

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ
ТЕХНИКА И МЕТРОЛОГИЯ**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ЧАСТЬ 4 Лабораторные работы № 4, 5

Издание второе
переработанное и дополненное

Под редакцией проф. Г.Н.Солопченко

Санкт - Петербург
2014

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 4

Исследование макета измерительного преобразователя
приращения сопротивления в код

1. Цели работы	3
2. Объект исследования	3
3. Программа работы.....	4
4. Используемые приборы и оборудование	4
5. Методические указания по выполнению работы.....	11
6. Теоретическая часть	18
7. Требования по выполнению работы и по составлению отчета о лабораторной работе	29
Список литературы, рекомендуемой для подготовки работе № 4	29

Лабораторная работа № 5

Измерение параметров электрических цепей
на переменном токе

1. Цели работы	30
2. Объект исследования	30
3. Программа работы	30
4. Используемые приборы и оборудование	31
5. Методические указания по выполнению работы	35
6. Теоретическая часть	42
7. Требования по выполнению работы и по составлению отчета о лабораторной работе	49
Список литературы, рекомендуемой для подготовки к работе № 5	49
Общие требования к составлению отчета по лабораторным работам	50

РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, ОСНАЩЕННОГО ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ.

1. Цели работы

1.1. Исследование свойств измерительного канала измерительной информационной системы (ИИС), работающего с потенциометрическим датчиком линейных и угловых перемещений.

1.2. Овладение основными приемами регулировки и настройки измерительных каналов ИИС по характеристикам точности в режиме диалога с компьютером,

1.3. Овладение экспериментальными методами выполнения поверки измерительных каналов ИИС,

1.4. Ознакомление с методами математической обработки результатов экспериментов при метрологических испытаниях измерительного канала ИИС в режиме диалога с компьютером.

2. Объект исследования

В настоящей работе исследуется макет измерительного канала измерительной системы, первым элементом которого является потенциометрический датчик, который преобразует измеряемую величину в изменение сопротивления. Измерительный канал с таким датчиком выполняет преобразование изменения или приращения сопротивления в напряжение. Потенциометрические датчики обычно применяются, как датчики угла поворота рулей корабля или самолета, как датчики линейного перемещения. Встречаются практические случаи, когда подобные датчики подключаются к одному плечу неравновесного моста, который является первым компонентом лабораторного макета такого измерительного канала. Вторым компонентом измерительного канала является аналогоцифровой преобразова-

тель (АЦП) “напряжение - код”, работающий под управлением персонального компьютера. В настоящей работе этот преобразователь используется для автоматического ввода в компьютер значений выходного напряжения неравновесного моста (аналоговой части канала).

3. Программа работы

3.1. Ввод данных и настройка макета измерительного канала.

3.2. Определение характеристики преобразования “приращение сопротивления в напряжение” макета измерительного методом "по мере" в нормальных условиях.

3.3. Определение характеристики погрешности преобразователя при нелинейной аппроксимации характеристики преобразования, полученной при поверке (калибровке) преобразователя методом "по мере".

3.4. Определение характеристики преобразования аналогового преобразователя “приращение сопротивления - напряжение” методом "по образцовому прибору" в нормальных условиях.

3.5. Определение характеристик погрешности преобразователя при нелинейной аппроксимации характеристики преобразования, полученной при поверке (калибровке) преобразователя методом "по образцовому прибору".

Примечание. Метод определения характеристики погрешности преобразователя: "по мере" или "по образцовому прибору" назначается преподавателем.

4. Используемые приборы и оборудование

4.1. Перечень приборов и оборудования

Мост **Р 329** в режиме неравновесного моста.

Магазин сопротивлений **МСП 60М**.

Цифровой вольтметр **GDM-8135** в режиме измерения постоянного напряжения.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП), сопряженный с ПЭВМ.

Источник постоянного напряжения **НУ-15002D**.

ПЭВМ.

Программное обеспечение.

При этом включении получается схема одинарного моста, плечи которого состоят из элементов схемы моста **Р 329**. Значения сопротивлений R_2 и R_3 устанавливаются с помощью штепселей. Надписи у гнезд, в которые вставляются штепсели, указывают значения установленных сопротивлений: 10,100,1000 или 10000 Ом. С целью достижения наибольшей чувствительности моста сопротивление R_2 должно быть соизмеримым с сопротивлением, имитирующем сопротивление датчика, а сопротивление R_3 выбирается так, чтобы в процессе работы моста участвовало наибольшее число декад сопротивления R_1 .

Предел допускаемой основной относительной погрешности моста в одинарном режиме в пределах до 100 кОм – 0,05 %.

4.3. Магазин сопротивлений

Для имитации сопротивления потенциометрического датчика используется магазин сопротивлений типа **МСП 60 М**, основная относительная погрешность которого нормирована величиной 0,02 %.

4.4. Вольтметр универсальный цифровой GDM-8135

В настоящей работе вольтметр применяется в качестве средства определения коэффициента масштабирования выходного сигнала измерительного канала.

Передняя панель вольтметра GDM-8135 представлена на рис. 4.2.

Для назначенного применения выбирается режим измерений постоянного напряжения, для чего левая крайняя кнопка кнопочного переключателя должна быть отжата. Предел измерения следует выбрать 2 В. Крайняя правая кнопка 1 зеленого цвета предназначена для включения питания. Измеряемое напряжение подключается к гнездам **V** и **COM**. Входное сопротивление на всех диапазонах измерения постоянного напряжения не менее 10 Мом.

Характеристики погрешности вольтметра приведены в таблице 4.1. В ней приведены отдельно мультипликативная и аддитивная погрешности.



Рис. 4.2. Передняя панель цифрового вольтметра GDM-8135

При выполнении лабораторных работ и оформлении отчета по этим характеристикам следует определить коэффициенты двучленной формулы нормирования, принятой для нормирования относительных погрешностей цифровых измерительных приборов в России.

Таблица 1.3

Характеристики абсолютной погрешности прибора GDM-8135 на постоянном токе

Измеряемая величина	Диапазоны измерения	Цена единицы младшего разряда вых. кода	Предел допускаемой основной абсолютной погрешности
Постоянное напряжение	-200 ÷ 200 мВ	0.1 мВ	0.001 · U _{изм} ± 1 мл. разряда
	-2 ÷ 2 В	1.0 мВ	
	-20 ÷ 20 В	10.0 мВ	
	-200 ÷ 200 В	100.0 мВ	

4.5. Аналого-цифровой преобразователь

В работе применяется аналого – цифровой преобразователь (АЦП) поразрядного уравнивания, смонтированный в корпусе разъема кабеля CENTRONIX. Работой АЦП управляет ПЭВМ в соответствии с режимом, установленным программой lab4_1.exe. В настоящей работе АЦП работает в режиме измерений с ручным запуском от клавиатуры. Время однократного измерения 1 мс или 2мс - в зависимости от выполняемой

функции.

Перед АЦП включен делитель напряжения, обеспечивающий два диапазона измерений : $(0 \div 1)$ В и $(0 \div 10)$ В. Входное сопротивление этого делителя равно:

- на диапазоне $(0 \div 1)$ В $R_d = 9912$ Ом

- на диапазоне $(0 \div 10)$ В $R_d = 109430$ Ом.

Характеристики погрешности АЦП и делителя не нормированы. В ходе работы выполняется корректировка систематической составляющей аддитивной погрешности АЦП и делителя, а также определяется масштабный коэффициент аналого-цифрового преобразования. Для этого используется внешний цифровой вольтметр. Инструкции по выполнению указанных операций появляются на дисплее компьютера при исполнении программы **lab4_1.exe**, описанной ниже в разд. 4.4.1).

Результаты измерений заносятся в память ПЭВМ и хранятся в файле, имя которого и содержание сообщается пользователю на экране дисплея.

4.6. Макет измерительного канала, работающего с потенциометрическим датчиком

Макет измерительного канала образован из блоков, типичных для современных измерительных информационных систем (ИИС): неравновесного моста (здесь эту функцию исполняет мост **P 329**) и АЦП. Компьютер является непременным компонентом любой современной ИИС. Структурная схема макета измерительного канала представлена на рис. 4.3.

На этом рисунке представлен мост, три плеча которого R_1, R_2, R_3 – сопротивления моста, четвертое плечо – сопротивление $R(0) + \Delta R_x$ – сопротивление, имитирующее сопротивление потенциометрического датчика, которое изменяется в зависимости от изменения измеряемой величины и воспроизводится магазином сопротивлений. $R(0)$ – сопротивление датчика, соответствующее нулевому значению измеряемой величины, при котором мост должен быть уравновешен. ΔR_x – изменение сопротивления датчика, вызванное изменением измеряемой величины. $U_{пит}$ – напряжение питания моста.

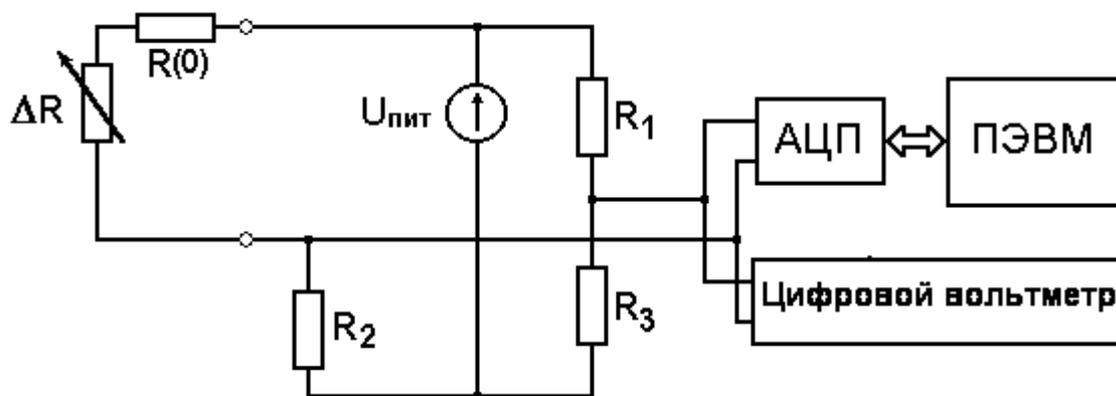


Рис. 4.3. Структурная схема макета измерительного канала, воспринимающего сигнал от потенциометрического датчика

Цифровой вольтметр **GDM-8135** является внешним прибором и предназначен для определения и ввода в компьютер масштабного коэффициента приведения выходного кода **АЦП** к единицам напряжения, а также поправки на систематическую составляющую аддитивной погрешности.

В работе определяются характеристики погрешности и статическая характеристика преобразования аналоговой части этого макета. Понятно, что в состав этих характеристик погрешности войдут погрешности магазина, неравновесного моста, **АЦП** и цифрового вольтметра **GDM-8135**.

4.4. Программное обеспечение работы

Программное обеспечение лабораторной работы размещено на диске **С** в директории **С:\LAB_159\LAB4** и состоит из трех отдельных программ **lab4_1.exe**, **lab4_1.exe** и **lab4_2.exe**, которые вызываются для исполнения последовательно под управлением командного файла **lab_4.bat**.

Общие рекомендации и пояснения к программному обеспечению (порядок запуска программ на исполнение, способы вывода содержимого файлов с промежуточными данными на экран дисплея, описание действий в нештатных ситуациях и др.) приведены в п. 1.4 части 1 [1].

