

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Факультет Инновационных технологий

Кафедра управления инновациями

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

по дисциплине «Измерительные преобразователи в робототехнических комплексах»

Составлены кафедрой управления инновациями для студентов, обучающихся  
по направлению подготовки «Мехатроника и робототехника»

Форма обучения очная

Составитель  
доцент кафедры управления инновациями

П.Н. Дробот  
«25» августа 2019 г.

Томск 2019

## Оглавление

Введение .....	3
Материально-техническое обеспечение для лабораторных занятий .....	4
Прием выполненных лабораторных работ.....	5
Тема занятий 1 – «Виды измерительных преобразователей» .....	6
Лабораторная работа «Программные пакеты Origin и SciDavis для построения графиков и анализа данных измерительных характеристик преобразователей».....	6
Тема занятий 1 – «Виды измерительных преобразователей» .....	10
Лабораторная работа «Исследование с помощью программных пакетов Origin или SciDavis нелинейной измерительной характеристики преобразователя».....	10
Тема занятий 2 – «Основы метрологии. Погрешности измерений».....	17
Лабораторная работа «Статистический анализ результатов многократных косвенных измерений одной величины» .....	17
Тема занятий 3 «Аппроксимация методом наименьших квадратов».....	20
Лабораторная работа «Линейная аппроксимация измерительной характеристики преобразователя».....	20
Тема занятий 4 «Измерительная техника. Методы и средства измерения физических величин» ....	24
Лабораторная работа «Исследование измерительных характеристик датчика температуры с частотным выходом».....	24
Тема занятий 5 «Датчики. Измерение неэлектрических величин электрическими методами» .....	29
Лабораторная работа «Исследование измерительных характеристик датчика магнитного поля с частотным выходом».....	29
Тема занятий 5 «Датчики. Измерение неэлектрических величин электрическими методами» .....	34
Лабораторная работа «Исследование RF-преобразователя сопротивления в частоту и построенного на его основе датчика перемещения.».....	34
Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины .....	41

## **Введение**

Дисциплина «Измерительные преобразователи в робототехнических комплексах» предлагается к изучению студентам магистратуры «Мехатроника и робототехника» для подготовки специалиста по мехатронике и робототехнике, владеющего необходимыми знаниями о методах и средствах измерительного контроля, о характеристиках измерительных преобразователей робототехнической и мехатронной продукции; формирование способности разрабатывать методики проведения экспериментов и проводить эксперименты в области мехатроники и робототехники по применению измерительных преобразователей и датчиков и обрабатывать результаты экспериментов с применением современных информационных технологий и технических средств; формирование готовности разрабатывать методику проведения экспериментальных исследований и испытаний измерительных преобразователей мехатронной или робототехнической системы, способностью участвовать в проведении таких испытаний и обработке их результатов.

Дисциплина формирует способность разрабатывать методику проведения экспериментальных исследований и испытаний мехатронной или робототехнической системы, способностью участвовать в проведении таких испытаний и обработке их результатов.

Лабораторные работы, предусмотренные настоящими указаниями, выполняются студентами во время аудиторных занятий индивидуально под контролем со стороны преподавателя. Все консультации осуществляются преподавателем.

Перед началом занятий студенты должны изучить инструкцию по охране труда. Преподаватель должен убедиться в знании инструкции, задавая студенту вопросы по ее содержанию, после чего сделать соответствующую запись в журнале охраны труда.

Во время проведения лабораторных занятий в аудитории студентам запрещается передавать друг другу файлы и другие материалы, являющиеся результатом выполнения заданий.

Студент имеет право просить консультации у преподавателя, если он в текущий

момент не распределяет задания, не принимает выполненные работы и не консультирует другого студента.

Преподаватель, давая консультацию студенту, указывает раздел технической документации или методической литературы, в которой имеется ответ на вопрос студента. Если необходимые сведения в документации и литературе отсутствуют, то преподаватель должен дать устные пояснения или продемонстрировать практические действия, приводящие к требуемому результату, с последующим повторением студентом.

Консультации, выдача заданий и прием результатов выполнения осуществляется только во время аудиторных занятий. Лабораторные работы выполняются последовательно. Правильное выполнение некоторых заданий возможно только, если студент корректно выполнил предыдущие задания. Поэтому приступать к следующему заданию студент может, только сдав преподавателю результат выполнения предыдущего.

### **Материально-техническое обеспечение для лабораторных занятий**

Лаборатория управления проектами

учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, учебная аудитория для проведения занятий практического типа, учебная аудитория для проведения занятий лабораторного типа, учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, помещение для курсового проектирования (выполнения курсовых работ), помещение для проведения групповых и индивидуальных консультаций, помещение для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации, помещение для самостоятельной работы

634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 414 ауд.

Описание имеющегося оборудования:

- Компьютер WS2 (6 шт.);
- Компьютер WS3 (2 шт.);
- Компьютер Celeron (3 шт.);
- Компьютер Intel Core 2 DUO;
- Проектор Nec;
- Экран проекторный Projecta;

- Стенд передвижной с доской магнитной;
- Акустическая система + (2колонки) KEF-Q35;
- Кондиционер настенного типа Panasonic CS/CU-A12C;
- Комплект специализированной учебной мебели;
- Рабочее место преподавателя.

Программное обеспечение:

- Microsoft Windows 7 Pro
- OpenOffice
- Origin , SciDavis

Размещение и освещенность рабочих мест в учебной аудитории (лаборатории) должно удовлетворять действующим требованиям санитарных правил и норм (СанПиН).

### **Прием выполненных лабораторных работ**

Результаты выполнения лабораторных работ демонстрируются преподавателю. Во время приема выполненной работы преподаватель вправе:

- Требовать у студента демонстрации выполненного задания в виде файлов, таблиц, мнемосхем, рисунков, графиков или диаграмм, в том числе, по возможности и необходимости, в бумажном письменном или распечатанном виде.
- Самостоятельно производить манипуляции с программным обеспечением, не изменяя его конфигурацию.
- Требовать у студента пояснений, относящихся к способам реализации задания.

Задание считается выполненным и принимается преподавателем только в том случае, если получены все результаты, предусмотренные заданием. Если какие то результаты, предусмотренные заданием, не получены или неверны, то задание подлежит доработке.

Студент должен работать внимательно и аккуратно. Подлежат обязательному исправлению замеченные преподавателем недочеты: грамматические ошибки; небрежное оформление рисунков, графиков, структур, схем; неточности в описаниях, структурах, схемах.

Результаты выполнения заданий сохраняются студентом в электронном виде (файлы), а также, если возможно и удобно, в бумажном формате, до получения зачета/экзамена по данной дисциплине.

До начала экзаменационной сессии студент должен сдать результаты выполнения всех

лабораторных работ, предусмотренным настоящими указаниями. В противном случае студенты к сдаче экзамена (зачета) не допускаются.

### Тема занятий 1 – «Виды измерительных преобразователей».

#### Лабораторная работа «Программные пакеты Origin и SciDavis для построения графиков и анализа данных измерительных характеристик преобразователей».

Цель: Дать студентам необходимые сведения о программном пакете Origin и его бесплатном аналоге SciDavis. Познакомить с производителями программного обеспечения, их веб-ресурсами, возможностями приобрести в интернет, скачать, с особенностями установки на компьютер. Познакомить с особенностями интерфейса, основными навыками работы с программным обеспечением и его возможностями.



Рисунок 1.1 – Сайт производителя Origin – <https://www.originlab.com/>

Найдите в интернет веб-сайты производителей программного обеспечения Origin и SciDavis. Познакомьтесь с условиями скачивания и работы с программным обеспечением, длительностью бесплатного ознакомительного периода, возможностью длительной работы, если такая предоставляется.

Производитель указывает

Thank you for your interest in downloading a trial version of Origin/OriginPro. The trial version is fully functional. Once installed, you can request a 21-day license.

То есть, пробная версия продукта полностью функциональная и работает 21 день.

Найдите самостоятельно другие сайты, возможно русскоязычные, посвященные работе с этим программным пакетом. Например, <https://vk.com/originpro> – группа в контакте на русском языке. Составьте подробный отчет об установленных веб-ресурсах, посвященных этому продукту.

Точно также отработайте информацию о продукте SciDAVis. Адрес производителя в интернет – <http://scidavis.sourceforge.net/>.



## What is SciDAVis?

SciDAVis is a free application for Scientific Data Analysis and Visualization.

## What does it look like?

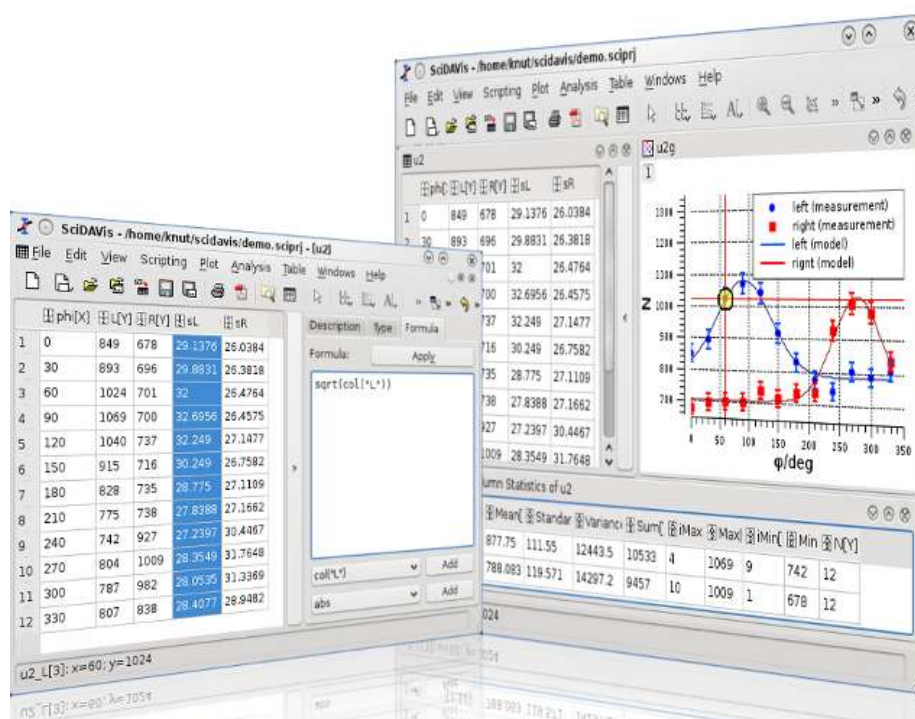


Рисунок 1.2 – Сайт производителя SciDAVis – <http://scidavis.sourceforge.net/>

SciDAVis — свободное бесплатное программное обеспечение для анализа научных данных, их визуализации и подготовки к печати, распространяемое под лицензией GNU GPL

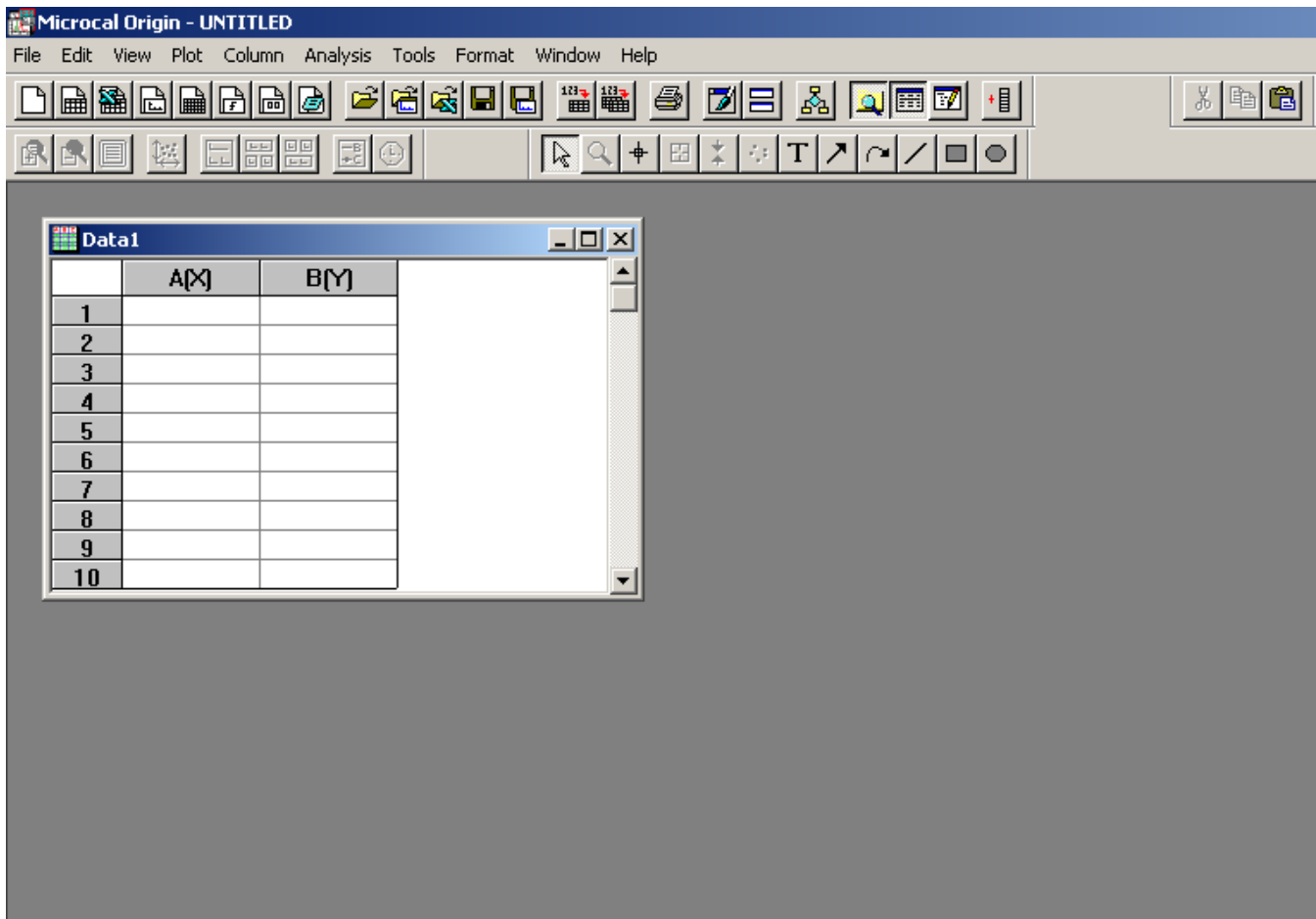


Рисунок 1.3 – Окно программы Origin

SciDAVis сочетает простой в освоении и интуитивно понятный интерфейс с обширными возможностями. Если при установке пользователь выберет русский язык, то программа будет бесплатно работать на постоянной основе.

Найдите самостоятельно другие сайты, возможно русскоязычные, посвященные работе с этим программным пакетом. Составьте подробный отчет об установленных веб-ресурсах, посвященных этому продукту.

Origin имеет привычную систему меню, ознакомьтесь самостоятельно с меню и возможностями программы.

File Edit View Plot Column Analysis Tools Format Window Help

Найдите в интернет книгу Исакова О.П., Тарасевич Ю.Ю., Юзюк Ю.И. Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета Origin. Анализ и обработка спектров. Учебно-методическое пособие. - Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, 2007. Используйте эту литературу для освоения программного обеспечения Origin.



