направления)*

**УТВЕРЖДАЮ**

И.о. зав. кафедрой «Информатика»  
к.т.н., доцент

 / С.Г. Пономарева /  
*(личная подпись)*  
«05» февраля 2016 г.

## ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу студента

Серицан Григория Валерьевича

1. Тема работы Сравнительный анализ методов обработки экспериментальных данных косвенных измерений

Утверждена приказом ректора университета от «15» апреля 2016 г. № 661

2. Срок сдачи студентом законченного проекта (работы) «30» мая 2016 г.

3. Исходные данные к работе

1) ГОСТ Р 8.736–2011

2) МИ 2083–90

3) Описание измерения емкости методом резонанса

4. Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

1) Аналитический обзор

2) Описание эксперимента по косвенному измерению емкости

3) Сравнительный анализ методов обработки данных косвенных измерений

4) Организационно – экономический раздел

5) Безопасность жизнедеятельности

7. Дата выдачи задания « 20 » января 2016г.

Задание выдал руководитель Е.В. Юрасова

Задание принял к исполнению студент-дипломник Г.В. Серицан

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапа	Отметки о выполнении этапа
Введение	01.02. – 02.02.2016	выполнено
Аналитический обзор	02.02. – 29.02.2016	выполнено
Описание эксперимента по косвенному измерению емкости	01.03.– 15.03.2016	выполнено
Сравнительный анализ методов обработки данных косвенных измерений	15.03.– 30.03.2016	выполнено
Организационно-экономический раздел	01.04.–20.04.2016	выполнено
Безопасность жизнедеятельности	11.05. – 22.05.2016	выполнено
Заключение	22.05. – 23.05.2016	выполнено
Библиографический список	24.05. – 25.05.2016	выполнено
Презентация доклада защиты работы	26.05. – 27.05.2016	выполнено
Оформление ВКР	27.05. – 28.05.2016	выполнено
Рецензирование	28.05. – 30.05.2016	выполнено
Защита работы	10.06.2016	

И.о зав. кафедрой  / С.Г. Пономарева /

*/личная подпись/*

Руководитель работы  / Е.В. Юрасова /

*/личная подпись/*

Студент-дипломник  / Г.В. Серицан /

*/личная подпись/*

## АННОТАЦИЯ

Серицан Г.В. Сравнительный анализ методов обработки экспериментальных данных косвенных измерений. – Нижневартовск: филиал ЮУрГУ, Информатика; 2016, 80 с. 12 ил., библиогр. список – 20 наим.

Выпускная квалификационная работа выполнена с целью проведения исследования, путем сравнительного анализа результатов обработки экспериментальных данных при косвенных некоррелированных измерениях.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы произведены:

- 1) Информационный поиск источников по теме выпускной квалификационной работы.
- 2) Проведен эксперимент для накопления данных.
- 3) Выполнена обработка экспериментальных данных косвенных некоррелированных измерений методом линеаризации, методом приведения и методом бутстреп.
- 4) Произведен сравнительный анализ результатов обработки экспериментальных данных.
- 5) Рассчитаны затраты на проведение исследования.
- 6) Рассмотрены проблемы безопасности жизнедеятельности, связанные с работой оператора с измерительным оборудованием и компьютером.

<b>200100.2016.168 ПЗ</b>			
	№ докум.	Дата	
Разраб.	Серицан Г.В.	<i>[Подпись]</i>	30.05.16
Проверил	Юрасова Е.В.	<i>[Подпись]</i>	30.05.16
Н.контр.	Буйлушкина Л.Н.	<i>[Подпись]</i>	30.05.16
Утвердил	Понимарова С.Г.	<i>[Подпись]</i>	30.05.16
Сравнительный анализ методов обработки экспериментальных данных косвенных измерений			
Лит.	Лист	Листов	
20	6	80	
Филиал ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) в г.Нижневартовске кафедра «Информатика»			

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	11
1.1 Методы обработки данных косвенных измерений.....	11
1.2 Перспективные разработки в области обработки данных некоррелированных косвенных измерений.....	24
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО КОСВЕННОМУ ИЗМЕРЕНИЮ ЕМКОСТИ.....	30
2.1 Описание метода резонанса.....	30
2.2 Описание экспериментальной установки.....	34
2.3 Обработка данных результатов измерения аргумента косвенного измерения.....	42
3 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	53
3.1 Обработка данных косвенного измерения традиционным методом.....	53
3.2 Обработка данных косвенного измерения методом приведения.....	55
3.3 Обработка данных косвенного измерения методом бутстрепа.....	59
3.4 Итоговая таблица.....	61
4 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	63
4.1 Определение затрат на проведение исследования.....	63
5 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	66
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	66
5.2 Нормирование параметров опасных и вредных факторов.....	68
5.3 Условия труда.....	72
5.4 Безопасность производственных процессов и оборудования.....	72
5.5 Пожарная безопасность.....	74
5.6 Эргономика.....	75
5.8 Режимы труда и отдыха.....	77

										Лист
										7
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Лп	200100.2016.168 ПЗ					

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....79

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....80

					<b>200100.2016.168 ПЗ</b>	Лист
						8
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Лп</i>		

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие экономики Российской Федерации нуждается в повышении конкурентоспособности отечественных товаров и услуг на мировом рынке. В современном мире низкая цена на товар не обеспечивает успеха в продажах, в свою очередь определяющим условием выбора потребителя все чаще становится качество. Очевидно, что в разных отраслях предъявляются разные требования к качеству выпускаемых товаров. Это означает, что качеством продукции и услуг необходимо управлять, анализировать и оценивать их показатели, варьировать влияющими на них процессами. Все эти вопросы рассматриваются метрологией.

Согласно РМГ 29-2013 [1], метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. В современных условиях измерения играют огромную роль. Наука, промышленное производство, экономика и коммуникации не могут существовать без измерений. Результаты измерительных операций используются для обеспечения качества выпускаемой продукции, безаварийной работы транспорта, обоснования медицинских и экологических диагнозов, анализа информационных потоков.

В условиях острой конкурентной борьбы за первенство на международных и российских рынках возрастают требования, предъявляемые к качеству выпускаемых изделий, и появляется очередная задача – повышение точности измерений. Точность измерений – основной показатель качества и степени совершенства измерений. Точность измерений определяется погрешностью измерений. По мере совершенствования средств измерений погрешности измерения постоянно снижаются. Однако они неизбежны, и истинное значение измеряемой величины без погрешности определить невозможно. Теоретические пределы снижения погрешности в настоящее время определяются дискретностью материи и энергии.

Быстрыми темпами развивается теория точности измерений. Основной задачей этой теории является оценка степени приближения результата измерения к

истинному значению измеряемой величины. Общая теория точности измерений включает:

1) 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;

2) 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.

Глубокая математическая обработка результатов наблюдений относится к методам теории точности апостериори.

По виду уравнения измерения последние классифицируются на прямые, косвенные, совместные и совокупные. Косвенные измерения – это измерения, при которых искомую величину определяют на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям [1].

Получение надежных числовых оценок значений исследуемых физических величин является непростой задачей из-за погрешностей, возникающих в результате измерений. Для оценки погрешности результатов косвенных измерений существует множество методов, такие как: метод линеаризации, метод приведения, метод бутстрап, метод трансформации, метод Монте-Карло.

В данной работе погрешность результатов экспериментальных данных косвенного измерения обрабатывались тремя различными методами: метод линеаризации, метод приведения, метод бутстрап. Проведен сравнительный анализ этих методов и сделаны выводы касательного каждого из них.

# 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

## 1.1 Методы обработки данных косвенных измерений

### 1.1.1 Метод МИ 2083-90

Для косвенных измерений при нелинейных зависимостях и некоррелированных погрешностях измерений аргументов используют метод линеаризации.

Метод линеаризации предполагает разложение нелинейной функции в ряд Тейлора:

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

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

$\partial f / \partial a_i$  – первая производная от функции  $f$  по аргументу  $a_i$ ;

$\Delta a_i$  – отклонение результата измерения аргумента  $a_i$ , от его среднего арифметического;

$R$  – остаточный член:

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

Метод линеаризации допускается использовать, только в тех случаях, когда остаточным членом  $R$  можно пренебречь.

Остаточным членом пренебрегают, если

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

где  $S^2(\tilde{a}_i)$  – среднее квадратическое отклонение случайных погрешностей результата измерения  $a_i$ -го аргумента.

Отклонения  $\Delta a_i$  при этом должны быть взяты из полученных значений погрешностей и такими, чтобы они максимизировали выражение для остаточного члена  $R$ .

Результат измерения:

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

Среднее квадратическое отклонение (далее – СКО) случайной погрешности результата косвенного измерения  $S(\tilde{A})$ :

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

Доверительные границы случайной погрешности результата косвенного измерения при условии, что распределения погрешностей результатов измерений аргументов не противоречат нормальным распределениям:

$$\varepsilon(p) = t_q \cdot S(\tilde{A}),$$

где  $t_q$  – коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности  $P=1-q$  и числу степеней свободы  $f_{эф}$ :

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

где  $n_i$  – число измерений при определении аргумента  $a_i$ .

Вместо коэффициентов  $b_1, b_2, \dots, b_m$  подставляют первые производные  $\partial f/\partial a_1, \partial f/\partial a_2, \dots, \partial f/\partial a_m$ , соответственно.

Границы неисключенной систематической погрешности результата косвенного измерения вычисляют следующим образом.

Если неисключенные систематические погрешности результатов измерений аргументов заданы границами  $\theta_i$ ; то доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата косвенного измерения  $\Theta(p)$  (без учета знака) при вероятности  $P$ :

$$\Theta(p) = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \cdot \theta_i^2},$$

где  $k$  – поправочный коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом  $m$  составляющих  $\theta_i$ .

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

При доверительной вероятности  $P=0,99$  поправочный коэффициент принимают равным 1,4, если число суммируемых составляющих  $m > 4$ . Если же число составляющих  $m \leq 4$ , то поправочный коэффициент  $k \leq 1,4$ ; более точное значение  $k$  можно найти с помощью графика зависимости  $k = k(l, m)$ , где  $m$  - число суммируемых составляющих (аргументов);  $l$  - параметр, зависящий от соотношения границ составляющих.

На рисунке 1.1 дается зависимость  $k$  от  $l$  при  $m = 2$ , кривая 2 - при  $m = 3$ , кривая 3 - при  $m = 4$ .

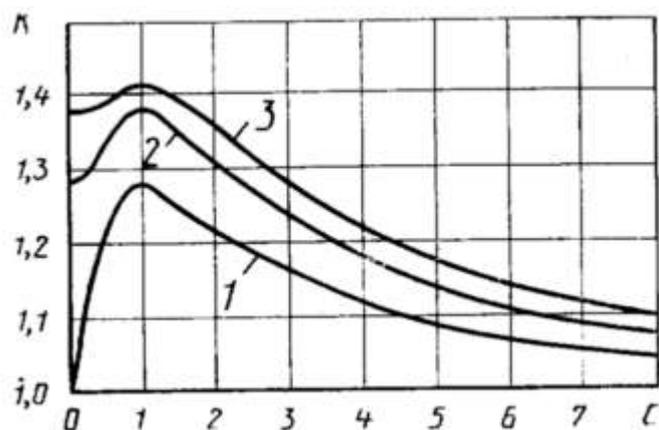


Рисунок 1.1 – Значения коэффициентов  $k$

Для нахождения  $k$  границы составляющих  $b_i \Theta_i$ , располагают в порядке возрастания:  $b_1 \Theta_1 \leq b_2 \Theta_2 \leq b_3 \Theta_3 \leq b_4 \Theta_4$  и вычисляют отношения границ:  $l = b_2 \Theta_2 / b_1 \Theta_1$ ,  $l_2 = b_m \Theta_m / b_{m-1} \Theta_{m-1}$ . Затем по графику определяют значения  $k_1 = k(l_1, m)$  и  $k_2 = k(l_2, m)$ ; в качестве поправочного коэффициента принимают наибольшее из  $k_1$  и  $k_2$ .

