

Санкт-Петербургский государственный университет

Кафедра вычислительной физики

В.В.Монахов, О.В. Огинец, С.Н.Жоголь, М.Г. Яковлева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПОМОЩЬЮ УСТРОЙСТВА СБОРА ДАННЫХ  
NI myDAQ

Учебно-методическое пособие

Санкт-Петербург

2020

ББК 32.973.26-018.2

В311я43+з973.2-018я43

Рецензенты: доктор физ.-мат. наук, профессор С.Л.Яковлев,  
канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель Р.С.Хоронжук

Печатается по решению методической комиссии физического факультета  
СПбГУ

В.В. Монахов, О.В. Огинец, С.Н. Жоголь, М.Г.Яковлева

В311я43+з973.2-018я43      Исследование вольт-амперных характеристик  
элементов электрической цепи с помощью устройства сбора данных NI  
myDAQ: Учебно-методическое пособие. – СПб: ЛЕМА, 2020. – 33 с.: ил.

Учебно-методическое пособие содержит описание лабораторной работы, проводимой в лаборатории автоматизированного практикума по физике в рамках дисциплины «Физический практикум» для студентов 2 курса бакалавриата, обучающихся на образовательных программах «Физика», «Прикладные физика и математика», «Инженерно-ориентированная физика», «Радиофизика» СПбГУ. Лабораторная работа выполняется на оборудовании Образовательного ресурсного центра по направлению «Физика» Научного парка СПбГУ (<http://researchpark.spbu.ru>). Может быть полезно для студентов других вузов, изучающих автоматизацию физического эксперимента.

УДК 681.3.068

ББК 32.973.26-018.2

© В.В. Монахов, О.В. Огинец, С.Н. Жоголь, М.Г.Яковлева, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Теоретическая часть .....	5
1.1. <i>Движение заряженных частиц в электрическом поле.</i>	
<i>Статические и динамические вольт-амперные характеристики ..</i>	<i>5</i>
1.1.1. Проводники первого и второго рода. Подвижность носителей заряда .....	5
1.1.2. Закон Ома в дифференциальной и интегральной форме. Отклонения от закона Ома. Интегральное и дифференциальное сопротивление .....	6
1.1.3. Омический и неомический контакты. Выпрямляющие контакты, р-п переход.....	8
1.1.4. Динамические вольт-амперные характеристики. Зарядные токи и токи утечки конденсатора.....	13
1.2. <i>Измерение вольт-амперных характеристик с помощью АЦП и ЦАП.....</i>	<i>15</i>
1.2.1. Цифро-аналоговые преобразователи .....	15
1.2.2. Аналого-цифровые преобразователи. Преобразователи ток–напряжение .....	16
2. Экспериментальная установка и программное обеспечение .....	19
2.1. <i>Экспериментальная установка.....</i>	<i>19</i>
2.2. <i>Схема установки для измерения динамических вольт-амперных характеристик.....</i>	<i>22</i>
2.3. <i>Программное обеспечение.....</i>	<i>24</i>
3. Контрольные вопросы.....	29
4. Задания.....	30

Задание 1.1. Дифференциальное и интегральное сопротивление резистора – синусоидальный сигнал .....	30
Задание 1.2. Дифференциальное и интегральное сопротивление резистора – пилообразный сигнал.....	31
Задание 1.3. Измерения и анализ результатов для резистора другого номинала .....	31
<i>Задание 2. Измерение ВАХ, интегрального и дифференциального сопротивления диодов. Исследование простейшего выпрямителя на одном диоде.....</i>	<i>31</i>
Задание 2.1. ВАХ диода, его дифференциальное и интегральное сопротивление .....	31
Задание 2.2. Простейший выпрямитель .....	32
<i>Задание 3. Измерение параметров стабилитронов.....</i>	<i>32</i>
<i>Задание 4. Измерение ВАХ и параметров электролитического конденсатора.....</i>	<i>32</i>
Задание 4.1 ВАХ конденсатора – синусоидальный сигнал.....	32
Задание 4.2. ВАХ конденсатора – пилообразный сигнал.....	33
Задание 4.3. ВАХ конденсатора – прямоугольный сигнал .....	33

