

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

A. V. Петров, A. A. Маркварт, Л. Б. Лиокумович

**ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ:
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОДЕРЖАНИЮ И
ОФОРМЛЕНИЮ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2022

A. B. Петров, A. A. Маркварт, Л. Б. Лиокумович. Отчет по лабораторной работе: рекомендации по содержанию и оформлению : учеб. пособие / А. В. Петров, А. А. Маркварт, Л. Б. Лиокумович – СПб, 2022. – 37 с.

В учебном пособии приводятся рекомендации по подготовке отчетов по лабораторным работам, выполняемым в рамках лабораторных практикумов по курсам «Теория электрических цепей», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Метрология», «Антенны и устройства СВЧ», «Основы цифровой схемотехники». Рекомендации содержат пояснения и требования, связанные со структурой и содержанием отчета, с обработкой и представлением результатов проведения лабораторного занятия, с форматированием текста, оформлением рисунков и таблиц и т.п. вопросами. Рекомендации направлены на унификацию и улучшение студенческих отчетов по лабораторным работам, а также формирование у студентов навыков правильного представления результатов измерений и исследований.

Учебное пособие предназначено для бакалавров направлений 11.03.01 «Радиотехника», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», а также может представлять интерес для студентов и преподавателей в рамках лабораторных практикумов других дисциплин.

Оглавление

Введение.....	4
1. Общие положения.....	5
2. Структура отчета и общие требования к его оформлению.	8
3. Содержательная часть отчета	10
4. Форматирование текста отчета.....	12
5. Оформление таблиц.....	13
6. Оформление рисунков.....	14
7. Запись формул.....	20
Приложение 1. Оформление титульного листа	21
Приложение 2. Пример оформления пункта отчета.....	22
Приложение 3. Аппроксимация измеренных значений при построении графиков	26

*Небывалая толицина этого отчета
защищала его от опасности быть
прочитанным.*

Уинстон Черчилль

Введение

В настоящем документе изложены требования к содержанию и оформлению отчетов по лабораторным работам (далее – отчетов) в рамках учебных дисциплин «Теория электрических цепей», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Метрология», «Антенны и устройства СВЧ», «Основы цифровой схемотехники».

Приведенные ниже требования отражают мнение авторов настоящего пособия и учитывают многолетний опыт проведения лабораторных работ по указанным дисциплинам. Они призваны упорядочить характер и форму представления отчетов, а также научить студентов оформлению отчетных материалов по результатам измерений и исследований. Однако в ходе занятий по лабораторному практикуму студенты должны руководствоваться требованиями преподавателя, ведущего лабораторные занятия. Поэтому выполнение данных рекомендаций необходимо в той части, в которой они не противоречат указаниям и рекомендациям преподавателя.

Представленные в данном документе требования к обработке и представлению результатов выполнения лабораторных работ предполагают, что студенты используют для создания отчета персональный компьютер и владеют навыками работы с ним. Также подразумевается, что для создания отчета достаточно использования программ MS Word, Excel, Power Point, входящих в пакет Microsoft Office, в частности, предоставляемых студентам СПбПУ для бесплатного пользования в рамках подписки на Microsoft 365.

Авторы выражают благодарность и признательность А. В. Медведеву, О. И. Котову, С. И. Иванову, Н. А. Ушакову, К. В. Грешневикову, А. А. Сочаве, В. Д. Купцову, Ф. А. Копылову и другим сотрудникам Высшей школы прикладной физики и космических технологий за полезные обсуждения, советы и поддержку в написании данного пособия.

1. Общие положения

Лабораторная работа – это практическое учебное занятие, проводимое для изучения и исследования характеристик заданного объекта и организуемое по правилам научно-экспериментального исследования с применением специального оборудования (лабораторных установок и средств измерения). Лабораторная работа предполагает проведение определенной последовательности действий и измерений, называемой *программой работы*. Как правило, по лабораторной работе существуют методические указания (описания), содержащие методические материалы и программу работы.

Обычно лабораторные работы являются частью лабораторного практикума по определенной учебной дисциплине, в ходе которого студенты выполняют несколько лабораторных работ по тематике данной дисциплины.

Лабораторные работы, выполняемые в рамках учебных курсов, указанных во введении, направлены на исследование относительно сложных устройств и протекающих в них физических процессов. При этом выполнение лабораторной работы фактически подразумевают *три основных этапа*:

1) **Первый этап** – подготовка к лабораторной работе. Этот этап выполняется студентами самостоятельно до непосредственного занятия по данной лабораторной работе (разумеется, при необходимости студенты могут обращаться с возникшими вопросами к преподавателю, ведущему лабораторные занятия, или к лектору соответствующего курса). На этом этапе студент должен внимательно изучить методические указания к лабораторной работе и, в случае необходимости, другие материалы (материалы лекций или учебной литературы).

В результате подготовки к работе студент должен иметь базовые знания об исследуемых устройствах и протекающих в них физических процессах, необходимые для полного и корректного выполнения программы работы, а также иметь понимание того, какие параметры и зависимости будут измеряться при выполнении программы лабораторной работы и какие результаты измерений следует ожидать.

Без добросовестной подготовки к лабораторной работе студент, скорее всего, не будет допущен к выполнению измерений или не сможет выполнить программу работы в предусмотренное для этого время.

2) **Второй этап** – работа студента в учебной лаборатории во время занятия, в ходе которого студент должен выполнить действия и измерения, предусмотренные программой лабораторной работы.

Обычно в начале занятия преподаватель проводит *опрос* для проверки готовности студентов к выполнению лабораторной работы. В ходе опроса каждому студенту задаются вопросы для проверки его знаний по теме выполняемой работы и понимания студентом программы работы и ожидаемых результатов. В том случае, если студент не может ответить на вопросы, к дальнейшему выполнению работы он не допускается. При успешном прохождении допуска студенст приступает непосредственно к выполнению программы лабораторной работы.

Программа лабораторной работы предусматривает выполнение ряда измерений. Полученные в ходе измерений результаты заносятся в *протокол*, а изображения осцилограмм, спектrogramм, внешнего вида собранных на макетах схем, и т.д. фиксируются в виде фотографий (или в виде файлов, сохраняемых приборами, если это предусмотрено правилами лабораторного практикума). При составлении протокола во время лабораторного занятия необходимо придерживаться следующих требований:

- все записи в протоколе выполняются ручкой, использование карандаша не допускается;
- в начале протокола должно быть читаемо и разборчиво записаны название и номер работы, дата занятия, а также ФИО студентов и номер бригады;
- вносимые в протокол данные должны быть четко структурированы в соответствии с программой лабораторной работы и быть хорошо читаемыми и понятными;
- в случае, если протокол состоит из нескольких страниц, они должны быть пронумерованы.

В протокол лабораторной работы заносятся типы использованных приборов и режимы их работы, измеренные значения и условия, при которых они получены, делаются необходимые пояснения, в т. ч. к фотографиям и сохраненным в ходе работы файлам. В конце занятия преподаватель проверяет и подписывает протокол измерений.

Таким образом, успешное завершение данного этапа предполагает успешное выполнение пунктов программы лабораторной работы, подтверждаемое преподавателем, подписавшим протокол измерений. При этом, в ходе занятия и выполнения программы лабораторной работы преподаватель может проверять содержание протокола измерений, фотографий и сохраненных файлов для уточнения корректности проведения измерений, а студент должен быть способен быстро и четко их показать. Кроме того, аналогичные обращения к протоколу измерений могут потребоваться и при обсуждении предоставленного отчета. Поэтому *протокол измерений является ключевым документом*, характеризующим результаты лабораторного занятия, и является неотъемлемой частью отчета по

лабораторной работе. Утрата каких-либо данных или плохое составление протокола измерений, не позволяющее впоследствии четко интерпретировать записанные результаты, влечет необходимость повторного выполнения соответствующих пунктов программы лабораторной работы. В случае утраты протокола измерений или проблемы интерпретации существенной части его содержания, представленные в отчете данные считаются недействительными, и лабораторную работу необходимо выполнить заново.

3) *Третий этап* – подготовка отчета по лабораторной работе. Все полученные в ходе занятия по выполнению лабораторной работы результаты оформляются в виде *отчета по лабораторной работе* в соответствии с рекомендациями, приведенными в настоящем документе.

Подчеркнем, что отчет по лабораторной работе *должен являться самостоятельным произведением*, смысл изложенного в отчете материала должен быть хорошо понятен любому специалисту по тематике лабораторной работы *без необходимости обращения к соответствующим методическим указаниям к данной работе*.

После составления файла с отчетом он должен быть распечатан, и бумажный экземпляр отчета предоставляется преподавателю. Преподаватель проверяет отчет и может сделать ряд замечаний, как по сути представленных результатов, так и по характеру их оформления и представления. В некоторых случаях устранение замечаний может потребовать проведение повторных измерений по каким-либо из пунктов программы лабораторной работы. В случае отсутствия замечаний по отчету или успешного их исправления преподаватель принимает отчет и ставит соответствующую утверждающую резолюцию на титульном листе.

Отчет по лабораторной работе (включающий протокол измерений), принятый преподавателем, является основным документом, характеризующий полученные студентом результаты, и позволяющим, при необходимости, подтвердить успешное выполнение лабораторной работы. В том случае, если отчет не принят, именно он может быть предметом рассмотрения при проведении промежуточной аттестации, работе комиссии, апелляциях и т. п.

2. Структура отчета и общие требования к его оформлению.

2.1 Отчет в обязательном порядке должен содержать титульный лист, введение, содержательную часть и заключение. Обязательным приложением к отчету должен быть протокол измерений, подписанный преподавателем.

1) **Титульный лист** должен представлять следующую информацию:

- корректные наименования университета, института и высшей школы;
- заглавие отчета, включающее номер лабораторной работы, ее название и наименование соответствующей дисциплины;
- номер группы и ФИО студента(ов), выполнивших лабораторную работу (номер бригады, если предусмотрено выполнение работы бригадами студентов);
- ФИО преподавателя, ведущего лабораторные занятия;
- год, когда был подготовлен отчет.

Образец титульного листа приведен в Приложении 1 к данным рекомендациям.

2) **Введение** к отчету должно содержать следующую информацию:

- цели лабораторной работы;
- используемые приборы и специализированное оборудование;
- исходные данные (если такие есть) об элементах установки или исследуемых в лабораторной работе объектах, используемые при выполнении программы работы, при обработке или анализе результатов измерений и расчетов.

3) **Содержательная часть** должна содержать краткое описание того, как были проведены измерения, приводятся полученные результаты (в числовом виде, в виде графиков, осциллограмм, спектрограмм и т. д.) и проводится анализ результатов измерений.

Обычно это наиболее объемная и сложная часть отчета и рекомендации по ее формированию и оформлению описаны отдельно в разделе 3 данного пособия.

4) **Заключение** содержит выводы, относящиеся к выполнению работы в целом. Отмечается полнота выполнения программы лабораторной работы. Если какие-то пункты программы не были выполнены, то указываются причины (в т. ч. если пропуск пункта был сделан в соответствии с распоряжением преподавателя). Могут быть указаны проблемы, возникшие при выполнении работы или рекомендации по совершенствованию лабораторной работы.

5) *Протокол измерений* является обязательным приложением к отчету. Этот документ создается во время занятия при выполнении программы лабораторной работы, подписывается преподавателем и при подготовке отчета не корректируется. Так как этот документ является рукописным, на него не распространяются требования по форматированию и остальные требования, которым должны соответствовать основные разделы отчета.