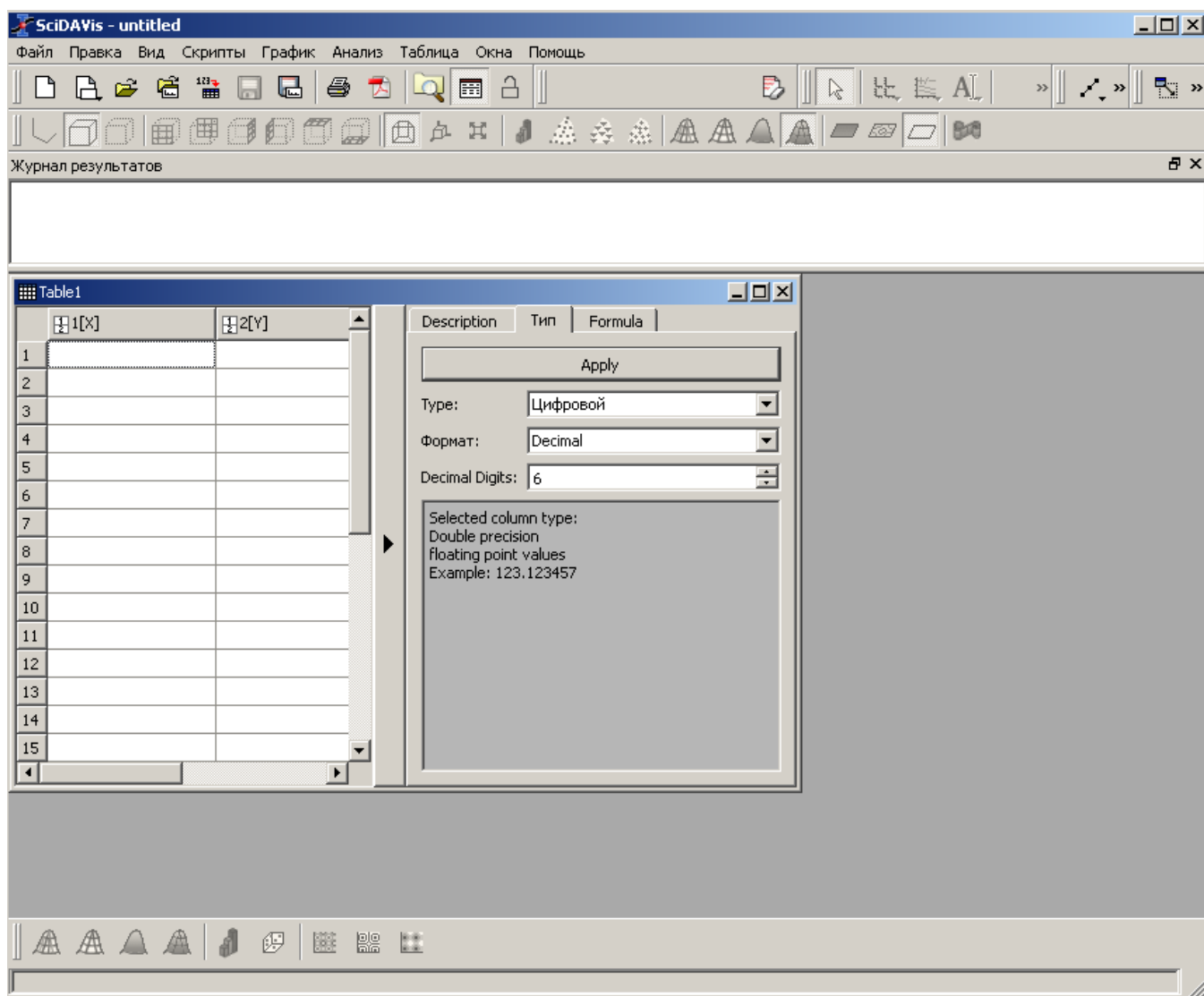


Рисунок 1.4 – Окно программы SciDAVis

Программный продукт SciDavis имеет интерфейс, похожий на систему меню программы Origin, но на русском языке. Поэтому освоение этой программы вполне возможно после освоения программы Origin.

Также как и Origin, SciDAVis может строить различные типы 2D и 3D-графиков (линейные графики, точечные графики, трёхмерные гистограммы, объёмные круговые гистограммы, трёхмерные поверхности) на основе данных, импортированных из ASCII файлов, введённых вручную или вычисленных по формулам.

Данные содержатся в отдельных таблицах (англ. spreadsheets), содержащих данные в столбцах (значения по осям X и Y при построении 2D-графиков) или в виде матриц (при построении 3D-графиков). Таблицы, графики и сопутствующие примечания собираются в проекты и могут быть организованы с использованием каталогов.

Встроенные средства анализа SciDAVis включают в себя построчную/постолбцовую статистику таблиц, свёртку/обратную свёртку, быстрый фурье-анализ и основанные на быстром фурье-анализе фильтры данных. Аппроксимация данных может производиться как с помощью функций, заданными пользователем, так и с помощью встроенного набора линейных и нелинейных функций аппроксимации, включая мультипиковую аппроксимацию (англ. multi-peak fitting) с использованием библиотеки GNU Scientific Library.

### **Тема занятий 1 – «Виды измерительных преобразователей».**

#### **Лабораторная работа «Исследование с помощью программных пакетов Origin или SciDavis нелинейной измерительной характеристики преобразователя»**

Цель: дать студентам знания о способах выяснения характера экспериментальной зависимости измерительной характеристики преобразователя, научить методам приведения любой нелинейной зависимости к линейному виду. Далее, от установленных числовых параметров линейной зависимости нетрудно перейти к числовым параметрам исходной нелинейной зависимости и установить ее аналитический вид.

Исследование измерительной характеристики преобразователя и все необходимые манипуляции по преобразованию координат удобно провести на основе нелинейных зависимостей. представленных экспериментальными вольт-амперными характеристиками полупроводниковых диодов с короткой и с длинной базой. Как известно, нелинейные вольт-амперные характеристики таких диодов могут быть либо экспоненциального вида, либо степенного вида.

На рисунке 1 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода с длинной базой и двумя торцевыми инжектирующими контактами: расстояние между торцевыми контактами  $d_z = 0,238$  см. сечение  $A_\Gamma = 0,012$  см<sup>2</sup>. Измерения выполнены при комнатной температуре.

Из рис.2.1 видно, что ВАХ представляет собой нелинейную функцию. Причем экспериментатору совершенно не ясно, является ли эта зависимость степенной функцией или экспоненциальной. В теории физики полупроводниковых приборов описаны разные режимы работы полупроводниковых диодов. Причем, соответствующие закономерности зависимости тока от приложенного к диоду напряжению, могут определяться разными условиями, конструктивными особенностями диода, например, толщиной базы диода, температурой окружающей среды и приложенными напряжениями.

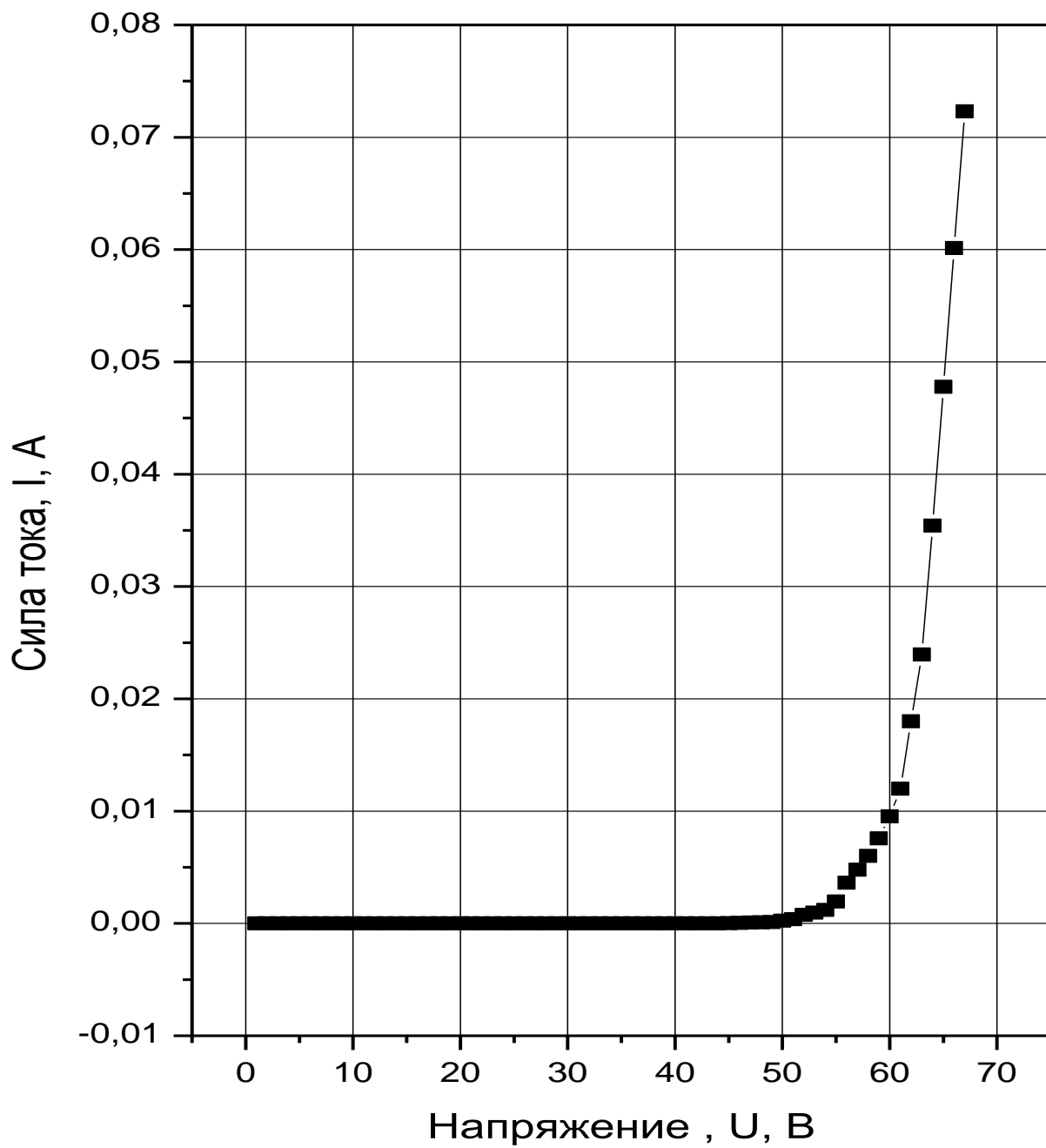


Рисунок 2.1 – ВАХ диода

Поэтому из полученных в эксперименте данных очень важно уметь выявлять необходимые закономерности и уметь проводить анализ экспериментальных данных. В том числе с учетом экспериментальных ошибок (погрешностей).

В подобных задачах анализа экспериментальных данных всегда имеется некоторая неопределенность и нужно вначале выбрать правильно вид нелинейной функции, которую затем, на втором этапе, подвергнуть более глубокому анализу с целью определения важных численных параметров, входящих в аналитический вид функции.

Линейная зависимость очень широко распространена в физике, поскольку многие физические закономерности предполагают, что одна величина должна быть пропорциональна другой. И даже когда зависимость нелинейная, обычно стараются с помощью простого преобразования координат получить прямо пропорциональную зависимость.

Например, если анализируемая нелинейная зависимость степенная,  $I \sim aU^n$ , то для проверки этого предположения и определения величины показателя  $n$  степенная зависимость преобразуется к линейной простым логарифмированием измеренных величин  $\lg I \sim \lg a + n \lg U$ . Для этого все экспериментальные точки нужно пересчитать в логарифмы и получить новые две колонки таблицы данных  $\lg I$  и  $\lg U$ . Далее необходимо построить график экспериментальной зависимости в других координатах  $\lg I$  ( $\lg U$ ) и проверить его линейность. Если окажется, что вся исходная экспериментальная зависимость в новых координатах представляет собой линейный график и линейную зависимость, то предположение о том, что исходная экспериментальная зависимость степенная оказалось верным. Отметим, что на практике, в широком диапазоне изменения координат, в данном случае напряжения и тока, обычно вся характеристика не спрямляется, но могут наблюдаться отдельные участки, на которых характеристика линейная. Именно эти участки и нужно анализировать далее, более глубоко, на втором этапе. В любом случае, используя свойства линейной функции, мы сможем определить из графика численный коэффициент  $a$  и показатель степени  $n$  и выяснить аналитический вид исходной нелинейной зависимости, если она степенная.

	U[Y]	IgU[Y]	Itok[Y]	IgI[Y]
1	1,30017E-5	-4,886	7,14794E-13	-12,14582
2	1,58489E-5	-4,8	1,4262E-12	-11,84582
3	1,86209E-5	-4,73	2,06149E-12	-11,68582
4	2,63027E-5	-4,58	3,7513E-12	-11,42582
5	4,46684E-5	-4,35	7,65916E-12	-11,11582
6	7,76247E-5	-4,11	1,4262E-11	-10,84582
7	9,12011E-5	-4,04	1,75462E-11	-10,75582
8	9,61612E-5	-4,017	1,79549E-11	-10,74582
9	1,28825E-4	-3,89	2,53619E-11	-10,59582
10	1,79887E-4	-3,745	3,58246E-11	-10,44582
11	3,54813E-4	-3,45	7,14794E-11	-10,14582
12	5,24807E-4	-3,28	1,13287E-10	-9,94582
13	6,99842E-4	-3,155	1,4262E-10	-9,84582
14	8,70964E-4	-3,06	1,79549E-10	-9,74582
15	0,00174	-2,76	3,58246E-10	-9,44582
16	0,00347	-2,46	7,14794E-10	-9,14582
17	0,00515	-2,288	1,13287E-9	-8,94582
18	0,00684	-2,165	1,4262E-9	-8,84582
19	0,00851	-2,07	1,79549E-9	-8,74582
20	0,03311	-1,48	7,14794E-9	-8,14582
21	0,04898	-1,31	1,13287E-8	-7,94582
22	0,06324	-1,199	1,4262E-8	-7,84582
23	0,07727	-1,112	1,79549E-8	-7,74582
24	0,13709	-0,863	3,58246E-8	-7,44582
25	0,22387	-0,65	6,01424E-8	-7,22082
26	0,2884	-0,54	7,57148E-8	-7,12082
27	0,34198	-0,466	9,53194E-8	-7,02082
28	0,38815	-0,411	1,2E-7	-6,92082
29	0,56754	-0,246	2,39431E-7	-6,62082
30	0,82985	-0,081	4,77728E-7	-6,32082
31	1,04713	0,02	7,57148E-7	-6,12082
32	1,25026	0,097	9,53194E-7	-6,02082
33	1,4388	0,158	1,2E-6	-5,92082
34	1,58489	0,2	1,2E-6	-5,92082
35	2,23872	0,35	2,39431E-6	-5,62082
36	2,44906	0,389	2,39431E-6	-5,62082
37	3,40408	0,532	4,77728E-6	-5,32082
38	3,63078	0,56	4,77728E-6	-5,32082
39	4,23643	0,627	7,57148E-6	-5,12082
40	4,46684	0,65	7,57148E-6	-5,12082
41	4,88652	0,689	9,53194E-6	-5,02082
42	5,24807	0,72	9,53194E-6	-5,02082
43	5,45758	0,737	1,2E-5	-4,92082
44	5,68853	0,755	1,2E-5	-4,92082

Рис.22. Таблица измеренных в эксперименте значений силы тока I через диод и соответствующих напряжений U.

В случае имеем график линейной зависимости в координатах  $(\ln I)(U)$ , а во втором случае линейный график в координатах  $(\lg I)(U)$ . В любом случае, используя свойства линейной функции, мы сможем определить из графика все численные коэффициенты  $b$  и  $c$  и выяснить аналитический вид.