Работа программ происходит в диалоговом режиме так, что после каждого действия оператора на дисплее появляется инструкция о следующем действии. Кроме того оператору предьявляется информация о результатах измерений или обработки.

При запуске на исполнение командного файла **lab_4.bat** управление передается программе **lab4_0.exe**, при исполнении которой в компьютер вводится номер группы. Затем управление передается программе **lab4_1.exe**, которая запрашивает исходные данные для работы и выводит на экран инструкции по выполнению эксперимента.

Программой предусмотрена автоматизированная коррекция систематических составляющих аддитивной и мультипликативной погрешности преобразователя, о чем также сообщается оператору.

Последующие инструкции, появляющиеся на экране дисплея, обеспечивают проведение эксперимента в соответствии с настоящими методическими указаниями и заданием преподавателя. При успешном выполнении плана эксперимента и заданий программа предъявляет оператору результаты эксперимента в виде графиков:

- двух граничных кривых, проходящих через крайние выборочные значения: верхние и нижние,
- теоретической характеристики преобразования, вычисляемой по формуле (1) или (2) разд. 6.2 – в зависимости от заданного метода калибровки.

Естественно, что при правильном выполнении экспериментов теоретическая характеристика должна находиться между двумя граничными.

Кроме того оператору сообщаются имена файлов, в которых записаны результаты экспериментов, и порядок размещения данных в этих файлах.

Затем управление передается программе **LAB4_2.EXE**, которая выполняет аппроксимацию полученных экспериментальных значений дробно-рациональными функциями, то есть функциями, соответствующими теоретической зависимости между изменением сопротивления в одном из плеч и напряжением в измерительной диагонали неравновесного моста, как это показано в разд. 6.2.

Аппроксимация заканчивается сообщением результатов в графическом и числовом виде, записью массивов в файлы и сообщением оператору имен этих файлов и порядка размещения их содержимого.

5. Методические указания по выполнению работы

5.1. Поверка «по мере» и «по образцовому прибору»

Метод “по мере” заключается в том, что на вход испытуемого преобразователя подаются фиксированные нерегулируемые значения физической величины с нормированной точностью. Характеристики погрешности и статическая характеристика преобразования определяются путем обработки значений выходной величины, которые содержат погрешности. В этом случае абсолютные погрешности выражаются в единицах выходной величины – напряжения, а статическая характеристика преобразования представляется, как функциональная зависимость выходной величины (напряжения) от входной (сопротивления).

Метод “по образцовому прибору” заключается в том, что задаются фиксированные значения выходной величины - напряжения, и в процессе эксперимента входная величина – сопротивление регулируется таким образом, чтобы выходная величина принимала именно эти фиксированные значения. При этом регистрируются значения входной величины, которые затем обрабатываются с целью определения искомых характеристик. В этом случае абсолютные погрешности выражаются в единицах входной величины – сопротивления, а статическая характеристика преобразования представляется, как функциональная зависимость входной величины от выходной. Отсчет значений входной величины в этом методе выполняется либо с помощью образцового прибора, либо по указателям (оцифрованному лимбу рукояток магазина), которыми снабжен регулируемый источник входной величины.

. 5.2. Выполнение п. 3.1. программы работы

На исполнение запускается программа **LAB_4.BAT**, которая последовательно вызывает программы **LAB4_0.EXE**, **LAB4_1.EXE**.

Программа **LAB4_0.EXE** запрашивает ввода номера группы, студенты которой выполняют работу.

Программа **LAB4_1.EXE** в режиме осциллографа предъявляет исполнителям график, указывающий положение напряжения в диагонали моста относительно нуля. Пользуясь этим графиком и показаниями вольтметра, преподаватель проверяет работоспособность моста и возможность его

уравновешивания, а также определяет пределы изменения сопротивления (при поверке «по мере») или напряжения в диагонали моста (при поверке «по образцовому прибору»).

По запросам компьютера преподаватель задает следующие исходные данные:

- метод выполнения работы: «по мере» или «по образцовому прибору»,
- количество значений независимой переменной (значения сопротивления или выходного напряжения – в зависимости от метода поверки),
- количество циклов измерений (не меньше двух),
- напряжение питания моста (от 4 В до 6 В),
- значения сопротивлений R_2 и R_3 плеч моста (указаны у соответствующих штепселей моста, которые показаны на рис. 4.1.),
- верхний предел измерения АЦП (1 В или 10 В),
- сопротивление имитатора датчика (магазина сопротивлений) $R(0)$, при котором мост должен находиться в равновесии во время всей работы),

После этого на экране появляется указание о соединении элементов макета канала и сообщение о введенных данных. В случае несоответствующего соединения элементов макета или неудачного ввода данных придется исправить недостатки.

Далее осуществляется настройка канала в отношении устранения или уменьшения действия аддитивных и мультипликативных погрешностей АЦП.

Аддитивные погрешности АЦП проявляются при нулевом входном напряжении. Поэтому при появлении на экране дисплея указания на установку нуля АЦП следует выключить питание моста и запустить АЦП на измерение. Это выполняется по указаниям компьютера. После чего на экране появляется значение аддитивной погрешности, которое записывается в память компьютера и вычитается из каждого результата измерения.

Для определения и последующего устранения мультипликативной погрешности выполняется следующее указание компьютера, выполнив которое, мы получаем значение мультипликативной погрешности, которое также записывается в память компьютера и на него делаются поправки при каждом измерении.

Для настройки макета канала по погрешности, вызванной влиянием

моста, необходимо установить на магазине сопротивлений значение $R(0)$, которое указано преподавателем, при котором мост должен находиться в равновесии. Уравновесить мост и записать то значение сопротивления R_1 , при котором состоялось равновесие, в единицах, соответствующих состояниям рукояток моста. Ввести это значение в компьютер вручную с клавиатуры.

Настройка канала выполнена.

5.3. Выполнение п. 3.2. программы работы

Определение характеристики преобразования “приращение сопротивления в напряжение” макета измерительного методом "по мере" выполняется под управлением программы **LAB4_1.EXE** при абсолютно точном и внимательном выполнении указаний компьютера, которые предъявляются на дисплее. Ниже приводится изложение методики выполнения измерений.

Пусть заданы значения сопротивления $R_x: R_{x1}, R_{x2}, \dots, R_{xk}$.

С помощью магазина сопротивлений последовательно устанавливаются заданные значения сопротивления в сторону увеличения (прямой ход) R_{xi} , $i = 1, 2, \dots, k$. При каждом значении R_{xi} , и в том числе, при $R_x = R_{xk}$ измеряют напряжение $U_{\text{диаг}}$. По достижении значения R_{xk} сопротивление R_x немного увеличивается и затем указанная процедура повторяется, но уже при обратном направлении изменения сопротивления R_x (обратный ход) вплоть до значения R_{x1} . После того, как при этом сопротивлении будет измерено выходное напряжение, сопротивление немного уменьшается и вновь устанавливается R_{x1} и вновь измеряется напряжение.

Напряжение $U_{\text{диаг}}$ измеряется при всех заданных значениях сопротивления R_{xi} , но мост уравнивается уже не должен до полного окончания всего комплекса экспериментов по калибровке. Обозначим через j , $j = 1, \dots, n$ номер прохода всех заданных значений R_{xi} , а результаты измерений напряжения $U_{\text{диаг}}$ в точке R_{xi} при j -ом эксперименте – через U_{ij} . Таким образом после выполнения n подобных циклов будет получено $2nk$

значений напряжения на диагонали моста для $i = 1, 2, \dots, k$, $j = 1, 2, \dots, n$.

После выполнения заданного количества измерений управление передается программе **lab4_2.exe**, и компьютер переключается на обработку полученных данных с целью дробно-рациональной аппроксимации функции преобразования канала.

В результате работы этих программ формируются массивы экспериментальных данных в файлах:

- в файле **Y_LAB_4.DAT** содержатся значения средних арифметических напряжения $U_{\text{диаг}}$ в i – х точках,

- в файле **YL_LAB_4.DAT** содержатся нижние граничные значения результатов измерений $U_{\text{ни}}$,

- в файле **YH_LAB_4.DAT** содержатся верхние граничные значения результатов измерений $U_{\text{ви}}$,

- в файле **REZ_LAB4.DAT** содержатся коэффициенты аппроксимирующей функции.

Порядок расположения в них данных представлен в разд. 6.3.4 и сообщается на дисплее при завершении программы аппроксимации характеристики преобразования.

Кроме того на дисплее показываются графики теоретической характеристики преобразования, а также граничных характеристик, проведенных по всем минимальным и максимальным экспериментальным значениям. Признаком успешности эксперимента является положение теоретической характеристики, вычисляемой в компьютере по формуле (1), между двумя граничными, которые проводятся по крайним выборочным значениям, полученным в i - ых точках, $i = 1, 2, \dots, k$. Если этого не происходит, следует выяснить причину случившегося, сообщить об этом преподавателю, сделать необходимые изменения в схеме или в исходных данных и повторить эксперимент.

При успешном завершении эксперимента необходимо записать в протокол имена файлов и их содержимое, пользуясь указаниями о порядке размещения данных в соответствующих файлах. Файлы записываются на дискету. При ее отсутствии содержимое файлов выводится на дисплей путем установки курсора на имя этого файла и нажатием клавиши **F3** и записывается в протокол вручную.

В отчете должны быть приведены:

- значения оценок $\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \tilde{b}_0, \tilde{b}_1$ коэффициентов функции, аппроксимирующей характеристику преобразования, и дисперсий погрешностей их определения,

- функция $U = \frac{\tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 \cdot \Delta R}{\tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 \cdot \Delta R}$, аппроксимирующая характеристику преобразования,

- график полученной характеристики преобразования $U = \tilde{f}(\Delta R)$, средние значения \bar{U}_i и крайние значения результатов измерений - по форме графика рис. 5.1

- расчетные значения тех же коэффициентов, вычисленные по формулам (12) - (15), а также выводы по результатам сопоставления экспериментальных и расчетных значений коэффициентов с учетом среднеквадратических значений погрешностей этих коэффициентов,

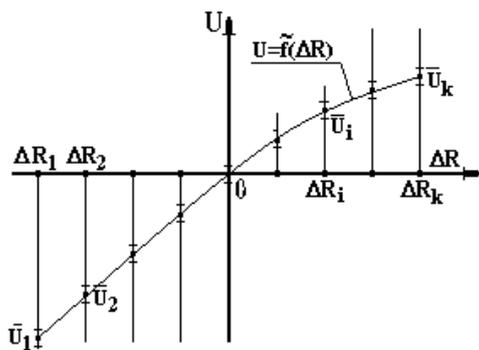


Рис. 5.1. Пример графического представления экспериментальных данных и результатов их обработки

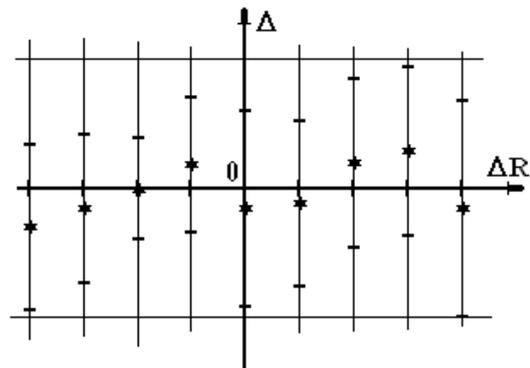


Рис. 5.2. Пример графического представления погрешностей измерений при испытаниях тензорезистора

Данные, необходимые для построения графика по форме графика рис. 5.1, извлекаются из перечисленных выше файлов.