2.2 Страницы отчета (кроме приложения с протоколом измерений) нумеруются по порядку без пропусков и повторений. Первой страницей считается титульный лист, на котором номер страницы не ставится, на следующей странице ставится номер "2" и т. д.

2.3 После формирования компьютерного файла с отчетом создается бумажный экземпляр отчета. При этом необходимо соблюдать следующие требования:

- 1) В случае печати отчета в чёрно-белом формате – на этапе подготовки отчета на компьютере необходимо обеспечить возможность идентификации всех используемых обозначений. В частности, не использовать на рисунках маркировку цветом или учитывать, что при чёрно-белой печати цвета должны создавать четко различимые оттенки.
- 2) Следует учитывать, что при отображении фотографий с дисплеев осциллографов и других приборов с цветными кривыми на черном фоне, часто целесообразно инвертировать цвета фотографии, чтобы получить темные кривые на светлом (белом фоне). Такой вариант более удобен для различения и для пометок (пометки могут быть сделаны как студентом при подготовке отчета для пояснения деталей и оценок, так и преподавателем при проверке отчета).
- 3) Все листы отчета, включая приложение с протоколом измерений, должны быть скреплены (при помощи скрепки, степлера или любым другим удобным, но надежным способом).

3. Содержательная часть отчета

В содержательной части отчета кратко, но четко и понятно описывается, как проводились измерения и какие получены результаты (в виде непосредственно измеренных или рассчитанных параметров, таблиц, графиков, осцилограмм, спектrogramm и т. д.). Приводится анализ представленных результатов и формулируются краткие выводы о получаемых значениях и зависимостях, а также о сопоставлении получаемых результатов с известными данными, данными теории и с результатами измерений в других пунктах программы работы.

3.1 Содержательная часть отчета должна быть разделена на пункты (и, возможно, на подпункты) в соответствии с программой лабораторной работы. Допускается изменение количества и корректировка содержания пунктов относительно программы работы (например, объединение нескольких пунктов в один или наоборот – разделение одного пункта на несколько пунктов или подпунктов) в том случае, если автор отчета сочтет это целесообразным.

3.2 Каждый пункт должен содержать следующие элементы:

- 1) Номер пункта и его полное заглавие.
- 2) Вводная часть (указать цель действий или измерений, представленных в данном пункте и краткое их описание, например, описание используемых схем и методики измерения).
- 3) Схема экспериментальной установки, содержащая исследуемый объект и все используемые приборы: генераторы, вольтметры, частотомеры, осциллографы и т. п. (*в том случае, если несколько пунктов выполняются на одной и той же измерительной схеме, можно в последующих не повторять рисунок со схемой*).
- 4) Описание результатов измерений (представляются в виде таблиц и/или графиков, зафиксированных осцилограмм, спектrogramm и т. д.). Представленные результаты должны быть основаны на данных из протокола измерений и сохраненных в ходе лабораторного занятия фотографиях или файлах, но с учетом проведения дополнительных расчетов с построением графиков зависимостей, расчетов и оценок параметров этих зависимостей, оценки параметров по осцилограммам, спектrogramмам и т. п.
- 5) Сравнение экспериментальных результатов с результатами расчетов по формулам, с известными значениями или с теоретическими соотношениями, с результатами измерений, представленными в предыдущих пунктах отчета.

Для сравнения нужно рассчитать и указать относительный уровень различия сравниваемых величин по выражению $100\% \cdot |A_1 - A_2|/A_1$, где A_1 и A_2 – сравниваемые значения, причем под A_1 обычно подразумевается более достоверный вариант значения (выбор наиболее достоверного значения зависит от ситуации и требует обсуждения в каждом конкретном случае).

- 6) Вывод, содержащий краткое описание мнения автора отчета о полученных результатах. О соответствии вида измеренных зависимостей теоретическим выражениям для этих зависимостей, о степени соответствия сравниваемых значений (отличное, хорошее, примерное, по порядку величины) и возможных причинах существенных расхождений и т. п.

Пример оформления пункта отчета приведен в *Приложении 2*.

3.3 Если какой-либо пункт из программы работы не выполнен (даже по указанию преподавателя) – необходимо отметить это обстоятельство в соответствующем пункте содержательной (а также в заключительной) части отчета и пояснить причину.

3.4 Рисунки и таблицы, содержащие результаты измерений, должны быть приведены в соответствующих пунктах содержательной части отчета. Оформление таблиц и рисунков в виде отдельных разделов или приложений к отчету не допускается.

3.5 Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы с использованием сквозной нумерации и иметь название.

3.6 На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте отчета. При ссылке следует писать слово «табл.» или «рис.» с указанием ее номера. Присутствие в тексте отчета рисунков и таблиц, которые не были упомянуты в тексте, не допускается.

3.7 В тексте отчета допускается использование аббревиатур. Аббревиатурное сокращение фразы должно вводиться при первом появлении фразы с указанием принимаемой аббревиатуры.

Пример: «Сняли амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) интегрирующей RC-цепи».

4. Форматирование текста отчета

4.1 Основной текст отчета формируется в формате А4 с «портретной» ориентацией страницы. При этом поля должны быть одинаковыми во всем тексте отчета. Рекомендуемые значения полей: левое – 30 мм, правое – 15 мм, верхнее – 20 мм, нижнее – 20 мм. В виде исключения при наличии объективной необходимости отдельные страницы могут быть выполнены с "альбомной" ориентацией (в этом случае поля могут отличаться от полей основного текста).

4.2 Тип шрифта, его размер и межстрочный интервал должны быть одинаковыми во всем тексте отчета. Рекомендуемые параметры:

- Тип шрифта – Times New Roman.
- Размер шрифта – 12.
- Межстрочный интервал – одинарный.
- Выравнивание текста – по ширине страницы.

4.3 Каждый абзац начинается с абзацного отступа. Абзацный отступ должен быть одинаковым по всему тексту. Рекомендуемое значение 1 см.

4.4 При написании дробных величин в качестве разделителей рекомендуется использовать точки. Используемый разделитель должен быть одинаковым во всем тексте отчета, а также на рисунках, в формулах и т.п.
Примечание: При указании измеренных или рассчитанных значений величин в тексте и в таблицах следует избегать бессмысленного указания в значении величины слишком большого числа десятичных разрядов.

4.5 Обозначения переменных должны выполняться в соответствии со следующими требованиями:

- 1) Латинские буквы, обозначающие переменные и функции, должны быть наклонными (например, f , u , i и т. д.). Исключение – тригонометрические функции (буквы должны быть прямыми, например, \sin , \cos , \tg) и др. табличные функции с общепринятыми обозначениями без наклона.
- 2) Греческие буквы должны быть прямыми (например, π , Ω , ω и т.д.).
- 3) Индексы в виде числа должны быть прямыми (например, U_2).
- 4) Буквенные индексы, идентифицирующие величину, должны быть прямыми (например, f_c).
- 5) Индексы в виде буквы, обозначающей переменный числовой коэффициент, должны быть наклонными (например, u_i – i -й отсчет напряжения или f_{cm} – частота среза фильтра m -го порядка).

5. Оформление таблиц

5.1 Название и номер таблицы должны располагаться над таблицей, с выравниванием по левому краю или по центру.

5.2 Название и номер таблицы должны быть размещены на одном листе с соответствующей таблицей.

5.3 Для размерных величин в таблице должны быть указаны их размерности (как правило, целесообразно указывать размерность в заголовках столбцов или строк, а не в каждой ячейке).

5.4 В том случае, если таблица не умещается целиком на одном листе, разрыв таблицы должен быть оформлен следующим образом:

- 1) часть таблицы, размещенная на последующем листе, должна быть подписана: «Продолжение табл. ...»;
- 2) подписи всех столбцов также должны быть продублированы на последующем листе.

Пример оформления разрыва таблицы:

Табл. 1. АЧХ ФНЧ ($R = 51$ кОм, $C = 1300$ пФ).

f , кГц	$U_{\text{вх}}$, В	$U_{\text{вых}}$, В	$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$
0.025	1	1	1
0.833		0.9	0.9
1.46		0.8	0.8
2.124		0.7	0.7
2.96		0.6	0.6

-----конец страницы-----

-----начало следующей страницы-----

Продолжение табл. 1. АЧХ ФНЧ ($R = 51$ кОм, $C = 1300$ пФ).

f , кГц	$U_{\text{вх}}$, В	$U_{\text{вых}}$, В	K
3.725	1	0.5	0.5
4.9		0.4	0.4
5.86		0.3	0.3
9.06		0.2	0.2

6. Оформление рисунков

6.1 Рисунками являются все изображения: схемы, фотографии осциллограмм, спектрограмм и лабораторных макетов, графики зависимостей и прочие графические материалы. Не допускается вводить различные виды рисунков (схема, график, фотография) и использовать эти виды с раздельными названиями в подписях и с раздельной нумерацией («График 1...», «Схема 2...», «Фотография 5...» и т. д.) – все рисунки должны быть подписаны в виде «Рис. 1...», вне зависимости от того, что изображено на рисунке (содержание изображения отражается в подписях к рисунку и его названии).

Примеры:

Рис. 1. График зависимости выходного напряжения от частоты.

Рис. 2. Осциллограмма выходного сигнала автогенератора.

Рис. 5. Схема автогенератора.

6.2 Подрисуночная подпись с номером и названием рисунка должна располагаться под рисунком, с выравниванием по левому краю или по центру, и должна быть отделена от последующего текста пустой строкой. В подрисуточные подписи можно включать дополнительные пояснения (или "легенду" семейства кривых).

6.3 Подрисуточная подпись должна быть размещена на одной странице с соответствующим рисунком.

Примеры:

Рис. 1. График зависимости выходного напряжения от частоты. Точками обозначены экспериментально измеренные значения, сплошной линией – аппроксимация теоретической функцией $u(f) = 1/f$.

Рис. 2. Осциллограммы сигналов на входе (верхняя линия) и выходе (нижняя линия) неинвертирующего усилителя.

Рис. 5. Схемы каскада с биполярным транзистором.

Слева – схема для измерения u_{11} и u_{22} , справа – схема для измерения коэффициента усиления.

6.4 Оформление рисунков с графиками зависимостей.

- 1) Рекомендуется строить графики зависимостей в программе Excel.
- 2) Оси графиков должны быть подписаны. Для размерных величин в подписи должна быть указана размерность.
- 3) При использовании логарифмического масштаба по оси должны быть отложены непосредственно значения величин, а не значения ее логарифма. Также при этом целесообразно делать подробную сетку по данной оси.
- 4) Все численные и буквенные обозначения на графике должны быть выполнены в соответствии с требованиями к форматированию текста согласно п. 4 данного пособия.
- 5) Измеренные в ходе выполнения работы значения зависимостей, зафиксированные в протоколе измерений, должны быть представлены на графиках в виде точек, без соединения линиями ("по умолчанию" часто точки не выделяются, но рисуются соединяющие их линии).
- 6) Экспериментально полученные точки должны быть аппроксимированы подходящей функцией (можно построить требуемую аппроксимирующую функцию или использовать стандартную линию тренда в Excel, либо провести адекватную, по мнению автора отчета, аппроксимирующую линию «от руки»).

Построение линий, аппроксимирующих измеренные значения, рассмотрено в Приложении 3.