В таблице на рис.2.2 показаны значения силы тока I в амперах и напряжения U в вольтах. Соответственно сделан пересчет этих значений в логарифмы – колонки IgU и IgI. Предполагая, что исходная нелинейная функция степенная, построим ее график в двойных логарифмических координатах (рис.2.3): только экспериментальные точки, без соединяющей их линии.

Второй случай нелинейной характеристики, часто реализующийся на практике, это экспоненциальная характеристика. Случай экспоненциальных вольт-амперных характеристик действительно также имеет место на практике.

Итак, если  $I \sim be^{cU}$ , то исходная нелинейная, предположительно, экспоненциальная зависимость, также может быть линеаризована преобразованием координат. Достаточно перестроить исходную нелинейную зависимость в полулогарифмических координатах и получить график зависимости  $\lg I(U)$  или  $\ln I(U)$ . Причем, нет принципиальной разницы в том, какой логарифм для преобразования выбрать. Конечный результат будет отличаться наличием постоянного коэффициента в случае десятичного логарифма, что связано с тем, что  $\lg(e)=4.3$  с точностью до десятых долей.

Другими словами, зависимость превращается в линейную вида 1)

$$\ln I \sim \ln be^{cU} = \ln b + cU \quad \text{или} \quad 2)$$

$$\lg I \sim \lg be^{cU} = \lg b + cU \lg e = \lg b + 4,3cU, \quad \text{если}$$

использовать десятичный логарифм. В первом

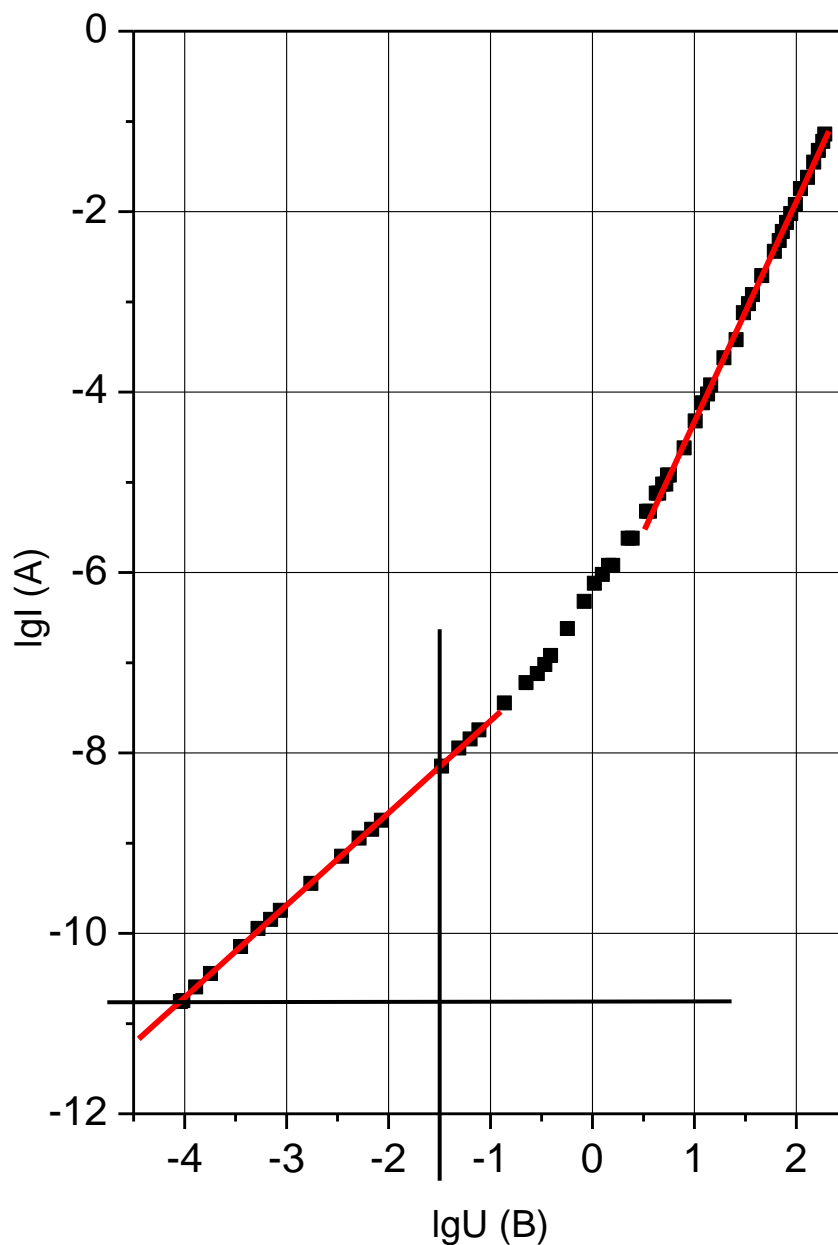


Рис.2.3 ВАХ в двойных логарифмических координатах

Из рис.2.3 видно, что на ВАХ в двойных логарифмических координатах действительно проявляются линейные участки. Вначале характеристики и во второй ее половине. Эта ситуация вполне согласуется с теоретическими представлениями. В рассмотренном диоде с длинной базой и двумя инжектирующими контактами реализуется режим двойной инжекции, что приводит к протяженному линейному участку во второй половине ВАХ. Причем показатель степени на этом участке равен 2 или немного больше. А первый линейный участок соответствует закону Ома, когда никакой инжекции еще нет при малых напряжениях и база диода играет просто роль сопротивления. В этих предположениях на первом участке будет выполняться степенная зависимость с показателем степени  $n=1$ .

Проверить эти предположения можно из графика на рис.2.3. , рассчитав тангенс угла

наклона прямой линии на каждом линейном участке. В соответствии с рисунком 3 выберем катеты треугольника, как показано на рис.3. Катет противолежащий определяется координатами  $\lg I = -8.145$  (20 строка таблицы рис.2) и  $\lg I = -10.745$  (8 строка таблицы рис.2). Катет прилежащий к углу определяется координатами  $\lg U = -4$  и  $\lg U = -1.5$ . Несложно вычислить по модулю длины катетов и поделить катет противолежащий на катет прилежащий, тогда тангенс угла наклона определится как  $(10.745 - 8.145) / (4 - 1.5) = 2.6 / 2.5 = 1.04$ . Но ведь это и есть показатель исходной степенной функции  $n$ . Таким образом мы действительно определили, что на первом линейном участке сила тока прямо пропорциональна приложенному напряжению, что соответствует закону Ома.

Более точно эту обработку можно провести в специальном программном обеспечении, реализующем методы линейной аппроксимации методом наименьших квадратов, таком, как Origin или SciDavis (это свободно распространяемый аналог Origin). Соответствующие линии аппроксимации показаны на рис. 3 красным цветом, а соответствующие им чилловые распечатки приведены ниже.

Участку первому на рис.3 соответствуют следующие результаты линейной аппроксимации.

Linear Regression for DATA3\_LGI:

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error
A	-6,62964	0,01291
B	1,01974	0,00418

R	SD	N	P
0,9999	0,01218	14	<0.0001

Из этих данных следует, что экспериментальная зависимость в двойных логарифмических координатах представляется аналитическим выражением  $Y = A + B * X$ , что соответствует в наших координатах выражению  $\lg I = a + n * \lg U$ . Параметр A и B приведены с абсолютными погрешностями:  $A = -6,62964 \pm 0,01291$  или более правильная запись с меньшим числом цифр после запятой :  $A = -6,630 \pm 0,013$ , и для параметра  $B = 1,019 \pm 0,004$ .

Приведен также коэффициент линейной корреляции  $R=0,9999$ , это очень близко к 1, что говорит о хорошей линейности характеристики. Приведено также стандартное отклонение  $SD=0,01218$ . Количество точек в анализ  $N=14$ .

Таким образом, видно, что в терминах наших обозначений показатель степенной зависимости  $n = 1,019 \pm 0,004$ .

Такая же обработка для второго линейного участка дает следующие результаты

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error	
-----			
A	-6,77219	0,0226	
B	2,44214	0,0149	
-----			
R	SD	N	P
-----			
0,99963	0,03122	22	<0.0001
-----			

Из этих данных следует, что в терминах наших обозначений показатель степенной зависимости  $n = 2,44 \pm 0,015$ . То есть этот участок близок к квадратичному, что согласуется с теорией двойной инжекции в полупроводниковых длинных диодах.

Далее рассмотрим другой случай. Если бы мы предположили, что исходная нелинейная характеристика не степенная, а экспоненциальная, то мы должны были бы проверить это, перестроив ВАХ в полулогарифмических координатах. Соответствующая обработка приведет нас к результатам, показанным на рис.4.

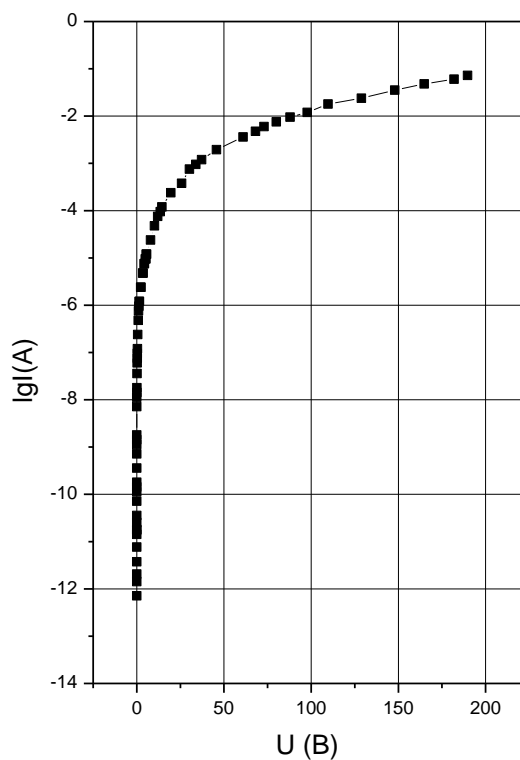


Рисунок 2.4 ВАХ, перестроенная в полулогарифмических координатах



Из рис.2.4 видно, что невозможно выделить спрямляющиеся участки ВАХ, вся она в целом изображается некоторой дугой. Это наглядно демонстрирует тот факт, что исходная нелинейная характеристика не является экспоненциальной. Следовательно, наше предположение о исходной нелинейной зависимости вида  $I \sim be^{cU}$  оказывается неверным.

Последовательность выполнения лабораторной работы.

- 1) Для работы в лаборатории получите у преподавателя файл с данными ВАХ для построения и анализа вольт-амперной характеристики. Пример таких данных показан на рисунке 2.
- 2) Проведите обработку данных по рассмотренным методикам, предполагая, что исходная зависимость тока от напряжения степенная.
- 3) Проведите обработку данных по рассмотренным методикам, предполагая, что исходная зависимость тока от напряжения экспоненциальная.
- 4) Установите, какому типу нелинейности соответствует исходная экспериментальная характеристика.
- 5) Проведите глубокий анализ, для определения числовых параметров аналитического вида исходной характеристики. Параметры приведите с соответствующими погрешностями.

## **Тема занятий 2 – «Основы метрологии. Погрешности измерений».**

### **Лабораторная работа «Статистический анализ результатов многократных косвенных измерений одной величины».**

Рассмотрим важный для практики случай, когда нельзя применять обычные статистические методы к результатам прямых измерений, но можно — к конечным результатам. На рис. 3.1 представлена экспериментальная вольт-амперная характеристика (ВАХ) кремниевой  $p^+-p-n^+$ -структуры при  $T = 292$  К, полученная в работе [3].

ВАХ построена в двойных логарифмических координатах для определения показателя степенной зависимости силы тока  $I$  от напряжения  $U$  на различных участках ВАХ. Участок ВАХ, подчиняющийся закону Ома, лежит в интервале  $\lg U \leq -0,5$ . Численные данные, соответствующие этому участку, представлены в табл. 1.3. Нет никакого смысла усреднять разные значения напряжений и силы тока, приведенных в табл. 1.3, так как они *не являются* различными результатами измерений одной и той же величины.

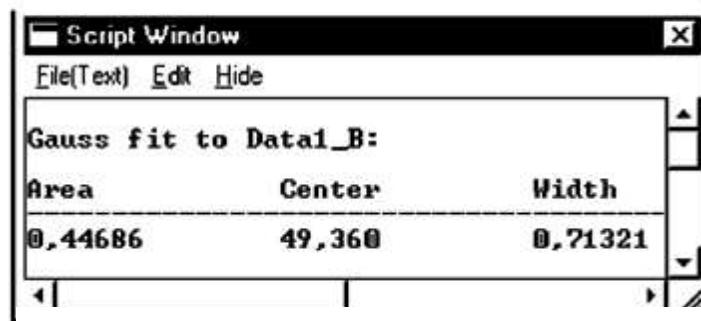
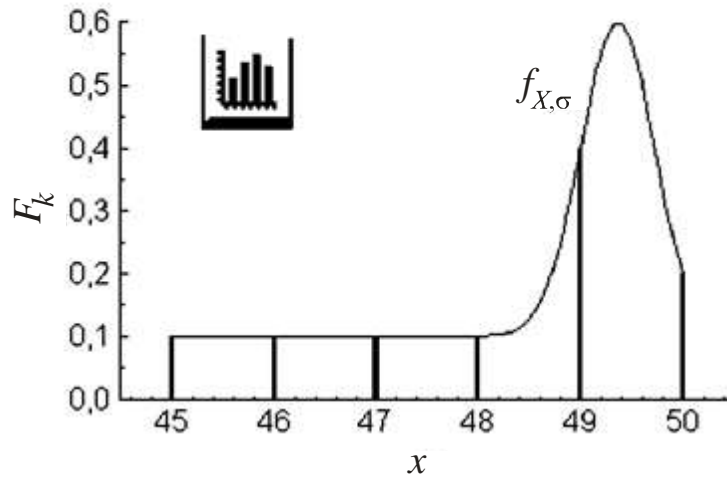


Рисунок 3.1. Пример проведенной в пакете Origin аппроксимации распределением Гаусса ограниченной выборки значений

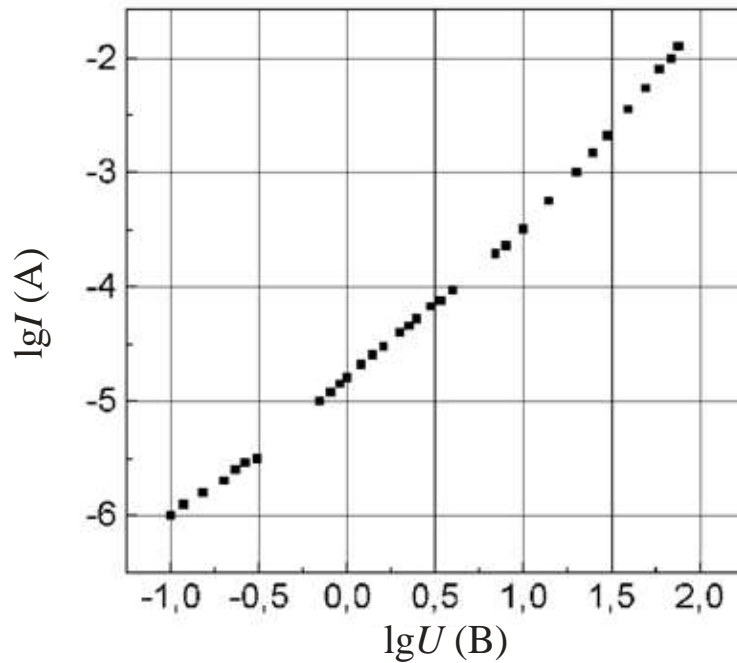


Рисунок 3.2 Измеренная в эксперименте вольт-амперная характеристика

Таблица 1.3 Результаты совместных измерений ВАХ, соответствующих начальному участку, где выполняется закон Ома

Номер измерения	$\lg U$ (В)	$\lg I$ (А)	$U$ , В	$I$ , А	$S$ , Ом <sup>-1</sup> ·см <sup>-1</sup>
1	-1,00	-6,00	0,10	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$3,07 \cdot 10^{-4}$
2	-0,93	-5,90	0,12	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$3,29 \cdot 10^{-4}$
3	-0,82	-5,80	0,15	$1,58 \cdot 10^{-6}$	$3,19 \cdot 10^{-4}$
4	-0,70	-5,70	0,20	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$3,08 \cdot 10^{-4}$
5	-0,64	-5,60	0,23	$2,51 \cdot 10^{-6}$	$3,34 \cdot 10^{-4}$
6	-0,58	-5,54	0,26	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$3,34 \cdot 10^{-4}$
7	-0,51	-5,50	0,31	$3,16 \cdot 10^{-6}$	$3,14 \cdot 10^{-4}$

С другой стороны, можно объединить значения  $I$  и  $U$  для вычисления равновесной удельной проводимости  $S^1$  базовой области  $p^+ - p - n^+$ -структуры по формуле

$$S = \frac{I \cdot l}{A \cdot U}, \quad (3.1)$$

где  $l$  — расстояние между  $p^+$ - и  $n^+$ -контактами, см;  $A$  — площадь контактов, см<sup>2</sup>.