Погрешность, возникающая при использовании формулы (8) для суммирования неисключенных систематических погрешностей, не превышает 5 %

Если границы неисключенных систематических погрешностей результатов измерений аргументов заданы доверительными границами, соответствующими вероятностям  $P_i$ , (границы неисключенных систематических погрешностей результатов измерений аргументов вычислены по формуле (8)), то границы неисключенной систематической погрешности результата косвенного измерения для вероятности  $P$  вычисляют (без учета знака) по формуле:

$$\Theta(P) = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \cdot \frac{\Theta_i^2(P)}{k_i^2}}$$

Для вероятности  $P = 0,95$   $k_i = 1,1$ ; для  $P = 0,99$  значения коэффициентов  $k_i$  (см. рисунок 1).

Погрешность результата косвенного измерения оценивают на основе композиции распределений случайных и неисключенных систематических погрешностей.

Если

$$\frac{\theta(P)}{S(\tilde{A})} > 0,8,$$

то за погрешность результата косвенного измерения принимают неисключенную систематическую составляющую погрешности измерения;

Если

$$\frac{\theta(P)}{S(\tilde{A})} < 0,8,$$

то за погрешность результата косвенного измерения принимают случайную составляющую погрешности измерения;

Если

$$0,8 \leq \frac{\theta(P)}{S(\tilde{A})} \leq 8,$$

то доверительную границу погрешности результата косвенного измерения  $\Delta(P)$  вычисляют (без учета знака) по формуле:

$$\Delta(P) = K(\varepsilon(P) + \theta(P)),$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности и от отношения  $\Theta(P)/S(\tilde{A})$ .

Значения коэффициента  $K$  в зависимости от отношения  $\Theta(P)/S(\tilde{A})$  для вероятности  $P = 0,95$  и  $P = 0,99$  представлены в МИ 2083–90 [2].

### 1.1.2 Метод приведения

Наряду с методом МИ 2083–90 [2] (метод линеаризации) для определения результатов косвенного измерения и его погрешности используют метод приведения, который предполагает наличие ряда отдельных значений измеряемых аргументов, полученных в результате многократных измерений. Этот метод можно также применять при неизвестных распределениях погрешностей измерений аргументов.

По своей сути метод основан на приведении ряда отдельных значений косвенно измеряемой величины к ряду прямых измерений. Получаемые сочетания отдельных результатов измерений аргументов подставляют в выражение и вычисляют отдельные значения измеряемой величины  $A$ :  $A_1, \dots, A_j, \dots, A_L$ .

Результат косвенного измерения  $A$  вычисляют по формуле:

$$\tilde{A} = \sum_{j=1}^L \frac{A_j}{L},$$

где  $L$  – число отдельных значений измеряемой величины;

$A_j$  –  $j$ -е отдельное значение измеряемой величины, полученное в результате подстановки  $j$ -го сочетания согласованных результатов измерений аргументов в формулу (11).

Среднее квадратическое отклонение случайных погрешностей результата косвенного измерения:

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

Доверительные границы случайной погрешности для результата измерения:

$$\Delta = T \cdot S(\tilde{A}),$$

где  $T$  – коэффициент, зависящий от вида распределения отдельных значений измеряемой величины  $A$ , выбранной доверительной вероятности.

### 1.1.3 Метод трансформации

Алгоритм этого метода 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  $j$ -й входной величины:

$$y_i = f(x_{1i}, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m), i = 1, 2, \dots, n_1$$

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 ( $m$ ). Все они объединяются в одну группу, число членов которой равно:

$$N = \sum_{j=1}^m n_j$$

Полученная группа данных обрабатывается как группа наблюдений при прямых измерениях. В оценке неопределенности результата учитывается как разброс членов объединенной группы, так и неточность оценок аргументов.

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, в 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 данной зависимости.

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

#### 1.1.4 Метод Бутстреп

Стремительно растущая производительность вычислительных средств, порождает острый интерес к статическим методам, интенсивно использующим компьютеры. Одним из таких методов является так называемый "бутстреп", предложенный в 1977 г. Б. Эфроном из Стэндфордского университета (США).

Метод основан на случайной выборке измеренных значений входных величин с возвращением. Пусть значение величины  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m)$  определяется по результатам измерения входных величин  $x_{ji}$  ( $j$  – номер входной величины,  $i$  – номер члена в выборке,  $i = 1, 2, \dots, n_j$ ). Выбирая случайным образом, значение номера члена в каждой выборке, рассчитываем соответствующую реализацию значения измеряемой величины. Повторяя эти вычисления,

произвольное число  $N$  раз, получаем массив независимых значений измеряемой величины (объемом  $N$ ), который позволяет построить функцию распределения этих реализаций и вычислить ее параметры – оценки математического ожидания, стандартного отклонения и границ доверительного интервала.

Шаг 1: Получение большого количества выборок случайных данных из изучаемой совокупности. В качестве исходных данных берется выборка, полученная эмпирическим путем. На основе одной имеющейся выборки генерируется множество псевдовыборок того же размера, состоящих из случайных комбинаций исходного набора элементов. При этом используется алгоритм "случайного выбора с возвращением, т.е. извлеченное число снова помещается в выборку, прежде чем выбирается следующее наблюдение. В результате некоторые члены в каждой отдельной псевдовыборке могут повторяться два или более раз, тогда как другие – отсутствовать. На рисунке 1.2 представлены три псевдовыборки из исходного набора шести наблюдений. На практике же генерируются сотни или тысячи псевдовыборок.

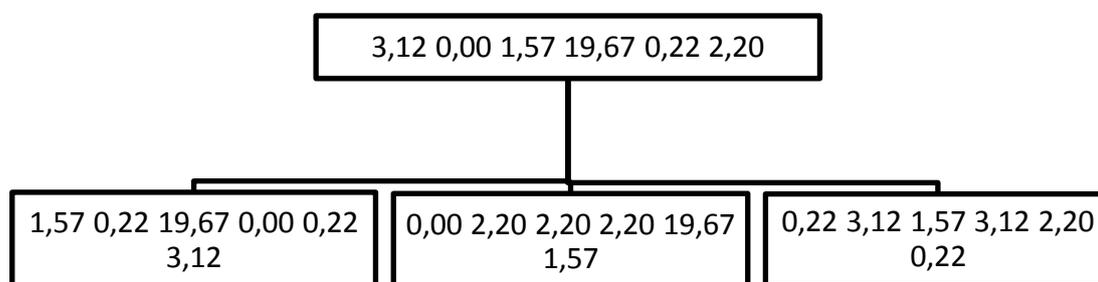


Рисунок 1.2 – Идея бутстрепа. Верхний блок включает эмпирическую выборку. Нижние блоки являются псевдовыборками, случайно составленными из элементов исходной выборки.

Шаг 2: Построение бутстреп-распределения оцениваемой величины. Для каждой псевдоповторности, полученной на шаге 1, рассчитывается значение анализируемой характеристики – среднего, медианы, стандартного отклонения и др. Имея это множество данных, строят гистограмму значений тестируемого показателя, отражающую закономерности его вариации, что дает возможность

оценить доверительные интервалы и другие выборочные характеристики анализируемой величины.

Значения среднего:

$$\bar{x}_{boot} = \frac{1}{b} \sum_{j=1}^b \bar{x}^{*j},$$

где  $b$  – количество итераций;

$\bar{x}^{*j}$  – частные величины среднего.

Стандартная ошибка бутстрепа:

$$se_{boot} = \left( \frac{1}{b-1} \sum_{j=1}^b (\bar{x}^{*j} - \bar{x}_{boot}) \right)^{\frac{1}{2}}$$

На основе бутстрепированных данных, строят гистограмму частотного распределения  $\bar{x}^{*j}$  и находят границы доверительного интервала истинного значения результата косвенного измерения при заданном уровне доверительной вероятности.

Генерирование повторных выборок создает новые данные. Но в бутстрепе эти данные используются для получения распределения средних, которые в свою очередь позволяют оценить, как изменилось бы выборочное среднее. Это позволяет проанализировать дрейф среднего и меру его вариаций, опираясь на статистические формулы (16) и (17) и не полагаться на то, что ошибка среднего равна  $s_m = s/\sqrt{n}$ .

### 1.1.5 Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло (далее – ММК) – это численный метод решения математических задач при помощи моделирования случайных величин, предложенный в 1949 году американскими математиками Дж. Нейманом и С. Уламом. Метод был известен и ранее, но широкое применение он получил после появления электронно-вычислительной машины (далее – ЭВМ).

Метод Монте-Карло является эффективным инструментом оценивания характеристик случайных погрешностей косвенных, совокупных и совместных измерений при любых законах распределения плотности вероятностей погрешности результатов прямых измерений.

Суть метода состоит в синтезе математической модели объекта исследования в виде случайной величины, генерации ряда независимых реализаций этой случайной величины и определении статических характеристик полученной выборки. Реализация метода Монте-Карло приведена на рисунке 1.3.

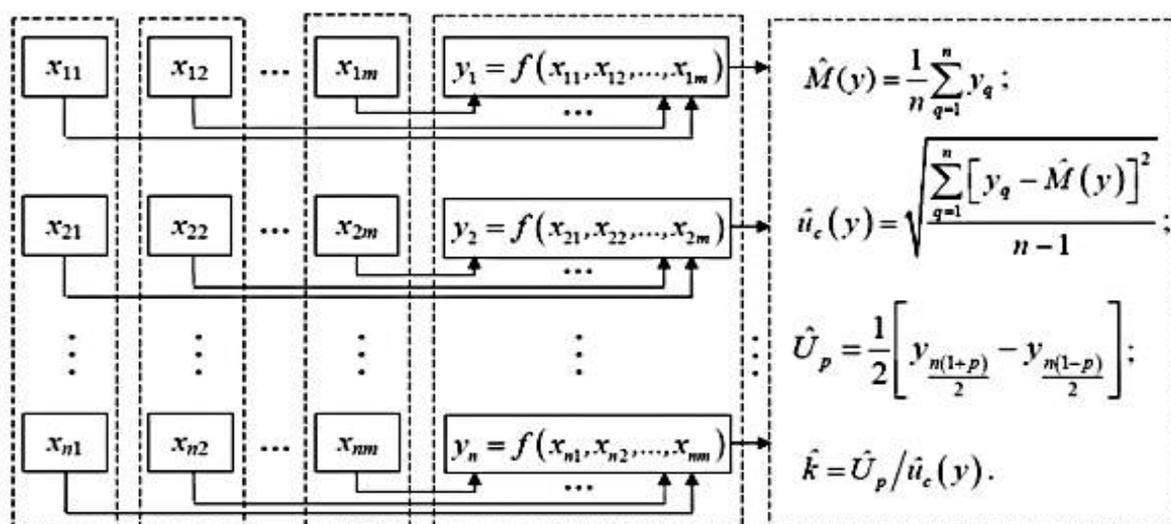


Рисунок 1.3 – Реализация метода Монте-Карло

Для применения метода Монте-Карло необходимо выбрать число испытаний  $M$ , то есть число наблюдений выходных значений модели. Число может выбираться до проведения испытаний, но тогда будет исключена возможность

управления точностью результатов, полученных с помощью данного метода. Рекомендуется выбирать значение  $M$  достаточно большим по сравнению с  $1/(1-p)$ .

После выбора числа испытаний  $M$  формируют  $M$  векторов  $x_r$ ,  $r = 1, \dots, M$  в соответствии с плотностями распределения вероятностей  $g_{x_i}(\xi_i)$  для  $N$  входных величин  $X_i$  или, если это необходимо, из многомерной плотности распределения  $g_x(o)$ .