## 1. Теоретическая часть

Цель лабораторной работы состоит в том, чтобы познакомить студентов с измерениями динамических вольт-амперных характеристик (ВАХ) различных элементов электрической цепи переменного тока с помощью виртуальных приборов, созданных в среде LabView, и подключенного к компьютеру устройства сбора данных NI MyDAQ. В практических заданиях проводятся измерения ВАХ, исследуются графики зависимости параметров элементов от напряжения на различных участках ВАХ, обработка результатов и оценка погрешностей и ограничений измерительной аппаратуры. В качестве исследуемых элементов используются резисторы, полупроводниковые диоды, стабилитроны и электролитические конденсаторы.

### 1.1. Движение заряженных частиц в электрическом поле.

#### Статические и динамические вольт-амперные характеристики

##### 1.1.1. Проводники первого и второго рода. Подвижность носителей заряда

При приложении внешнего напряжения (разности потенциалов) в веществах возникает электрический ток. В зависимости от того, движение каких электрически заряженных частиц (носителей заряда) создает электрический ток, вещества делят на проводники первого и второго рода. В проводниках первого рода носители заряда — электроны и дырки (квазичастицы, имеющие свойства, подобные свойствам электрона в твердом теле, но обладающие положительным зарядом). В проводниках второго рода кроме электронов и дырок заряд переносится ионами, поэтому протекание тока сопровождается переносом массы. Зависимость тока, протекающего через элемент электрической цепи от приложенного к этому элементу напряжения, называется вольт-амперной характеристикой. В зависимости от того, в каком режиме измеряются ВАХ, они называются статическими или динамическими.

Статические ВАХ измеряются «поточечно» при фиксированных значениях напряжения после окончания всех переходных процессов в цепи.

Для измерения динамических ВАХ напряжение изменяется по какому-либо заданному закону (линейно, синусоидально и т.д.).

Плотность квазистационарного электрического тока  $\mathbf{j}$ , протекающего через проводник, может быть выражена через концентрацию  $n$  и среднюю скорость направленного движения носителей заряда, или дрейфовую скорость  $\mathbf{v}$  носителей

$$\mathbf{j} = zqn\mathbf{v}, \quad (1)$$

где  $q$  — абсолютная величина заряда электрон,  $z$  — кратность заряда носителей (для электрона  $z=-1$ , для дырок  $z = +1$ , для ионов  $Fe^{+3}$  значение  $z = 3$ , и т.п.). Если ток переносится несколькими типами носителей, надо суммировать соответствующие вклады. Иными словами, средняя скорость дрейфа — это скорость, усредненная по всем носителям заряда.

В большинстве случаев средняя скорость дрейфа носителей прямо пропорциональна напряженности электрического поля  $E$

$$\mathbf{v} = \mu E. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности  $\mu$  называется подвижностью носителей, и имеет размерность  $[\mu] = [\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})]$ . Подвижность численно равна скорости, приобретаемой носителями в электрическом поле напряженностью 1 В/см. Характерные значения  $\mu$  для металлов лежат в области  $5\div 20 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , для полупроводников  $1\div 10^6 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

1.1.2. Закон Ома в дифференциальной и интегральной форме. Отклонения от закона Ома. Интегральное и дифференциальное сопротивление

Если подставить формулу (2) в уравнение (1), получим

$$\mathbf{j} = qz\mu nE. \quad (3)$$

То есть

$$\mathbf{j} = \sigma E, \quad (4)$$

где

$$\sigma = qz\mu n .$$

(5)

Коэффициент  $\sigma$  называется удельной проводимостью, а соотношение (4) носит название закона Ома в дифференциальной форме. Величину

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{qz\mu n} \quad (5)$$

называют удельным сопротивлением,  $[\rho] = [\text{Ом} \cdot \text{см}]$ .