Пример построения графика зависимости.

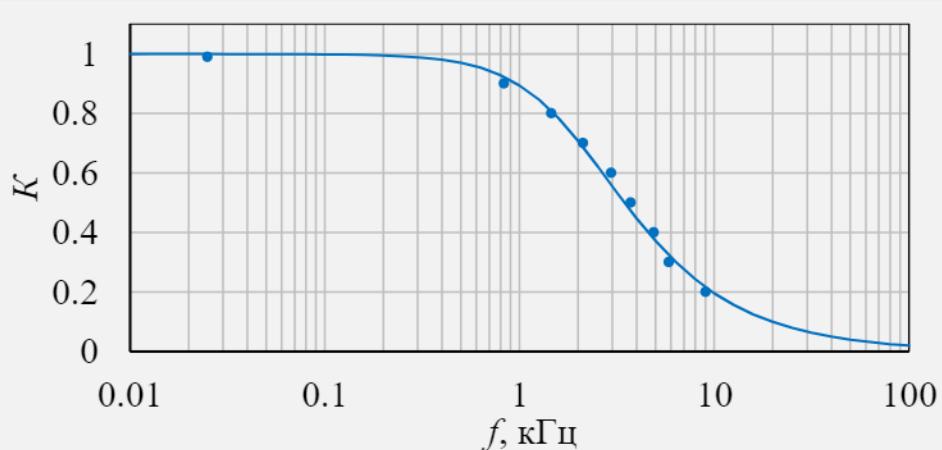
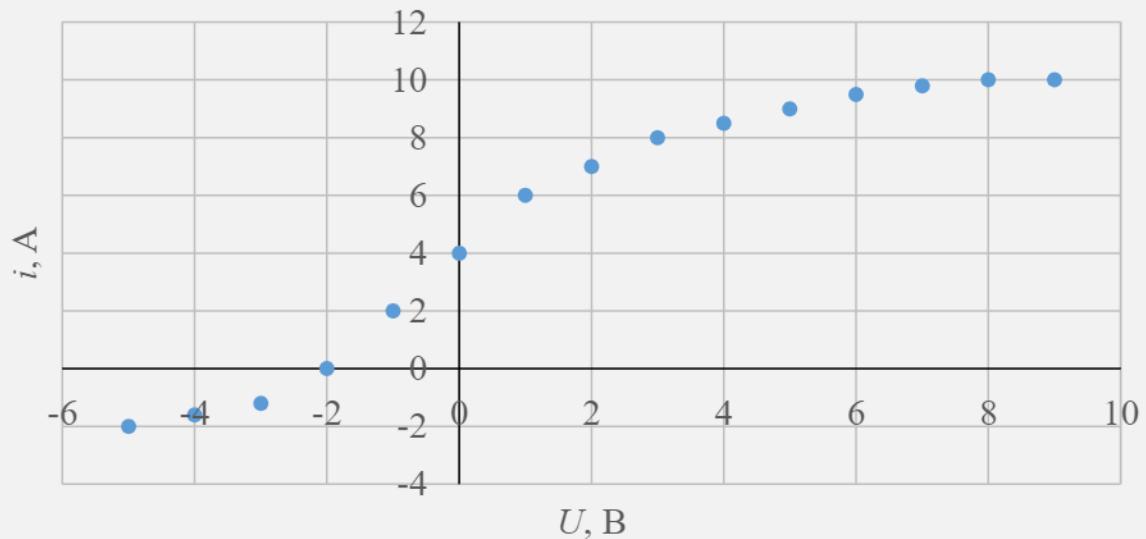


Рис. 1. АЧХ ФНЧ в полулогарифмическом масштабе. Точками обозначены измеренные значения, линией – их аппроксимация с помощью формулы $K(f) = [1 + (f/f_c)^2]^{-1/2}$.

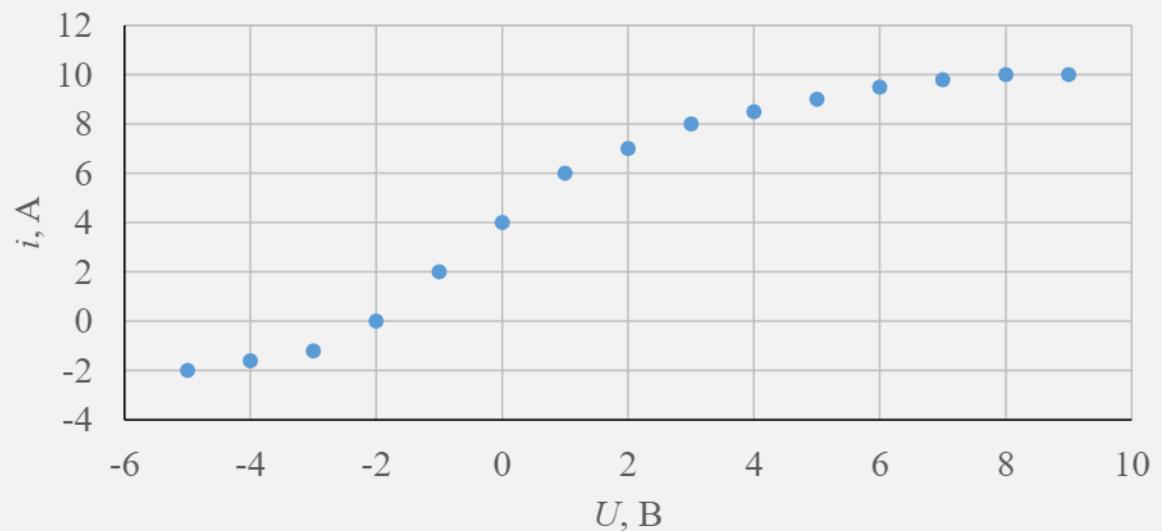
- 7) Оси должны быть расположены строго на границах области построения (например, вертикальная ось – левая граница, горизонтальная ось – нижняя граница). Не допускается расположение осей внутри области построения.
- 8) Масштабы по осям должны быть выбраны таким образом, чтобы отсутствовали незадействованные области на графике.

Пример

Неправильное оформление графика – оси расположены внутри области построения (несоответствие п. 6.3.7).

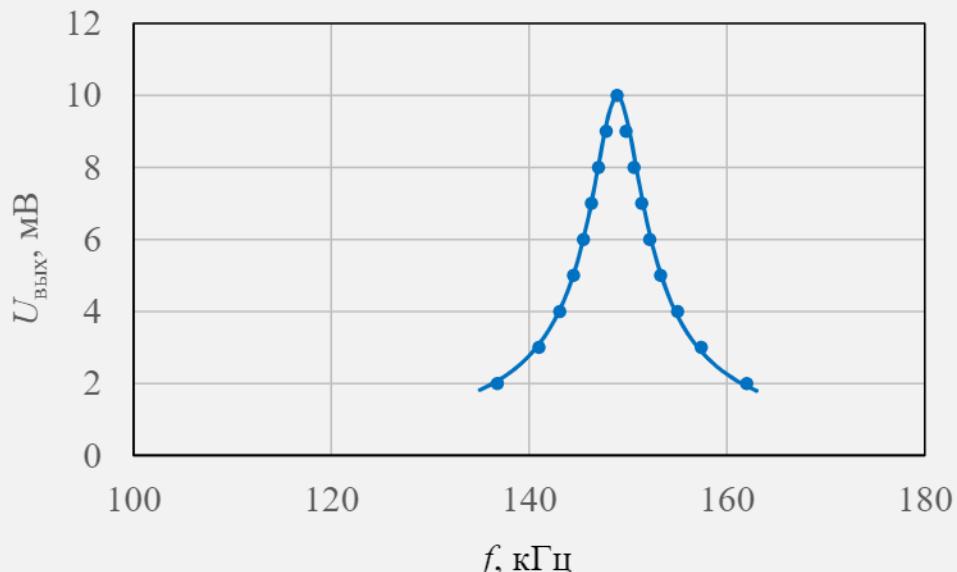


Правильное оформление графика.

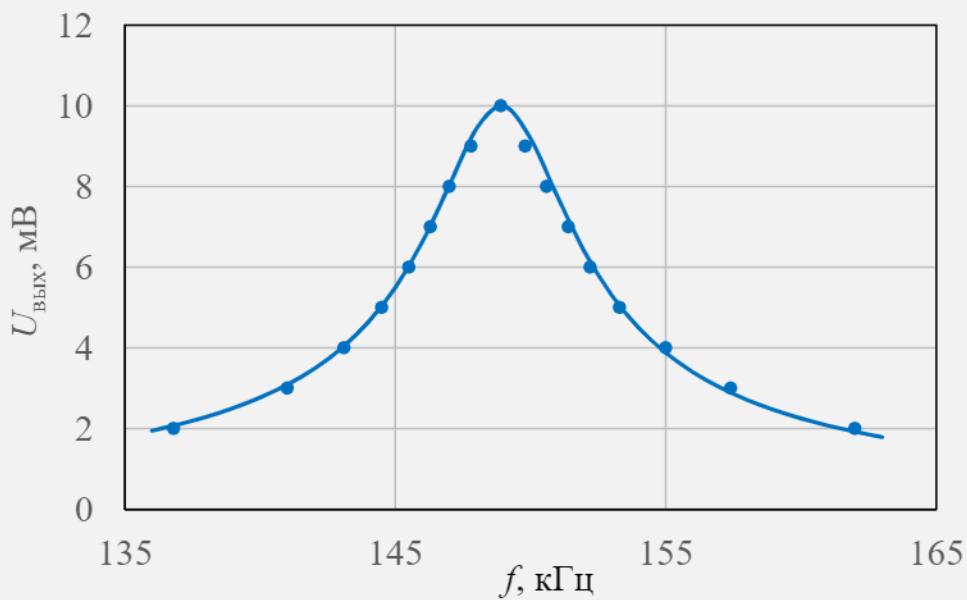


Пример

Неправильное оформление графика – существенная часть области аргумента зависимости не задействована (несоответствие п. 6.3.8).



Правильное оформление графика.



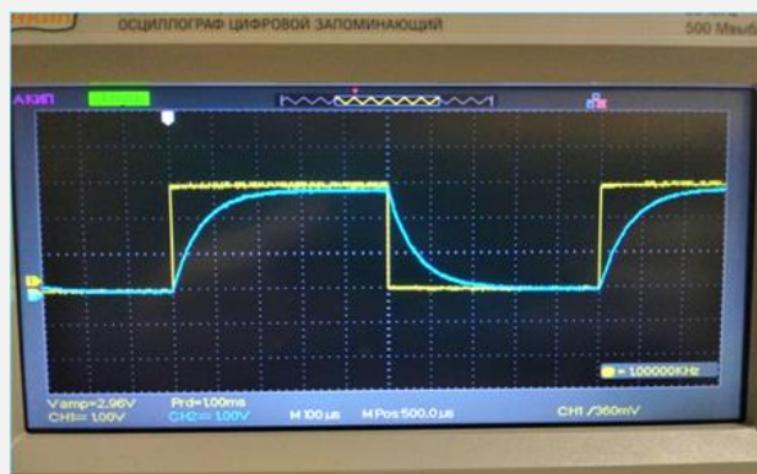
6.5 Оформление рисунков с фотографиями.