Значения  $l$  и  $A$  измерены так, что погрешность их измерения значительно меньше требуемой точности определения  $S$ .

Формула (3.1) следует из закона Ома

$$I = Aj = ASE = AS \frac{U}{l},$$

где  $j$  — плотность тока;  $E$  — напряженность электрического поля, усредненная по длине образца.

Наши данные для  $S$  в последнем столбце табл. 1.3 представляют собой результаты косвенных измерений одной и той же величины, и, следовательно, к ним применимы статистические методы.

Для примера проведем статистическую обработку этих данных с помощью пакета Origin. Для этого нужно данные последнего столбца табл. 1.3 ввести в любую колонку таблицы Worksheet и, кликнув правой кнопкой мыши по заголовку колонки, выбрать в раскрывшемся меню пункт

<sup>1</sup> В физике полупроводников принято проводимость обозначать греческой буквой  $\sigma$ . Здесь использовано обозначение  $S$ , чтобы не путать проводимость с параметром ширины распределения Гаусса.

Statistics in Columns (статистика по столбцу). Результаты расчета появятся в окне, показанном на рис. 1.4: среднее  $\bar{S}$  (Mean), CO (sd — standard deviation) — см. выражение (1.8),

	Col(X)	Mean(Y)	sd(yEr±)	se(yEr±)	Sum	N
1	A	3,20714E-4	1,16864E-5	4,41704E-6	0,00225	7

Рис. 3.3. Результаты статобработки в пакете Origin

COС — стандартная ошибка (se — standard error) — см. выражение (1.9).

Наилучшей оценкой  $S$  будет среднее  $\bar{S} = 3,21 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , COС —  $\sigma_{\bar{S}} = 0,04 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Из табл. 1.2 для  $N=7$  и  $\alpha = 0,95$  определим  $t_{\alpha} = 2,45$ , тогда по формуле (1.15)  $\Delta S = t_{\alpha} \cdot \sigma_{\bar{S}} = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  и наш окончательный результат, основанный на этих семи измерениях, для удельной проводимости будет равен

$$S = (3,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}. \quad (1.22)$$

Относительная погрешность в соответствии с формулой (1.12)

$$\varepsilon = \pm \Delta S / \bar{S} \cdot 100\% = (0,1/3,2) \cdot 100\% = 3\%. \quad (1.23)$$

Задача статистической обработки результатов многократных измерений не является наиболее важной задачей статистики, но эта простая задача должна быть хорошо понята, прежде чем мы сможем перейти к более общим проблемам. Далее мы обсудим одну из таких важных общих проблем — аппроксимацию экспериментальных результатов.

### Тема занятий 3 «Аппроксимация методом наименьших квадратов»

#### Лабораторная работа «Линейная аппроксимация измерительной характеристики преобразователя».

Цель: научить студентов проводить аппроксимацию измерительных характеристик преобразователей, построенных из экспериментальных результатов.

Изучите самостоятельно предложенный материал

**При анализе измеренных  $N$  пар значений  $(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$  и аппроксимации полученной зависимости прямой линией  $y=A+Bx$  решаются две основные задачи:**

1) определение наилучших оценок постоянных  $A$  и  $B$ , основанных на данных  $(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$ , то есть нахождение прямой линии, которая наилучшим образом аппроксимирует результаты измерений;

Рассмотрим первую задачу аппроксимации. Для упрощения будем предполагать, что погрешность в измерениях  $x$  пренебрежимо мала, в противном случае анализ существенно усложняется. Такое предположение очень часто оправдывается на практике. Например, при измерении ВАХ (см. рис. 1.3) напряжение  $U$  подавалось от стабилизированного источника питания и точно измерялось. Сделаем еще одно допущение, разумное для многих экспериментов. Предположим, что все погрешности в  $y$  одинаковы по величине, если говорить точнее, что результат измерения каждого  $y_i$  подчиняется распределению Гаусса с одинаковой шириной  $\sigma_y$  во всех измерениях и с центром на истинном значении  $Y_i$ , которое можно было бы вычислить, зная параметры  $A$  и  $B$ :

$$Y_i = A + Bx_i. \quad (1.24)$$

*оценки метода наименьших квадратов для постоянных  $A$  и  $B$ :*

$$A = \frac{\left( \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) \left( \sum_{i=1}^N y_i \right) - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right) \left( \sum_{i=1}^N x_i y_i \right)}{D}; \quad (1.27)$$

$$B = \frac{N \left( \sum_{i=1}^N x_i y_i \right) - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right) \left( \sum_{i=1}^N y_i \right)}{D}, \quad (1.28)$$

где

$$D = N \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2. \quad (1.29)$$

Формулы (1.27) и (1.28) дают наилучшие оценки постоянных  $A$  и  $B$  для прямой линии  $y = A + Bx$ , основанные на измеренных точках  $(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)$ . Получившаяся линия называется *линией аппроксимации методом наименьших квадратов* этих данных, или *линией регрессии  $y$  от  $x$* .

Оценка  $\sigma_y$  будет определяться суммой квадратов отклонений:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (y_i - A - Bx_i)^2}, \quad (1.30)$$

где  $A$  и  $B$  определяются выражениями (1.27) и (1.28).

абсолютные погрешности  $A$  и  $B$  определяют простым расчетом ошибок в косвенных измерениях, исходя из погрешности  $\sigma_y$  для  $y_1, \dots, y_N$ :

$$(\Delta A)^2 = \sigma_A^2 = \sigma_y^2 \sum_{i=1}^N x_i^2 / D; \quad (1.31)$$

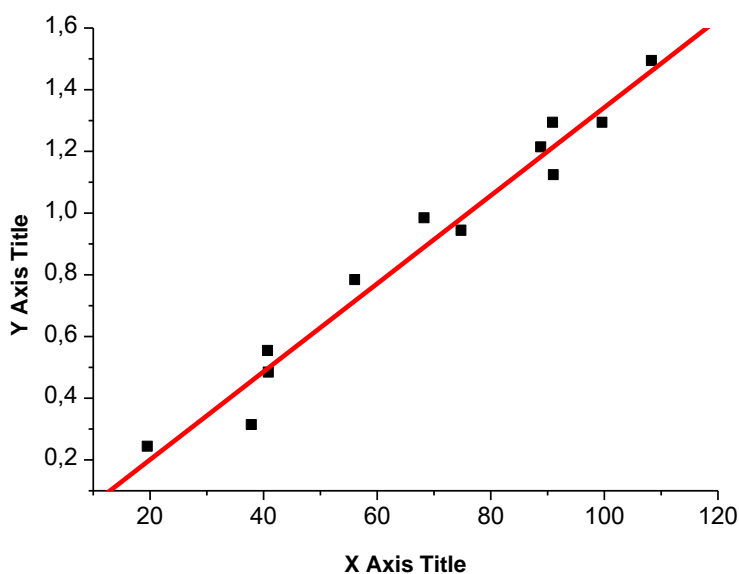
$$(\Delta B)^2 = \sigma_B^2 = N \sigma_y^2 / D, \quad (1.32)$$

где  $D$  определяется выражением (1.29).

Построив график измеренной зависимости и проведя через точки экспериментальных результатов линию аппроксимации, необходимо от каждой точки отложить вертикальные черточки ошибок длиной в одно стандартное отклонение (1.30) по каждую сторону от точки. Тогда мы можем видеть, действительно ли измеренные точки лежат разумно близко к линии. Если это так, то измерения подтверждают наше предположение, что  $x$  и  $y$  связаны линейно.

В программе Origin проведите линейную аппроксимацию данных, представленных ниже для примера и изучения. Получите у преподавателя экспериментальные данные и проведите такую же их обработку.

### Задание 1



Data1		
	A[X]	B[Y]
1	19,76	0,24
2	38,09	0,31
3	40,95	0,55
4	41,08	0,48
5	56,29	0,78
6	68,51	0,98
7	75,01	0,94
8	89,05	1,21
9	91,13	1,29
10	91,26	1,12
11	99,84	1,29
12	108,55	1,49
13		

Проверочный ответ :  $A = -0,085 \pm 0,056$ ;  $B = 0,0143 \pm 8,09162E-4$

**Задание 2** В программе Origin проведите линейную аппроксимацию данных

Data3		
	A[X]	C[Y]
1	19,76	0,11758
2	38,09	0,1726
3	40,95	0,40789
4	41,08	0,33255
5	56,29	0,68888
6	68,51	0,97015
7	75,01	0,91136
8	89,05	1,331
9	91,13	1,46516
10	91,26	1,1853
11	99,84	1,46516
12	108,55	1,81878

Проверочный ответ :

$$A = -0,41404 \pm 0,08809; \quad B = 0,01932 \pm 0,0012$$

**Задание 3** В программе Origin проведите линейную аппроксимацию данных

Data4		
	A[X]	D[Y]
1	19,76	0,02627
2	38,09	0,05046
3	40,95	0,21773
4	41,08	0,15387
5	56,29	0,53069
6	68,51	0,94979
7	75,01	0,85404
8	89,05	1,62593
9	91,13	1,91427
10	91,26	1,33508
11	99,84	1,91427
12	108,55	2,76455

Проверочный ответ :  $A = -0,48803 \pm 0,18687; \quad B = 0,23325 \pm 0,02539$

Все выполненные задания должны быть представлены с анализируемым графиком, демонстрирующим линейную аппроксимацию и анализ полученных зависимостей с подробным

описанием.

#### Тема занятий 4 «Измерительная техника. Методы и средства измерения физических величин»

##### Лабораторная работа «Исследование измерительных характеристик датчика температуры с частотным выходом».

Цель: дать студентам знания о современных датчиках температуры с частотным выходом и познакомить с особенностями частотных сигналов датчиков, особенностями осциллограмм этих сигналов и с методами обработки таких осциллограмм, установления значений частоты сигнала, построение соответствующей частотно-температурной измерительной характеристики такого измерительного преобразователя и ее анализ.

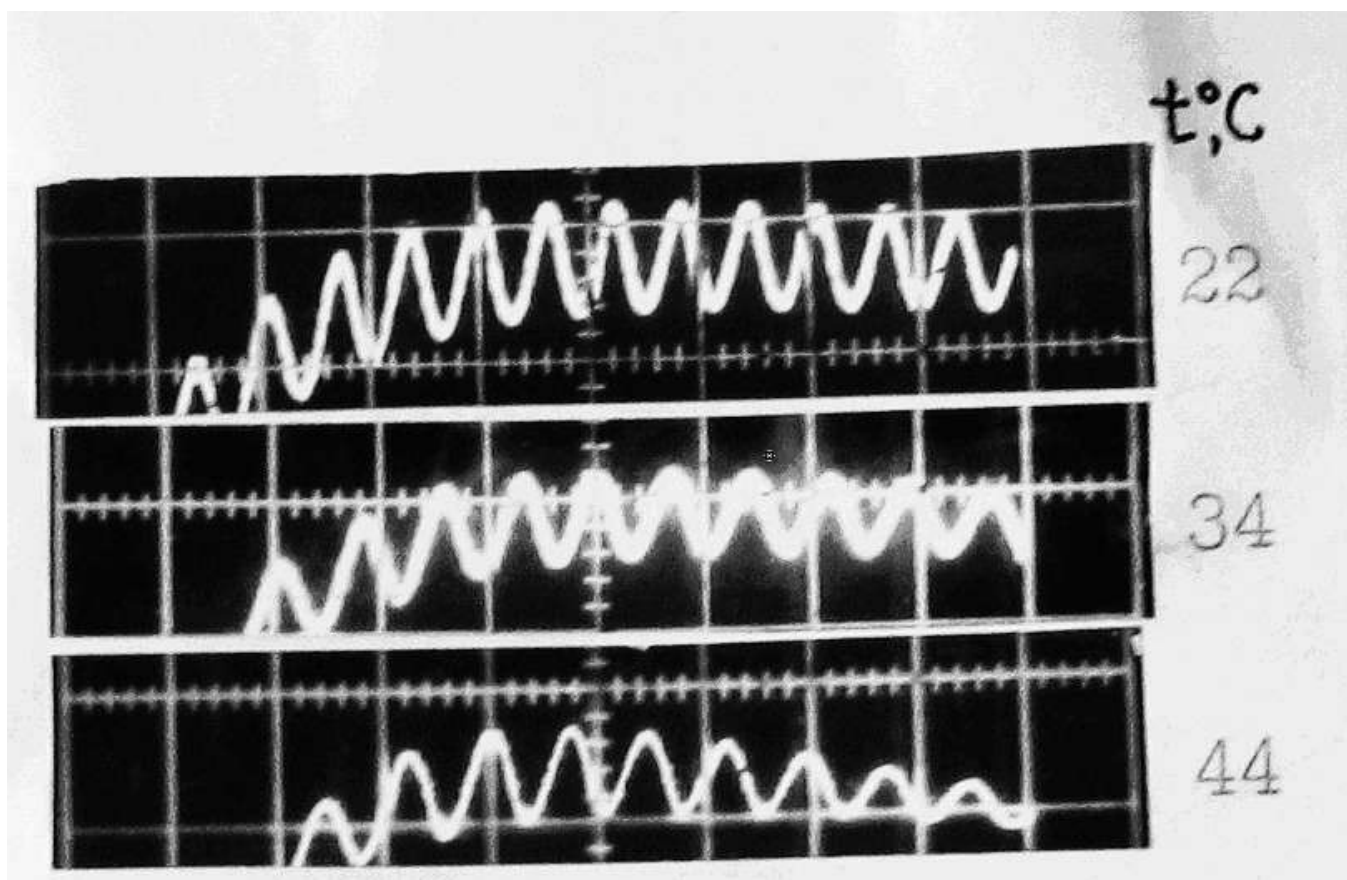


Рисунок 5.1 – Осциллограммы сигналов частотного датчика температуры при различных значениях температуры 22, 34 и 44 градусов Цельсия.

На рисунке 5.1 представлены осциллограммы сигналов, которые надо обработать и провести их анализ. Масштаб : по – вертикали 0,5 В/б.дел; развертка по времени 10 мкс/б.дел.