5.4. Выполнение п. 3.3. программы работы

Данный пункт программы работы компьютером не поддержан, и его необходимо выполнять вручную при оформлении отчета о лабораторной работе. Определение характеристик погрешности преобразователя в зави-

симости от метода аппроксимации характеристики преобразования выполняется в соответствии с разд. 6.3.5 настоящих методических указаний. Для этого используются данные, записанные в файлы результатов **X_LAB_4.DAT**, **Y_LAB_4.DAT**, **YH_LAB_4.DAT**, **YL_LAB_4.DAT**, **Z_LAB_4.DAT**, **REZ_LAB4.DAT**. Порядок расположения данных представлен в разд. 6.3.4 и сообщается на дисплее при завершении программы аппроксимации характеристики преобразования.

В отчете по настоящему пункту должны быть представлены:

- график, представляющий состав абсолютных погрешностей преобразователя по форме графика рис. 5.2, на котором показать:

значения систематических погрешностей $\bar{\Delta}_i$ (формула (7)),

границы для аддитивных погрешностей (формула (3.54) части 1 [1]),

предельную абсолютную погрешность Δ_a (формулы (3.55), (3.56)

части 1 [1]),

- значения абсолютной Δ и приведенной γ предельных погрешностей.

5.5. Выполнение п. 3.4. программы работы

Подготовка к работе выполняется в соответствии с разд. 5.2.

По значениям U_{\min} , U_{\max} , полученным в разд. 5.2, преподаватель задает значения U_i , $i = 1, 2, \dots, n$, а также другие исходные данные в соответствии с разд. 5.2, при которых следует выполнять работу.

После этого на исполнение запускается программа **LAB_4.BAT**, которая вызывает программы **LAB4_0.EXE**, **LAB4_1.EXE**. Все действия следует выполнять по инструкциям, выводимым на дисплей.

Выполнение эксперимента аналогично тем указаниям, которые приведены в п. 5.3, с тем отличием, что в данном случае необходимо устанавливать заданные значения напряжения в диагонали путем регулирования значения сопротивления магазина **M 60M**, имитирующего выходное сопротивление потенциометрического датчика.

Данные, необходимые для построения графика по форме графика рис. 5.3, извлекаются из файлов:

- значения средних арифметических $\overline{\Delta R}_i$ – из файла **Y_LAB_4.DAT**,

- значения нижних граничных значений результатов измерений ΔR_{ni} – из файла **YL_LAB_4.DAT**,

- значения верхних граничных значений результатов измерений ΔR_{Bi} – из файла **YH_LAB_4.DAT**,
- коэффициенты аппроксимирующей функции – из файла **REZ_LAB4.DAT**.

Порядок расположения данных в этих файлах представлен в разд. 6.3.4 и сообщается на дисплее при завершении программы аппроксимации характеристики преобразования.

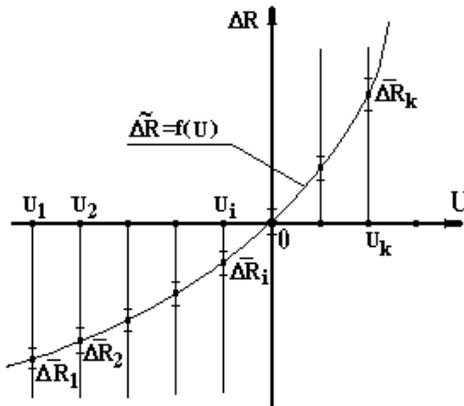


Рис. 5.3. Пример графического представления экспериментальных данных и результатов их обработки

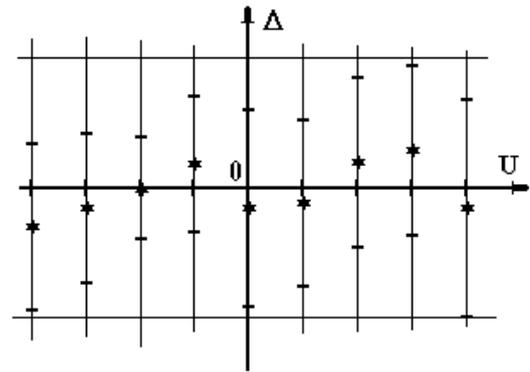


Рис. 5.4. Пример графического представления погрешностей измерений при испытаниях тензорезистора

В отчете должны быть приведены:

- значения оценок $\tilde{c}_0, \tilde{c}_1, \tilde{d}_0, \tilde{d}_1$ коэффициентов функции, аппроксимирующей характеристику преобразования, и дисперсий погрешностей их определения,

- функция $\Delta R = \frac{c_0 + c_1 \cdot U}{d_0 + d_1 \cdot U}$, аппроксимирующая характеристику преобразования,

преобразования,

- график полученной характеристики преобразования $\Delta R = \tilde{f}(U)$, средние значения $\overline{\Delta R}_i$ и крайние значения результатов измерений – по форме графика рис. 5.4.

- расчетные значения тех же коэффициентов, вычисленные по формулам (17) - (20), а также выводы по результатам сопоставления экспериментальных и расчетных значений коэффициентов с учетом среднеквадратических значений погрешностей этих коэффициентов,

5.6. Выполнение п. 3.5. программы работы

Все действия по настоящему пункту аналогичны действиям, установленным в разд. 5.4. с соответствующей заменой переменных. Для ориентировки в обозначениях следует обратить внимание на обозначения осей координат графиков, представляемых на дисплее.

В отчете по настоящему пункту должны быть представлены:

- график, представляющий состав абсолютных погрешностей преобразователя по форме графика рис. 5.4, на котором показать

значения систематических погрешностей $\bar{\Delta}_i$ (формула (8)),

границы для аддитивных погрешностей (формула (3.54) части 1 [1])

предельную аддитивную погрешность Δ_a (формулы (3.55), (3.56) части 1 [1]),

- значения абсолютной Δ и приведенной γ предельных погрешностей.

Для оформления отчета используются данные из файлов результатов **X_LAB_4.DAT**, **Y_LAB_4.DAT**, **YH_LAB_4.DAT**, **YL_LAB_4.DAT**, **Z_LAB_4.DAT**, **REZ_LAB4.DAT**. Порядок расположения данных представлен в разд. 6.3.4 и сообщается на дисплее при завершении программы аппроксимации характеристики преобразования и указан в разд. 6.3.4.

6. Теоретическая часть

6.1. Области применения преобразователей

"приращение сопротивления - код"

Измерительное преобразование приращения сопротивления в код (цифру) используется, как правило, в цепочке измерительных преобразований неэлектрических величин в тех случаях, когда первым этапом в этой цепочке является преобразование измеряемой величины в изменение сопротивления от некоторого начального значения **R(0)**. Подобные первичные преобразования распространены довольно широко. Перечислим несколько типичных примеров.

а) Измерения угла поворота, значительных (до 200 мм) прямолинейных перемещений с помощью потенциметрических датчиков.

Потенциметрические датчики представляют собой круглые или плоские реостаты (потенциометры), движок которых перемещается в соот-

ветствии с измеряемым угловым или плоскопараллельным перемещением. В результате сопротивление датчика, заключенное между одним из контактов реостата и его движком изменяется. Пределы изменения сопротивления подобных датчиков могут составлять от сотен до тысяч Ом. Нулевому перемещению соответствует некоторое, может быть ненулевое значение сопротивления $R(0)$, при котором мост должен быть уравновешен.

б) Измерение температуры с помощью термопреобразователей сопротивления (терморезисторов)

Принцип действия термометров сопротивления основан на зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры T . При нулевой температуре стоградусной шкалы сопротивление подобных датчиков $R(0) \neq 0$. При изменении измеряемой температуры это сопротивление изменяется, и выходной информативный параметр такого датчика есть $\Delta R(T) = R(T) - R(0)$, где $R(T)$ - зависимость сопротивления терморезистора от температуры T . Для стандартных термометров сопротивления зависимости $R(T)$ табулированы в стандарте ГОСТ 3044. Всегда желательно, чтобы при $T = 0$ выходной сигнал преобразователя также был равен нулю.

в) Измерение деформации, силы, ускорения, давления с помощью тензорезистивных датчиков.

Для всех этих датчиков характерно то, что при нулевом значении измеряемой величины их сопротивление не равно нулю. Применение неравновесных мостов во всех перечисленных случаях путем их уравновешивания скомпенсировать это начальное ненулевое сопротивление, и при нуле измеряемой величины получать нулевое значение на выходе.

6.2. Преобразование приращения сопротивления в напряжение с помощью мостов в неравновесном режиме

Как уже отмечено выше, любой мост может быть предварительно уравновешен при начальном значении сопротивления $R(0)$, и тогда напряжение (или ток) в диагонали моста будет зависеть от величины изменения этого сопротивления относительно $R(0)$. В общем случае при питании моста от источника напряжения, как это имеет место в настоящей работе, напряжение в диагонали моста, уравновешенного предварительно при значении измеряемого напряжения $R(0)$, выражается формулой

$$U_{\text{диаг}} = -E_0 \cdot \frac{\Delta R}{(R(0) + \Delta R + R_2) \left(1 + \frac{R_1}{R_3}\right) + \frac{(R(0) + \Delta R) R_1}{R_4} (R_2 + R_3) + \frac{R_2}{R_4} (R_1 + R(0) + \Delta R)}, \quad (1)$$

где через ΔR обозначено приращение сопротивления, подлежащее преобразованию в напряжение диагонали, R_4 - входное сопротивление прибора или преобразователя, включенного в диагонали моста. В нашем случае оно равно входному сопротивлению делителя напряжения R_d . Остальные обозначения поясняются на рис. 4.3 и соответствуют обозначениям на панели моста **P329** и на внутренней стороне его крышки.

В соответствии с глобальной целью любой измерительной процедуры в конечном итоге необходимо определить значение входной величины ΔR по значению $U_{\text{диаг}}$ на выходе измерительного преобразователя. В связи с этим необходимо знание зависимости, обратной (1):

$$\Delta R = -U_{\text{диаг}} \frac{(R(0) + R_2) \left(1 + \frac{R_1}{R_3}\right) + (R(0) + R_1) \frac{R_2}{R_4} + (R_2 + R_3) \frac{R(0)R_1}{R_3 R_4}}{E_0 + U_{\text{диаг}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_4} + \frac{R_1}{R_3} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_4} + \frac{R_3}{R_4}\right)\right)}. \quad (2)$$

Функции (1), (2) суть строгие математические записи прямой и обратной статических характеристик преобразования измерительного преобразователя “ $\Delta R \rightarrow U_{\text{диаг}}$ ”. Рассмотрим подробнее свойства этих характеристик.