Если проводник имеет длину  $L$  и поперечное сечение площадью  $S$ , то

$$E = \frac{U}{L}, \quad j = \frac{I}{S}, \quad (6)$$

где  $U$  — приложенное к проводнику напряжение, а  $I$  — протекающий через него ток,  $[U] = [\text{вольт}]$ ,  $[I] = [\text{ампер}]$ . Тогда (4) можно переписать в таком виде

$$I = \frac{U}{R}, \quad (7)$$

где  $R = \rho \frac{L}{S}$ . Величину  $R$  называют сопротивлением,  $[R] = [\text{Ом}]$ .

Соотношение (7) — это закон Ома в интегральной форме. Напомним, что он выведен для установившегося (т.е. квазистационарного) тока в проводнике.

Исходя из приведенных рассуждений, можно сделать выводы о том, что закон Ома (7) не будет выполняться в случаях, если:

- нарушается условие квазистационарности (например, при протекании переменного тока через конденсатор или индуктивность);
- в соотношении (2) подвижность носителей  $\mu$  начинает зависеть от напряженности электрического поля  $E$ ;
- наблюдается зависимость концентрации носителей  $n$  от напряженности электрического поля, то есть  $n = n(E)$ ;
- проводник неоднороден в какой-либо его части, например, при наличии выпрямляющих контактов металл-полупроводник или p-n переходов.

В случае выполнения закона Ома (7) ВАХ — прямая линия. Ее наклон дает значение  $\frac{1}{R}$ . Если закон Ома нарушается, ВАХ может иметь сложную форму. В частности, форма ВАХ может меняться со временем или в зависимости от скорости и направления изменения напряжения.

Когда ВАХ нелинейна, теряет смысл понятие сопротивления как коэффициента пропорциональности между током  $I$  и напряжением  $U$  (его называют интегральным сопротивлением). Понятием интегрального сопротивления можно пользоваться только в том случае, когда отклонение от линейности мало.

С другой стороны, для малых приращений напряжения ( $dU$ ) и тока ( $dI$ ) линейность сохраняется:

$$dU = r dI. \quad (8)$$

Коэффициент  $r$ , вообще говоря, зависит от  $U$ , и называется дифференциальным сопротивлением. В случае выполнения закона Ома (7)  $r$  не зависит от  $U$ :  $r(U) = R$ .

### 1.1.3. Омический и неомический контакты. Выпрямляющие контакты, p-n переход

Реальный элемент электрической цепи всегда подключается к остальной части электрической цепи с помощью внешних проводников (электродов). При этом внешнее приложенное напряжение распределяется между самим элементом и электродами. Электроды, как правило, делаются хорошо проводящими, и падением напряжения на них можно пренебречь. Однако в месте контакта электрода с элементом может происходить значительное падение напряжения. В том случае, когда сопротивление контакта можно считать пренебрежимо малым по сравнению с объемным сопротивлением элемента (полупроводника или металла), контакт называют омическим. Сопротивление омического контакта не зависит от величины и направления тока. Другими словами, это контакты, обладающие практически линейной



вольт-амперной характеристикой. Если же сопротивлением контакта пренебречь нельзя, контакт называется неомическим. При прохождении тока через неомический контакт ВАХ становится нелинейной.

Неомический контакт, ток через который в одном направлении резко возрастает с увеличением приложенного напряжения, а в другом остается малым, называется выпрямляющим. Хорошими выпрямляющими свойствами обладают контакты некоторых металлов с полупроводниками, полупроводников с разными типами проводимости (р-п переходами), полупроводников с разным химическим составом (так называемые гетеропереходы). Окисные пленки, покрывающие поверхность металлов, как правило, обладают полупроводниковыми свойствами, и из-за этого механический контакт металлических проводников может быть неомическим.