- 1) Фотографии осциллограмм и спектрограмм должны быть обрезаны таким образом, чтобы убрать все лишние детали (элементы управления приборов и т. д.), которые не используются и не требуются для анализа и интерпретации представленных результатов.
- 2) На самом рисунке или в подписи к нему должен быть указан (виден) масштаб (цена деления) каждой из осей.

- 3) В том случае, если на фотографии изображена осциллограмма двух сигналов (двулучевой режим работы осциллографа) – линия каждого луча должна быть подписана и разъяснена (на самом рисунке или в подписи к нему).
- 4) При представлении фотографий осциллограмм и спектрограмм со светлыми линиями и надписями на темном (черном) фоне обычно целесообразно инвертировать цвета изображения. При этом получаются темные линии и подписи на светлом (белом) фоне. При таком варианте рисунок, как правило, лучше "читается" (линии лучше смотрятся, а надписи лучше различимы). Кроме того, в этом случае на инвертированной по цвету осциллограмме намного удобнее делать поясняющие пометки как автору отчета, так и преподавателю, проверяющему отчет.

Пример представления фотографий

Исходная фотография:



Фотография после обрезки с удалением ненужных областей:

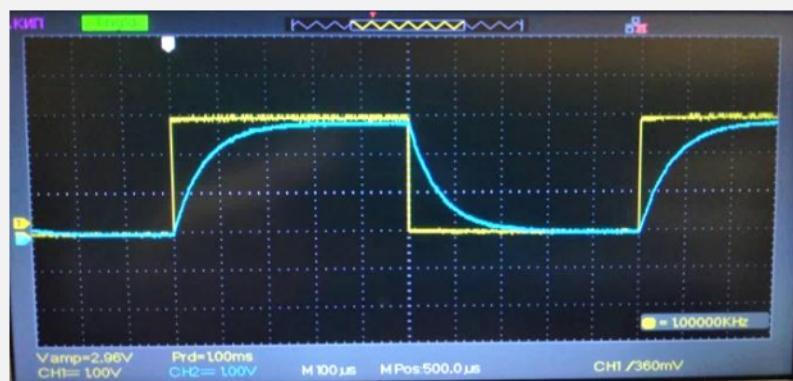


Рисунок в отчете:

- инвертированы цвета;
- нанесены дополнительные построения для нахождения τ_ϕ и A ;
- добавлена подпись к рисунку.

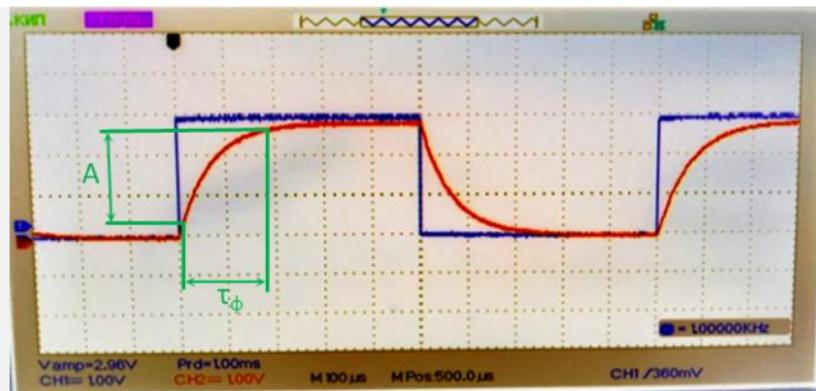


Рис. 1. Осциллограммы сигналов на входе ФНЧ (синяя линия) и на выходе ФНЧ (красная линия). По оси Y – 1 В/дел., по оси X – 100 мкс/дел.

- 5) Если печать отчета будет производится в черно-белом формате, необходимо учитывать это обстоятельство:
- В том случае, когда сигналы каналов отличаются цветом линии (как в примере выше), необходимо убедится, что в черно-белом формате оттенки этих линий будут различимы. При этом в подписи должны быть указаны актуальные цвета (т.е. не синий и красный, а темно-серый и светло-серый).
 - В том случае, если цвета разных линий при переводе изображения в черно-белый формат становятся неразличимыми, следует выбрать другой вариант обозначения (например, поясняющие надписи и т. п.).

Пример поясняющих надписей на осциллограмме

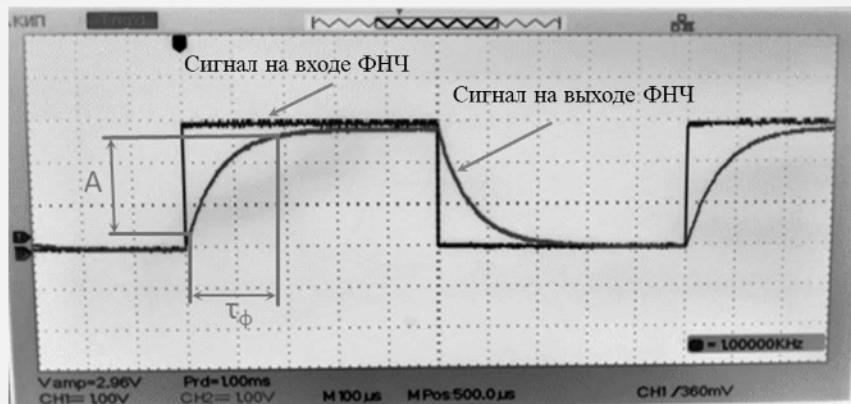


Рис. 1. Осциллограммы сигналов на входе и на выходе ФНЧ. По оси Y – 1 В/дел., по оси X – 100 мкс/дел .

7. Запись формул

7.1 Каждая формула должна быть расположена в отдельной строке, с выравниванием по центру.

7.2 Формулы должны приводиться не ранее их первого упоминания в тексте отчета.

7.3 Все формулы в отчете должны быть пронумерованы сквозной нумерацией. Номер формулы должен быть заключен в круглые скобки. Номер располагается на одной строке с соответствующей формулой, с равнением по правому краю.

7.4 Обозначения величин в формулах должно соответствовать требованиям, приведенным в п. 4.5 настоящего документа и строго соответствовать обозначениям этих же величин, упоминаемых в тексте отчета.

7.5 Формулы в отчете должны быть записаны с использованием общепринятых символов и обозначений. Не допускается использование символов «*» для обозначения умножения, «^» для обозначения возведения в степень, «sqrt» для обозначения квадратного корня и т. д.

7.6 В случае использования «многоуровневых» скобок рекомендуется использовать следующую последовательность скобок: {{[[...]]}}.

Пример оформления формулы в отчете

Резонансная частота полосового фильтра рассчитана по следующей формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot (C + C_0 + C_{\pi})}}. \quad (8)$$

Далее провели сравнение экспериментально измеренного значения резонансной частоты с полученной в результате расчета по формуле (8).

Оформление титульного листа.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт электроники и телекоммуникаций
Высшая школа прикладной физики и космических технологий

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № __

«Название лабораторной работы»

по дисциплине «Название дисциплины»

Выполнили
студенты гр. № _____ / _____
бригада № _____

Фамилия И. О.
Фамилия И. О.

Преподаватель:

Фамилия И. О.

Санкт-Петербург
2022 г.

Пример оформления пункта отчета.

1. Измерение амплитудно-частотной характеристики фильтра нижних частот на основе RC-цепи.

Собрали фильтр нижних частот (ФНЧ) на основе интегрирующей RC-цепи и подключили к нему генератор и измерительные приборы согласно схеме, представленной на рис. 1. При выполнении работы исследовались два варианта ФНЧ, отличающиеся номиналом используемого конденсатора. В первом варианте ФНЧ – $R = 51 \text{ кОм}$, $C = 1300 \text{ пФ}$, во втором – $R = 51 \text{ кОм}$, $C = 10 \text{ нФ}$.

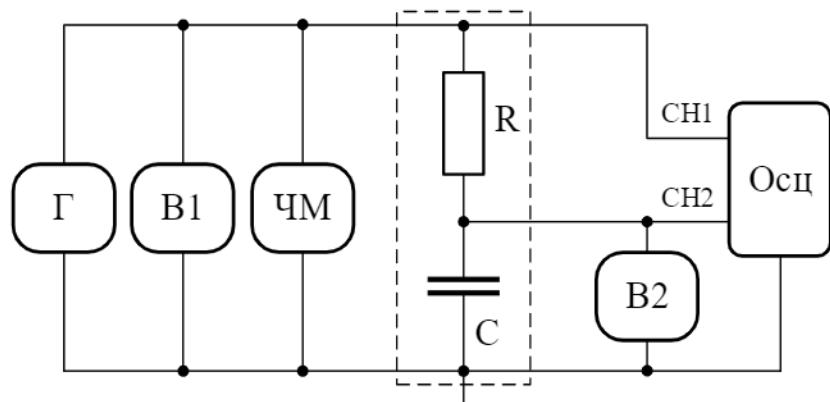


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования ФНЧ на основе RC-цепи. Условные обозначения: «Г» – генератор, «В1» и «В2» – вольтметры, «ЧМ» – частотометр, «Осц» – осциллограф (CH1 и CH2 – первый и второй каналы осциллографа).

В данном пункте измерялась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цепи, то есть зависимость коэффициента передачи K от частоты. Для этого при помощи генератора подали на вход ФНЧ напряжение синусоидальной формы, контролируя при этом действующие (эффективные) значения сигнала на входе и выходе при помощи вольтметров B_1 и B_2 . Изменяя частоту сигнала в диапазоне от 0 до 11 кГц и поддерживая при этом напряжение на входе на уровне $U_{\text{вх}} = 1$ В, мы фиксировали уровень $U_{\text{вых}}$ на выходе ФНЧ. Коэффициент передачи рассчитывали по формуле

$$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} . \quad (1)$$

По указанию преподавателя перед проведением непосредственно измерений убедились, что цепь имеет свойства ФНЧ. Изменяя частоту подаваемого сигнала и наблюдая осциллограммы входного и выходного сигналов, мы убедились, что при малых частотах амплитуды сигналов практически совпадают (то есть коэффициент передачи $K \approx 1$) и сдвиг фаз между ними отсутствует ($\Delta\phi \approx 0$ рад.), а с увеличением частоты амплитуда

выходного сигнала уменьшается (т. е. уменьшается коэффициент передачи K) и увеличивается сдвиг фазы $\Delta\phi$.

Для примера мы зафиксировали осциллограммы сигнала на входе и выходе ФНЧ для четырех различных частот входного сигнала (рис. 2 – 4).

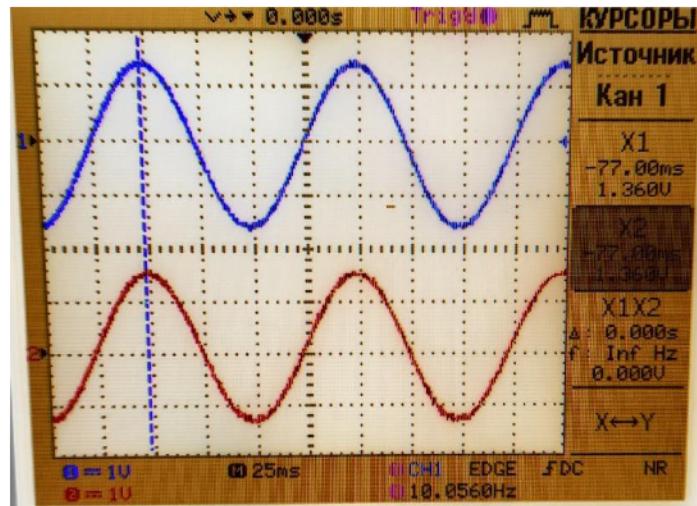


Рис. 2. Осциллограмма сигнала на входе ФНЧ (сверху) и на выходе ФНЧ (снизу). Частота сигнала $f = 10$ Гц. $K = 1$, $\Delta\phi = 0$ рад. Масштабы: по оси Y – 1 В/дел., по оси X – 100 мс/дел.