а) Если входное сопротивление R_4 прибора или преобразователя, включенного в диагональ моста, значительно больше, чем $R(0)$, R_1 , R_2 , то есть $R_4 \gg R(0)$, $R_4 \gg R_1$, $R_4 \gg R_2$, то формулы (1), (2) сильно упрощаются :

$$U_{\text{диаг}} = -E_0 \cdot \frac{R_3}{(R_1 + R_3)} \cdot \frac{\Delta R}{(R(0) + R_2 + \Delta R)}, \quad (3)$$

$$\Delta R = -U_{\text{диаг}} \cdot \frac{(R(0) + R_2)(R_1 + R_3)}{E_0 \cdot R_3 + U_{\text{диаг}} \cdot (R_3 + R_1)}. \quad (4)$$

б) Как видно из формул (1) – (4), эти характеристики линейными не являются. Это дробные функции, числитель и знаменатель которых пред-

ставляют собой полиномы первой степени. Такие функции называются *дробно - линейными*. Однако, если диапазон изменения аргумента ΔR невелик, то есть если $\Delta R \ll R(0)$, как например, у тензорезистивных преобразователей в работе № 8, то $R(0) + \Delta R \cong R(0)$, и обе характеристики оказываются практически линейными. При этом условии формулы упрощаются еще больше:

$$U_{\text{диаг}} = -E_0 \cdot \frac{R_3}{(R_1 + R_3)} \cdot \frac{\Delta R}{(R(0) + R_2)}, \quad (5)$$

$$\Delta R = -U_{\text{диаг}} \cdot \frac{(R_1 + R_3)(R(0) + R_2)}{E_0 \cdot R_3}, \quad (6)$$

в) Характеристики преобразования зависят от напряжения питания моста. Поскольку мост работает в неравновесном режиме, нестабильность напряжения питания будет вызывать мультипликативную погрешность, относительное значение которой будет равно относительной нестабильности напряжения E_0 .

6.3. Поверка (калибровка) макета измерительного канала с потенциометрическим датчиком

6.3.1. Варианты выполнения калибровки

Целью поверки (калибровки) макета измерительного канала является экспериментальное определение его метрологических характеристик.

В настоящей работе по результатам экспериментов определяются

- характеристика преобразования (прямая или обратная - по заданию преподавателя),

- характеристика систематической составляющей погрешности преобразователя,

- среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной составляющей погрешности преобразователя.

Результаты экспериментов используются для аппроксимации характеристики преобразования степенным полиномом или дробно-линейной функцией.

На выбор преподавателя исследуется один из четырех вариантов комбинаций калибровки: "по мере" и "по образцовому прибору" при дробно-

рациональной аппроксимации характеристики преобразования..

Методы калибровки "по мере" и "по образцовому прибору" подробно изложены в разд.5.1.

По полученным экспериментальным данным отыскивается такая характеристика, которая наилучшим образом аппроксимирует полученные данные, насколько позволяют погрешности выполненных измерений входной и выходной величин. В этом случае характеристики погрешности преобразователя определяются относительно полученной аппроксимирующей функции. Ясно, что погрешность от нелинейности фактической характеристики преобразования будет уменьшена до значения, маскируемого погрешностями измерений, выполненных при калибровке. Процедура определения статической характеристики преобразования в этом варианте описана в разд. 3.5.1 - 3.5.4 части 1 [1].

В обоих вариантах схема соединений аппаратуры одинакова, и может быть выполнен любой из методов калибровки как "по мере", так и "по образцовому прибору". Различие будет только в действиях оператора.

6.3.2. Методика выполнения измерений при калибровке измерительного преобразователя "по мере"

В ходе выполнения работы калибровка преобразователя методом "по мере" реализуется под управлением программы **lab4_1.exe** при точном исполнении оператором инструкций, появляющихся на экране дисплея. Ниже приводится изложение методики выполнения измерений.

Пусть заданы значения сопротивления $R_x : R_{x1}, R_{x2}, \dots, R_{xk}$.

Вначале при значении $R_x = R(0)$, которое задается преподавателем, мост уравнивается. С помощью магазина сопротивлений последовательно устанавливаются заданные значения сопротивления R_{xi} , $i = 1, 2, \dots, k$. При каждом значении R_{xi} , и в том числе, при $R_x = R_{xk}$ измеряют напряжение $U_{\text{диаг}}$. По достижении значения R_{xk} сопротивление R_x увеличивается на $(0.1 \div 0.2) R_{xk}$ и затем указанная процедура повторяется, но уже при обратном направлении изменения сопротивления R_x вплоть до значения R_{x1} .

Напряжение $U_{\text{диаг}}$ измеряется при всех заданных значениях сопро-

тивления R_{xi} , но мост уравнивается уже не должен до полного окончания всего комплекса экспериментов по калибровке. Обозначим через j , $j = 1, \dots, n$ номер прохода всех заданных значений R_{xi} , а результаты измерений напряжения $U_{\text{диаг}}$ в точке R_{xi} при j -ом эксперименте - через U_{ij} . Таким образом после выполнения n подобных циклов будет получено nk значений напряжения на диагонали моста для $i = 1, 2, \dots, k$, $j = 1, 2, \dots, n$.

После выполнения заданного количества измерений управление передается программе **lab4_2.exe**, и компьютер переключается на обработку полученных данных в соответствии с алгоритмами, изложенными в разделе 3.5 части 1 [1], где в качестве x_i в нашем случае следует использовать значения R_{xi} , а в качестве y_{ij} - значения U_{ij} .

6.3.3. Методика измерений при калибровке измерительного преобразователя "по образцовому прибору"

В ходе выполнения работы калибровка преобразователя методом "по образцовому прибору" реализуется под управлением программы **lab4_1.exe** при точном исполнении оператором инструкций, появляющихся на экране дисплея. Ниже приводится изложение методики выполнения измерений.

Должен быть предварительно задан диапазон изменения выходной величины и значение сопротивления, при котором выходное напряжение должно быть равно нулю, то есть уравновешен мост.

В нашем случае преподаватель задает диапазон изменения напряжения в диагонали моста - интервал (U_{\min}, U_{\max}), и значение сопротивления $R_x = R(0)$, при котором мост должен быть уравновешен.

Задаются также фиксированные значения напряжения в диагонали моста U_i , $i = 1, 2, \dots, k$, среди которых должно быть и нулевое значение.

Вначале мост уравнивается при $R_x = R(0)$ один раз на время работы.

Затем с помощью магазина сопротивлений при $i = 1$ добиваются того, чтобы напряжение в диагонали моста было в точности равно U_1 , и при этом фиксируют значение сопротивления магазина, которое обозначается

через R_{x11} . После этого таким же путем на выходе преобразователя устанавливаются напряжение U_2 и фиксируется соответствующее значение сопротивления R_{x21} . Эта процедура повторяется для каждого значения напряжения до U_k включительно, после чего входное сопротивление немного увеличивается, и затем вновь устанавливается таким, чтобы выходное напряжение оказалось равным U_k . При этом фиксируется значение сопротивления R_{xk2} , и процедура повторяется в обратном направлении. Таким образом после выполнения n подобных циклов будет получено nk значений R_{xij} входного сопротивления для $i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, n$, где j - номер одного прохода всех заданных значений U_i .

После выполнения заданного количества измерений управление передается программе **lab4_2.exe**, и компьютер переключается на обработку полученных данных в соответствии с заданием преподавателя, которое было введено в начале работы по запросу компьютера. Обработка данных выполняется в соответствии с алгоритмами, изложенными в разд. 3.5.3, 3.5.4 части 1 [1], где в качестве x_i в нашем случае следует использовать значения U_i , а в качестве y_{ij} - значения R_{xij} .

6.3.4. Определение характеристики преобразования.

Нелинейная модель. Дробно-линейная аппроксимация

Дробно-линейная аппроксимация экспериментальных данных при калибровке преобразователя методом "по мере" заключается в определении коэффициентов дробно-линейной функции

$$f(\Delta R) = \frac{a_0 + a_1 \cdot \Delta R}{b_0 + b_1 \cdot \Delta R} \quad (11)$$

так, чтобы в i -ых точках обеспечить наименьшее отличие значений $f(\Delta R_i)$ от экспериментальных значений \bar{U}_i . В настоящей работе минимизируется функционал

$$\sum_{i=1}^k w_i \cdot (f(\Delta R_i) - \bar{U}_i)^2,$$

где w_i - весовые коэффициенты.

Это означает, что здесь используется метод наименьших квадратов.

Из формул (1), (11) видно, что дробно-линейная аппроксимация в полной мере соответствует виду истинной зависимости напряжения в диагонали моста от измеряемой величины ΔR , где

$$a_0 = 0,$$

$$a_1 = \frac{-E_0 \cdot R_3 \cdot R_4}{R(0)R_1(R_2 + R_3) + R_2R_3(R_1 + R(0)) + R_4(R(0) + R_2)(R_1 + R_3)}, \quad (12)$$

$$b_0 = 1,$$

$$b_1 = \frac{R_2R_3 + R_1(R_2 + R_3) + R_4(R_1 + R_3)}{R(0)R_1(R_2 + R_3) + R_2R_3(R_1 + R(0)) + R_4(R(0) + R_2)(R_1 + R_3)}, \quad (13)$$

Если входное сопротивление АЦП $R_4 \gg R(0)$, $R_4 \gg R_1$, $R_4 \gg R_2$, то

$$a_0 = 0,$$

$$a_1 = \frac{-E_0 \cdot R_3}{(R(0) + R_2)(R_1 + R_3)}, \quad (14)$$

$$b_0 = 1,$$

$$b_1 = \frac{1}{R(0) + R_2}. \quad (15)$$

Как и ранее, управление экспериментом и вычисления выполняются программой **LAB4_1.EXE**, которая записывает значения $\bar{U}_i, S_i, \Delta R_i$ соответственно в файлы **Y_LAB_4.DAT**, **Z_LAB4.DAT**, **X_LAB_4.DAT**, предъявляет оператору графики функций и передает управление программе **LAB4_2.EXE** для аппроксимации экспериментальных данных дробно-линейной функцией (11).

В рассматриваемом случае необходимо давать следующие ответы на запросы от компьютера:

на запрос "введите минимальный и максимальный порядок числителя"

вводится : <1><пробел><1> ,

на запрос "введите минимальный и максимальный порядок знаменателя"

вводится : <1><пробел><1> .

Результаты вычислений предъявляются оператору на дисплее и запи-

ссылаются в файл **REZ_LAB2.DAT** в последовательности:

$$22 \quad \tilde{a}_0 \quad \tilde{a}_1 \quad \text{дисп}(\tilde{a}_0) \quad \text{дисп}(\tilde{a}_1) \quad 1 \quad \tilde{b}_1 \quad 0 \quad \text{дисп}(\tilde{b}_1),$$

где

2 - количество коэффициентов числителя,

2 - количество коэффициентов знаменателя,

\tilde{a}_0 - оценка коэффициента a_0 ,

\tilde{a}_1 - оценка коэффициента a_1 ,

$\text{дисп}(\tilde{a}_0)$ - дисперсия оценки коэффициента a_0 ,

$\text{дисп}(\tilde{a}_1)$ - дисперсия оценки коэффициента a_1 ,

1 - фиксированный коэффициент $b_0 = 1$,

\tilde{b}_1 - оценка коэффициента b_1 ,

0 - дисперсия оценки коэффициента b_0 ,

$\text{дисп}(\tilde{b}_1)$ - дисперсия оценки коэффициента b_1 .

В рассматриваемом случае отпадает необходимость в проверке гипотезы о соответствии вида модели статической характеристики преобразования экспериментальным данным, поскольку выбранная для аппроксимации дробно-линейная функция (11) в точности соответствует истинной теоретической зависимости (1).