Модель оценивается для каждого из  $M$  извлечений из функции плотности вероятности (далее – ФПВ) для  $N$  входных величин. Конкретнее, необходимо обозначить  $M$  извлечений через  $x_1, \dots, x_m$ , где  $r$ -е значение  $x_r$  состоит из случайных значений  $x_{1,r}, \dots, x_{N,r}$ , а  $x_{i,r}$  – случайное значение из ФПВ для  $X_i$ . Тогда значения модели представляются в виде:

$$y_r = f(x_r), r = 1, \dots, M.$$

Дискретное представление  $G$  функции распределения  $GY(\eta)$  для выходной величины  $Y$  может быть получено следующим образом:

а) необходимо рассортировать значения модели  $y_r$ ,  $r=1, \dots, M$ , полученные по ММК, в неубывающем порядке. Обозначить рассортированные значения модели как  $y(r)$ ,  $r=1, \dots, M$ ;

б) если необходимо, создать возмущения для любых дублирующих значений модели  $y(r)$  так, чтобы конечный полный набор  $y(r)$ ,  $r=1, \dots, M$ , формировал строго возрастающую последовательность;

в) полученная последовательность  $y(r)$ ,  $r=1, \dots, M$  определяет  $G$ .

Если выходная величина  $Y$  будет рассматриваться как входная величина при оценивании неопределенности другого измерения, то выборку из ее распределения легко получить случайным (равновероятным) выбором значений из  $y(r)$ ,  $r=1, \dots, M$ .

Последовательность  $y(r)$  (или  $y_r$ ) может быть скомпонована в гистограмму (при подходящей ширине ячеек) и представлять собой частотное распределение, которое, при условии, что оно нормировано, чтобы иметь единичную площадь, обеспечивает приближение к ФПВ  $gY(\eta)$  для  $Y$ . Вычисления характеристик

распределения обычно проводятся не в терминах этой гистограммы, разрешение которой зависит от выбора ширины ячеек, а в терминах  $G$ . Тем не менее, гистограмма может быть полезна для понимания природы ФПВ, например степени ее асимметрии.

В ряде случаев полезна аппроксимация  $GY(\eta)$  непрерывной функцией.

В качестве оценки выходной величины  $Y$  используется выборочное среднее:

$$\tilde{y} = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M y_r,$$

а в качестве оценки ее стандартной неопределенности  $u(y)$  – выборочное стандартное отклонение  $u(\tilde{y})$ :

$$u^2(\tilde{y}) = \frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (y_r - \tilde{y})^2.$$

Интервал охвата для входной величины. Пусть  $q=pM$ , если  $pM$  – целое число. В противном случае в качестве  $q$  можно выбрать целую часть  $(pM+1/2)$ . Тогда  $[y_{low}, y_{high}]$  – это 100р % интервал охвата для  $Y$ , где для любого  $r$  из ряда  $r=1, \dots, (M - q), y_{low} = y(r)$  и  $y_{high} = y(r+q)$ . Вероятностно симметричный 100р% интервал охвата можно получить, взяв  $r=(M-q)/2$ , если  $(M-q)/2$  — целое число,  $r=int[(M-q+1)/2]$  – в противном случае.

Для нахождения наименьшего 100р% интервала охвата задается определение  $r^*$ , чтобы, что для  $r=1, \dots, M-q$  выполнялось неравенство:

$$y(r^* + q) - y(r^*) \leq y(r + q) - y(r).$$

## 1.2 Перспективные разработки в области обработки данных некоррелированных косвенных измерений

В настоящее время активно разрабатываются системы бессенсорной диагностики и контроля магнитных и механических свойств электромагнитных механизмов с обнаружением неисправностей. В работе «Применение метода косвенного определения Вебер-Амперных характеристик в автоматизированной системе бессенсорной диагностики электромагнитных механизмов» [3] описывается новый метод косвенного определения вебер-амперных характеристик с изменяющейся составляющей сопротивления обмотки электромагнитного механизма в зависимости от тепловой энергии. Объясняются принципы бессенсорной диагностики электромагнитных механизмов. Описывается программное обеспечение для автоматизированной системы бессенсорной диагностики электромагнитных механизмов, которое определяет вебер-амперные характеристики по трем способам интерполяции функции изменения составляющей сопротивления обмотки (постоянное, линейное, в зависимости от выделяемого тепла).

Преимуществом таких систем является то, что первичным источником информации служит собственная обмотка электромагнитного механизма, что позволяет определять вебер-амперные характеристики косвенным методом. Такой подход позволит повысить точность определения вебер-амперных характеристик электромагнитных механизмов.

Метод косвенного определения вебер-амперных характеристик электромагнитных механизмов был экспериментально проверен на электромагните Staiger, при этом были измерены базовые значения активной составляющей сопротивления. Измерения проводились цифровым мультиметром. Результаты показали, что предложенный алгоритм обеспечивает повышение точности за счет снижения погрешности, вызванной изменением сопротивления обмотки.

В работе «Сравнительная оценка двух методов косвенных измерений разности расходов теплоносителя» [4] поднимается вопрос важности обеспечения достоверности результатов измерений при решении задач технологического и коммерческого учета тепла и теплоносителей. В этих областях недостоверные результаты являются источником нештатных и аварийных ситуаций при технологических измерениях, которые существенно влияют на финансовые отношения между поставщиком и потребителем энергоресурсов при коммерческих измерениях. В работе сравниваются два метода косвенных измерений: стандартный метод и метод косвенных измерений разности расходов с использованием двух расходомеров, установленных в подающем и обратном трубопроводах систем - дифференциальный метод, предложенный А.Г. Лупеем. Первым критерием сравнительного анализа является точность результатов косвенных измерений. Равноточные результаты сравниваются по практической применимости. Производя измерения погрешности разности расходов стандартным методом, автор пришёл к следующим выводам.

Безусловным преимуществом дифференциального метода является то, что при его использовании погрешность измерения не зависит от величины измеряемого расхода и не может превышать максимальную (по модулю) погрешность расходомеров (поскольку модуль среднего арифметического двух чисел не может превышать модуль большего из них). В то же время погрешность измерения стандартным методом зависит от величины (а точнее соотношения) измеряемых расходов и стремится к бесконечности с уменьшением степени открытости системы. Все это определяет сферу предпочтительного применения дифференциального метода. Если первоочередным требованием пользователя являются измерения разности расходов с погрешностью в пределах погрешностей измеряемых приборов, то следует остановиться на дифференциальном методе. Однако при выполнении определенных условий стандартный метод может обеспечить лучший, по сравнению с дифференциальным методом, результат. Эти условия сводятся к следующему. Во-первых, необходимо выбирать пары

расходомеров с погрешностями одного и того же знака. Во-вторых, в подающий трубопровод следует устанавливать расходомер с меньшей (по модулю) погрешностью, а в обратный – с большей. Представляется, что выполнение этих условий не является трудноразрешимой задачей. И если эта задача будет решена, то целесообразно использовать малозатратный (по сравнению с дифференциальным) стандартный метод измерения разности расходов теплоносителя.

В работе «Использование метода приведения при обработке результатов косвенных измерений» [5] рассматриваются вопросы обработки результатов косвенных измерений при наличии корреляционной зависимости между аргументами номинальной нелинейной функции преобразования средства измерений. Исследование проводится сравнением результатов, полученных методом приведения и методом Монте-Карло, для некоторых сочетаний видов функций плотности распределения вероятностей и коэффициентов корреляции.

Авторы утверждают, что при оценивании неопределенности косвенных измерений, более точным является метод Монте-Карло. Однако более простым методом оценивания неопределенности зависимых косвенных измерений является метод приведения, другим достоинство которого является отсутствие необходимости вычисления коэффициента корреляции.

Для оценивания неопределенности измерений проводилось моделирование результатов зависимых косвенных измерений с многократными наблюдениями. Моделирование проводилось для уравнений  $Y = \frac{X_1}{X_2}$ ,  $Y = X_1 X_2$ ,  $Y = \sqrt{X_1 X_2}$ ,  $Y = X_1 \sqrt{X_2}$  в предположении нормальной функции плотности распределения вероятностей величин  $X_1$  и  $X_2$ . Результаты зависимых косвенных многократных измерений обрабатывались методом приведения по методике МИ2083-90, а затем проводилось сравнение с результатами обработки измерений методом Монте-Карло.

В результате анализа и обработки, полученных данных авторы делают выводы о том, что оценка результата измерения, полученная методом приведения, совпадает с оценкой, полученной методом Монте-Карло, а ширина доверительного интервала, полученная методом приведения, несколько шире при той же доверительной вероятности  $p=0,95$ .

В работе «Сравнительный анализ методов обработки экспериментальных данных при косвенных некоррелированных измерениях» [6] рассмотрены различные подходы к оцениванию неопределённости косвенных некоррелированных измерений: традиционный, Монте-Карло, трансформации, перебора, бутстреп. Проведен анализ этих подходов. Результаты применения всех методов иллюстрируются примером измерения плотности тела.

Анализируя методы обработки экспериментальных данных при косвенных некоррелированных измерениях, авторы дают сравнительные оценки. В результате анализа авторы приходят к следующим выводам:

Результаты измерений, полученные разными методами, показали практически одно и то же значение измеряемой величины. Это объясняется малыми неопределенностями измерения массы и объема, при которых нет заметного смещения результата измерения плотности.

Наибольшее значение расширенной неопределенности показал метод Монте-Карло, что объясняется не полным соответствием экспериментальных данных принятому для их описания распределению Стьюдента.

Статистическая надежность методов обработки экспериментальных данных зависит от точности оценивания дисперсии распределения наблюдений, выполненных при измерении.

В качестве показателя надежности предложено отношение стандартного отклонения оценки дисперсии распределения к ее истинному значению. При нормальном распределении это отношение зависит только от числа членов распределения.

Анализ показал, что наиболее надежными являются методы Монте-Карло и бутстреп. Это объясняется тем, что эти методы позволяют получить на выходе

распределения с неограниченным числом членов. Но по этой же причине количественный показатель надежности к ним не применим. Из методов с физически ограниченным числом членов наиболее надежным оказался метод перебора.

Метод Монте-Карло и бутстреп-процедура легко реализуются компьютере. Для распространения этих методов следует разработать и стандартизовать соответствующие специализированные программные средства.

В работе «Неопределенность измерения температуры и разности температур с учетом корреляции» [7] автор решает задачу повышения точности расчета неопределенности измерения температуры, производящегося рабочим термометром сопротивления с индивидуальной градуировкой. Описана модель, в которой учитывается, что поверка в градуировочных точках осуществляется с помощью одинакового измерительного оборудования, что, в свою очередь, приводит к корреляции неопределенностей поверки в разных точках. Автор с помощью функции Каллендра переводит неопределенности, присущие градуировке термометров сопротивления в эквивалент сопротивления, оставляя фиксированными значения температур. Таким образом, переменные функции представляются как суммарные стандартные неопределенности. Коэффициенты корреляции отражают взаимозависимость между результатами измерений, которая основана на том, что используется одна и та же измерительная аппаратура и образцовый термометр. Вычисления проводились с учетом корреляции и без ее учета. В результате сделаны следующие выводы: в случае превышения суммарных коррелированных неопределенностей над некоррелированными предложено использовать линейную интерполяцию для получения неопределенностей в интервале; для выражения неопределенности разности температур, измеренной двумя термометрами, градуированными с помощью одной и той же аппаратуры необходимо учитывать корреляцию, что снизит суммарную неопределенность разности в несколько раз.

Выводы по разделу один:

В данном разделе выпускной квалификационной работы был произведен обзор основных методов обработки данных косвенных измерений, приведены алгоритмы расчета погрешностей косвенных измерений по каждому методу.