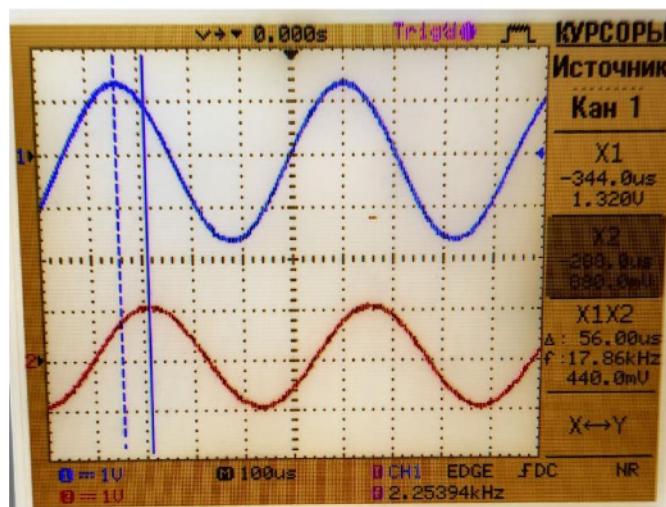


Рис. 3. Осциллограмма сигнала на входе ФНЧ (сверху) и на выходе ФНЧ (снизу). Вертикальными линиями отмечены максимумы входного сигнала (пунктирная линия) и выходного сигнала (сплошная линия). Частота сигнала $f = 2.25$ Гц. $K = 0.7$, $\Delta\phi = 0.25\pi$ рад. Масштабы: по оси Y – 1 В/дел., по оси X – 100 мкс/дел.

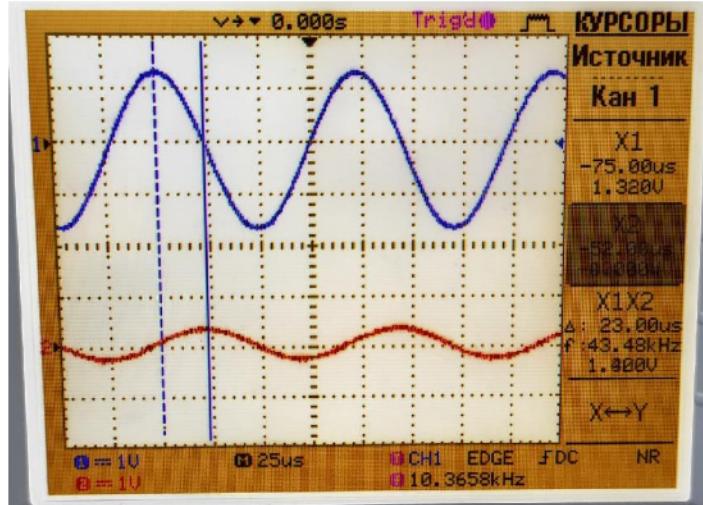


Рис. 4. Осциллографмма сигнала на входе ФНЧ (сверху) и на выходе ФНЧ (снизу). Вертикальными линиями отмечены максимумы входного сигнала (пунктирная линия) и выходного сигнала (сплошная линия). Частота сигнала $f = 10.36$ кГц. $K = 0.4$, $\Delta\phi = 0.48\pi$ рад. Масштабы: по оси Y – 1 В/дел., по оси X – 100 мкс/дел.

Из рис. 2 – 4 видно, что с ростом частоты K уменьшается, а $\Delta\phi$ увеличивается, что соответствует фильтру нижних частот.

Затем сняли АЧХ для обоих вариантов ФНЧ. Результаты измерений представлены в табл.1 (выделены строки с $K = 0.7$) и на рис. 5.

Табл. 1. АЧХ ФНЧ для двух вариантов RC-цепи.

$R = 51$ кОм, $C = 1300$ пФ		$R = 51$ кОм, $C = 10$ нФ	
f , кГц	K	f , кГц	K
0.025	1	0.1	0,98
0.833	0.9	0.17	0.9
2.124	0.7	0.27	0.7
3.725	0.5	0.38	0.5
9.06	0.2	0.53	0.2

По результатам проведенных измерений определили значения граничной частоты (частота, при которой $K \approx 0.707$) составляют: $f_{c1} = 2.124$ кГц для первого варианта ФНЧ и $f_{c2} = 0.27$ кГц для второго варианта ФНЧ.

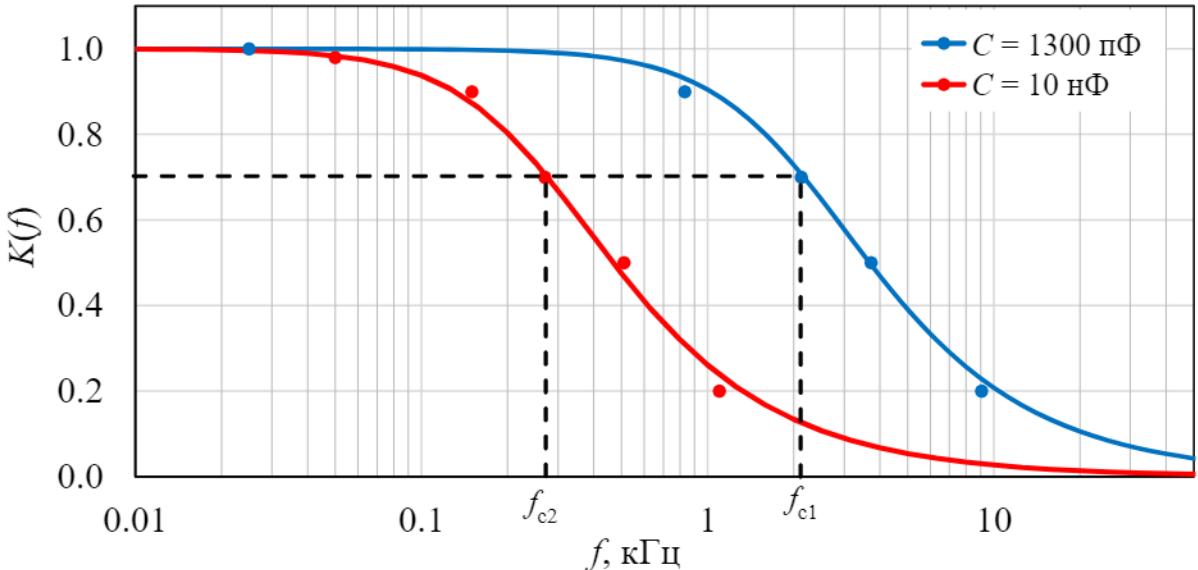


Рис. 5. АЧХ в полулогарифмическом масштабе для двух вариантов ФНЧ.

Для построения аппроксимирующих кривых на рис. 5 использовалась формула

$$K(f) = 1 / \sqrt{1 + (f/f_c)^2}, \quad (2)$$

где в качестве параметра f_c использовались значения f_{c1} и f_{c2} . Из графиков на рис. 5 видно, что экспериментальные точки хорошо согласуются с теоретической зависимостью.

Также мы оценили граничные частоты ФНЧ по номиналам резистора и конденсатора по следующей формуле

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (3)$$

Сравнение полученных значений граничных частот показано в табл. 2.

Табл. 2. Экспериментальные и расчетные значения граничных частот для двух вариантов ФНЧ.

		$R = 51 \text{ кОм}, C = 1300 \text{ пФ}$	$R = 51 \text{ кОм}, C = 10 \text{ нФ}$
f_c	Измерение	2.12 кГц	0.27 кГц
	Расчет по номиналам	2.40 кГц	0.31 кГц
Относительное отклонение	11.6 %	13 %	

Видно, что экспериментально измеренная частота среза согласуется с оцененной путем расчета (отклонение не превышает 13%). Наличие отклонения может быть объяснено отличием реальных значений сопротивления и емкости элементов от указанных номинальных значений.

Аппроксимация измеренных значений при построении графиков

Зависимости, полученные в ходе измерений при выполнении лабораторной работы, должны быть представлены в отчете в виде графиков. В большинстве случаев при измерениях регистрируются не непрерывные зависимости одной величины от другой, а дискретные пары значений двух связанных величин, которые соответствуют дискретным точкам на графике рассматриваемой зависимости. Согласно данным рекомендациям, эти точки должны быть обязательно представлены на графиках (т. н. "маркеры"). Однако в рамках анализа полученных результатов на графике обязательно должна быть проведена непрерывная линия, характеризующая полученную зависимость.

Часто при построении графиков ошибочно делается соединение полученного при измерениях набора дискретных точек прямыми линиями. Фактически это означает применение линейной **интерполяции** (в общем случае интерполяция позволяет соединить точки плавной линией, например, с использованием сплайна и других методов). Однако в подавляющем большинстве случаев применение интерполяции для построения зависимости по экспериментальным точкам является неудачным или даже неприемлемым. Измеренные значения имеют погрешность, поэтому точки на графике могут отклоняться (в т. ч. случайным образом) от истинной зависимости. Кривая, получаемая при интерполяции, проходит через точки, по которым делается интерполяция. Поэтому вместо правильной гладкой линии получается ломаная (если точки соединяются прямыми), на кривых рассматриваемой зависимости возникают паразитные колебания, ложные локальные экстремумы и т. п. артефакты.

Причина указанных негативных факторов состоит в том, что с учетом наличия погрешности измерений, непрерывная зависимость, соответствующая измеренным точкам, не должна обязательно проходить через эти точки. Поэтому правильный способ построения на графике непрерывной линии рассматриваемой зависимости – **аппроксимация** набора полученных при измерении дискретных точек аналитической функцией некоторого вида. Такой подход позволяет не только получить адекватный вид непрерывной зависимости графика по измеренным точкам, но и позволяет провести более полный анализ полученных экспериментальных данных.

В том случае, когда теоретический вид измеренной зависимости заранее не известен, успешный подбор аппроксимирующей функции (которая хорошо соответствует экспериментальным точкам) позволяет сделать вывод о том, какой именно функцией характеризуется эта зависимость.

В том случае, когда теоретическая функция, описывающая измеренную зависимость, заранее известна (как правило, измерения во время лабораторных занятий относятся именно к этому случаю), аппроксимирующая функция позволяет оценить величину и характер отклонения измеренных точек от теоретических, что позволяет проводить более полный анализ полученных результатов.

Успешность аппроксимации связана не только с правильным выбором вида аппроксимирующей функции, но и с подбором ее параметров. Универсальным и общепринятым показателем успешности аппроксимации, включая выбор параметров аппроксимирующей функции, является параметр σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) значений функции от значений экспериментальных точек. В общем случае выражения для СКО выглядит следующим образом

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y(X_i) - Y_i(X_i))^2}, \quad (\text{ПЗ-1})$$

где $Y_i(X_i)$ – значения для экспериментальных точек, $y(X_i)$ – значения аппроксимирующей функции $y(x)$, рассчитанные для значений аргумента X_i , соответствующих экспериментальным точкам.