При калибровке преобразователя методом “по образцовому прибору” статическая характеристика преобразования отыскивается в виде $\Delta R = f(U_{\text{диаг}})$. Все зависимости остаются также дробно-линейными, однако значения коэффициентов изменяются. Если статическую характеристику преобразователя $\Delta R = f(U)$ записать в дробно-линейном виде

$$f(U) = \frac{c_0 + c_1 \cdot U}{d_0 + d_1 \cdot U}, \quad (16)$$

то сопоставляя (16) с формулой (2), увидим, что выражения для коэффициентов через электрические параметры будут иными :

$$c_0 = 0,$$

$$c_1 = -\frac{1}{E_0 R_3 R_4} [R(0)R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3 (R_1 + R_0) + R_4 (R(0) + R_2)(R_1 + R_3)], \quad (17)$$

$$d_0 = 1,$$

$$d_1 = \frac{1}{E_0 R_3 R_4} [R_2 R_3 + R_1 (R_2 + R_3) + R_4 (R_1 + R_3)]. \quad (18)$$

В тех случаях, когда входное сопротивление R_4 велико по сравнению с сопротивлениями моста, эти выражения упрощаются очевидным образом:

$$c_1 = - \frac{(R(0) + R_2)(R_1 + R_3)}{E_0 R_3}, \quad (19)$$

$$d_1 = \frac{R_1 + R_3}{E_0 R_3}. \quad (20)$$

Коэффициенты c_1 и d_1 вычисляются по результатам экспериментов в программе **LAB4_2.EXE**, если в начальном диалоге был выбран метод калибровки “по образцовому прибору”.

Содержимое файлов, в которые записываются промежуточные результаты (файлы **X_LAB_4.DAT**, **Y_LAB_4.DAT**, **Z_LAB_4.DAT**), изменится в соответствии с переменной мест зависимой и независимой переменных. Конкретно, в файле **X_LAB_4.DAT** вместо ΔR_i будут размещены значения U_i , в файле **Y_LAB_4.DAT** вместо \bar{U}_i – значения $\Delta \bar{R}_i$. Файл **Z_LAB_4.DAT** будет содержать оценки S_i среднеквадратических отклонений значений ΔR_{ij} в точках U_i .

Что касается файла окончательных результатов **REZ_LAB4.DAT**, то он будет содержать следующие значения:

$$22 \quad \tilde{c}_0 \quad \tilde{c}_1 \quad \text{дисп}(\tilde{c}_0) \quad \text{дисп}(\tilde{c}_1) \quad 1 \quad \tilde{d}_1 \quad 0 \quad \text{дисп}(\tilde{d}_1),$$

где

- 2 - количество коэффициентов числителя,
- 2 - количество коэффициентов знаменателя,
- \tilde{c}_0 - оценка коэффициента c_0 ,
- \tilde{c}_1 - оценка коэффициента c_1 ,
- $\text{дисп}(\tilde{c}_0)$ - дисперсия оценки коэффициента c_0 ,
- $\text{дисп}(\tilde{c}_1)$ - дисперсия оценки коэффициента c_1 ,
- 1 - фиксированный коэффициент $d_0 = 1$,
- \tilde{d}_1 - оценка коэффициента d_1 ,
- 0 - дисперсия оценки коэффициента d_0 ,

дисп (\tilde{d}_1) - дисперсия оценки коэффициента d_1 .

Последующие вычисления характеристик погрешности макета измерительного преобразователя не поддерживаются компьютерными программами и выполняются студентами самостоятельно при оформлении отчета в соответствии с методами и формулами, представленными в разд. 3.5.6 части 1 [1], и в следующем разд. 6.3.5.

6.3.5. Определение характеристик погрешности преобразователя. Нелинейная модель. Дробно-линейная аппроксимация

Процедуры, описанные в настоящем разделе, не поддерживаны программами вычислений и выполняются студентами самостоятельно при оформлении отчета. Значения, необходимые для выполнения данного раздела, извлекаются из файлов **Y_LAB_4.DAT**, **Z_LAB4.DAT**, **X_LAB_4.DAT**, **REZ_LAB4.DAT**.

В рассматриваемом случае двучленная формула не может быть использована из-за нелинейности статической характеристики преобразования. По этой причине здесь ограничиваются определением характеристики погрешности, считая ее аддитивной во всем диапазоне изменения измеряемой величины. В качестве характеристики аддитивной погрешности используется наибольший по модулю толерантный предел из всех толерантных пределов, которые определены для отклонений значений выходной (или входной) величины от той характеристики преобразования, которая будет получена в результате калибровки.

После того, как получены оценки коэффициентов аппроксимирующей дробно-линейной функции (11) или (16), вычисляются массивы значений систематических погрешностей:

- при калибровке “по мере”

$$\bar{\Delta}_i = \bar{U}_i - \frac{\tilde{a}_1 \cdot \Delta R_i}{1 + \tilde{b}_1 \cdot \Delta R_i},$$

- при калибровке “по образцовому прибору”

$$\bar{\Delta}_i = \bar{\Delta R}_i - \frac{\tilde{c}_1 \cdot U_i}{1 + \tilde{d}_1 \cdot U_i}.$$

7. Требования по выполнению работы и составлению отчета о лабораторной работе

Задания преподавателя и результаты, получаемые в ходе выполнения работы, должны фиксироваться в черновом протоколе с применением таблиц, форма которых установлена в разд. 5.2 – 5.4 настоящих методических указаний. В этом черновом протоколе должен быть приведен перечень использованных приборов в соответствии с требованиями, приведенными в Приложении 2 части 1 Лабораторного практикума [1].

При успешном завершении работы преподаватель подписывает черновой протокол выполненных экспериментов, который должен быть приложен к окончательному отчету.

Общие требования к содержанию и оформлению отчета о работе приводятся ниже на стр. 50, а также в приложениях 1 и 2 к части 1 лабораторного практикума [1].

Список литературы, рекомендуемой для подготовки к работе № 4

1. Измерительная информационная техника и технологии / Лабораторный практикум, часть 1 “Используемые приборы, сведения из теоретической метрологии, статистическая обработка результатов измерений” // Под ред. Г.Н.Солопченко. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. – 91 С.

2. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин.-Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 С.

3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1997. – 479 С.

4. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ, тт. 1, 2. – М.: Финансы и статистика, 1987.

РАБОТА N 5

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

1. Цель работы

Овладение практическими навыками измерения параметров электрических цепей с помощью мостов переменного тока и электронных цифровых измерительных приборов.

2. Объект исследования

Объектами исследования в работе являются две модификации мостов переменного тока: для измерения электрических параметров реальных конденсаторов и катушек индуктивности.

3. Программа работы

3.1. Измерение емкости и тангенса угла потерь конденсатора.

3.1.1. Измерение параметров конденсатора с помощью моста переменного тока.

3.1.2. Определение характеристик погрешности измерений по п. 3.1.1.

3.1.3. Измерение параметров конденсатора с помощью цифрового измерителя **LCR** типа **AM-3002**.

3.1.4. Определение характеристик погрешности измерений по п.3.1.3.

3.2. Измерение индуктивности и активного сопротивления катушки индуктивности

3.2.1. Измерение параметров катушки индуктивности с помощью моста переменного тока.

3.2.2. Определение характеристик погрешности измерений по п. 3.2.1.

3.2.3. Измерение параметров катушки индуктивности с помощью цифрового измерителя **AM-3002**.

3.2.4. Определение характеристик погрешности измерений по п.3.2.3.

Примечания. Возможны два варианта выполнения измерений по п.п. 3.1, 3.2.

а) Измерения выполняются при пяти различных значениях сопротивления R_2 (рис. 5.1), но при одном значении частоты напряжения питания моста, заданного преподавателем.

б) Измерения выполняются при пяти различных значениях частоты напряжения питания моста, но при одном значении сопротивления R_2 (рис. 5.1), заданного преподавателем.

4. Используемые приборы и оборудование

В лабораторной работе используются :

- генератор питания моста **ГЗ-33**,
- образцовый конденсатор C_N , обладающий малыми потерями, его емкость указана на крышке бокса, в котором он находится, погрешность воспроизведения емкости не превышает 1%,
- магазины сопротивления типа **РЗЗ** и **КМС-6**,
- электронно - лучевой осциллограф **ОСУ-10А**,
- измеритель **LCR** универсальный цифровой типа **AM-3002**.

4.1. Магазин сопротивлений

Для регулирования и определения сопротивлений плеч моста в режиме равновесия, в работе используются магазины сопротивлений, характеристики которых представлены в таблице 4.1.

Характеристики магазинов сопротивления

Тип	Число декад	Пределы воспроизведения R Ом	Дискретность воспроизведения Ом	Класс точности γ %	Допускаемая мощность на декаду Вт
Р 33	6	0 - 100000	0.1	0.2	0.5
КМС 6	6	0 - 100000	0.1	0.2	0.5
МСП 60М	6	0 - 10000	0.01	0.02	0.5
МСП 63	7	0 - 100000	0.01	0.05	0.5

4.2. Измеритель LCR универсальный цифровой типа АМ-3002

Прибор выполняет измерения сопротивления, индуктивности, емкости, тангенса угла активных потерь емкости на частотах 120 Гц и 1 кГц в последовательном и параллельном режимах соединения элементов схем замещения. Передняя панель прибора представлена на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Передняя панель цифрового LCR - метра.

Для выбора двухпроводного или четырехпроводного режимов измерения сопротивления служит кнопка **2W/4W**. При четырехпроводном соединении сопротивление подключается к разъемам **Π** (потенциальные) и **T** (токовые). Цвет разъемов присоединения измеряемого резистора должен соответствовать цвету соединительных проводов.

При двухпроводном соединении измеряемое сопротивление подключается к разъемам **Π**. Для измерения **L** или **C** соединительные провода присоединяются к разъемам **Π**. Кнопка **D/Q** служит для индикации на дисплее тангенса угла потерь (**D**) или добротности (**Q**).

Кнопка **L/C/R** служит для выбора измеряемой величины. С помощью кнопки **1к/120** переключается частота тока, при котором выполняются измерения.

Кнопка **AUTO/RANGE** позволяет переходить от ручного выбора предела измерения к автоматическому. По умолчанию работает автоматический выбор предела.

Кнопка **TOL** позволяет выполнять допусковые измерения.

Для измерения индуктивности в соответствии с параллельной схемой замещения нужно нажать кнопку **ДН**, а затем нажать и удерживать кнопку **D/Q** в течение одной секунды. Аналогично для измерения емкости в соответствии с последовательной схемой замещения нужно нажать кнопку **ДН**, а затем нажать и удерживать кнопку **D/Q** в течение одной секунды. На дисплее прибора появятся соответствующие надписи **PRL** или **Ser**. Для выхода из режима нужно нажать кнопку **ДН**.

Для калибровки в соответствии с сообщением на дисплее **OPn** или **Srt** нужно либо разомкнуть либо замкнуть соединительные провода и нажать и удерживать кнопку **REL/CAL** в течение одной секунды.

Характеристики погрешности прибора при выполнении измерений на частоте 1 кГц приведены в табл. 4.2 – 4.4. В этих таблицах обозначено: **емр** – цена единицы младшего разряда.

Таблица 4.2.