В области контактов практически всегда наблюдается зависимость  $n(E)$ , из-за чего нарушается закон Ома. Приборами, в которых используется р - п переход для односторонней проводимости тока, являются различные полупроводниковые диоды.

ВАХ полупроводникового диода имеют форму, приведенную на рис.1.1.

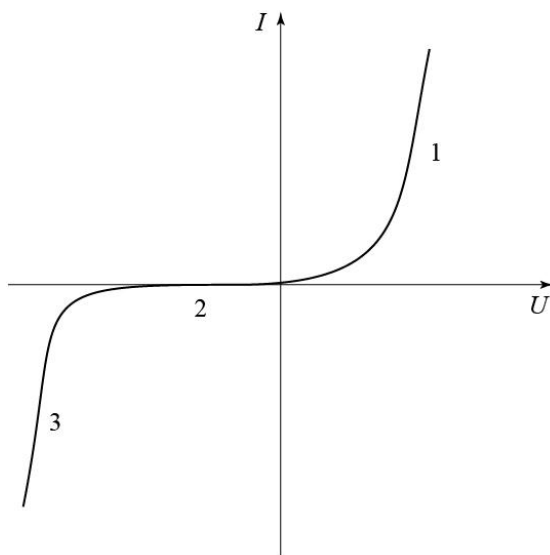


Рис.1.1 ВАХ полупроводникового диода.

ВАХ диода имеет три области. Область 1 — прямая ветвь ВАХ. В этой области сопротивление диода мало, и он хорошо пропускает ток. Область 2 — обратная ветвь ВАХ. Такое направление приложенного к диоду напряжения называют запирающим, так как в этой области сопротивление диода велико, и ток очень мал. Область 3 соответствует электрическому пробоя, в результате которого ток резко возрастает при увеличении приложенного напряжения.

Прямую и обратную ветвь ВАХ обычно показывают в разных масштабах, поскольку амплитуда запирающего диод напряжения  $U_{пр}$  не превышает 1–1.5 В, в то время как амплитуда обратного напряжения  $U_{обр}$  может составлять десятки вольт.

При больших значениях напряженности поля  $E$  возникает пробой полупроводников и диэлектриков, сопровождающийся резким увеличением концентрации носителей. Пробой бывает двух типов: электрический (обратимый) и тепловой (необратимый). В свою очередь для электрического пробоя различают два его вида: лавинный и туннельный. Напряжение лавинного пробоя составляет десятки и сотни вольт. Туннельный пробой объясняется явлением туннельного эффекта, который заключается в переходе носителей заряда через потенциальный барьер. Напряжение туннельного пробоя не превышает единиц вольт.

На явлении лавинного пробоя основана работа некоторых полупроводниковых приборов, например, стабилитронов, которые применяются для стабилизации напряжения. В стабилитронах используется обратная ветвь ВАХ диода (область 3 на рис.1.1), где напряжение почти постоянно, а ток стабилитрона меняется в широком диапазоне.

Для выпрямления электрического тока используют области 1 и 2 ВАХ. На рис.1.2 приведена простейшая схема выпрямителя на одном диоде.

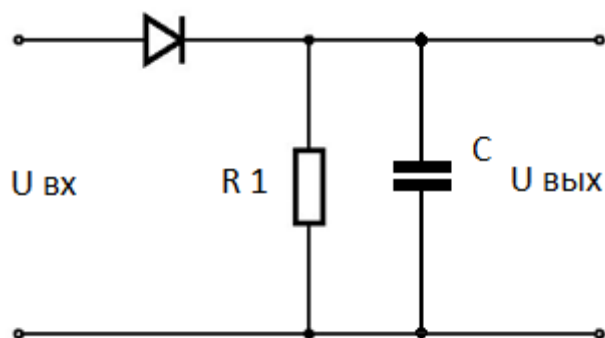


Рис.1.2. Простейший выпрямитель на одном диоде.