Существуют последовательные подходы поиска параметров аппроксимирующей функции заданного вида для заданного набора дискретных точек, обеспечивающие минимизацию σ – т. н. метод наименьших квадратов. Однако для обработки данных в учебных лабораторных практикумах, на которые ориентировано данное пособие, не требуется изучение данного метода и не обязательно строго его применять.

Как упоминалось выше, в большинстве случаев для исследуемых в лабораторных работах зависимостей известен их аналитический вид, что должно быть учтено при построении аппроксимирующих кривых. При использовании для аппроксимации теоретических формул график будет не только отражать результат измерений, но наглядно показывать, насколько измеренные точки соответствуют теоретической зависимости с выбранными параметрами. Более того, если выбрать параметр (параметры) аппроксимирующей функции так, чтобы измеренные точки хорошо соответствовали линии этой функции, то это еще один способ оценки значений этих параметров, который может быть более достоверным, чем другие варианты. Далее описываются основные варианты построения аппроксимирующей функции, которые могут быть использованы при подготовке отчета по лабораторной работе.

1. Ручная аппроксимация.

Данный способ подразумевает проведение аппроксимирующей функции на графике вручную. Самый тривиальный вариант – провести линию при помощи ручки или карандаша в бумажной версии отчета. Другой вариант – нанести на графике линию с использованием встроенных инструментов рисования линий Excel («Вставка – Фигуры – Кривая»).

Этот способ проведения аппроксимирующей линии позволяет показать характер рассматриваемой непрерывной зависимости (в частности, продемонстрировать понимание автором отчета того, какой характер эта зависимость имеет). Но судить о том, насколько эта кривая соответствует теории и насколько точны измерения можно только на очень грубом, "качественном" уровне.

2. Аппроксимация с использованием инструмента "линия тренда"

В программном пакете Excel есть специальный инструмент, обеспечивающий возможность проведения аппроксимации дискретных точек – **"линия тренда"**. Данный инструмент автоматически подбирает коэффициенты аппроксимирующей функции, обеспечивающие наилучшее соответствие этой функции экспериментальным точкам.

Отметим, что в качестве критерия достоверности аппроксимации в Excel вместо среднеквадратического отклонения используется т. н. коэффициент детерминации R^2 . Данный коэффициент по своей сути является некоторой нормированной формой СКО и может принимать значения от 0 до 1, причем значение $R^2 = 1$ соответствует максимальной степени достоверности аппроксимации (т. е. нулевому значению σ), а снижение этого значения означает уменьшение достоверности аппроксимации (рост σ). Таким образом, подбор коэффициентов линии тренда в Excel осуществляется таким образом, чтобы обеспечивалось R^2 , максимально близкое к единице.

При проведении аппроксимации с использованием инструмента **линия тренда** необходимо выбрать тип функции, наиболее соответствующий типу полученной экспериментальной зависимости. Excel обеспечивает построение линии тренда на основе одной из следующих функций:

- экспоненциальная: $y(x) = e^{ax}$;
- линейная: $y(x) = a \cdot x + b$;
- логарифмическая: $y(x) = a \cdot \ln(x) + b$;
- степенная: $y(x) = a \cdot x^b$;
- полиномиальная: $y(x) = \sum_{i=0}^N a_i \cdot x^i$,

где a , b , a_i – числовые коэффициенты, автоматически подбираемые для обеспечения максимального значения R^2 , N – степень полинома (от 2 до 6).

Инструмент "линия тренда" позволяет отображать аппроксимирующую линию для заданного набора точек не только в интервале этих точек, но и строить эту линию в расширенных пределах. Для этого нужно в меню инструмента "линия тренда" на вкладке «Прогноз» ввести числовых коэффициентов в поля «вперед на: ... периодов» и «назад на: ... периодов».

Также целесообразно использовать имеющуюся возможность отображения формулы аппроксимирующей функции (и значения R^2) на графике. Вместо отображения формулы на графике, можно указать ее в подрисуночной подписи или при описании рисунка в основном тексте.

Пример аппроксимации экспериментально снятой зависимости напряжения $U_{\text{ср.в.}}$ на выходе детектора средневыпрямленных значений от амплитуды U_m напряжения на входе с помощью линии тренда приведен на рис. П3-1.

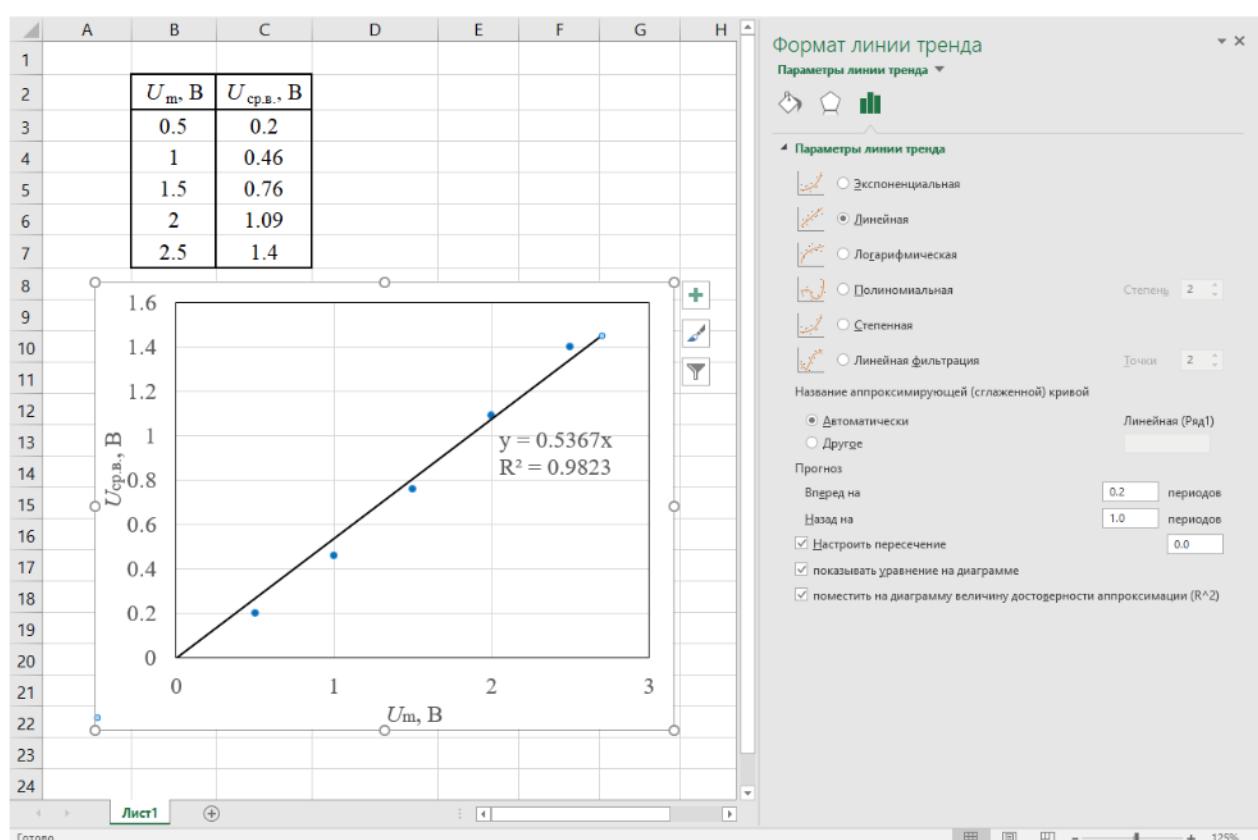


Рис. П3-1. Фрагмент листа в Excel, иллюстрирующий построение линии тренда по экспериментальным данным.

На рис. ПЗ-1 приведен фрагмент листа Excel с таблицей экспериментальных данных и построенным по ним графиком. Измеренные значения напряжения $U_{\text{ср.в.}}$ на выходе детектора при различных амплитудах напряжения U_m на входе обозначены на графике круглыми синими маркерами. В качестве линии тренда (аппроксимирующей функции) выбрана линейная функция – сплошная линия на графике. Так как, согласно теории, данная зависимость должна начинаться в точке (0, 0), для получения физически корректной линии тренда было задано пересечение линии тренда с осью Y в точке 0.0 (опция «Настроить пересечение»). Коэффициент линии тренда (определяющий наклон прямой) был подобран Excel автоматически для получения максимально близкого к единице параметра достоверности аппроксимации R^2 .

Инструмент "линия тренда" является достаточно удобным для построения аппроксимирующей линии, однако он может быть успешно применен только в том случае, когда вид экспериментальной зависимости соответствует одной из функций, доступных в инструменте "линия тренда" (в примере выше из теории известно, что зависимость средневыпрямленного значения напряжения от амплитудного является линейной функцией). Когда экспериментальный набор точек не соответствует ни одной из предусмотренных функций, данный метод не может быть успешно применен для аппроксимации.

Отметим, что даже если при использовании инструмента «линия тренда» удается подобрать аппроксимирующую функцию так, что рассматриваемые точки визуально соответствуют линии тренда, но при этом данная функция совершенно не соответствует ожидаемой теоретической зависимости, то такая аппроксимация, вообще говоря, не позволяет четко судить о соответствии измеренных точек теории, из чего следует, что данная аппроксимация не позволит сделать достаточно полные выводы о соответствии полученных экспериментальных результатов теоретической зависимости. Поэтому если теоретическая формула, описывающая рассматриваемую зависимость известна, но не совпадает ни с одной из функций инструмента "линия тренда" – следует использовать следующий, третий метод аппроксимации.

3. Аппроксимация с помощью функции

Если известна теоретическая формула, которой описывается экспериментально измеренная зависимость, и эта формула не соответствует ни одной из перечисленных выше стандартных функций инструмента "линия тренда", то представляется целесообразным построение аппроксимирующей кривой непосредственно на основе этой формулы, осуществив подбор ее коэффициентов, обеспечивающий хорошее соответствие аппроксимирующей линии измеренным точкам и низкое значение σ .

Отметим, что такой подход в ряде случаев позволяет не только получить физически корректную аппроксимирующую кривую, но и существенно уточнить результаты измерений.

В качестве примера рассмотрим построение аппроксимирующей кривой для АЧХ колебательного контура в области резонанса. Из теории электрических цепей известно, что резонансная зависимость коэффициента передачи колебательного контура от частоты $K(f)$ описывается аналитической формулой

$$K(f) = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \left(2 \frac{Q \cdot \Delta f}{f_0}\right)^2}}, \quad (\text{П3-2})$$

где f_0 – резонансная частота, $K_0 = K(f_0)$ – коэффициент передачи на резонансной частоте, Q – добротность контура, $\Delta f = f - f_0$ – отстройка частоты f от резонансной частоты f_0 .

Пусть во время занятия были измерены и записаны в протоколе измерений значения напряжений на выходе контура $U_{\text{вых}}$ для разных частот, представленные в табл. П3-1.

Табл. П3-1. Измеренная резонансная кривая колебательного контура.

f , кГц	$U_{\text{вх}}$, мВ	$U_{\text{вых}}$, мВ	$K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$
135.1	300	22	0.073
140.2		33	0.110
144.2		55	0.183
146.1		77	0.257
147.1		95	0.317
147.9		110	0.367
151.8		95	0.317
152.9		77	0.257
154.8		55	0.183
158.7		33	0.110
163.3		22	0.073

При этом на входе контура поддерживалось фиксированное напряжение $U_{\text{вх}} = 300$ мВ. Значения коэффициента передачи пересчитываются по приведенному отношению $K(f) = U_{\text{вых}}(f)/U_{\text{вх}}$.