Характеристики погрешности измерения
сопротивления постоянному току

Диапазон	Инструментальная погрешность	Диапазон	Инструментальная погрешность
1 МОм	0,3 % + 3 емр	1 кОм	0,3 % + 2 емр
100 кОм	0,3 % + 2 емр	100 Ом	0,5 % + 3 емр
10 кОм	0,3 % + 2 емр	10 Ом	0,6 % + 5 емр

Таблица 4.3.

Характеристики погрешности измерения емкости

Диапазон	Инструментальная погрешность		Диапазон	Инструментальная погрешность	
	Емкости	Тангенса δ		Емкости	Тангенса δ
100 мкФ	0,6 % + 5 епр	1,2 % + 100/Сх + 5 епр	100 нФ	0,4 % + 3 епр	0,4% + 100/Сх + 5 епр
10 мкФ	0,4 % + 3 епр	0,4% + 100/Сх + 5 епр	10 нФ	0,4 % + 5 епр	0,4% + 100/Сх + 5 епр
1 мкФ	0,4 % + 3 епр	0,4% + 100/Сх + 5 епр	1 нФ	0,6 % + 5 епр	1,0% + 100/Сх + 5 епр

Примечание. Сх – целое число, состоящее из всех знаков результата измерения. Например, если результат С = 88,65, то Сх = 8865.

Таблица 4.4.

Характеристики погрешности измерения индуктивности

Диапазон	Инструментальная погрешность		Диапазон	Инструментальная погрешность	
	L	Добротность		L	Добротность
100 Гн	0,3% + +(Lx/10000)% + 5 епр	1,0 % + 100/Lx + 5 епр	100 мГн	0,3% + +(Lx/10000)% + 5 епр	0,8% + 100/Lx + 5 епр
10 Гн	0,3% + +(Lx/10000)% + 5 епр	0,8% + 100/Lx + 5 епр	10 мГн	0,5% + +(Lx/10000)% + 5 епр	2,5% + 100/Lx + 5 епр
1 Гн	0,3% + +(Lx/10000)% + 5 епр	0,8% + 100/Lx + 5 епр	1 мГн	1,0% + +(Lx/10000)% + 5 епр	5,0% + 100/Lx + 5 епр

Примечание. Lx – целое число, состоящее из всех знаков результата измерения. Например, если результат L = 88,65, то Lx = 8865.

5. Методические указания по выполнению лабораторной работы

5.1. Выполнение п. 3.1.1 программы работы

В соответствии с п.3.1.1 программы работы следует собрать мостовую цепь, изображенную на рис. 5.1. В качестве сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 используются магазины сопротивлений. Питание цепи моста осуществляется от генератора синусоидальных сигналов, например, ГЗ-33. В качестве указателя равновесия используется электронно-лучевой осциллограф ОСУ-10А, на вход 'Y' которого подается сигнал неравновесия моста, а на другой вход 'X' через разделительный трансформатор - выходное напряжение генератора (напряжение питания моста). При неравновесии моста на экране осциллографа наблюдается наклонный эллипс, который при достижении равновесия должен вырождаться в горизонтальную прямую линию. Равновесие моста, т.е. выполнение условий (4) п. 6.2.1 может быть достигнуто изменением значений сопротивлений R_1 и R_3 (при этом для удобства вычислений заранее следует установить значение сопротивления R_2 кратным десяти). Уравновешивание следует начинать, установив малую чувствительность осциллографа (например, 1/100), таким образом, чтобы фигура на экране осциллографа не выходила за пределы экрана. Регулируя сопротивление R_3 , добиваются уменьшения высоты фигуры на экране до минимально возможной.

Если высота фигуры уменьшится до 1/10 высоты экрана, следует увеличить чувствительность осциллографа на одну ступень. После этого переходят к регулировке с помощью сопротивления R_1 и добиваются дальнейшего уменьшения высоты фигуры. **Попеременным** регулированием R_1 и R_3 добиваются полного уравновешивания моста. Процесс уравновешивания можно считать законченным, когда любые даль-

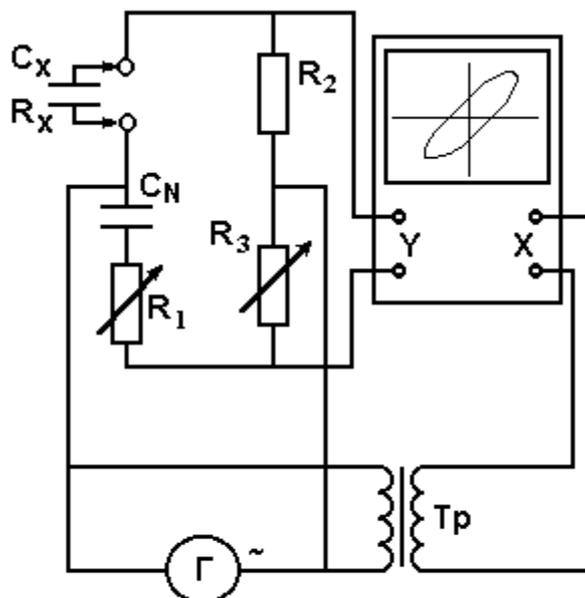


Рис. 5.1. Мост для измерения емкости

нейшие изменения регулируемых сопротивлений приводят лишь к увеличению напряжения в диагонали моста. Этот процесс повторяется при фиксированной заданной частоте и при каждом заданном значении R_2 (при выполнении работы в соответствии с примечанием а)) или при фиксированном заданном значении сопротивления R_2 и при каждом заданном значении частоты (при выполнении работы в соответствии с примечанием б)). Значения сопротивлений, при которых достигается равновесие моста, и значения искомых параметров, вычисленные по формулам (3), (4) разд. 6.2.1, заносятся в таблицу по форме таблицы 5.1

Если работа выполняется в соответствии с примечанием б) к программе, то в столбце 1 таблицы записываются значения частоты, а в столбце 2 должны быть записаны предельные значения погрешностей воспроизведения частоты, но ввиду пренебрежимой малости влияния погрешности установки частоты на погрешность результатов этот столбец не заполняется. Столбцы 9, 11, 13 заполняются при выполнении п. 3.1.2 программы настоящей работы.

В этой таблице $tg\delta = \omega R_x C_x$, где $\omega = 2\pi f$.

Таблица 5.1

$f = \dots\dots\dots$ Гц $\Delta f = \dots\dots\dots$ Гц - если работа выполняется в соответствии с примечанием а) к программе работ

$R_2 = \dots\dots$ Ом, $\Delta R_2 = \dots\dots$ Ом- если работа выполняется в соответствии с примечанием б) к программе работ

$C_N = \dots\dots\dots$ мкФ

R_2	ΔR_2	R_1	ΔR_1	R_3	ΔR_3	ΔC_N	C_x	ΔC_x	R_x	ΔR_x	$tg\delta$	$\Delta tg\delta$
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	Ом		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

5.2. Выполнение п. 3.1.2. программы работы

а) Если работа выполняется в соответствии с примечанием а) к программе работ.

Для каждого из результатов измерений параметров C_x , R_x и вычислений $\operatorname{tg}\delta$, полученных при каждом заданном значении сопротивления R_2 вычисляются характеристики относительных погрешностей измерения этих параметров по формулам (7), (8), (10). Затем вычисляются характеристики абсолютных погрешностей, которые заносятся в столбцы 9, 11, 13 таблицы разд.5.1. Вычисляются границы интервалов, содержащих истинные значения искомых параметров в виде :

$$(C_x - \Delta C_x, C_x + \Delta C_x), (R_x - \Delta R_x, R_x + \Delta R_x), (\operatorname{tg}\delta - \Delta \operatorname{tg}\delta, \operatorname{tg}\delta + \Delta \operatorname{tg}\delta)$$

Все эти границы наносятся на графики, примеры которых приведены на рис. 5.2. Графики такого вида строятся для каждого параметра отдельно.

б) Если работа выполняется в соответствии с примечанием б) к программе работ.

Указанные выше действия выполняются для каждого из заданных значений частоты f . В таблице вида таблицы 5.1 вместо значений R_2 и ΔR_2 заносятся значения f и Δf соответственно. На графиках вида графиков рис. 5.2 делаются аналогичные замены

5.3. Выполнение п. 3.1.3 программы работы

Перед работой с LCR метром AM-3002 следует предварительно ознакомиться с правилами пользования прибором, приведенными здесь в разд.

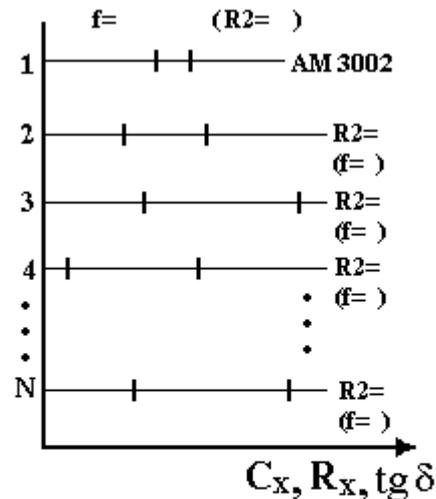


Рис. 5.2. Пример графического представления интервалов неопределенности значений измеряемых параметров

4.2. Измерения выполняются в следующем порядке.

А). Включить питание прибора и дать прибору прогреться.

В). Присоединить к прибору конденсатор двумя проводами к разъемам **П** так, чтобы цвет провода и цвет разъема совпадали.

С). Нажатием кнопки **1к/120** установить частоту выходного напряжения равной 1 кГц. Это значение должно появиться на дисплее прибора справа от места индикации результата.

Д) Нажимая кнопку **L/C/R** добиться индикации на дисплее прибора над местом индикации обозначения измеряемой величины **С**.

Е) На дисплее появится результат измерения. При нажатии кнопки **D/Q** на дисплее над индикацией результата измерения емкости поочередно высвечивается значение тангенса угла потерь и добротности. Следует выбрать индикацию тангенса угла потерь.

Ф) При измерении емкости следует применить последовательную и параллельную схемы замещения с помощью кнопок **DH** и **D/Q** следующим образом: нажать на кнопку **DH**, затем на кнопку **D/H** и удерживать ее не менее 1 секунды. Повторное нажатие на кнопку **DH** приводит к выходу из режима. На дисплее высвечивается сообщение **SEr** об использовании при измерении последовательной схемы замещения и сообщение **PRL** – об использовании параллельной схемы.

Результаты всех выполненных измерений записать в протокол и представить в отчете.

Результаты расчетов и формулы привести в отчете о работе.

5.4. Выполнение п. 3.1.4. программы работы

Учитывая, что в помещении лаборатории климатические условия близки к нормальным, расчет характеристик погрешности результатов прямых измерений параметров **С**, **tgδ** параллельной и последовательной схемы замещения конденсатора выполняется на основе характеристик основной погрешности прибора **AM-3002**, приведенных в таблице 4.3 разд. 4.2. Таким образом будут получены характеристики относительных погрешностей обоих параметров конденсатора. По этим значениям вычисляются характеристики абсолютных погрешностей ΔC_x и $\Delta(\text{tg}\Delta)$. Характеристики абсолютной погрешности ΔC_x , ΔR_x , $\Delta(\text{tg}\delta)$ позволяют построить

границы интервалов, содержащих истинные значения параметров, как это указано в разд. 5.2. Графическое представление полученных границ в отчете должно соответствовать указаниям разд. 5.2 и примерам, приведенным на рис. 5.2.