Рассмотрены перспективные исследования в области обработки данных некоррелированных измерений. Проведенный информационный поиск показал, что обработка данных косвенных измерений выполняется различными методами, поэтому актуально проведение исследования путем сравнительного анализа результатов измерений косвенного измерения при его получении различными методами.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Провести эксперимент для накопления данных.
- 2) Выполнить обработку экспериментальных данных косвенных некоррелированных измерений методами линеаризации, приведения и бутстреп.
- 3) Произвести сравнительный анализ результатов обработки экспериментальных данных.

## 2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО КОСВЕННОМУ ИЗМЕРЕНИЮ ЕМКОСТИ

### 2.1 Описание метода резонанса

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 (далее – 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.

Резонансный метод измерения параметров сосредоточенных элементов реализуется в измерителях добротности – куметрах. Упрощенная структурная схема прибора, представленная на рисунке 2.1, 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.

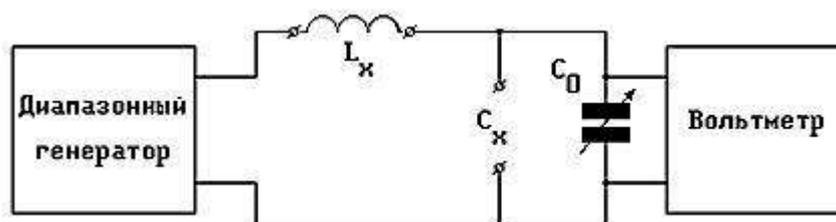


Рисунок 2.1 – Структурная схема метода резонанса

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:

- 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 индуктивности  $L_x$  возможны два варианта применения метода. Для малых значений индуктивности, когда на рабочей частоте  $f$  выполняется условие:

$$\frac{1}{(2\pi f)^2 C_{0max}} < L_x < \frac{1}{(2\pi f)^2 C_{0min}},$$

где  $C_{0max}$  и  $C_{0min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения емкости рабочего конденсатора, исследуемую катушку включают в измерительную схему последовательно. После этого настраивают контур в резонанс (момент настройки определяется по максимуму показаний вольтметра) и фиксируют резонансное значение емкости рабочего конденсатора  $C_1$ . Действующее значение индуктивности рассчитывается по выражению:

$$L_x = \frac{1}{(2\pi f)^2 C_1}.$$

Если же индуктивность велика и

$$L_x > \frac{1}{(2\pi f)^2 C_{0min}},$$

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:

$$L_x = \frac{1}{(2\pi f)^2(C_2 - C_1)}.$$

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.

## 2.2 Описание экспериментальной установки

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы для получения данных для обработки была реализована экспериментальная установка, представленная на рисунке 2.2, включает в себя следующие меры и средства измерения:

- катушка индуктивности типа P536, служащая для создания резонанса в измерительном контуре;
- магазин емкости P5025, являющийся объектом исследования;
- магазин сопротивления измерительный P33, создающий нагрузку в схеме;
- осциллограф GOS-620, предназначенный для настройки измерительного контура на максимальный резонанс (индикатор резонанса);
- генератор SFG 71003 – измерение частоты, генерация высоких частот.

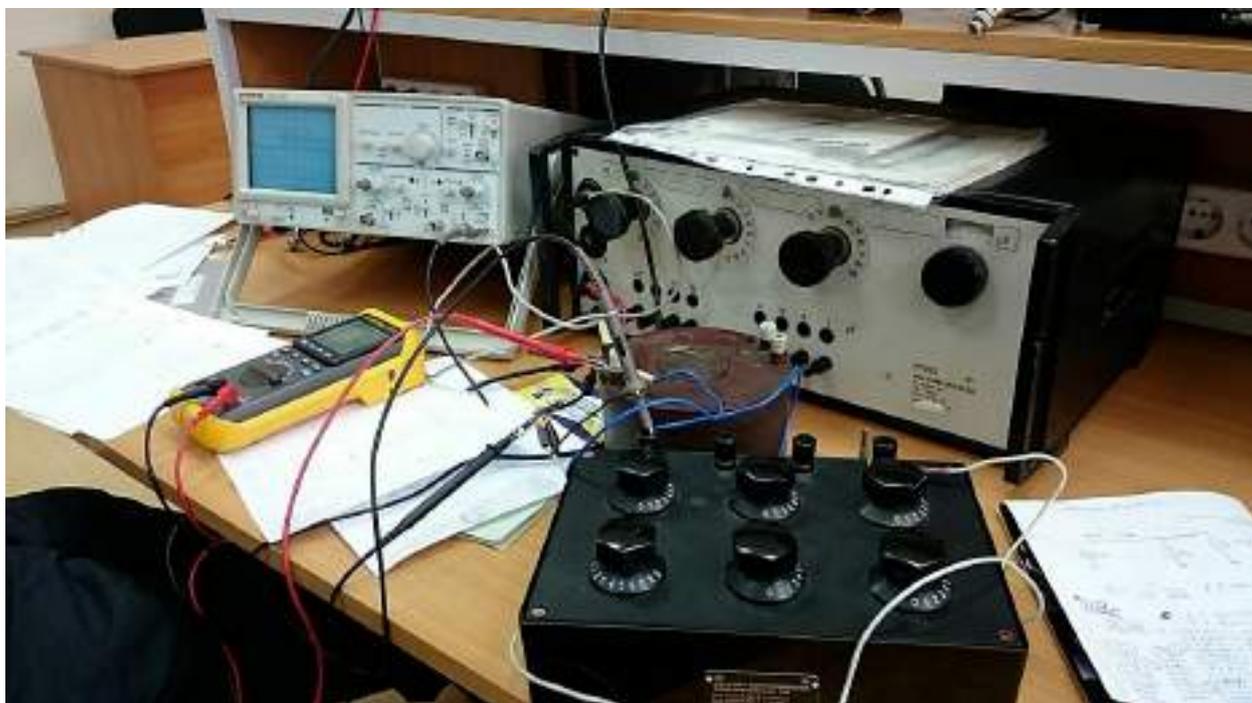


Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка

Схема соединения для измерения емкости по методу резонанса представлена на рисунке 2.3

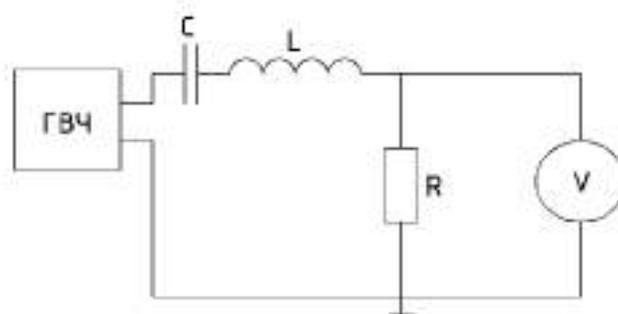


Рисунок 2.3 – Схема соединения для измерения емкости по методу резонанса,

где ГВЧ – генератор высоких частот;

L – Катушка индуктивности;

C – измеряемый магазин емкости;

V – Осциллограф;

R – Магазин сопротивления.

Теперь, когда известно общее устройство экспериментальной установки рассмотрим более подробно ее составные части, а именно, используемые средства измерения и меры.

### 2.2.1 Катушка индуктивности P536

Катушка индуктивности типа P536, представленная на рисунке 2.4, выполняется в виде обмоток из медной проволоки на изоляционном каркасе. Катушка взаимной индуктивности P536 по своему устройству аналогична катушке индуктивности, отличается лишь только наличием второй обмотки, причем номинальное значение индуктивности каждой из обмоток равняется значению их взаимной индуктивности.

Основные технические метрологические характеристики катушки индуктивности P536:

- индуктивность  $M=0,001$  Гн;
- максимальное напряжение  $J_{max}=3$  А;
- $L1=0,0021$  Гн;

- $R1=0,51 \text{ Ом};$
- $L2=0,0022 \text{ Гн};$
- $R2=0,52 \text{ Ом}.$



Рисунок 2.4 – Катушка взаимной индуктивности P536

### 2.2.2 Магазин емкости P5025

Магазин емкости P5025, приведенные на рисунке 2.5 предназначен для применения в качестве меры или элементов измерительных цепей переменного тока частоты от 40 Гц до 60 кГц.



Рисунок 2.5 – Магазин емкости P5025

Магазин состоит из шести блоков:

- блоки Б1, Б2, Б3 являются декадами 0,1-0,9; 0,01-0,09; 0,001-0,009 мкФ со ступенчатым изменением емкости и состоят из конденсаторов ССГ и рычажного переключателя;

- блок Б4 является декадой 0,0001-0,0011 мкФ с плавным изменением емкости (конденсатор с воздушным диэлектриком);

- блоки Б5, Б6 являются декадами 1-10 и 10-100 мкФ со ступенчатым изменением емкости;

Для подключения декад 0,0001-0,0011; 0,001-0,009; 0,01-0,09 и 0,1-0,9 мкФ в измерительную схему служат зажимы «1» и «2'», декад 1-10 и 10-100 мкФ зажимы «1» и «2».

Основные технические характеристики прибора Р5025:

- максимальная ёмкость: 111,0001 мкФ;
- число декад: 6;
- Класс точности:
- 0,1 (для декад 0, 0001-0011, 0,001-0,009, 0,01-0,09 и 0,1-0,9 мкФ);
- 0,5 – (для 1-10, 10-100 мкФ).
- масса: 25 кг;
- габариты: 490х360х210 мм.

Условия эксплуатации:

Умеренный климат в закрытых отапливаемых помещениях при температуре окружающего воздуха от 10 до 35 градусов по Цельсию и относительной влажности до 80% при 25 градусах по Цельсию.

### 2.2.3 Магазин сопротивлений измерительный Р33

Измерительный магазин сопротивлений Р33, приведенный на рисунке 2.6 предназначен для измерения сопротивления по постоянному и переменному току, а также используется в качестве многозначной меры электрического

сопротивления. Измерительный магазин Р33 выполнен в настольном горизонтальном исполнении и имеет карболитовый корпус.



Рисунок 2.6 – Магазин сопротивлений Р33

На верхней панели Р33 выведены декадные переключатели и клемменные соединители. Каждая из декад имеет по десять равнономинальных значений устанавливаемых сопротивлений. На панель так же выведены и множители декад. Работа с магазином сопротивлений Р33 заключается в последовательном подключении требуемого количества резисторов образцовой величины выставляемых в каждой декаде.

Основные технические характеристики прибора Р33:

- класс точности -  $0,2/6 * 10^{-6}$ ;
- количество декад – 6;
- диапазон сопротивления 0,1-99999,9 Ом;
- номинальное сопротивление одной ступени:
- высшей декады – 10000 Ом;
- низшей декады – 0,1 Ом.
- начальное сопротивление не более 0,06 Ом;
- вариация начального сопротивления - 0,006 Ом;
- номинальный ток – 1 А;
- номинальная мощность на ступень – 0,25 Вт;

- габариты прибора 265x185x110 мм;
- масса прибора 3,0 кг.

#### 2.2.4 Осциллограф GOS-620

Осциллограф – прибор, отображающий получаемую информацию в графическом виде, т.е. он попросту рисует диаграмму электрического сигнала. Диаграмма отражает изменения сигнала во времени: вертикальная ось (Y) представляет значения напряжения, а горизонтальная ось (X) – время. Интенсивность или яркость выведенной на экран прибора картинке иногда называется осью Z.

GOS-620FG (рисунок 2.7) – это двухканальный осциллограф со встроенным многофункциональным генератором, формирующим три формы сигнала с частотой до 1 МГц. Полоса пропускания осциллографа – 20 МГц, максимальная чувствительность – 1 мВ/дел, минимальный коэффициент развёртки – 0,2 мкс/дел. Возможность установления времени развертки 100 нс/дел при растяжке в 10 раз. Осциллограф допускает устойчивую синхронизацию, когда одновременно исследуются два различных сигнала разной частоты. При переводе осциллографа в режим X-Y канал 1 используется как ось X, а вход канала 2 – как ось Y. Встроенный калибратор импульсов положительной полярности с частотой 1 кГц имеет амплитуду 2 В. Также в осциллографе присутствует 6-дюймовая (12,5 см) прямоугольная электронно-лучевая трубка с красной внутренней шкалой. Яркость луча может управляться сигналом положительного уровня, подаваемым на Z- вход, например от ТТЛ-логики.