Если в пакете Excel заполнить такую таблицу измеренными данными, пересчитать по ним значения $K(f)$ и построить график, то получится результат, представленный на рис. П3-2.

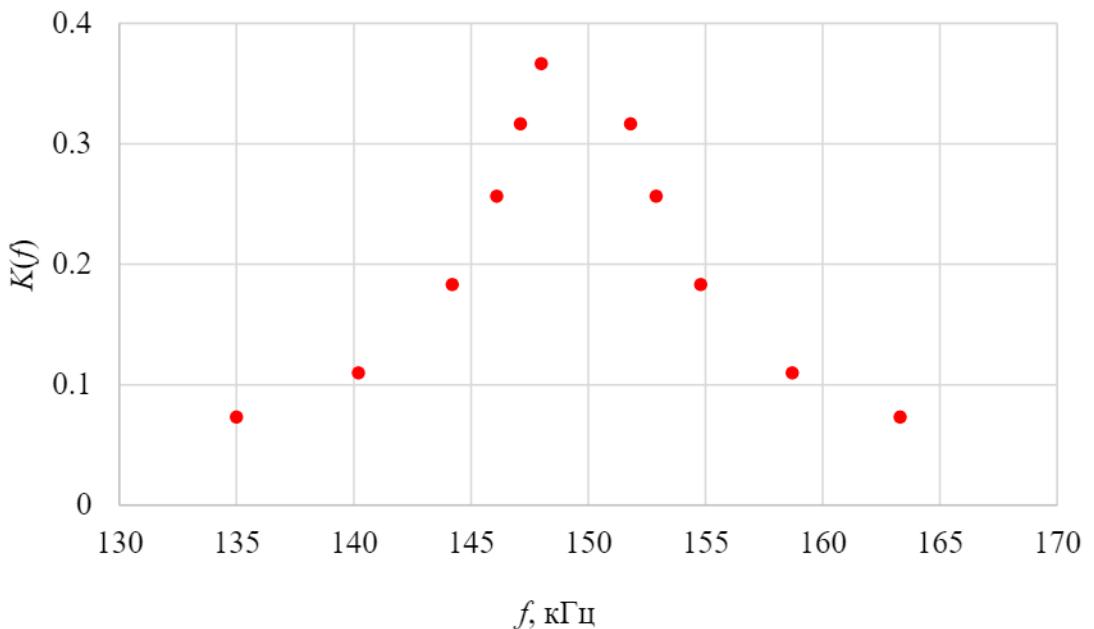


Рис. ПЗ-2. График с измеренными точками зависимости коэффициента передачи от частоты.

Для проведения аппроксимирующей кривой не удастся использовать инструмент "линия тренда", поскольку ни одна из предусмотренных там функций не соответствует виду (ПЗ-2). Поэтому для построения линии тренда следует провести относительно простой дополнительный расчет по выражению (ПЗ-2).

Выражение (ПЗ-2) содержит три параметра f_0 , K_0 и Q , которые надо подобрать таким образом, чтобы среднее отклонение аппроксимирующей функции от измеренных точек было минимальным. Поскольку проведение измерений подразумевает поиск резонансной частоты и измерение K_0 , то в качестве начального приближения для f_0 и K_0 можно выбрать измеренную резонансную частоту и значение K при этой частоте соответственно. Согласно приведенной выше таблице ПЗ-1 это точка с частотой $f=147.9$ кГц и напряжением $U_{\text{вых}} = 110$ мВ, при этом коэффициент передачи для этой точки равен $K = 0.367$. Для начальной оценки параметра Q можно взять оценку

$$Q = \frac{f_0}{f_B - f_H}, \quad (\text{ПЗ-3})$$

где f_B и f_H – верхняя (больше f_0) и нижняя (меньше f_0) частоты, для которых выполняется $K(f_B) = K(f_H) = 0.707 \cdot K_0$. Согласно таблице ПЗ-1 в качестве таких частот следует принять $f_H \approx 146.1$ кГц и $f_B \approx 152.9$ кГц. После построения аппроксимирующей линии эти параметры можно уточнять для получения лучшего соответствия построенной аппроксимирующей кривой и измеренных точек.

Пример требуемого расчета поясняет рис. П3-3, на котором показан фрагмент листа Excel с построением аппроксимирующей кривой при помощи встроенных операторов.

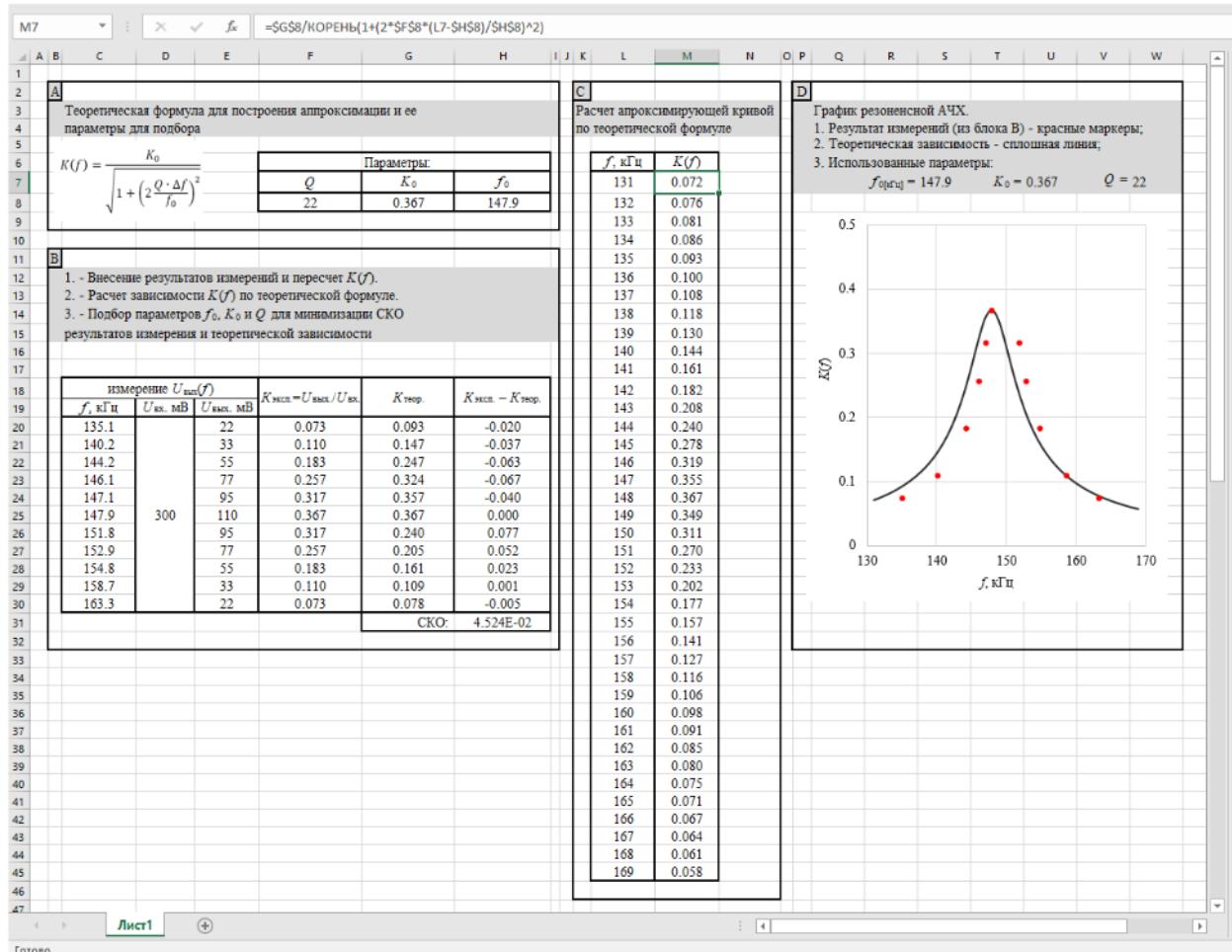


Рис. П3-3. Фрагмент листа Excel, на котором проводится построение аппроксимирующей функции по экспериментальным данным.

Приведем краткое пояснение приведенного на рис. П3-3 построения.

- В блоке А введена таблица с параметрами, которые следует задать, и можно подбирать для улучшения соответствия аппроксимирующей линии точкам.
- Блок В содержит данные, полученные при измерении, и позволяет сравнить измеренные значения K и расчет K по формуле (П3-2). Для каждой точки дополнительно проведен расчет отклонения измеренного значения от теоретического для указанных в блоке А параметров аппроксимирующей функции. Затем рассчитывается СКО этих значений.
- Блок С содержит расчет точек зависимости $K(f)$ по формуле (П3-2) для параметров функции, указанных в блоке А. Шаг значений по частоте берется достаточно малым, чтобы аппроксимирующая линия выглядела гладкой.

- Блок D содержит график, построенный по измеренным значениям из блока В и теоретическим точкам из блока С. Для ряда данных диаграммы, использующего значения из блока В, указываются точки (маркеры точек), а линия не проводится. Для ряда данных использующего значения из блока С, наоборот, точки не ставятся (маркеры отсутствуют), но присутствует линия, соединяющая точки.

На рис. ПЗ-4 приведен график, полученный при построении аппроксимирующей функции по начальным приближениям параметров f_0 , K_0 и Q (блок D на рис. ПЗ-3). На графике также указано значение СКО измеренных значений от аппроксимации.

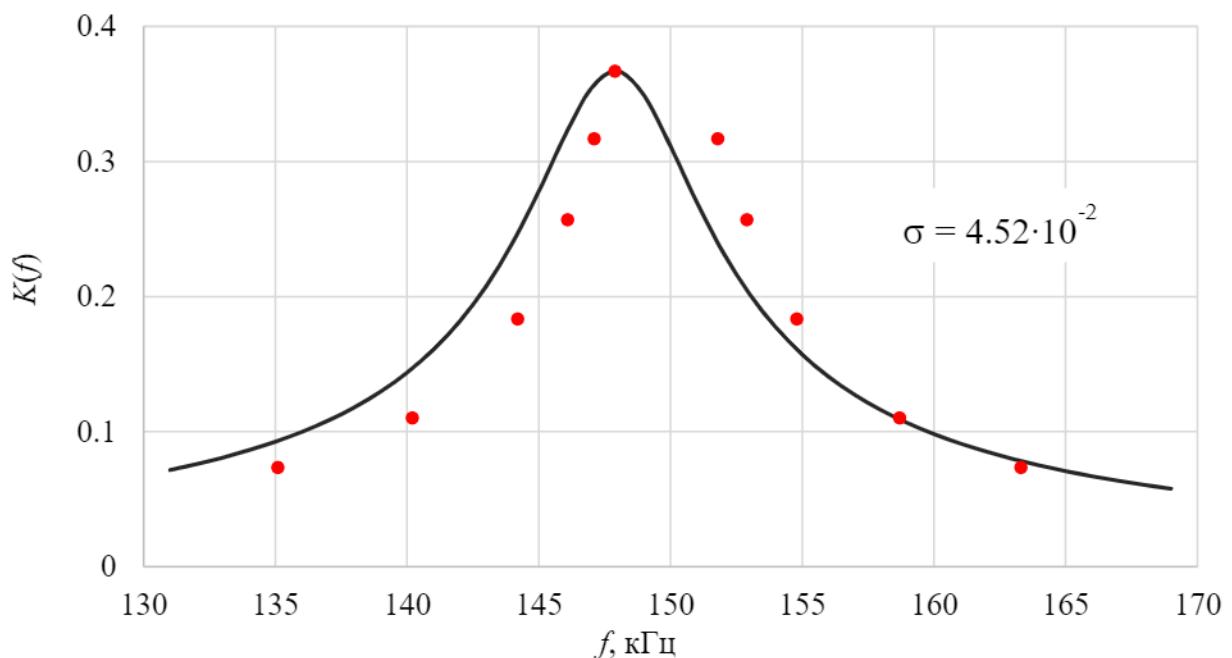


Рис. ПЗ-4. Зависимость коэффициента передачи от частоты. Точками обозначены экспериментальные данные, линией – аппроксимирующая кривая. Параметры аппроксимации: $f_0 = 147.9$ кГц, $K(f_0) = 0.367$ и $Q = 22$.