5.5. Выполнение п. 3.2.1 программы работы

Для измерения параметров катушки индуктивности необходимо собрать мост по схеме рис. 5.3. Процесс уравновешивания моста описан выше в разд. 5.1. Расчет искомым параметров катушки индуктивности по значениям сопротивлений, при которых мост уравновешен, выполняется по формулам (5), (6) разд. 6.2.2. Процесс уравновешивания моста повторяется при фиксированной заданной частоте и при каждом заданном значении R_2 (при выполнении работы в соответствии с примечанием а))

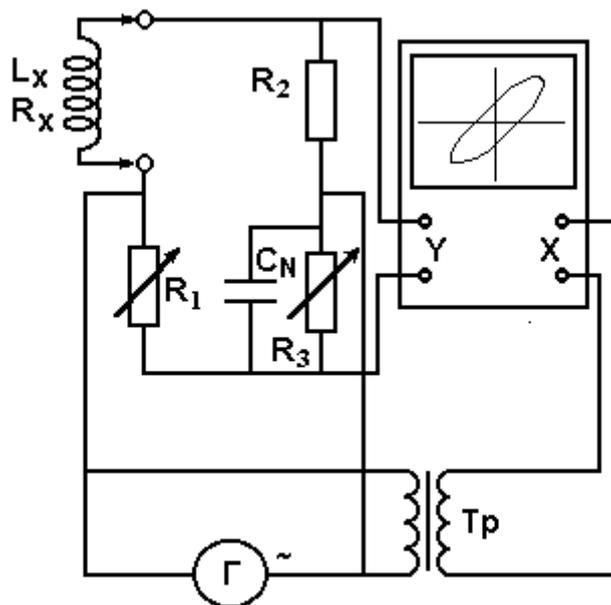


Рис. 5.3. Мост для измерения индуктивности

Таблица 5.2

$f = \dots\dots\dots$ Гц $\Delta f = \dots\dots\dots$ Гц - если работа выполняется в соответствии с примечанием а) к программе работ

$R_2 = \dots\dots$ Ом, $\Delta R_2 = \dots\dots\dots$ Ом - если работа выполняется в соответствии с примечанием б) к программе работ

$C_N = \dots\dots\dots$ мкФ

R_2	ΔR_2	R_1	ΔR_1	R_3	ΔR_3	ΔC_N	L_x	ΔL_x	R_x	ΔR_x	Q	ΔQ
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мГн	мГн	Ом	Ом		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

или при фиксированном заданном значении сопротивления R_2 и при каждом значении частоты (при выполнении работы в соответствии с примечанием б)). Значения сопротивлений, при которых достигается равновесие моста, и вычисленные значения искомых параметров заносятся в таблицу по форме таблицы 5.2. Если работа выполняется в соответствии с примечанием б) к программе, то в столбце 1 таблицы записываются значения частоты, а в столбце 2 должны быть записаны предельные значения погрешностей воспроизведения частоты, но ввиду пренебрежимой малости влияния погрешности установки частоты на погрешность результатов этот столбец не заполняется. В столбце 12 записывается значение добротности, вычисляемое по формуле $Q = 2\pi f / R_x$. Столбцы 9, 11, 13 заполняются при выполнении п. 3.2.2 программы настоящей работы.

5.6. Выполнение п. 3.2.2 программы работы

а) Если работа выполняется в соответствии с примечанием а) к программе работ.

Для каждого из результатов измерений параметров L_x , R_x , полученных при каждом заданном значении сопротивления R_2 , вычисляются характеристики относительных погрешностей измерения этих параметров по формулам (9), (11). Затем вычисляются характеристики абсолютных погрешностей, которые заносятся в столбцы 9, 11, 13 таблицы 5.2. Вычисляются границы интервалов, содержащих истинные значения искомых параметров в виде :

$$(L_x - \Delta L_x, L_x + \Delta L_x), (R_x - \Delta R_x, R_x + \Delta R_x), (Q - \Delta Q, Q + \Delta Q)$$

все эти границы наносятся на графики, примеры которых приведены на рис. 5.2 – для каждого параметра отдельный график.

б) Если работа выполняется в соответствии с примечанием б) к программе работ.

Указанные выше действия выполняются для каждого из заданных значений частоты f . В таблице вида таблицы 5.2 вместо значений R_2 и ΔR_2 заносятся значения f и Δf соответственно. На графиках вида графиков рис. 5.2 делаются аналогичные замены.

5.7. Выполнение п. 3.2.3 программы работы

Перед работой с цифровым измерителем **AM-3002** следует предварительно ознакомиться с правилами пользования прибором (см. разд. 4.2). Измерения выполняются в следующем порядке.

А). Включить питание прибора и дать прибору прогреться.

В). Присоединить к прибору катушку индуктивности двумя проводами к разъемам **П** так, чтобы цвет провода и цвет разъема совпадали.

С). Нажатием кнопки **1к/120** установить частоту выходного напряжения равной 1 кГц. Это значение должно появиться на дисплее прибора справа от места индикации результата.

Д) Нажимая кнопку **L/C/R** добиться индикации на дисплее прибора над местом индикации результата обозначения измеряемой величины **L**.

Е) На дисплее появится результат измерения. При нажатии кнопки **D/Q** на дисплее над индикацией результата измерения емкости поочередно высвечивается значение тангенса угла потерь или добротности. Следует выбрать индикацию добротности.

Ф) При измерении индуктивности следует применить только последовательную схему замещения с помощью кнопок **DH** и **D/Q** следующим образом: нажать на кнопку **DH**, затем на кнопку **D/H** и удерживать ее не менее 1 секунды. Повторное нажатие на кнопку **DH** приводит к выходу из режима. На дисплее высвечивается сообщение **SEr** об использовании при измерении последовательной схемы замещения и сообщение **PRL** – об использовании параллельной схемы.

Результаты всех выполненных измерений записать в протокол и представить в отчете.

Результаты расчетов и формулы привести в отчете о работе.

5.8. Выполнение п. 3.2.4 программы работы

Учитывая, что в помещении лаборатории климатические условия близки к нормальным, расчет характеристик погрешности результатов прямых измерений параметров **L**, **R** последовательной схемы замещения катушки индуктивности выполняется на основе характеристик основной погрешности прибора **AM-3002**, приведенных в таблице 4.4 разд. 4.2. Таким образом будут получены характеристики относительных погрешно-

стей обоих параметров катушки. По этим значениям вычисляются характеристики абсолютных погрешностей ΔL_x и ΔR_x . Характеристики абсолютной погрешности позволяют построить границы интервалов, содержащих истинные значения параметров, как это указано в разд. 5.2. Графическое представление полученных границ в отчете должно соответствовать указаниям разд. 5.2 и примерам, приведенным на рис. 5.2.

6. Теоретическая часть

6.1. Схемы замещения объектов измерения

Реактивные компоненты электрических цепей (конденсаторы и катушки индуктивности) проявляют себя, как комплексные сопротивления, обладающие кроме реактивной составляющей активным сопротивлением, которое характеризует потери активной энергии и называется сопротивлением потерь. Для учета вклада этого сопротивления в общий импеданс, которым обладают реактивные компоненты, их представляют в виде схем замещения (см. рис 6.1).

Если конденсатор обладает малыми потерями, его схему замещения на частоте ω удобно представить в виде последовательного соединения идеального конденсатора и сопротивления потерь, а импеданс такого соединения выражается формулой

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C},$$

где ω – круговая частота, $\omega = 2\pi f$.

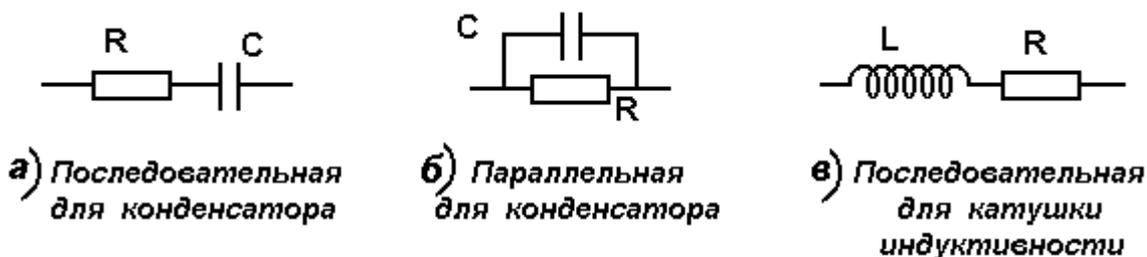


Рис. 6.1. Схемы замещения

Конденсатор со значительными потерями описывается параллельной схемой замещения, импеданс Z и комплексная проводимость Y которой выражается формулами :

$$Z = \frac{R}{1 + j\omega RC}, \quad Y = G + j\omega C,$$

где $G = 1/R$.

Для катушек индуктивности принята последовательная схема замещения с импедансом :

$$Z = R + j\omega L .$$

Активные потери в конденсаторе и катушке индуктивности, приводят к тому, что фазовый сдвиг между напряжением и током в реальном реактивном компоненте электрической цепи отличается от $\pi/2$ на угол δ . Общепринятой характеристикой потерь конденсаторов является тангенс этого угла : $\operatorname{tg} \delta$ Для катушек индуктивности характеристикой потерь является добротность Q , но в ряде случаев и для них используется $\operatorname{tg} \delta$.

Для рассмотренных схем замещения $\operatorname{tg} \delta$ выражается формулами (в порядке их представления) :

- для схемы рис. 6.1 а) $\operatorname{tg} \delta = \omega RC = \omega C/G$;
- для схемы рис. 6.1 б) $\operatorname{tg} \delta = 1/\omega RC = G/\omega C$;
- для схемы рис. 6.1 в) $\operatorname{tg} \delta = R/\omega L = 1/\omega GL$.

В этих формулах G – проводимость, $G = 1/R$.

Активные потери катушек индуктивности чаще всего характеризуются добротностью Q , обратной $\operatorname{tg} \delta$:

$$Q = 1/\operatorname{tg} \delta = \omega L / R .$$

6.2. Мосты переменного тока

Одним из наиболее эффективных средств измерения параметров электрических цепей являются мосты постоянного и переменного тока, которые широко применяются и в качестве образцовых средств при проверке мер электрических величин. Мосты переменного тока позволяют производить измерения емкости, индуктивности и связанных с ними параметров: тангенса угла потерь конденсаторов, добротности катушек индуктивности, а также активного сопротивления с погрешностью от единиц до тысячных долей процента. Конкретное значение погрешности определяется погрешностью элементов, из которых составлен мост, а также чувствительностью индикатора равновесия моста. Принципиальная схема моста переменного тока может быть представлена в виде эквива-

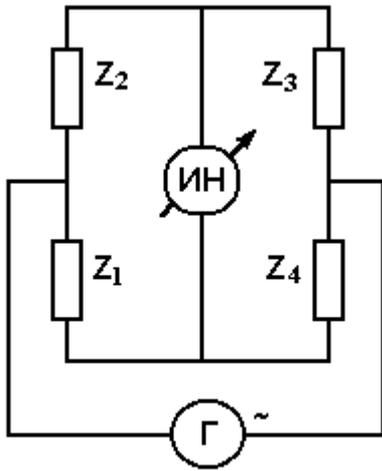


Рис. 6.2. Мост переменного тока

лентной схемы, состоящей из четырех комплексных сопротивлений $Z_1 - Z_4$ (рис. 6.2).