Необходимо определить параметры характеристики  $f(t)$ , ее аналитический вид, провести анализ линейности, установить чувствительность частоты к температуре. Определить погрешности параметров и коэффициент линейности.

Задача: 1) для каждой температуры определить частоту (кГц) и построить график  $f(t)$  и 2) определить амплитуду (размах), график  $A(t)$ , чувствительность  $A$  к  $t$  ( $t$  – температура в градусах Цельсия).



Дать ответ на вопрос: если считать, что ошибка в определении  $t$  (задании  $t$ ) ничтожна, то какая же ошибка (погрешность) у частоты  $\Delta f$ , если ошибки в определении параметров линейной зависимости  $f=Ax+B$  известны:  $\Delta A$  и  $\Delta B$  ?

### Пример выполнения лабораторной работы.

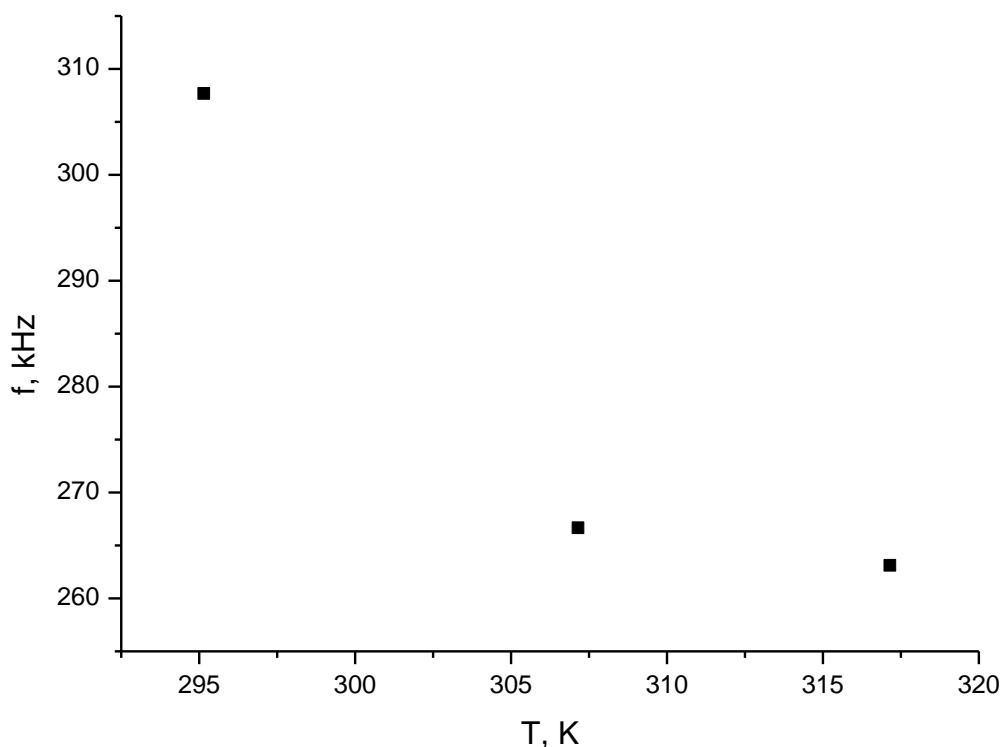
Используя полученную осциллограмму определим частоту выходного сигнала для каждого значения температуры через период  $T$ , при цене большого деления 10 мкс:

$$T = \frac{N \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{N_T} \quad \text{где} \quad N - \text{число больших делений}; \quad N_T - \text{число целых периодов}$$

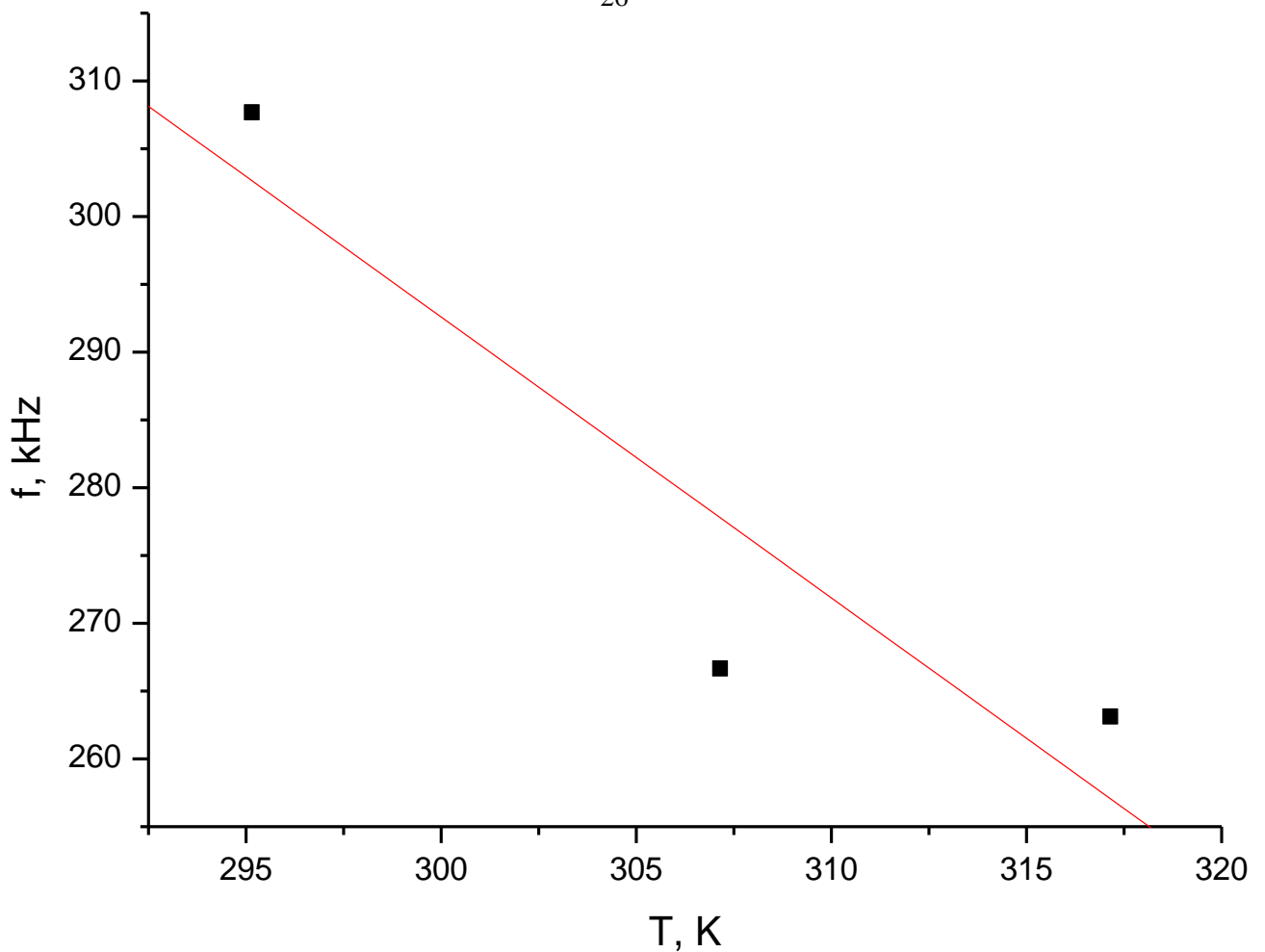
Температура $t$ , °C	Напряжение $U$ , мВ	Период $T$ , мкс	Частота $f$ , кГц	Температура $T$ , К
22	450	3,25	307,69	295,15
34	410	3,75	266,67	307,15
44	390	3,8	263,12	317,15

Также определим амплитуду для каждого значения температуры, при цене большого деления в 200 мВ и результаты внесем в таблицу.

Построим график зависимости  $f(T)$ .



Проведем линейную аппроксимацию в программе Origin. Для этого в пункте меню Tools



выберем Linear fit.

Красной линией показана линейная аппроксимация. Отразим данные полученные в результате аппроксимации.

Аналитический вид прямой имеет следующий вид:

$$f = A + B \cdot T$$

где  $A = 914,13$   $\Delta A = 268,16$

$B = -2,07$   $\Delta B = 0,87$

В итоге зависимость частоты  $f$  от температуры имеет вид:

$$f = 914,13 - 2,07 \cdot T$$

$$\Delta f = 269,03$$

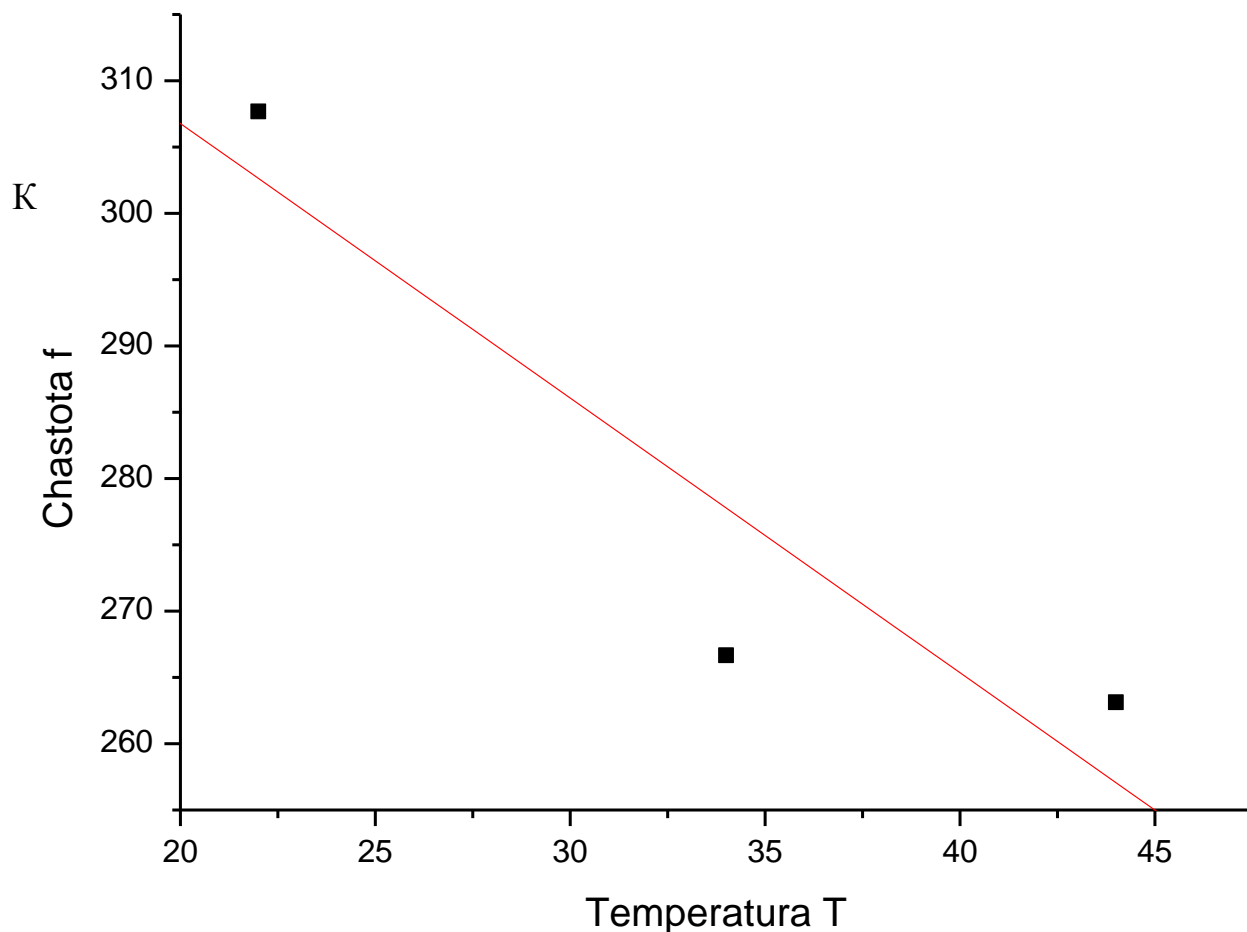
Коэффициент корреляции равен  $R = 0,92$ .

Коэффициент линейности  $K_{л} = 1 - R = 1 - 0,92 = 0,08$ .

Чувствительность частоты к магнитному полю определим по следующей формуле:

$$N = \frac{\Delta f}{\Delta T} = \frac{f_{22} - f_{44}}{44 - 22} = \frac{307,69 - 263,12}{44 - 22} = \frac{44,57}{22} = 2,03 \left[ \frac{\text{кГц}}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

В случае, если на графике температуру указывать в градусах Цельсия, то будем иметь следующие значение ошибок:



Красной линией показана линия линейной аппроксимации. Отразим данные полученные в результате аппроксимации.

Аналитический вид прямой имеет следующий вид:

$$f = A + B \cdot T$$

где  $A = 348,22$   $\Delta A = 30,19$

$$B = -2,07 \quad \Delta B = 0,87$$

В итоге зависимость частоты  $f$  от магнитной индукции  $B$  имеет вид:

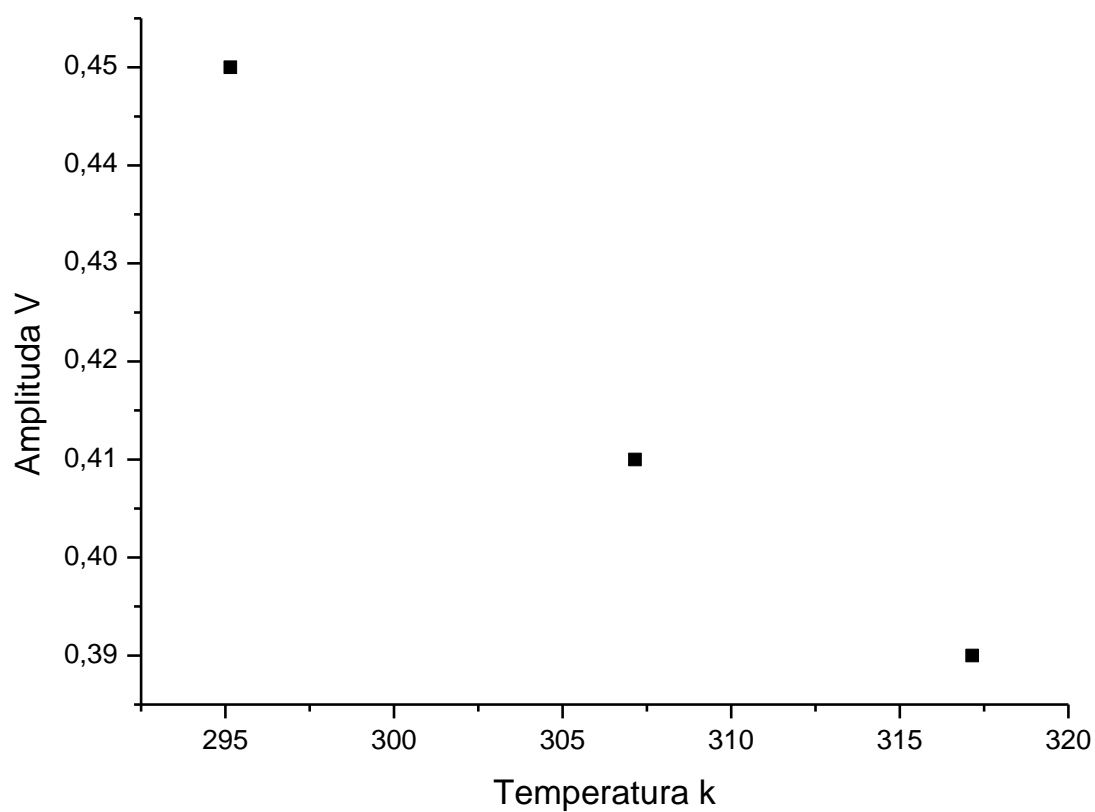
$$f = 348,22 - 2,07 \cdot T$$

$$\Delta f = 31,06$$

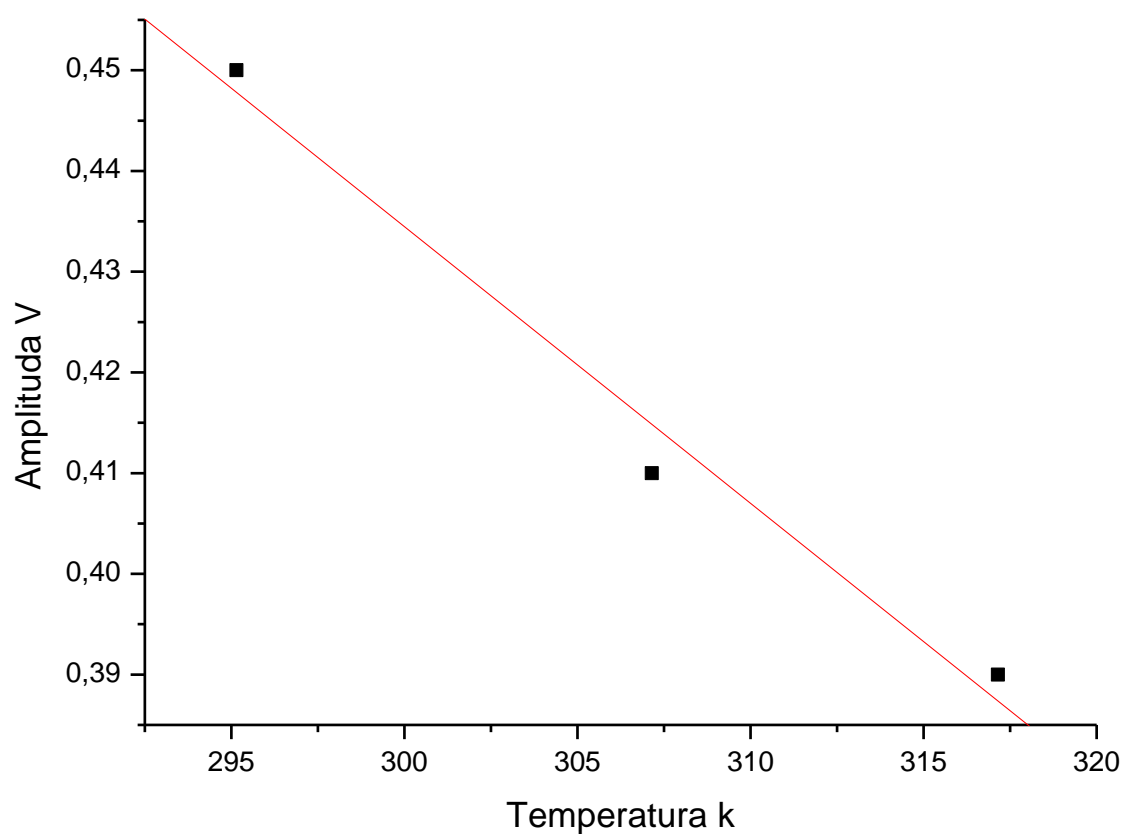
Коэффициент корреляции равен  $R = 0,92$ .

Коэффициент линейности  $K_{л} = 1 - R = 1 - 0,92 = 0,08$ .

Построим график зависимости амплитуды колебаний от температуры  $U_m(T)$ .



Проведем линейную аппроксимацию в программе Origin. Для этого в пункте меню Tools выберем Linear fit.



Красной линией показана линейная аппроксимация. Отразим данные полученные в результате аппроксимации.

Аналитический вид прямой имеет следующий вид:

$$Um = A + B \cdot T$$

где  $A = 1,2586$   $\Delta A = 0,1672$   
 $B = -0,0028$   $\Delta B = 0,0004$

В итоге зависимость частоты амплитуды от температуры имеет вид:

$$Um = 1,2586 - 0,0028 \cdot B$$

$$\Delta Um = 0,0004$$

Коэффициент корреляции равен  $R = 0,99$ .

Коэффициент линейности  $K_L = 1 - R = 1 - 0,99 = 0,01$ .

Чувствительность амплитуды к температуре определим по следующей формуле:

$$N = \frac{\Delta f}{\Delta Um} = \frac{f_{2.45} - f_{1.73}}{560 - 400} = \frac{330 - 265}{560 - 400} = \frac{65}{160} = 0,41 \left[ \frac{\text{кГц}}{\text{мВ}} \right]$$

Чувствительность амплитуды к температуре определим по следующей формуле:

$$N = \frac{\Delta Um}{\Delta T} = \frac{450 - 390}{44 - 22} = \frac{60}{22} = 2,73 \left[ \frac{\text{мВ}}{\text{К}} \right]$$

## Тема занятий 5 «Датчики. Измерение неэлектрических величин электрическими методами»

### Лабораторная работа «Исследование измерительных характеристик датчика магнитного поля с частотным выходом».

Цель: дать студентам знания о современных датчиках магнитного поля с частотным выходом и познакомить с особенностями частотных сигналов датчиков, особенностями осциллограмм этих сигналов и с методами обработки таких осциллограмм, установления значений частоты сигнала, построение соответствующей частотно-магнитной измерительной характеристики такого измерительного преобразователя и ее анализ.

На рис. 6.1 представлены осциллограммы информационного сигнала датчика магнитного поля с частотным выходом и соответствующие им значения магнитной индукции. Развертка по времени, цена большого деления 10 мкс. В одном большом делении 5 малых делений. Определить параметры характеристики  $f(B)$ , ее аналитический вид, провести анализ линейности, установить чувствительность частоты к магнитному полю (чувствительность датчика магнитного поля).

Определить погрешности параметров и коэффициент линейности: 1) для каждого магнитного поля определить частоту (кГц) и построить график  $f(B)$  и провести указанный выше анализ; 2) определить амплитуду (размах)  $A$ , если цена большого деления 0.5 в/Б.ДЕЛ. Построить график  $A(B)$ , описать его.

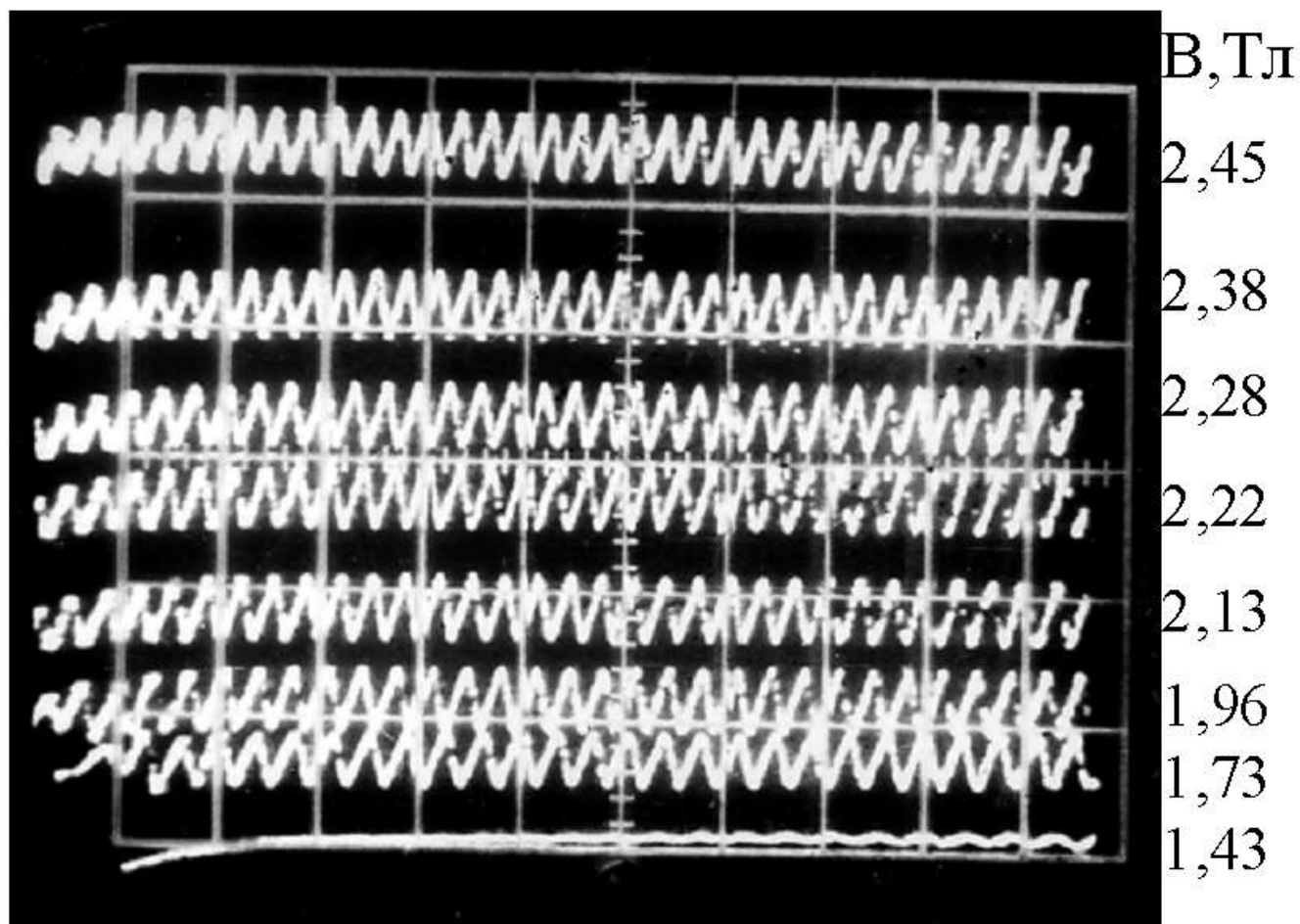


Рисунок 6.1. – Осциллограммы информационного сигнала датчика магнитного поля с частотным выходом и соответствующие им значения магнитной индукции  $B$ , Тл ( $T = 293$  К).

Пример выполнения лабораторной работы.

Используя полученную осциллограмму определим частоту выходного сигнала для каждого значения магнитной индукции через период  $T$ , при цене большого деления 10 мкс:

$$T = \frac{N \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{N_T}$$

где  $N$  – число больших делений

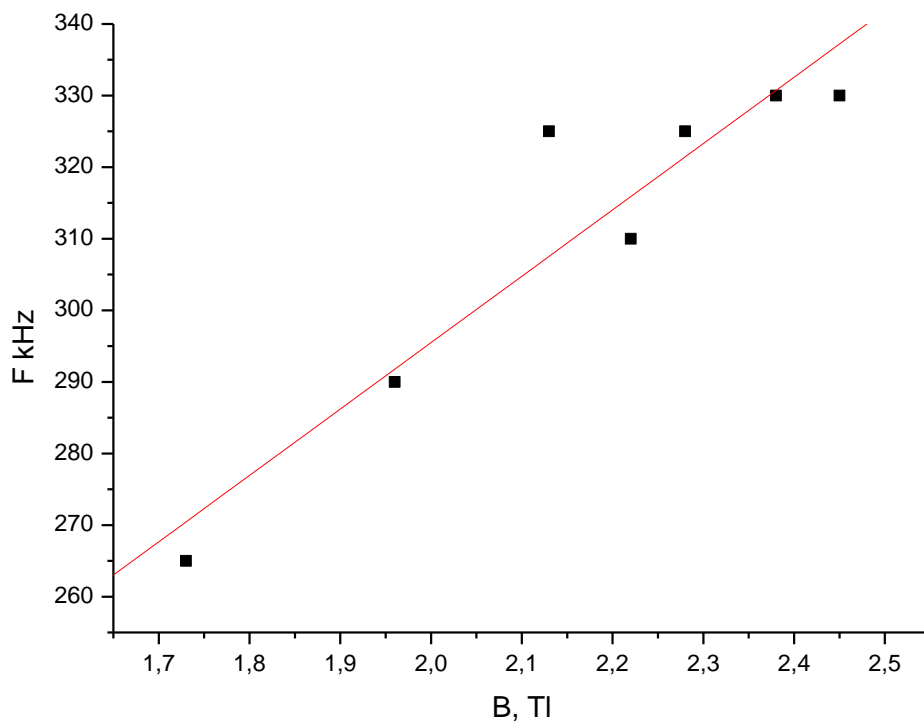
$N_T$  – число целых периодов

Также определим амплитуду для каждого значения магнитной индукции, при цене большого деления в 200 мВ и результаты внесем в таблицу.

Построим график зависимости  $f(B)$ .

Построим частотно – магнитную измерительную характеристику. Проведем линейную аппроксимацию в программе Origin. Для этого в пункте меню Tools выберем Linear fit.

Магнитная индукция В, Тл	Напряжение U, мВ	Период Т, мкс	Частота f, кГц
1,73	400	3,774	265
1,96	420	3,448	290
2,13	540	3,077	325
2,22	560	3,226	310
2,28	520	3,077	325
2,38	580	3,030	330
2,45	560	3,030	330



Красной линией показана линейная аппроксимация. Отразим данные полученные в результате аппроксимации.

Аналитический вид прямой имеет следующий вид:

$$f = A + B \cdot X$$

где  $A = 110,04$   $\Delta A = 33,19$

$B = 92,72$   $\Delta B = 15,25$

В итоге зависимость частоты  $f$  от магнитной индукции  $B$  имеет вид:

$$f = 110,04 + 15,25 \cdot B$$

$$\Delta f = 48.44$$

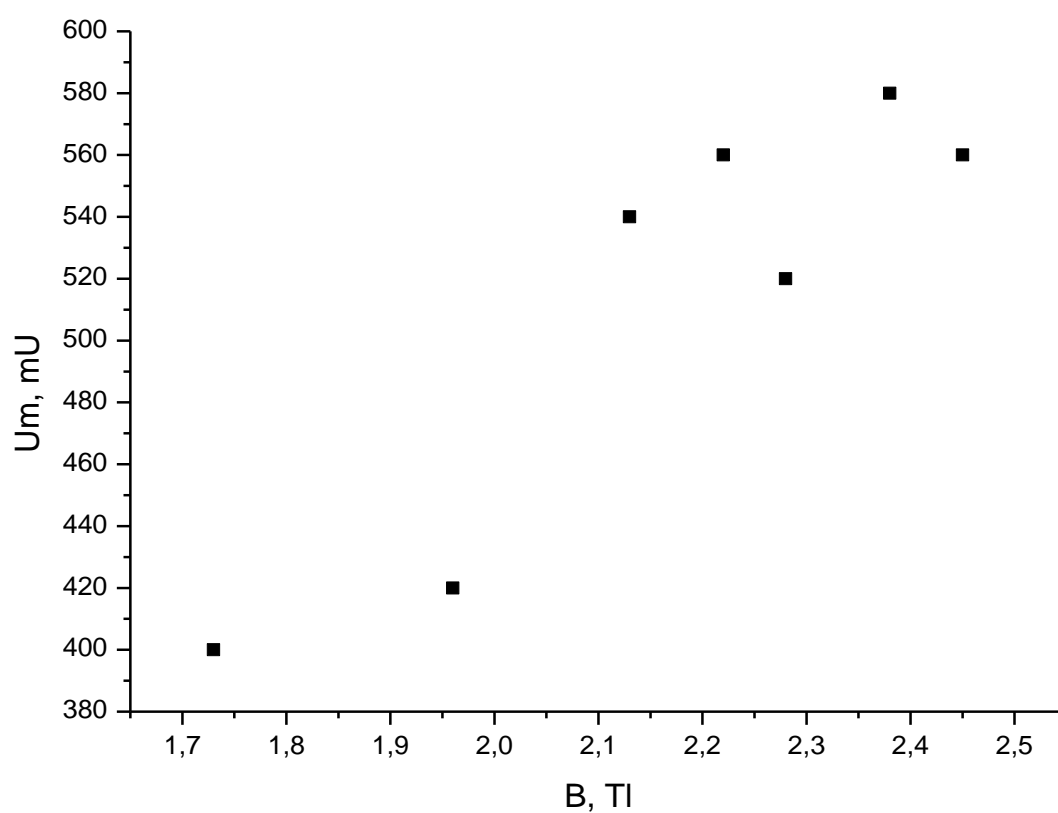
Коэффициент корреляции равен  $R = 0,94$ .