Рисунок 2.7 – Осциллограф GOS-620

#### Основные технические характеристики прибора GOS-620

- полоса пропускания 0 - 20 МГц;
- чувствительность прибора 1 мВ/дел;
- ТВ синхронизация;
- модуляция яркости луча (Z - вход);
- дополнительный выход канала 1.

#### 2.2.5 Генератор SFG-71003

Генератор SFG-71003, представленный на рисунке 2.8 является функциональным генератором, который использует технологию DDS и воспроизводит высокоточный по частоте сигнал с высоким разрешением и минимальными искажениями.



Рисунок 2.8 – Генератор SFG-71003

Прибор обладает следующими возможностями:

- прямой цифровой синтез обеспечивает высокое качество сигнала;
- стабильность и точность установки частоты  $\pm(20 * 10^{-6})$ ;
- малые гармонические искажения (менее – 55 дБн);
- частотный диапазон (для синуса и меандра) 0,1 Гц ... 3 МГц;
- частотный диапазон (для треугольника) 0,1 Гц ... 1 МГц;
- форма сигнала: синус, треугольник, меандр;
- разрешение по частоте 100 мГц;
- входное сопротивление 50 Ом  $\pm 10\%$ ;
- выход ТТЛ;
- режим постоянного смещения  $\pm 5\text{В}$  (на 50 Ом).

Общие данные:

- напряжение питания 110В/220/240В $\pm 10\%$ , 50/60 Гц;
- габаритные размеры 251x91x291 мм;
- масса 2,1 кг.

#### 2.2.6 Описание условий проведения эксперимента

В соответствии с ГОСТ 8.395 – 80 [10] нормальным условиям соответствуют температура воздуха 20°C (с отклонениями 0,01;0,02;0,05;0,1;0,2;0,5;1;2;5;10;15) атмосферное давление 760 мм. рт. столба (с отклонениями  $\pm 3;4;6;8;10$ ), влажность 58% (с отклонениями  $\pm 1;2;5;10;15;20\%$ ).

Данный эксперимент проводился в закрытом, отапливаемом помещении при температуре окружающей среды 20,6°C, атмосферном давлении 760 мм. рт. столба.

Все измерения проводились одним оператором, при одинаковых условиях.

Данные условия в соответствии с ГОСТ 8.395 – 80 [10] можно считать нормальными.

### 2.2.7 Результаты эксперимента

В соответствии с требованиями по МИ 2091-90 [9] определим количество измерений, необходимое для дальнейшей достоверной обработки данных.

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

$$n \geq \frac{t^2(q,n) \cdot S^2}{\Delta_p^2}, \quad (26)$$

где  $t(q,n)$  – коэффициент Стьюдента,  $t(q,n-1)=1,7$ ;

$S$  – среднее квадратическое отклонение группы результатов,  $S=3$  Гц.

Тогда предельное значение погрешности:  $\Delta_p = 3 \cdot S = 10$  Гц

Таким образом,

$$n \geq \frac{t^2(q,n) \cdot S^2}{\Delta_p^2} = 0,2601.$$

В результате измерения аргумента – частоты, получили выборку из 21 элемента, приведенную в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Экспериментальные значения частоты  $f$

№	$f$ , Гц
1	67930,0
2	67970,0
3	67920,0
4	67940,0
5	67930,0
6	67950,0
7	67910,0
8	67970,0

Продолжение таблицы 2.1

№	$f$ , Гц
9	67930,0
10	67920,0
11	67930,0
12	67910,0
13	67950,0
14	67930,0
15	67910,0
16	67920,0
17	67930,0
18	67940,0
19	67930,0
20	67930,0
21	67920,0

2.3 Обработка данных результатов измерения аргумента косвенного измерения

При статической обработке группы результатов прямых многократных независимых измерений частоты резонанса выполним следующие операции:

- проверим наличие грубых погрешностей и при необходимости исключим их;
- проверим наличие постоянно возрастающей или постоянно убывающей систематической погрешности;
- проверим гипотезу о принадлежности результатов измерений аргумента нормальному распределению.

Дальнейшую обработку выполним в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.736 – 2011 [8].

Объем выборки результатов наблюдений аргумента –  $n$  равен 21.

Доверительную вероятность  $P$  примем равной 0,95.

### 2.3.1 Исключение грубых погрешностей

Для исключения грубых погрешностей используем критерий Граббса. Данный критерий основан на предположении о том, что группы результатов измерений принадлежит нормальному распределению.

Обозначим гипотезы:

$H_0$  – Наибольшее (наименьшее) значение  $f$  является промахом;

$H_1$  – Наибольшее (наименьшее) значение  $f$  не является промахом.

Вычислим критерии  $G_1$  и  $G_2$ , предполагая, что наибольший  $f_{max}$  или наименьший –  $f_{min}$  результат измерений частоты вызван грубыми погрешностями:

$$G_1 = \frac{|f_{max} - \bar{f}|}{S};$$

$$G_2 = \frac{|\bar{f} - f_{min}|}{S},$$

где  $\bar{f}$  – оценка измеряемой величины;

$S$  – среднеквадратическое отклонение.

Выберем максимальное и минимальное значение  $f$ :  $f_{max}=67970$  Гц,  
 $f_{min}=67910$  Гц.

Среднее квадратическое отклонение  $S$  группы:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}{n-1}} = 16,917 \text{ Гц};$$

За оценку измеряемой величины примем среднее арифметическое значение результатов измерения:  $\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i = 67931,905$  Гц;

Подставив значения в (27) и (28) получим:  $G_1=2,252$ ;  $G_2=1,295$ .

Зададим уровень значимости  $0,05$ , при котором теоретическое значение критерия Граббса, согласно таблице, представленной в ГОСТ Р 8.736–2011 [8], равно:  $G_T=2,733$ .

Сравним полученные значения критерия  $G_1$  и  $G_2$  с теоретическим значением  $G_T$ :  $2,525 < 2,733$ .

Сделаем вывод: неравенство верно, принимаем гипотезу  $H_1$ . Следовательно,  $f_{\max}$  не является промахом, и мы сохраняем его в ряду результатов измерений.

$$1,295 < 2,733$$

Сделаем вывод: неравенство верно, принимаем гипотезу  $H_1$ . Следовательно,  $f_{\min}$  не является промахом, и мы сохраняем его в ряду результатов измерений.

### 2.3.2 Обнаружение трендов

Наличие монотонных систематических погрешностей (трендов) будем определять с помощью критерия Аббе.

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

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

где  $S_d$  – среднее квадратическое отклонение группы результатов измерений:

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2},$$

где  $S$  – среднее квадратическое отклонение группы результатов измерений;

$n$  – число измерений в группе;  
 $x_i$  –  $i$ -й результат измерений группы;  
 $v_T(q, n)$  – квантиль распределения, соответствующий уровню значимости и числу измерений в группе.

Подставив известные нам значения в (30) получим:  $S_d=19,558$  Гц.

С помощью таблицы, приведенной в МИ2091-90 [9] определим квантиль распределения  $v_T(q, n)$ :  $v_T(0,05;20)=0,65$ .

Теперь, когда все значения известны, подставим их в неравенство (29):

$$\frac{19,558^2}{16,917^2} < 0,65,$$
$$1,337 < 0,65.$$

Неравенство не выполняется, таким образом, группы результатов измерений не содержит постоянно возрастающую или постоянно убывающую систематическую погрешность.

### 2.3.3 Установление вида закона распределения

Так как число результатов измерений  $n$  меньше 50-ти, для установки вида закона распределения будем использовать составной критерий.

Критерий 1:

Обозначим гипотезы:

$H_0$  – Распределение группы результатов измерений можно считать нормальным;

$H_1$  – Распределение группы результатов измерений нельзя считать нормальным.

Рассчитываем отношение  $\tilde{d}$

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{A}|}{n * S^*},$$

где  $S^*$  – смещенное среднеквадратическое отклонение:

$$S^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}.$$

Результаты измерений в ряду считают распределенными нормально, если

$$d_{1-q\frac{1}{2}} < \tilde{d} \leq d_{q\frac{1}{2}},$$

где  $d_{1-q\frac{1}{2}}$  и  $d_{q\frac{1}{2}}$  квантили распределения.

Подставив значения в (32) и (31), получим:  $S^* = 16,509$ ;  $\tilde{d} = 0,742$ .

По таблице, приведенной в ГОСТ Р 8.736–2011 [8] найдем квантили распределения:

$$d_{1-q\frac{1}{2}} = 0,730; d_{q\frac{1}{2}} = 0,877.$$

После чего подставим найденные значения в неравенство (33):

$$0,730 < 0,742 \leq 0,877$$

Неравенство выполняется, следовательно, принимаем гипотезу  $H_0$ , то есть можно считать, что результаты измерений в ряду распределены нормально.

Критерий 2:

Обозначим гипотезы:

H0 – Распределение группы результатов измерений можно считать нормальным;

H1 – Распределение группы результатов измерений нельзя считать нормальным.

Результаты измерений будут принадлежать нормальному распределению, если не более  $m$  разностей  $(x_i - \bar{x})$  превысили значение:

$$z_{p/2} * S,$$

где  $S$  – среднеквадратическое отклонение

$z_{p/2}$  – верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа, отвечающий вероятности  $P/2$ .

Из таблицы, приведенной в ГОСТ Р 8.736–2011 [8] найдем  $m$ , а затем квантиль распределения:

$$m=2,$$

$$z_{p/2} = 1,96.$$

Теперь произведем сравнение разностей  $(f_i - \bar{f})$  и значения  $z_{p/2} * S$  (см. таблица 2.2)

Таблица 2.2 – Сравнение разностей  $|f_i - \bar{f}|$  и значения  $z_{p/2} * S$

$ f_i - \bar{f} $	$m'$	$z_p$
1,905	<	33,158
38,095	>	33,158
11,905	<	33,158
8,095	<	33,158
1,905	<	33,158
18,095	<	33,158
21,905	<	33,158
38,095	>	33,158
1,905	<	33,158
11,905	<	33,158
1,905	<	33,158
21,905	<	33,158

Продолжение таблицы 2.2

$f_i$	$m'$	$z_p$
18,095	<	33,158
1,905	<	33,158
21,905	<	33,158
11,905	<	33,158
1,905	<	33,158
8,095	<	33,158
1,905	<	33,158
1,905	<	33,158
11,905	<	33,158

$$m' \leq m; 2 \leq 2$$

Неравенство выполняется, следовательно, принимаем гипотезу  $H_0$ , то есть результаты измерения принадлежат нормальному распределению.

Таким образом, мы получили верные неравенства в обоих критериях, что позволяет нам сделать вывод о том, что результаты измерений в группе распределены нормально.

#### 2.3.4 Оценка измеряемой величины и среднее квадратическое отклонение

За оценку измеряемой величины  $\bar{f}$  примем среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений:

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i = 67931,905 \text{ Гц.}$$

Среднее квадратическое отклонение  $S$  группы, содержащей  $n$  результатов измерений, вычислим по формуле:  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}{n-1}} = 16,917 \text{ Гц.}$

Среднее квадратическое отклонение оценки измеряемой величины вычислим по формуле:  $S_{\bar{f}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = 3,692 \text{ Гц.}$

### 2.3.5 Доверительные границы случайной погрешности

Доверительные границы случайной погрешности оценки измеряемой величины:

$$\varepsilon = tS_{\bar{f}},$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента.

Для доверительной вероятности  $P=0,95$  и числа измерений  $n=21$ :  $t(0,95;21)=2,086$ .