Источником питания моста переменного тока является генератор синусоидального напряжения Γ . Индикатор равновесия моста ИН включен в измерительную диагональ моста. Как известно, ток и напряжение в измерительной диагонали моста равны нулю, если выполняется условие равновесия :

$$Z_1 \times Z_3 = Z_2 \times Z_4 . \quad (1)$$

Если в одно из плеч моста включено комплексное сопротивление, значение которого необходимо измерить, например Z_1 , то, изменяя сопротивления других плеч, можно добиться отсутствия тока или напряжения в измерительной диагонали и, зная сопротивления плеч $Z_2 - Z_4$, рассчитать значение неизвестного сопротивления. Комплексному условию равновесия моста (1) соответствуют два вещественных равенства, которые получают покомпонентным приравниванием действительных и мнимых частей комплексных сопротивлений $Z = R + jX$:

$$\begin{aligned} R_1 \times R_3 - X_1 \times X_3 &= R_2 \times R_4 - X_2 \times X_4, \\ R_1 \times X_3 + R_3 \times X_1 &= R_2 \times X_4 + R_4 \times X_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Полагая $Z = |Z| \cdot e^{j\varphi}$, имеем

$$|Z_1| \cdot |Z_3| \cdot e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = |Z_2| \cdot |Z_4| \cdot e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)} .$$

Последнее соотношение можно выразить двумя равенствами :

$$|Z_1| \cdot |Z_3| = |Z_2| \cdot |Z_4| \quad \text{и} \quad \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 .$$

Таким образом, мостовые цепи переменного тока в отличие от мостовых цепей постоянного тока, могут быть уравновешены только при одновременном выполнении двух условий равновесия. Для этого необходима регулировка, по крайней мере, двух параметров.

В качестве индикаторов равновесия удобно использовать электронно-лучевой осциллограф, который позволяет разделить признаки неуравно-

вешенности моста по амплитуде и по фазе благодаря схеме его включения. Если фазы напряжения питания и напряжения в диагонали моста различны, то на экране осциллографа будет изображаться эллипс, а при равенстве фаз - прямая, наклон которой определяется амплитудой напряжения в диагонали моста: с уменьшением амплитуды наклон прямой уменьшается. По мере приближения к равновесию наклон большой оси эллипса и его малая ось будут уменьшаться, и при достижении равновесия эллипс вырождается в горизонтальную прямую.

Входы осциллографа разделены трансформатором, который служит для гальванического разделения моста от общей точки двух входов осциллографа. На практике мостовые цепи, собираемые из отдельных элементов, применяются крайне редко. В настоящее время значительно большее использование находят автоматические мосты для измерения сопротивлений, емкостей и индуктивностей, которые совмещаются в одном приборе и предъявляют результат измерения в цифровом виде. Примерами такого прибора могут служить универсальный цифровой **LCR** – метр **AM-3002** и отечественный прибор **E7-8**. Поскольку в этих приборах мост уравнивается автоматически, и потому индикатор равновесия отсутствует.

6.2.1. Измерение емкости

Конденсаторы, параметры которых подлежат измерению в настоящей работе, имеют малые потери, и их схема замещения - последовательная. Поэтому используется мост, изображенный на рис. 5.1. Исследуемый конденсатор представлен емкостью C_x и активным сопротивлением R_x . Условия равновесия моста определяются следующими соотношениями:

$$R_x \cdot R_3 = R_1 \cdot R_2, \quad C_x \cdot R_2 = C_N \cdot R_3,$$

откуда
$$R_x = R_1 \cdot R_2 / R_3, \quad C_x = C_N \cdot R_3 / R_2 \quad (3)$$

где R_1, R_2, R_3 - активные сопротивления, включенные в плечи моста, C_N - емкость образцового конденсатора, обладающего малыми потерями. Потери в конденсаторе принято характеризовать тангенсом угла потерь $\text{tg}\delta$, который при последовательной схеме замещения равен:

$$\text{tg}\delta = \omega C_x R_x = \omega C_x / G_x, \quad (4)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота напряжения питания моста, G_x - проводимость, обратная эквивалентному сопротивлению потерь R_x .

Те же параметры конденсатора в лабораторной работе измеряются с помощью электронного цифрового прибора: **АМ-3002**. Прибор **АМ-3002** может выполнять измерения емкости в двух режимах: режиме параллельной и последовательной схем замещения. В этой ситуации полезно сопоставить результаты измерения емкости и тангенса угла потерь по обеим схемам замещения, полученные с помощью прибора, с результатом, полученным с помощью моста, и дать свои комментарии.

6.2.2. Измерение индуктивности

Схема замещения – последовательная. Используется мост, схема которого приведена на рис. 5.3.

Условия равновесия моста определяются соотношениями:

$$R_x \cdot R_3 = R_1 \cdot R_2, \quad L_x / C_N = R_1 \cdot R_2,$$

откуда получаем:

$$R_x = R_1 \cdot R_2 / R_3, \quad L_x = R_1 \cdot R_2 \cdot C_N. \quad (5)$$

В этом случае добротность катушки индуктивности вычисляется, как

$$Q = 2\pi f L_x / R_x. \quad (6)$$

Полученное значение добротности рекомендуется сопоставить с результатом измерения добротности этой же катушки, полученном с помощью прибора **АМ-3002**.

6.3. Погрешности измерений

6.3.1. Погрешность измерений, выполняемых с помощью моста по схемам рис. 5.1, 5.3.

Погрешность результатов измерения обусловлена следующими причинами. Во-первых, значения регулировочных сопротивлений **R1–R3** устанавливаются дискретно, а сами сопротивления нестабильны, в связи с чем условия равновесия моста выполняются приближенно. Во-вторых, емкость образцового конденсатора C_N известна с относительной погрешностью, не превышающей 1%, и, наконец, третьей причиной является неточная фиксация равновесия по осциллографу вследствие ограниченной его

чувствительности и наводок, которые приводят к расширению линии на экране. К сожалению, используемые средства измерений имеют характеристики погрешности, нормированные в виде предельных значений без разделения на систематические и случайные составляющие. Поэтому нам придется вычислять характеристики погрешности результатов измерений в виде предельно допускаемых, гарантированных значений. Гарантированные интервалы для относительной погрешности измерений электрических параметров конденсатора и катушки индуктивности определяются по формулам (см. также разд. 2.7 части 1 Лабораторного практикума [1]):

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta C_N}{C_N} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta L_x}{L_x} = \frac{\Delta C_N}{C_N} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (9)$$

где ΔC_N , ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 - предельные значения абсолютных погрешностей емкости C_N и активных сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 . Предельное значение относительной погрешности образцового конденсатора приведено в разд. 3 и не превышает 1%. Предельные значения абсолютных погрешностей ΔR_1 и ΔR_2 определяются на основании сведений об абсолютной погрешности применяемых магазинов сопротивления, которые приведены в разд. 4.1 настоящего руководства и нанесены на лицевых панелях этих магазинов.

Для того, чтобы учесть погрешности, вызванные ограниченной чувствительностью индикатора (в нашем случае электронно - лучевого осциллографа), необходимо выполнить специальные процедуры, которые заключаются в следующем. При достижении равновесия моста изменяют сопротивление R_1 в таких пределах, внутри которых эти изменения сопротивления не приводят к заметным изменениям прямой линии на экране осциллографа при наибольшей его чувствительности. Эти пределы изменения сопротивления R_1 фиксируются, а в качестве ΔR_1 в формулах (7) - (9) используется модуль полуразности этих пределов. После этого устанавливают значение сопротивления R_1 , равное полусумме этих

пределов. Затем таким же образом варьируют сопротивление R_3 и определяют значение ΔR_3 для формул (7), (8), как модуль разности пределов изменения сопротивления R_3 , при котором была незаметна реакция осциллографа. Предельное значение модуля относительной погрешности вычисления $\text{tg}\delta$ определяются по формуле, аналогичной формулам (7) - (9) (см. также разд. 2.7 части 1 Лабораторного практикума [1]):

$$\frac{\Delta(\text{tg}\delta)}{\text{tg}\delta} = \frac{\Delta C_x}{C_x} + \frac{\Delta R_x}{R_x} + \frac{\Delta\omega}{\omega}, \quad (10)$$

в которую необходимо подставить значения относительной погрешности $\Delta R_x / R_x$ и $\Delta C_x / C_x$, вычисленные по формулам (7), (8).

Точно так же рассчитывается предельное значение модуля погрешности вычисления добротности:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta L_x}{L_x} + \frac{\Delta R_x}{R_x} + \frac{\Delta\omega}{\omega}. \quad (11)$$

Предельное значение $\Delta\omega$ погрешности задания частоты определяется по метрологическим характеристикам генератора, питающего мост (см. п. 1.6 части 1 Лабораторного практикума [1]). В частности, для генератора ГЗ-33 абсолютная погрешность воспроизведения частоты составляет $(0.01f + 1)$ Гц, где f – значение частоты, установленное с помощью лимба генератора.

В соответствии с примечаниями к программе настоящей работы измерения параметров конденсатора и (или) катушки индуктивности выполняются при различных значениях сопротивления R_2 (при постоянной частоте) или при различных значениях частоты (при постоянном значении сопротивления R_2), в результате чего будет получено не менее 5 значений каждого из измеряемых параметров.

7. Требования по выполнению работы и составлению отчета о лабораторной работе

Задания преподавателя и результаты, получаемые в ходе выполнения работы, должны фиксироваться в черновом протоколе с применением таблиц, форма которых установлена в разделах. 5.1, 5.5 настоящих методических указаний. В этом черновом протоколе должен быть приведен перечень использованных приборов в соответствии с требованиями, приведенными в Приложении 2 части 1 Лабораторного практикума [1].

При успешном завершении работы преподаватель подписывает черновой протокол выполненных экспериментов, который должен быть приложен к окончательному отчету.

Общие требования к содержанию и оформлению отчета о работе приводятся ниже на стр. 50, а также в приложениях 1 и 2 к части 1 лабораторного практикума [1].

Список литературы, рекомендуемой для подготовки к работе № 5

1. Измерительная информационная техника и метрология / Лабораторный практикум, часть 1 “Используемые приборы, сведения из теоретической метрологии, статистическая обработка результатов измерений” // Под ред. Г.Н.Солопченко. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. – 91 С.

2. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин.-Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 С.

3. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов/ Б.Я.Авдеев, Е.М.Антонюк, Е.М.Душин и др.; Под ред. Е.М.Душина.- Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 С.

4. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин.-М.:Высшая школа, 1989. – 383 С.

5. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники, часть вторая Теория цепей переменного тока – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 443 С.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТОВ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Форма титульного листа и указания по составлению отчета приведены в приложениях 1 и 2 к части 1 лабораторного практикума [1].

Отчет о лабораторной работе должен содержать :

1. Перечень использованных средств измерений с указанием метрологических характеристик, на основании которых были определены погрешности результатов измерений.
2. Задания преподавателя - по всем пунктам программы.
3. Черновые протоколы измерений с экспериментальными данными, подписанные преподавателем.
4. Схемы соединений.
5. Таблицы и графики, формулы и результаты вычислений.
6. Комментарии и выводы.
7. Замечания и предложения по настоящим методическим указаниям.