Коэффициент линейности  $K_{л} = 1 - R = 1 - 0,94 = 0,06$ .

Чувствительность частоты к магнитному полю определим по следующей формуле:

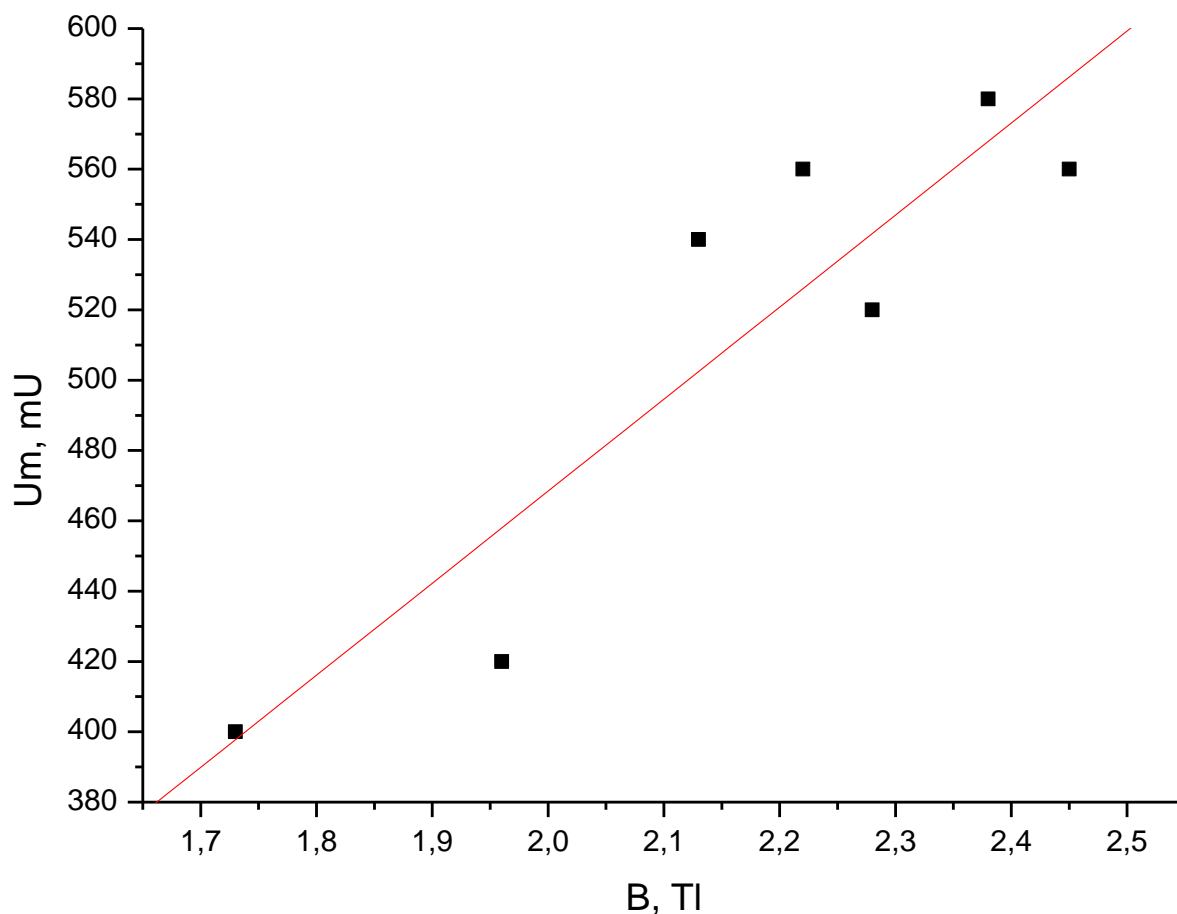
$$N = \frac{\Delta f}{\Delta B} = \frac{f_{2.45} - f_{1.73}}{2.45 - 1.73} = \frac{330 - 265}{2.45 - 1.73} = \frac{65}{0,72} = 90,27 \left[ \frac{\text{кГц}}{\text{Тл}} \right]$$

Построим график зависимости амплитуды  $U_m(B)$ .



Проведем линейную аппроксимацию в программе Origin. Для этого в пункте меню Tools выберем Linear fit.





Красной линией показана линейная аппроксимация. Отразим данные полученные в результате аппроксимации.

Аналитический вид прямой имеет следующий вид:

$$Um = A + B \cdot X$$

где  $A = -55,04$   $\Delta A = 115,72$

$B = 261,73$   $\Delta B = 53,16$

В итоге зависимость частоты  $f$  от магнитной индукции  $B$  имеет вид:

$$Um = -55,04 + 261,73 \cdot B$$

$$\Delta Um = 168,88$$

Коэффициент корреляции равен  $R = 0,91$ .

Коэффициент линейности  $K_{л} = 1 - R = 1 - 0,91 = 0,09$ .

Чувствительность амплитуды к магнитному полю определим по следующей формуле:

$$N = \frac{\Delta Um}{\Delta B} = \frac{560 - 400}{2.45 - 1.73} = \frac{160}{0.72} = 222.22 \left[ \frac{mU}{Tл} \right]$$

**Тема занятий 5 «Датчики. Измерение неэлектрических величин электрическими методами»  
Лабораторная работа «Исследование RF-преобразователя сопротивления в частоту и  
построенного на его основе датчика перемещения.».**

Возможность электронной перестройки частоты осциллятора обусловлена ее зависимостью от напряжения питания и силы тока, то есть частотой можно управлять изменением величины добавочного резистора  $R_D$ , включенного в цепь осциллятора. С помощью осциллятора можно преобразовать омическое сопротивление в частоту, то есть осуществить *resistor-to-frequency*-преобразование. Соответствующий прибор был назван осцилляторный RF-преобразователь. Для исключения влияния температуры  $T$  на значение частоты сигнала  $f$  RF-преобразователь помещается в малогабаритный термостат, либо в цепь осциллятора включают резистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

Характеристики RF-преобразователя исследованы при температуре  $20^\circ\text{C}$  и питании импульсным прямоугольным напряжением  $U^* = 46$  В (в том числе одиночный импульс), величина  $R_D$  меняется в интервале от 0 до 90 Ом. Определены зависимости от  $R_D$  амплитуды  $U_1$  и частоты  $f$  колебаний напряжения на  $R_H = 10$  Ом. Эти зависимости линейные, чувствительность  $df/dR = 1.2$  кГц/Ом. При использовании в качестве  $R_D$  выпускаемых промышленностью переменных резисторов, применение RF-преобразователя может быть самым разнообразным, в частности, для разработки потенциометрических датчиков с частотным выходом углового и линейного положения.

Экспериментальная зависимость  $f(R_D)$  аппроксимируется выражением

$$f = a + bR_D. \quad (1)$$

Экспериментальная зависимость амплитуды колебаний напряжения  $U_1$  на выходе RF-преобразователя тоже линейная, но для нас главное значение, как информационный параметр, имеет частота. Важно, что амплитуда  $U_1$  для практического использования не требует усиления –  $U_1$  уменьшается от 0.4 В при  $R_D = 0.0$  Ом до 0.02 В при  $R_D = 90.0$  Ом.

Линейная зависимость  $f(R_D)$  была использована нами для разработки датчика линейного перемещения с частотным выходом с использованием ползункового переменного резистора СПЗ-23а с линейной зависимостью величины сопротивления  $R$  от длины пробега ползунка, максимальное значение которой  $l_R = 60$  мм. В соответствии с технической характеристикой этого переменного резистора при  $l_R = 0$  мм  $R = 0$  Ом, а при  $l_R = 60$  мм  $R = 220$  Ом.

Из линейной зависимости  $R(l_R)$  установлено аналитическое выражение для зависимости  $R(l_R) = c \cdot l_R$ , которое подставляется в выражение (1) для установления зависимости  $f(l_R)$ . Искомая зависимость  $f(l_R)$  является выходной характеристикой датчика линейного перемещения с частотным выходом и описывается выражением

$$f(l_R) = a + b \cdot c \cdot l_R \quad (2)$$

Аналогичный анализ для линейной зависимости амплитуды выходного сигнала RF-

преобразователя  $U_1(R_D)$

$$U_1(R_D) = a_U + b_U R_D \quad (3)$$

приводит к линейной зависимости амплитуды выходного сигнала датчика линейного перемещения  $U_1(l_R)$

$$U_1(l_R) = a_U + b_U \cdot c \cdot l_R. \quad (4)$$

Численные коэффициенты имеют значения:  $a=285796$ ;  $b=-1193$ ;  $c=3.6667$ ;  $a_U=0.3899$ ;  $b_U=-0.0042$ . Экспериментальные значения зависимостей  $f(l_R)$  и  $U_1(l_R)$  имеют небольшой разброс вполне понятной природы. Зависимости, представленные выражениями (2) и (4), хорошо совпадают с экспериментальными данными. Информационный параметр частота осцилляторной генерации имеет высокую чувствительность к изменению линейного перемещения  $df/dl_R = 4.4$  кГц/мм. Для разработки датчика углового перемещения с частотным выходом в качестве  $R_D$  был выбран переменный резистор SH-083 производства тайваньской компании Song-Huei Electric Co., Ltd ([www.song-huei.com.tw](http://www.song-huei.com.tw)). Это полный аналог отечественного резистора СПЗ-38а и имеет номинал 100 Ом, линейную зависимость сопротивления от угла поворота  $\varphi$  и максимальный угол поворота движка 250 градусов. Градуировочная зависимость  $R_D(\varphi)$  имеет вид

$$R_D(\varphi) = k + m\varphi. \quad (5)$$

Измеренная выходная характеристика  $f(\varphi)$  датчика углового положения на основе  $RF$ -преобразователя обладает хорошей линейностью. Используя выражения (1) и (5) нетрудно получить, что

$$f(\varphi) = l + n\varphi, \quad (6)$$

где  $l=(a+bk)$ ,  $n=b \cdot m$ . Из зависимостей (3) и (5) получаем зависимость амплитуды выходного сигнала преобразователя углового положения  $U_1(\varphi)$

$$U_1(\varphi) = l_U + n_U \varphi, \quad (7)$$

где  $l_U=(a_U+b_Uk)$ ,  $n_U=b_U \cdot m$ . Наблюдается хорошее совпадение результатов измерений и результатов, полученных по выражениям (6) и (7). Численные коэффициенты имеют значения:  $k=-5.56$ ;  $m=0.43$ ;  $l=292429$ ;  $n=-513$ ;  $l_U=0.4133$ ;  $n_U=-0.0018$ . Информационный параметр частота имеет высокую чувствительность к изменению угла поворота:  $df/d\varphi=0.5$  кГц/град.

### **Построение датчика линейного перемещения с частотным выходом (схема, работа, характеристики, графики).**

Осцилляторный преобразователь представляет собой осциллятор, который состоит из магнитной системы (состоящей из двух магнитов) и помещенного в зазор кристалла. Чтобы кристалл не был раздавлен магнитами, предусмотрено охранное кольцо в виде шайбы с разрезом. Магниты сделаны из сплава Железо-Неодим-Бор (FeNdB). Магнитное поле в зазоре 1 Тесла.

От кристалла выходят 2 провода, которые образуют схему с сопротивлением нагрузки ( $R_n$ ) для измерения и наблюдения силы тока в цепи в виде падения напряжения на  $R_n$  (Рисунок 6).

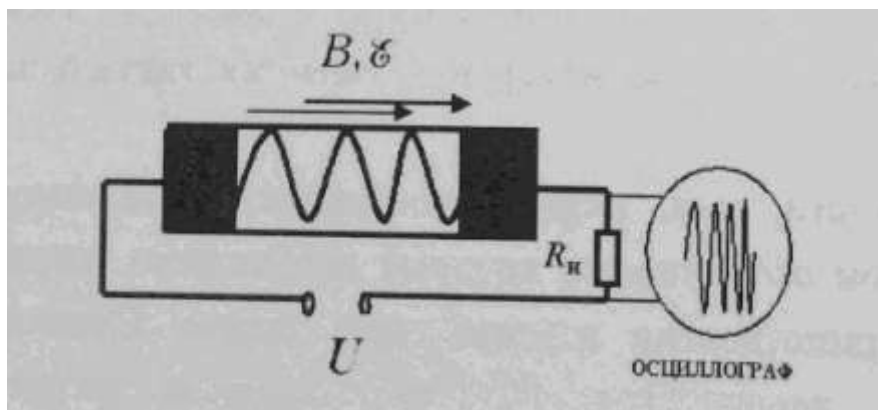


Рисунок 7.1 – Схема питания осциллятора и регистрации сигнала осцилляторной генерации.

Осциллятор можно использовать для датчиков перемещения. В основе лежит зависимость частоты ( $f$ ) осциллятора от напряжения ( $U_k$ ) на кристалле (Рисунок 7).

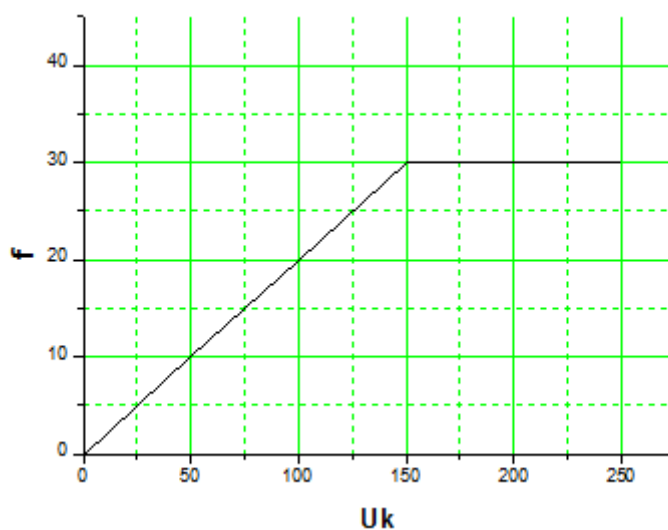


Рисунок 7.2 – Зависимость частоты осциллятора от напряжения на кристалле (схематично)  $f(U_k)$ .

Для простой схемы с  $R_n = 1 \div 10$  Ом, напряжение на кристалле почти такое же, как напряжение на источнике ( $U \approx U_k$ ). Если увеличивается  $U$ , то увеличивается и  $U_k$ . Но можно напряжение на кристалле  $U_k$  менять по другому при  $U = \text{const}$  – перераспределять с помощью  $R_d$  (переменного резистора, добавленного в цепь). Тогда  $U$  будет распределяться между  $R_k$  и  $R_d$  ( $U = U_d + U_k + U_n$ ) (Рисунок 7.3).