Видно, что при данных параметрах построенная аппроксимирующая кривая существенно смещена влево. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что при проведении эксперимента была неверно измерена резонансная частота контура. Поэтому можно улучшить соответствие аппроксимации измеренным точкам, увеличив параметр f_0 .

На рис. ПЗ-5 представлен график, полученный при построении аппроксимирующей функции после подбора значения параметра f_0 , при котором отсутствует смещение аппроксимации относительно измеренных точек.

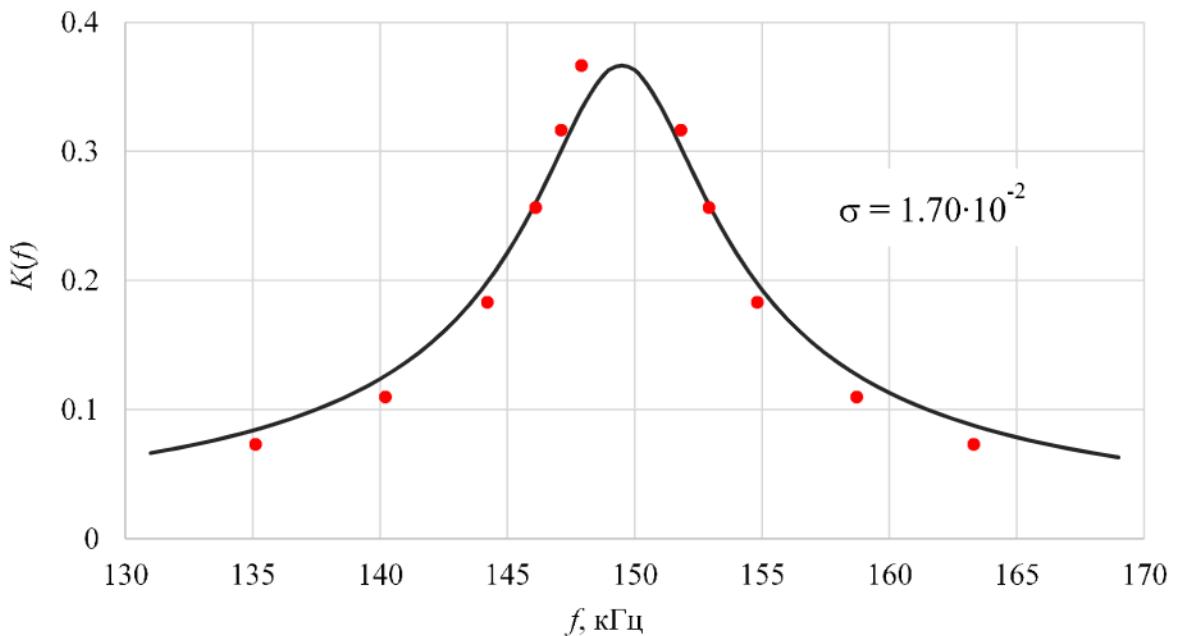


Рис. П3-5. Зависимость коэффициента передачи от частоты. Точками обозначены экспериментальные данные, линией – аппроксимирующая кривая. Параметры аппроксимации: $f_0 = 149.5$ кГц, $K(f_0) = 0.367$ и $Q = 22$.

Видно, что кривая на рисунке П3-5 лучше соответствует измеренным точкам, что численно выражается в заметном уменьшении σ . Однако все еще присутствует заметное расхождение результата измерений и аппроксимации, из чего следует необходимость дальнейшего подбора параметров.

Если посмотреть на то, как экспериментальные точки смещены относительно аппроксимирующей линии, можно сделать следующие выводы.

Во-первых, аппроксимирующая кривая заметно «шире» экспериментальной зависимости. Так как ширина данной кривой определяется параметром Q (добротность контура), то можно уменьшить параметр Q аппроксимирующей функцией, чтобы добиться лучшего соответствия аппроксимации и измерений.

Во-вторых, так как было выяснено, что при проведении эксперимента была неверно определена частота резонанса, то очевидно, что фактическое значение коэффициента передачи на резонансной частоте должно быть больше, чем изначально измеренное, и нужно увеличить параметр K_0 .

На рис. П3-6 представлен график, полученный при построении аппроксимирующей функции после подбора параметров Q и K_0 с учетом вышеприведенных соображений. Как видно из рисунка, удалось добиться значительно лучшего соответствия аппроксимирующей кривой и измеренных точек по сравнению с исходным рис. П3-5, что также выражается в снижении σ примерно в 8.6 раз.

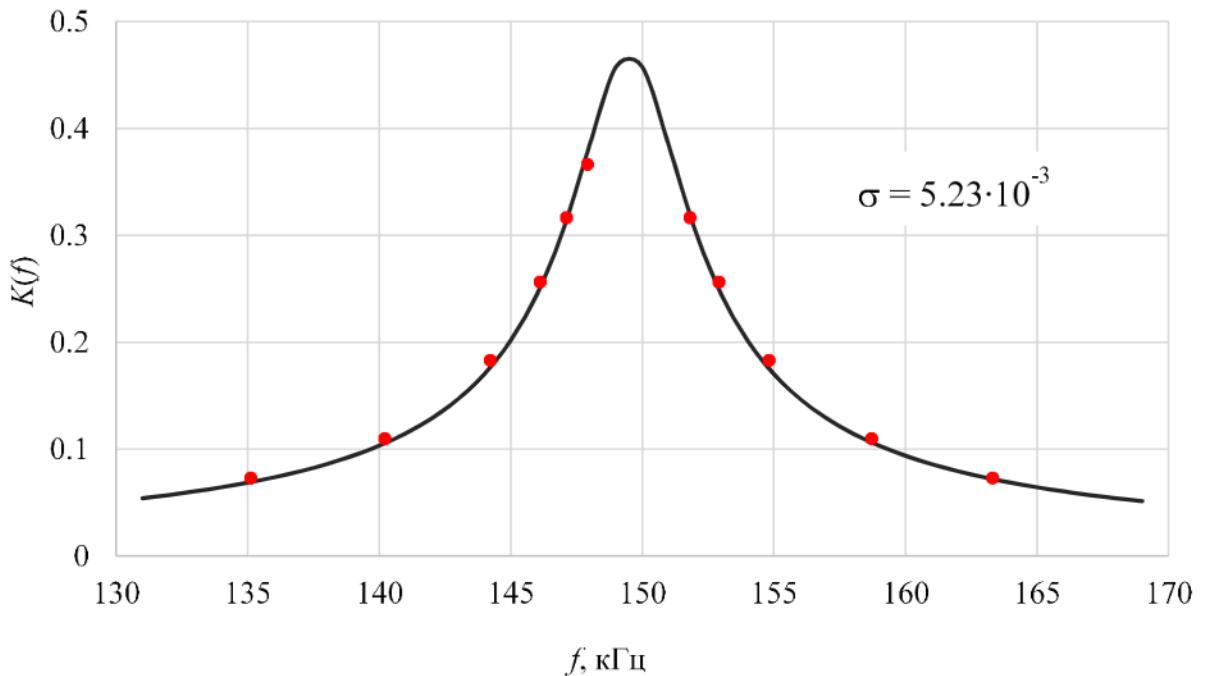


Рис. ПЗ-6. Зависимость коэффициента передачи от частоты. Точками обозначены экспериментальные данные, линией – аппроксимирующая кривая. Параметры аппроксимации: $f_0 = 149.5$ кГц, $K(f_0) = 0.47$ и $Q = 35$.

Отметим, что рассмотренная в данном примере аппроксимация позволила не только получить хорошо соответствующую измеренным точкам кривую, но и позволила сделать вывод о том, что в ходе эксперимента была неверно определена резонансная частота f_0 . Также по данной аппроксимации можно получить лучшую оценку полосы пропускания Δf и добротности контура Q .

Для наглядности в табл. ПЗ-2 представлены значения этих величин, определенные по результатам эксперимента и по последующей аппроксимации полученных экспериментальных результатов. Из таблицы видно, что относительно небольшая ошибка (около 1%) в определении резонансной частоты при проведении измерений в итоге привела к достаточно серьезному отклонению значений добротности и ширины полосы пропускания, что удалось выяснить в результате правильного подбора аппроксимирующей функции.

Табл. ПЗ-2. Сравнение измеренных при проведении эксперимента и оцененных по аппроксимации параметров полосового фильтра.

	f_0 , кГц	Δf , кГц	Q
Результат прямого измерения	147.9	6.8	22
Результат оценки по аппроксимации	149.5	4.5	35
Относительное отклонение, %	1	50	37

На рис. П3-3, иллюстрирующем построение аппроксимирующей функции в Excel, не указаны используемые при построении математические операторы. Поэтому в табл. П3-3 дополнительно приведен полный перечень всех используемых операторов.

Табл. П3-3. Основные математические операторы, используемые для построения аппроксимирующей функции на рис. П3-3.

Краткое описание операции	Номер ячейки	Математический оператор
Расчет значения K на экспериментальной частоте $f=135.1$ кГц	F20	=E20/\$D\$20
Расчет значения величины аппроксимирующей функции на экспериментальной частоте $f=135.1$ кГц	G20	=\$G\$8/КОРЕНЬ(1+(2*\$F\$8*(C20-\$H\$8)/\$H\$8)^2)
Расчет отклонения измеренного напряжения на контуре от значения аппроксимирующей функции на частоте $f=135.1$ кГц	H20	=(F20-G20)
Расчет СКО измеренного коэффициента передачи от аппроксимирующей функции	H31	=СТАНДОТКЛОН(H20:H30)
Задание шага по частоте при построении аппроксимирующей функции на графике	L8	=L7+1
Расчет значения величины аппроксимирующей функции для построения на графике	M8	=\$G\$8/КОРЕНЬ(1+(2*\$F\$8*(L8-\$H\$8)/\$H\$8)^2)

Отметим, что в Приложении 2 при построении АЧХ ФНЧ (рис. 5) вместо примененного способа подстановки экспериментально измеренной частоты среза f_c в качестве параметра аппроксимирующей функции можно попробовать подобрать этот параметр с целью уменьшить σ . Как видно из рис. 6, в представленном примере подстановка экспериментально измеренной частоты среза в качестве параметра аппроксимирующей функции обеспечила хорошее согласование с экспериментальными точками. Но в общем случае подбор f_c с учетом минимизации σ может дать лучший результат аппроксимации и более достоверное значение частоты среза.