Подставив найденное значение (35) получим:  $\varepsilon = 7,701$  Гц.

Таким образом, доверительные границы случайной погрешности:

$$[\bar{f} - \varepsilon; \bar{f} + \varepsilon] \rightarrow [67924,204; 67939,606] \text{ Гц.}$$

### 2.3.6 Доверительные границы неисключенной систематической погрешности

Неисключенная систематическая погрешность (далее – НСП) оценки измеряемой величины образуется из следующих составляющих:

- погрешность установки  $20 * 10^{-6}$ ;
- разрешение по частоте 0,1 Гц.

Так как количество НСП менее трех, границу НСП оценки измеряемой величины:

$$\Theta_{\Sigma} = \pm \sum_{i=1}^m |\Theta_i|$$

Подставляя в (36), получаем:  $\Theta_{\Sigma} = 20 * 10^{-6} + 0,1 = 0,10002$  Гц.

### 2.3.7 Доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины

Сначала необходимо оценить значимость составляющих погрешности результата наблюдения:  $\frac{\theta_{\Sigma}}{S_{\bar{f}}} = \frac{0,10002}{3,692} = 0,027$ .

$0,027 < 0,8$  следовательно,

$$\Delta f = \varepsilon = 7,701 \text{ Гц.}$$

### 2.3.8 Результат измерения

Оценку измеряемой величины представим в форме:  $\bar{f} \pm \Delta f, P$ .

$$(67932 \pm 8) \text{ Гц, } P_{\text{дов}} = 0,95.$$

Выводы по разделу два:

В данном разделе выпускной квалификационной работы был описан метод косвенного измерения ёмкости, а именно метод резонанса.

Описан эксперимент по получению экспериментальных данных косвенного измерения ёмкости методом резонанса. Рассмотрена схема соединения для измерения емкости по методу резонанса. Приведены основные технические и метрологические характеристики используемых приборов. Описаны условия проведения эксперимента.

Выполнена статическая обработка группы результатов прямых многократных независимых измерений частоты резонанса. Установлено отсутствие грубых погрешностей в группе результатов измерений, отсутствие постоянно возрастающей или убывающей погрешности. Сделан вывод о том, что результаты измерений аргумента принадлежат нормальному распределению.

### 3 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 3.1 Обработка данных косвенного измерения традиционным методом

Измеряемая емкость определяется формулой:

$$C = \frac{1}{4\pi^2 * f^2 * L}$$

Исходя из функции преобразования, видно, что зависимость емкости от частоты и индуктивности нелинейная, поэтому необходимо разложить данную функцию в ряд Тейлора.

$$C = \frac{1}{4\pi^2 * \tilde{f}^2 * L} + \frac{\partial C}{\partial f} * \Delta f + R,$$

где R – остаточный член, вычисляемый в соответствии с (2).

Им пренебрегают, при условии выполнения неравенства (3)

Проверим это неравенство, в нашем случае остаточный член R будет равен:

$$R = \frac{1}{2} * \frac{\partial^2 C}{\partial f \partial f} * (\Delta f * \Delta f) = 9,61 * 10^{-17} \text{ Ф},$$
$$0,8 \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial f}\right)^2 * S^2(\tilde{f})} = 2,17 * 10^{-13} \text{ Ф}.$$

Сравним, полученные значения

$$9,61 * 10^{-17} < 2,17 * 10^{-13}$$

Неравенство верное, следовательно остаточным членом можно пренебречь, тогда из (4) результат измерения ёмкости  $\tilde{C}$ :

$$\tilde{C} = \frac{1}{4\pi^2 * \tilde{f}^2 * L} = 2,4975 * 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Среднее квадратическое отклонение случайной погрешности результата косвенного измерения в соответствии с (5):  $S(\tilde{C}) = 2,71 * 10^{-13} \text{ Ф.}$

Доверительные границы случайной погрешности результата косвенного измерения вычисляются в соответствии с выражением (6). Чтобы найти коэффициент Стьюдента, соответствующий выбранной доверительной вероятности  $P=0,95$  числу степеней свободы  $f_{\text{эф}}$  рассчитаем это число в соответствии с (7), подставляя вместо  $b$  первую производную от функции распределения по частоте  $f$ :

$$b_1 = \frac{\partial C}{\partial f}$$

$$b_1 = -7,35 * 10^{-14} \text{ Ф.}$$

Таким образом, число степеней свободы:  $f_{\text{эф}} = 20$ .

Для доверительной вероятности  $P = 0,95$  и числа степеней свободы  $f_{\text{эф}} = 20$  коэффициент Стьюдента из [7] равен:  $t_q(0,95; 20) = 2,086$ .

Теперь, вычислим доверительные границы случайной погрешности результата косвенного измерения (6):  $\varepsilon(p) = 5,7 * 10^{-13} \text{ Ф.}$

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности рассчитаем с помощью формулы (8), используя в качестве поправочного коэффициента  $k$  значение 1,1. Таким образом:  $\Theta(P) = 8,09 * 10^{-15} \text{ Ф.}$

Погрешность результата косвенного измерения будем оценивать на основе композиции распределений случайных и неисключенных систематических погрешностей:

$$\frac{\Theta(P)}{S(\tilde{C})} = 0,03$$

Так как  $\frac{\Theta(P)}{S(\tilde{C})} < 0,8$ , за погрешность результата косвенного измерения будем принимать случайную составляющую погрешности измерения (6):

$$\Delta C = 5,7 * 10^{-13} \text{ Ф.}$$

На основе расчетов запишем результат измерения:

$$(2490,0 \pm 0,6) \text{ пФ, } R_{\text{дов}}=0,95.$$

### 3.2 Обработка данных косвенного измерения методом приведения

Метод основан на приведении ряда отдельных значений косвенно измеряемой величины к ряду прямых измерений. Чтобы сделать это, подставим все возможные сочетания отдельных результатов измерений аргумента в нашу функцию (35). Результаты приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Приведение результатов косвенных измерений к ряду прямых измерений

L, Гн \ f, Гц	0,002200
67930	2,49767E-09
67970	2,49473E-09
67920	2,49840E-09
67940	2,49693E-09
67930	2,49767E-09
67950	2,49620E-09
67910	2,49914E-09
67970	2,49473E-09
67930	2,49767E-09
67920	2,49840E-09

Продолжение таблицы 2.3

L, Гн \ f, Гц	0,002200
67930	2,49767E-09
67910	2,49914E-09
67950	2,49620E-09
67930	2,49767E-09
67910	2,49914E-09
67920	2,49840E-09
67930	2,49767E-09
67940	2,49693E-09
67930	2,49767E-09
67930	2,49767E-09
67920	2,49840E-09

Прежде чем перейти к обработке ряда прямых измерений установим вид закона распределения.

Объем выборки  $L = 21$ , поэтому целесообразно применить составной критерий.

Критерий 1:

Рассчитываем отношение  $\tilde{d}$  в соответствии с выражением (31), где

$$S^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2};$$

$\tilde{A}$  – оценка значения результата измерения.

Результаты измерений в ряду считают распределенными нормально, если

$$d_{1-q_1/2} < \tilde{d} \leq d_{q_1/2},$$

где  $d_{1-q_1/2}$  и  $d_{q_1/2}$  квантили распределения, полученные из таблицы [8] по  $n$ ,  $q_1/2$  и  $(1-q_1/2)$ , где  $q_1$  – уровень значимости.

Подставив известные значения, получим:  $S^* = 1,214 * 10^{-12}$ ;  $\tilde{d} = 0,742$ .

По таблице, приведенной в ГОСТ Р 8.736-2011 [8] найдем квантили распределения:

$$d_{1-q\frac{1}{2}} = 0,877$$

$$d_{q\frac{1}{2}} = 0,730$$

$$0,730 < 0,742 \leq 0,877$$

Неравенство выполняется, следовательно, можно считать, что результаты измерений в ряду распределены нормально.

Критерий 2:

Результаты измерений будут принадлежать нормальному распределению, если не более  $m$  разностей  $(x_i - \bar{x})$  превысили значение  $z_{p/2} * S$ , где  $S$  – среднеквадратическое отклонение;

$z_{p/2}$  – верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа, отвечающий вероятности  $P/2$ .

Из таблицы, приведенной в ГОСТ Р 8.736-2011 [8] найдем  $m$ , а затем квантиль распределения:

$$m=2,$$

$$z_{p/2} = 1,96.$$

Сравнение разностей  $(x_i - \bar{x})$  и значения  $z_{p/2} * S$  приведено в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Сравнение разностей  $|C_i - \bar{C}|$  и значения  $z_{p/2} * S$

$ C_i - \bar{C} $	$m'$	$z_{p/2} * S$
0,0000000000001396	<	0,0000000000024373
0,0000000000027992	>	0,0000000000024373
0,0000000000008751	<	0,0000000000024373

Продолжение таблицы 2.4

$ C_i - \bar{C} $	$m'$	$z_{p/2} * S$
0,0000000000005956	<	0,000000000024373
0,0000000000001396	<	0,000000000024373
0,00000000000013305	<	0,000000000024373
0,00000000000016110	<	0,000000000024373
0,00000000000027992	>	0,000000000024373
0,0000000000001396	<	0,000000000024373
0,00000000000008751	<	0,000000000024373
0,0000000000001396	<	0,000000000024373
0,00000000000016110	<	0,000000000024373
0,00000000000013305	<	0,000000000024373
0,0000000000001396	<	0,000000000024373
0,00000000000016110	<	0,000000000024373
0,00000000000008751	<	0,000000000024373
0,0000000000001396	<	0,000000000024373
0,0000000000005956	<	0,000000000024373
0,0000000000001396	<	0,000000000024373
0,0000000000001396	<	0,000000000024373
0,00000000000008751	<	0,000000000024373

$$m' \leq m; 2 \leq 2$$

Неравенство выполняется, следовательно, результаты измерения принадлежат нормальному распределению, тогда результат косвенного измерения рассчитаем по выражению (11):  $\tilde{C} = 2,4975 * 10^{-9}$  Ф.

Среднее квадратическое отклонение случайных погрешностей результата косвенного измерения (12):  $S(\tilde{C}) = 2,7136 * 10^{-13}$  Ф.

Доверительные границы случайной погрешности для результата измерения в соответствии с (13), при коэффициенте  $T(NЗР; 095) = 2,086$ .

$$\Delta C = 5,66052 * 10^{-13} \Phi.$$

Запишем результат измерения:

$$(2500,0 \pm 0,6) \text{ пФ}, R_{\text{дов}}=0,95$$

### 3.3 Обработка данных косвенного измерения методом бутстрепа

Для обработки методом бутстрепа приведем ряд значений отдельных значений косвенно измеряемой величины  $C$  к ряду прямых измерений. Подставив все возможные комбинации отдельных результатов измерений в нашу функцию (36), получим изучаемую совокупность исходных данных. Результаты приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Изучаемая совокупность данных

$C, \Phi$
2,49767E-09
2,49473E-09
2,49840E-09
2,49693E-09
2,49767E-09
2,49620E-09
2,49914E-09
2,49473E-09
2,49767E-09
2,49840E-09
2,49767E-09

Продолжение таблицы 2.5

С, Ф
2,49914E-09
2,49620E-09
2,49767E-09
2,49914E-09
2,49840E-09
2,49767E-09
2,49693E-09
2,49767E-09
2,49767E-09
2,49840E-09

На основе выборки (таблица 2.5) сгенерируем 1000 псевдовыборок, каждая объемом 21 элемент, состоящих из случайных комбинаций исходного набора элементов. Для этого воспользуемся специализированной программой Resampling Procedures 1.3 (Howell, 2001). Результаты работы программы приведены на рисунке 3.1.