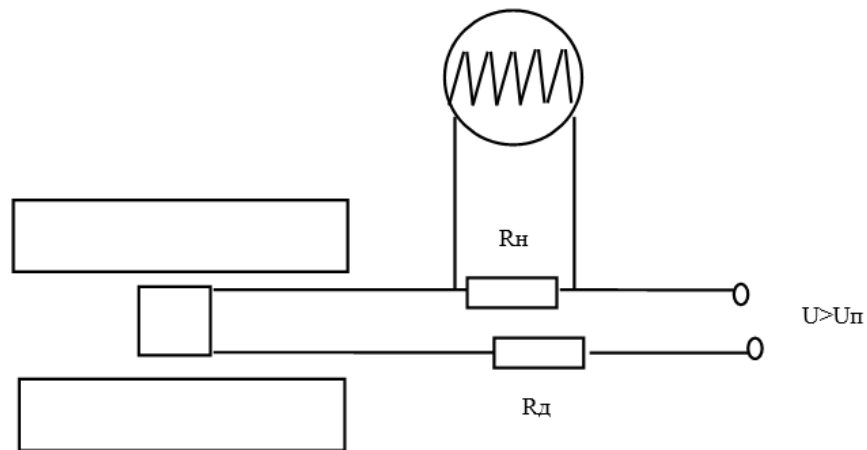


Рисунок 7.3 – Схематичное изображение работы осциллографа и RF-преобразователя. .

Характеристики  $RF$ -преобразователя при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  и питании импульсным напряжением прямоугольной формы  $U^* = 46\text{ В}$  (длительность импульса  $t_{\text{и}} = 60 \div 100\text{ мкс}$ , частота повторения  $40\text{ Гц}$  или одиночный импульс), определены зависимости частоты  $f$  и амплитуды колебаний напряжения  $U_1$  на нагрузке  $R_{\text{н}} = 10\text{ Ом}$  от величины сопротивления  $R_{\text{д}}$ . Эти зависимости являются линейными, что является достоинством любого преобразователя. Частота  $f$  (рис. 1а, кривая 1) уменьшается от  $286\text{ кГц}$  при  $R_{\text{д}} = 0.0\text{ Ом}$  до  $182\text{ кГц}$  при  $R_{\text{д}} = 90.0\text{ Ом}$ , чувствительность  $df/dR$  составляет  $1.2\text{ кГц/Ом}$ . Амплитуда колебаний  $U_1$  (рис. 1а, кривая 2) уменьшается от  $0.4\text{ В}$  при  $R_{\text{д}} = 0.0\text{ Ом}$  до  $0.02\text{ В}$  при  $R_{\text{д}} = 90.0\text{ Ом}$ .

Осциллографный  $RF$ -преобразователь обладает следующим рядом достоинств: 1) прямое преобразование сопротивления в частоту; 2) линейность характеристики преобразования; 3) высокая помехозащищенность, в том числе, в условиях промышленных помех, так как полезная информация заключена в частоте, а не в амплитуде переменного сигнала; 4) удобство и высокая точность частотных измерений; 5) частотный выход упрощает преобразование в цифровой код; 6) высокая амплитуда выходного сигнала, что позволяет не применять усилитель.

При использовании в качестве переменного сопротивления  $R_{\text{д}}$  выпускаемых промышленностью стандартных, в том числе, прецизионных потенциометров сопротивления, практическое применение  $RF$ -преобразователя может быть самым разнообразным. В частности для решения такой актуальной задачи, как разработка потенциометрических датчиков с частотным выходом угла поворота, линейного перемещения и джойстиков управления.

В соответствии с технической характеристикой этого переменного резистора при  $l_R = 0\text{ мм}$   $R_{\text{д}} = 0\text{ Ом}$ , а при  $l_R = 60\text{ мм}$   $R_{\text{д}} = 220\text{ Ом}$  (рис. 10).

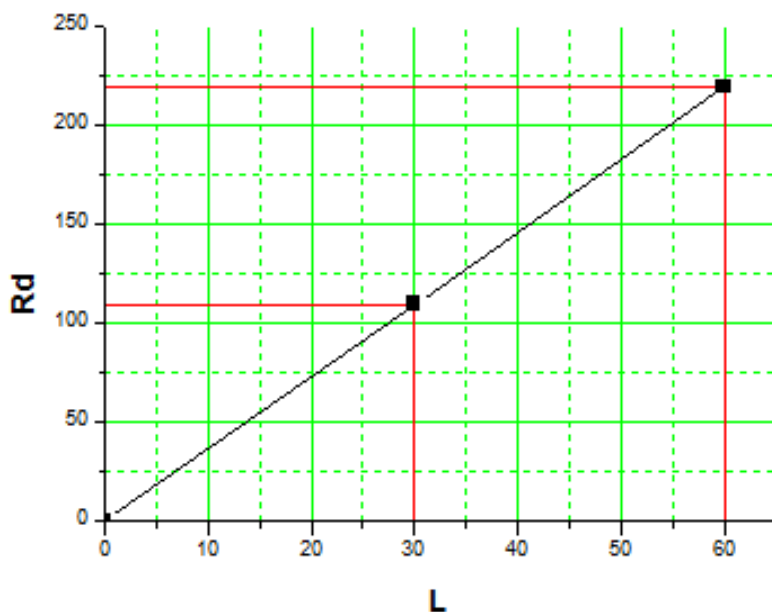
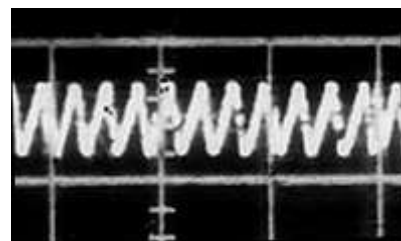
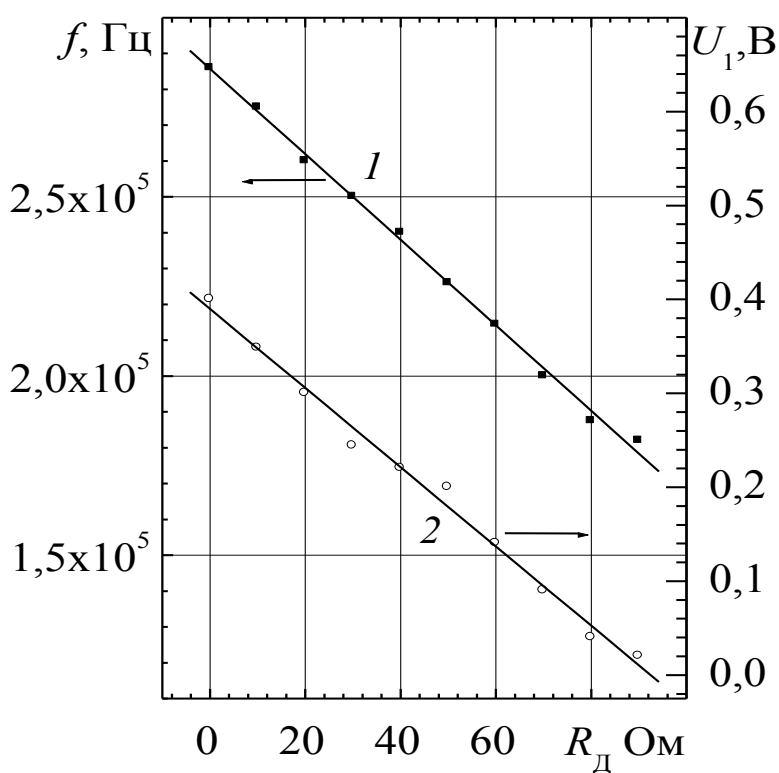


Рисунок 7.4 – Линейная зависимость сопротивления переменного резистора от пробега ползунка  $R_d(L)$ .



б)

а)

Рисунок 7.5 – а) частота  $f$  и амплитуда  $U_1$  в зависимости от величины сопротивления  $R_d$ ; б) форма выходного сигнала  $RF$ -преобразователя

Для работы  $RF$ -преобразователя необходим резистор с  $R = 100$  Ом, откуда можно выявить

чему будет равна измеряемая длина перемещения  $L$  при использовании переменного резистора СПЗ-23. На графике видно, что при  $R = 110$  Ом (близкое значение к 100 Ом),  $L = 30$  мм. Найдем и остальные значения  $L$ , при меняющемся  $R_d$  по графику (Рисунок 10) и представим результаты в таблице (Таблица 2).

Таблица 2 - Зависимость сопротивления переменного резистора от пробега ползунка  $R_d(L)$ .

$R_d$ , Ом	220	200	175	150	125	110	100	75	50	25	0
$l_R$ , мм	60	55	48	41	35	30	28	20	13	7	0

Экспериментальная зависимость  $f(R_d)$  (рис. 7.5,а) аппроксимируется выражением

$$f = a + bR_d. \quad (1)$$

Экспериментальная зависимость амплитуды колебаний напряжения  $U_1$  на выходе  $RF$ -преобразователя тоже линейная, но для нас главное значение, как информационный параметр, имеет частота. Важно, что амплитуда  $U_1$  для практического использования не требует усиления –  $U_1$  уменьшается от 0.4 В при  $R_d = 0.0$  Ом до 0.02 В при  $R_d = 90.0$  Ом.

Линейная зависимость  $f(R_d)$  была использована нами для разработки датчика линейного перемещения с частотным выходом с использованием ползункового переменного резистора СПЗ-23а с линейной зависимостью величины сопротивления  $R$  от длины пробега ползунка, максимальное значение которой  $l_R=60$  мм. В соответствии с технической характеристикой этого переменного резистора при  $l_R = 0$  мм  $R = 0$  Ом, а при  $l_R = 60$  мм  $R = 220$  Ом.

Из линейной зависимости  $R(l_R)$  установлено аналитическое выражение для зависимости  $R(l_R) = c \cdot l_R$ , которое подставляется в выражение (1) для установления зависимости  $f(l_R)$ . Искомая зависимость  $f(l_R)$  является выходной характеристикой датчика линейного перемещения с частотным выходом и описывается выражением

$$f(l_R) = a + b \cdot c \cdot l_R \quad (2)$$

Аналогичный анализ для линейной зависимости амплитуды выходного сигнала  $RF$ -преобразователя  $U_1(R_d)$

$$U_1(R_d) = a_U + b_U R_d \quad (3)$$

приводит к линейной зависимости амплитуды выходного сигнала датчика линейного перемещения  $U_1(l_R)$

$$U_1(l_R) = a_U + b_U \cdot c \cdot l_R. \quad (4)$$

Численные коэффициенты имеют значения:  $a=285796$ ;  $b=-1193$ ;  $c=3.6667$ ;  $a_U=0.3899$ ;  $b_U=-0.0042$ .

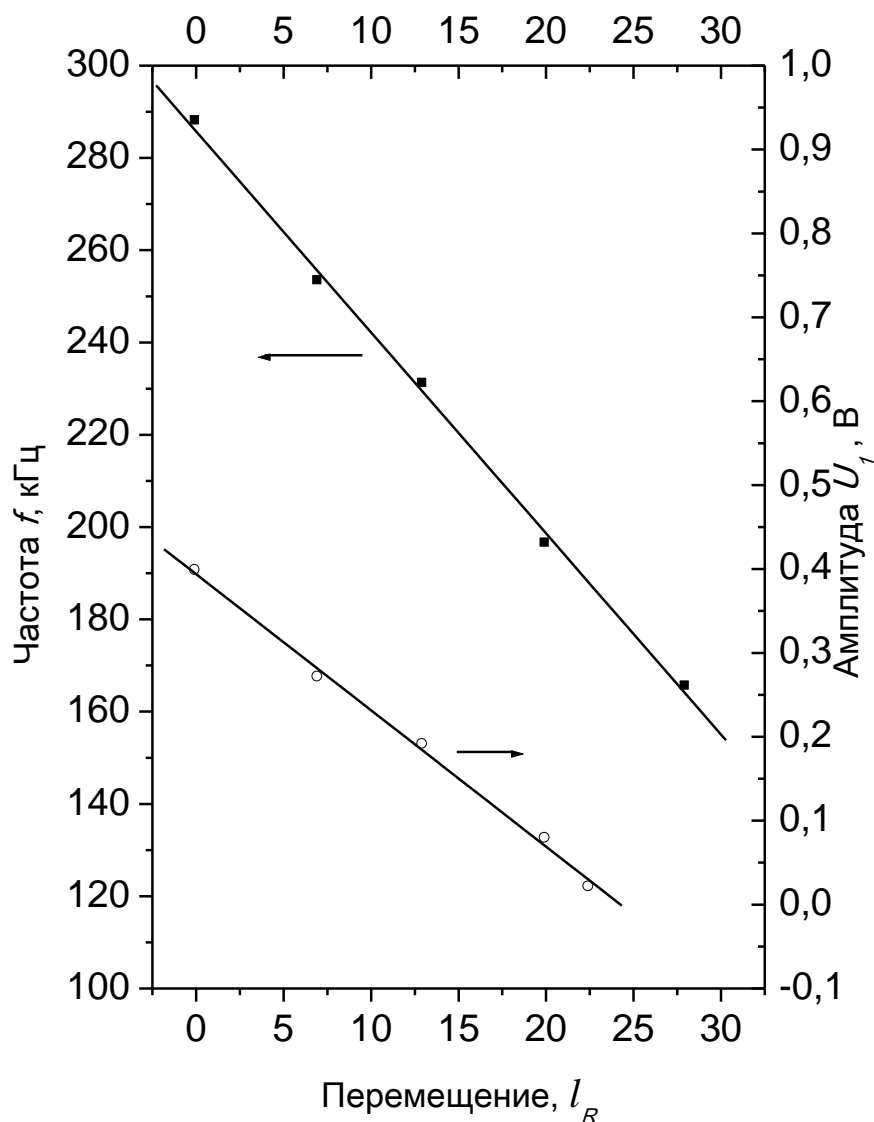


Рисунок 7.6 – Измерительные характеристики датчика линейного перемещения

Информационный параметр – частота, выходная характеристика датчика линейного перемещения линейная и описывается выражением (2). Частота имеет высокую чувствительность к изменению линейного перемещения  $df/dl_R = 4.4$  кГц/мм. Экспериментальные значения зависимостей  $f(l_R)$  и  $U_1(l_R)$  имеют небольшой разброс вполне понятной природы. Зависимости, представленные выражениями (2) и (4), хорошо совпадают с экспериментальными данными. Соответствующие характеристики датчика линейного перемещения представлены на рис. 7.6

**Задание:** используя характеристики  $RF$ -преобразователя и подходящего переменного резистора линейного или кругового перемещения разработайте датчик соответствующего перемещения и исследуйте его характеристики. Представьте подробный отчет с графиками измерительных характеристик преобразователей перемещения с частотным выходом и анализом всех результатов. Сформулируйте выводы по работе.



## **Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **Основная литература**

1. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебное пособие / Перемитина Т. О. - 2016. 150 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6715>, дата обращения: 06.05.2018.

2. Основы научных исследований и патентоведение: Учебное пособие / Озеркин Д. В., Алексеев В. П. - 2012. 171 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1283>, дата обращения: 06.05.2018.

### **Дополнительная литература**

1. Автоматизация измерений, контроля и испытаний [Текст] : учебник для вузов / К. П. Ла- тышен-ко. - М. : Академия, 2012. - 320 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 15 экз.)

2. Интеллектуальные средства измерений [Текст]: учебник для вузов / Г. Г. Раннев. - М. : Академия, 2011. - 272 с (наличие в библиотеке ТУСУР - 10 экз.)

3. Теория ошибок и обработка результатов измерений: учебное пособие / П. Н. Дробот; Министерство образования и науки Российской Федерации, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. - Томск : ТУСУР, 2011. – 83 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 20 экз.)