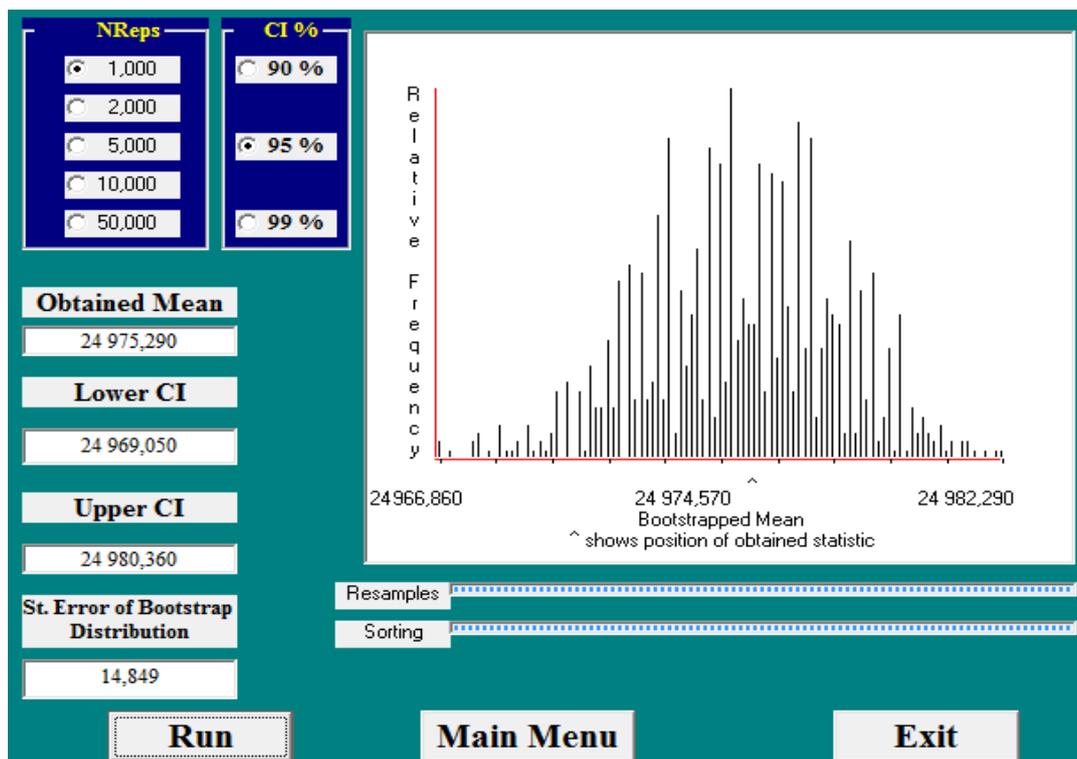


Рисунок 3.1 – Обработка параметров распределения с использованием программы Resampling Procedures 1.3 (Howell, 2001).

На рисунке 3.1 обозначено: NReps – количество псевдовыборок; CI% – уровень доверительной вероятности; Obtained Mean – среднее значение для исходной выборки; Lower и Upper CI – верхняя и нижняя граница доверительного интервала истинного значения; St.Error of Bootstrap Distribution – стандартное отклонение.

На основе бутстрепированных данных, полученных в результате имитации, построена гистограмма частотного распределения (см. рисунок 3.1).

Таким образом, значение среднего:  $\bar{x}_{boot} = 2,49753E - 09 \Phi$ ;  
стандартное отклонение:  $se_{boot} = 1,4849E - 13 \Phi$ ;  
границы доверительного интервала истинного значения:  
 $[2,49691E - 09; 2,49804E - 09], \Phi$ .

### 3.4 Итоговая таблица

В ходе обработки результатов косвенного измерения традиционным методом, методом приведения и методом бутстреп, полученные результаты, а именно: оценка среднего, среднее квадратическое отклонение, доверительные границы истинного значения, были сведены в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Итоговая таблица

Метод	Традиционный метод	Метод приведения	Метод бутстреп
Оценка среднего, пФ	2497,5285	2497,5289	2497,5290
Среднее квадратическое отклонение, пФ	0,2712	0,2714	0,1485
Доверительные границы истинного значения, пФ	2496,963	2496,963	2496,905
	— 2498,093	— 2498,095	— 2498,036

Анализ таблицы 2.6 показывает, что оценка результата измерения изменилась незначительно: отклонение оценки полученной традиционным методом от оценки метода приведения составляет  $-1,6 \cdot 10^{-5}\%$ ; отклонение оценки полученной традиционным методом от оценки методом бутстреп составляет  $-2 \cdot 10^{-5}\%$ ; отклонение оценки полученной методом приведения от оценки метода бутстреп составляет  $-0,4 \cdot 10^{-5}\%$ .

Оценка СКО результата измерения, полученная традиционным методом отклоняется от оценки СКО, полученной методом приведения на  $-0,07\%$ ; оценка СКО, полученная традиционным методом отклоняется от оценки СКО, полученная методом бутстрап на  $42,5\%$ ; оценка СКО, полученная методом приведения отклоняется от оценки СКО, полученная методом бутстрап на  $42,3\%$ .

Ширина доверительного интервала истинного значения измеряемой величины полученная традиционным методом составляет 1,131 пФ; методом приведения 1,132 пФ; методом бутстрап 1,131 пФ.

Все методы обработки данных показали сопоставимые результаты по точности, следовательно, выбор метода обработки данных косвенных измерений остается за оператором, исходя из трудоемкости расчетов и имеющихся вычислительных средств.

Выводы по разделу три:

В данном разделе выпускной квалификационной работы был произведен сравнительный анализ обработки данных косвенных измерений традиционным методом, методом приведения, методом бутстреп.

Произведено сравнение методов по оценке результата измерения, по среднему квадратическому отклонению и по доверительным границам истинного значения. В результате чего было установлено, что все используемые в данном исследовании методы показывают сопоставимые результаты по точности.

## 4 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

### 4.1 Определение затрат на проведение исследования

Для расчета затрат необходимо определить количество исполнителей, трудоемкость работ, материальные затраты и др.

В стоимость проведения исследования входят затраты на:

- оборудование;
- материалы;
- контрагентские расходы;
- заработная плата и отчисления с заработной платы;
- накладные расходы.

Затраты на оборудование представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Затраты на оборудование

Наименование	Единица измерения	Цена за единицу, руб.	Количество	Стоимость, руб.
катушка индуктивности типа P536	шт.	19999,00	1	19999,00
магазин емкости P5025	шт.	5500,00	1	5500,00
магазин сопротивления измерительный P33	шт.	7000,00	1	7000,00
осциллограф GOS-620	шт.	44500,00	1	44500,00
генератор SFG 71003	шт.	17500,00	1	17500,00
Итого:				94499,00

Затраты по статье “Материалы” сведены в таблицу 4.2

Таблица 4.2 – Затраты по статье “Материалы”

Наименование	Единица измерения	Цена за единицу, руб.	Количество	Стоимость, руб.
Бумага для принтера, Ф. А4	шт.	187,50	1	187,50
Бумага писчая	шт.	50,53	1	50,53

Продолжение таблицы 4.2

Наименование	Единица измерения	Цена за единицу, руб.	Количество	Стоимость, руб.
Картридж для принтера	шт.	959,00	1	959,00
Электроэнергия	кВт·ч	1,81	120	217,20
Скоросшиватель	шт.	100,00	1	100,00
Итого:				1514,03

В статью “Контрагентские расходы” включается стоимость работ, выполненных сторонними организациями и предприятиями по заказу организации, проводящей НИР. В нашем случае такими расходами являются только использование Интернета. В таблице 4.3 представлен расчет затрат по статье “Контрагентские расходы”.

Таблица 4.3 – Контрагентские расходы

Наименование работы	Единицы измерения	Цена за единицу, руб.	Количество	Стоимость, руб.
Использование Интернета	месяц	400,00	1	400,00

Обычно в статью “Заработная плата” включается основная заработная плата (Зосн) научных и инженерно – технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. В эту же статью включается доплата по поясному коэффициенту (ЗПпк). Величина расходов по заработной плате определяется, исходя из трудоемкости работ сетевого графика и действующей системы окладов и тарифных ставок. В нашем случае оплата производится на контрактной основе, поэтому в расчетах отсутствуют поясной коэффициент и премия. Расчет заработной платы представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчет заработной платы с отчислениями

Исполнитель	Стоимость одного часа, руб.	Количество часов	Зарплата, руб.
Инженер	100,00	147	14700,00
Научный руководитель	250,00	30	7500,00
Итого:			22200,00
Отчисления во внебюджетные фонды 30%			6660,00
Итого:			28860,00

Затраты по статье “Накладные расходы” включают в себя 10% от суммы затрат статей “Оборудование”, “Материалы” и “Контрагентские расходы”:

$$0,1*(94400,00+1514,03+400,00)= 9641,303 \quad (36)$$

Расходы по всем статьям обобщим в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Калькуляция плановой себестоимости проведения НИР

Статья затрат	Сумма, руб.
Оборудование	94499,00
Материалы	1514,03
Контрагентские расходы	400,00
Заработная плата	22200,00
Отчисления с заработной платы	6660,00
Накладные расходы	9641,303
Итого:	134914,333

Выводы по разделу четыре:

В данной главе рассчитана полная стоимость оборудования, необходимого для проведения научно исследовательской работы, расходы на материалы. Рассчитана заработная плата научных и инженерно – технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ, а так же приведена полная стоимость исследования.

## 5 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В данной выпускной квалификационной работе был проведен сравнительный анализ методов обработки экспериментальных данных косвенных измерений. Данное исследование подразумевает работу оператора с измерительными приборами, а так же с компьютером, в котором происходит обработка экспериментальных данных.

### 5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

При выполнении данной исследовательской работы может проявиться ряд опасных и вредных факторов, к числу которых относятся:

Физические опасные и вредные факторы:

- повышенная или пониженная влажность воздуха;
- повышенная или пониженная ионизация воздуха;
- недостаточная освещенность рабочей зоны;
- повышенная яркость света;
- пониженная контрастность;
- прямая и отраженная блескость;
- отсутствие или недостаток естественного света;
- повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны;
- повышенная или пониженная подвижность воздуха;

Электрические факторы, обусловленные:

- повышенным значением напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;
- повышенным уровнем электромагнитных излучений;
- повышенным уровнем статического электричества;
- повышенной напряженностью электрического поля;
- повышенной напряженностью магнитного поля;

Электрические факторы появляются из-за электрических сетей, электроприборов, оборудования с электроприводом и т. п. Данные факторы могут повлечь за собой:

- механические травмы;
- психические травмы;
- ожоги;

Психофизиологические факторы, обусловленные статическими физическими перегрузками:

- продолжительная работа с дисплеями;
- работа в неудобной позе;

Психофизиологические факторы, обусловленные нервно-психическими перегрузками:

- умственным перенапряжением;
- перенапряжением анализаторов;
- монотонностью труда;

Психофизиологические факторы являются причиной:

- радикулита,
- психических расстройств;
- усталости и др.

Освещенность:

- повышенная пульсация светового потока;
- отсутствие или недостаток естественного света;
- прямая и отраженная блескость;
- недостаточная освещенность рабочей зоны,

что приводит к повреждению, утомлению зрения.

Для предотвращения возникновения перечисленных опасностей необходимо соблюдать технику безопасности при работе в учебной лаборатории, при работе с персональным компьютером, периферийными устройствами, корректно оборудовать рабочее место оператора.

## 5.2 Нормирование параметров опасных и вредных факторов

Помещение, в котором предполагается работа оператора, должно обеспечивать оптимальные параметры микроклимата (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Оптимальные нормы микроклимата для помещений с персональными компьютерами

Период года	Категория работ	Температура воздуха, град С, не более	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Легкая – 1а	22...24	40...60	0,1
Теплый	Легкая – 1а	23...25	40...60	0,1

Температура, относительная влажность воздуха и уровень ионизации воздуха на рабочих местах должны соответствовать действующим требованиям к микроклимату производственных помещений (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03[11]) и находиться вблизи оптимальных значений для работ категории 1а (работы, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением, при которых интенсивность расхода энергии не превышает 120 ккал/ч).

Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений

Наименование параметров	Допустимое значение
Напряженность электрического поля в диапазоне – частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
– в диапазоне частот 2 – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока должна быть не более: – в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц;	250 нТл
– в диапазоне частот 2 – 400 кГц.	25 нТл

Продолжение таблицы 5.2

Наименование параметров	Допустимое значение
Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать	500 В

Уровни положительных и отрицательных аэроионов в воздухе помещений, с расположенными в них электронными вычислительными машинами, должны соответствовать нормам, приведённым в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Уровни ионизации воздуха помещений при работе на ВДТ и ПЭВМ

Уровни	Число ионов в 1 см куб. воздуха	
	n+	n-
Минимально необходимые	400	600
Оптимальные	1500...3000	30000...50000
Максимально допустимые	50000	50000

В помещениях, где работают инженерно-технические работники, уровень шума не должен превышать 60 дБА.

В производственных помещениях, в которых работа с персональным компьютером является основной, вибрация на рабочих местах не должна превышать допустимых норм.

Помещение должны иметь как естественное, так и искусственное освещение.

Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных персональными компьютерами:

- Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы дисплеи были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал слева.

- Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПК должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения.

– Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

– Следует ограничивать прямую блесккость от источников освещения, при этом яркость светящихся поверхностей, находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м<sup>2</sup>.

– Следует ограничивать отраженную блесккость на рабочих поверхностях за счет правильного выбора типов светильников и расположения рабочих мест по отношению к источникам естественного и искусственного освещения, при этом яркость бликов на экране ПК не должна превышать 40 кд/м<sup>2</sup> и яркость потолка не должна превышать 200 кд/м<sup>2</sup>.

– Показатель ослепленности для источников общего искусственного освещения в производственных помещениях должен быть не более 20.

– Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90 градусов с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м<sup>2</sup>, защитный угол светильников должен быть не менее 40 градусов.

– Светильники местного освещения должны иметь не просвечивающий отражатель с защитным углом не менее 40 градусов.

– Следует ограничивать неравномерность распределения яркости в поле зрения пользователя ПК, при этом соотношение яркости между рабочими поверхностями не должно превышать 3:1 - 5:1, а между рабочими поверхностями и поверхностями стен и оборудования - 10:1.

– Коэффициент запаса для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4.

– Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.

– Для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях для использования ПК следует проводить чистку стекол оконных рам и

светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп.

Допустимые визуальные параметры устройств отображения информации представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4– Допустимые визуальные параметры устройств отображения информации

№ п/п	Параметры	Допустимые значения
1	Яркость белого поля	Не менее 35 кд/кв. м
2	Неравномерность яркости рабочего поля	Не более +/- 20%
3	Контрастность	Не менее 3:1
4	Временная нестабильность изображения	Не должна фиксироваться
5	Пространственная нестабильность изображения	Не более $2 \times 1E(-4L)$ , где L - проектное расстояние наблюдения, мм

Естественное освещение должно осуществляться через светопроемы, ориентированные преимущественно на север и северо-восток и обеспечивать коэффициент естественной освещенности не ниже 1.2% в зонах с устойчивым снежным покровом и не ниже 1.5% на остальной территории (СНиП 23-05-95).

Расположение рабочих мест для взрослых пользователей в подвальных помещениях не допускается.

Площадь на одно рабочее место оборудованного лабораторным комплексом для взрослых пользователей должна составлять не менее 6,0 кв. м, а объем не менее 20,0 куб.м.

Производственные помещения, в которых для работы используются преимущественно персональные электронно-вычислительные машины, не должны граничить с помещениями, в которых уровни шума и вибрации превышают нормируемые значения.

### 5.3 Условия труда

Рабочие места, оборудованные лабораторным комплексом, должны быть расположены по отношению к световым проемам так, чтобы естественный свет падал сбоку, слева.

Помещения должны оборудоваться системами отопления, кондиционирования воздуха или эффективной приточно-вытяжной вентиляцией.

Для повышения влажности воздуха следует применять увлажнители воздуха, заправляемые ежедневно фильтрованной или прокипяченной питьевой водой.

Снизить уровень шума в помещении можно с использованием звукопоглощающих материалов для отделки помещений, подтвержденных специальными акустическими расчетами.

Используемое помещение должно быть оснащено аптечкой первой помощи и углекислотными огнетушителями.

### 5.4 Безопасность производственных процессов и оборудования

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей и животных от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества (ГОСТ Р 12.1.009-2009 [12])

Воздействие электрической дуги или электрического тока вызывают электротравмы. Нормы на допустимые токи и напряжения прикосновения в электроустановках должны устанавливаться в соответствии с предельно допустимыми уровнями воздействия на человека токов и напряжений прикосновения и утверждаться в установленном порядке (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Значения предельно допустимых уровней напряжения и тока прикосновения

Режим (вид электроустановки)	Вид тока, частота		
	50 Гц		
	U, В	I, мА	Продолжительность
Нормальный	2	0,3	не более 10 мин
Производственные электроустановки (напряжением до 1000 В, с изолированной нейтралью)	36	6,0	>1с
Аварийный режим Бытовые электроустановки напряжением до 1000 В	12	2,0	>1с

Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты, а также организационными и техническими мероприятиями. Электроустановки и их части должны быть выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям необходимо применять следующие способы и средства:

- защитные оболочки;
- безопасное расположение токоведущих частей;
- изоляция токоведущих частей;
- предупредительная сигнализация, блокировка, знаки безопасности.

Компьютеры относятся к электроустановкам напряжением до 1000 В. Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетокведущим частям применяют защитное заземление. Сопротивление в цепях рабочего заземления не должно превышать 4 Ом.

## 5.5 Пожарная безопасность

Пожарная безопасность объекта должна обеспечиваться системами предотвращения пожара, противопожарной защитой, достигающимися применением автоматических установок пожарной сигнализации и средств пожаротушения, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Объект должен иметь системы пожарной безопасности, направленные на предотвращение воздействия на людей опасных факторов пожара на требуемом уровне.

Рассматриваемое в данной работе помещение операторской относится к помещениям категории «В» - негорючие вещества и материалы в холодном состоянии; оно должно быть оснащено аптечкой первой помощи и углекислотным огнетушителем.

## 5.6 Эргономика

Общие требования к организации рабочих мест пользователей ПК:

– При размещении рабочих мест с ПК расстояние между рабочими столами с видеомониторами должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м.

– Рабочие места с ПК в помещениях с источниками вредных производственных факторов должны размещаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом.

– Рабочие места с ПК при выполнении творческой работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5 - 2,0 м.

– Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

– Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5 - 0,7.

– Конструкция рабочего стула должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПК, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПК.

– Рабочий стул должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию.

– Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

Требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПК для взрослых пользователей:

– Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680 - 800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм.

– Модульными размерами рабочей поверхности стола для ПЭВМ, на основании которых должны рассчитываться конструктивные размеры, следует считать: ширину 800, 1000, 1200 и 1400 мм, глубину 800 и 1000 мм при нерегулируемой его высоте, равной 725 мм.

– Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм.

– Рабочее место пользователя ПК следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по

высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20 град. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

– Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 - 300 мм от края, обращенного к пользователю.

### 5.7 Режимы труда и отдыха

Режимы труда и отдыха при работе с ПК должны организовываться в зависимости от вида и категории трудовой деятельности.

Трудовая деятельность пользователя будет относиться к группе А – работа по считыванию информации с экрана ПК с предварительным запросом.

Продолжительность обеденного перерыва определяется действующим законодательством о труде и Правилами внутреннего трудового распорядка предприятия (организации, учреждения).

Для обеспечения оптимальной работоспособности и сохранения здоровья профессиональных пользователей на протяжении рабочей смены должны устанавливаться регламентированные перерывы через 2 часа от начала рабочей смены и через 1,5–2 часа после обеденного перерыва продолжительностью 15 минут каждый или продолжительностью 10 минут через каждый час работы.

Во время регламентированных перерывов с целью снижения нервно-эмоционального напряжения, утомления зрительного анализатора, устранения влияния гиподинамии и гипокинезии, предотвращения развития познотонического утомления целесообразно выполнять комплексы упражнений.

Сравнивая имеющиеся условия труда с нормативными показателями, можно сделать вывод о соответствии рабочего места всем нормативным показателям.

Выводы по разделу пять:

В данной главе выпускной квалификационной работы была рассмотрены проблемы безопасности жизнедеятельности, связанные с работой оператора с

измерительным оборудованием и компьютером. В процессе труда пользователь подвергается действию опасных и вредных факторов.

В связи с этим, были изучены различные нормы, сертификаты и правила, определялись пути решения проблем, для сокращения пагубного влияния компьютера на человека и обеспечения безопасных условий труда операторов. Произведена классификация опасных и вредных производственных факторов, даны рекомендации по организации рабочего места и правильной эргономике окружающего пространства работника.

Данная исследовательская работа, при соблюдении необходимых правил техники безопасности и графика профилактических работ, является абсолютно безопасной для жизнедеятельности человека.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были изучены источники литературы по теме выпускной квалификационной работы, проведен эксперимент по измерению ёмкости для накопления исследуемых данных, произведена обработка экспериментальных данных косвенных некоррелированных измерений разными методами. В результате этого выполнен сравнительный анализ результатов обработки экспериментальных данных.

Также рассчитана общая стоимость проведения исследования. Рассмотрены вопросы безопасности жизнедеятельности и влияние вредных факторов на оператора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 РМГ 29–2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2014. – 56 с.

2 МИ 2083–90. Измерения косвенные. Определение результатов измерения и оценивание их погрешностей. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. – 11 с.

3 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. Январёв // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5 – С. 23–25.

4 Чипулис, В.П. Сравнительная оценка двух методов косвенных измерений разности расходов теплоносителя / В.П. Чипулис // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2012. – том 2 – С. 14–17.

5 Бержинская, М. В. Использование метода приведения при обработке результатов косвенных измерений / М. В. Бержинская, А. А. Данилов, К. И. Мальцева // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 9 – С. 15–20.

6 Захаров, И.П. Сравнительный анализ методов обработки экспериментальных данных при косвенных некоррелированных измерениях / И.П. Захаров, С.Г. Рабинович // Системы обработки информации. — 2011. — № 1(91). — С. 33–38.

7 Моисеева, Н.П. Неопределенность измерения температуры и разности температур с учетом корреляции / Н.П. Моисеева // Измерительная техника. – 2010. – №11. – С. 14–23.

8 ГОСТ Р 8.736–2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 2013. – 20 с.

9 МИ2091-90. Измерения физических величин. Общие требования. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. – 20 с.

10 ГОСТ 8.395—80. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2008. – 7 с.

11 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Минздрав России, 2003. – 56 с.

12 ГОСТ Р 12.1.009-2009. Электробезопасность. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 16 с.

13 ГОСТ 12.0.003-80. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 4 с.

14 СТО ЮУрГУ 04–2008. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

15 СТО ЮУрГУ 21–2008. Курсовая и выпускная квалификационная работа. Требования к содержанию и оформлению – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

16 Ишниязова, А.Р. Методическое пособие по разработке экономической части дипломного проектирования для не экономических специальностей / А.Р. Ишниязова. – Нижневартовск, 2005. – 29 с.

17 ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2008. – 17 с.

18 Сергеев, А.Г. Метрология / А.Г.Сергеев, В.В. Крохин. – Москва: Логос, 2011. – 408 с.

19 Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – Москва: Высшая школа, 2003. – 474 с.

20 ГОСТ 2.747-68. Обозначения условные графические в схемах. Размеры условных графических обозначений. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2015. 6 с.