Сопротивление нагрузки  $R_1$  должно быть намного больше сопротивления диода  $R_{пр}$  на прямой ветви  $R_1 \gg R_{пр}$ , но намного меньше его обратного сопротивления  $R_1 \ll R_{обр}$ . Тогда при подаче на вход положительного напряжения  $U_{вх} > 0$  практически все оно будет падать на резисторе  $R_1$ . Если на вход подается отрицательное напряжение  $U_{вх} < 0$ , то пока обратный ток мал, все напряжение  $U_{вх}$  будет падать на диоде, а на выходе окажется практически нулевое напряжение  $U_{вых} \approx 0$ .

При положительных полупериодах напряжения диод «открывается», и через диод, а следовательно и через нагрузку  $R_1$  течет прямой ток  $I_{пр}$ . При отрицательных полупериодах напряжения диод «закрывается», и во всей цепи течет незначительный обратный ток  $I_{обр}$ . Таким образом, диод отсекает отрицательную полуволну переменного тока, и через нагрузку течет не переменный, а пульсирующий ток одного направления. Понятно, что питать таким пульсирующим выходным напряжением можно лишь маломощную нагрузку — например, светодиод.

Коэффициент выпрямления  $K$  схемы можно определить отношением прямого и обратного тока через нагрузку при одном и том же значении амплитуды положительного и отрицательного напряжения  $U = 1В$ .

$$K = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}}. \quad (9)$$

Сгладить пульсации выпрямленного тока можно, если параллельно сопротивлению нагрузки  $R_1$  подключить фильтрующий электролитический конденсатор большой емкости. Заряжаясь во время положительных полупериодов входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , во время отрицательных полупериодов конденсатор разряжается через нагрузку  $R_1$ . При достаточно большой емкости конденсатора за время между импульсами тока  $I_{\text{пр}}$  он не успевает заметно разрядиться, и через нагрузку  $R_1$  будет проходить практически одинаковый ток как во время положительных, так и во время отрицательных полупериодов  $U_{\text{вх}}$ .

Диод, работающий в режиме электрического пробоя (область 3 ВАХ) и предназначенный для стабилизации напряжения, называется стабилитроном. На рис.1.3 приведена схема простейшего стабилизатора напряжения, в которой используются области 2 и 3 ВАХ.

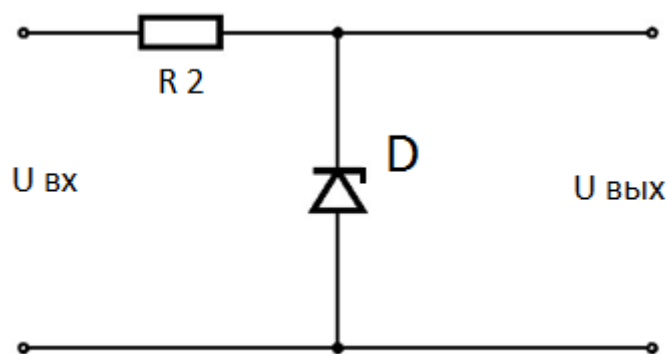


Рис.1.3. Простейший стабилизатор напряжения.

Если сопротивление резистора  $R_2$  намного больше сопротивления диода в области электрического пробоя, при подаче на вход напряжения  $U_{\text{вх}}$ , превышающего напряжение стабилизации  $U_{\text{вх}} \gg U_{\text{ст}}$ , на выходе окажется напряжение  $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{ст}}$ . При этом на резисторе  $R_2$  падает напряжение  $U_{\text{вх}} - U_{\text{ст}}$ .

В металлах концентрация свободных носителей очень велика и практически не зависит от приложенного напряжения. Это же относится к графиту, который по своим электрическим свойствам занимает промежуточное положение между полупроводниками и металлами (такие вещества называются полуметаллами). Подвижность носителей при таких электрических полях, в которых не происходит теплового разрушения металлических и графитовых полупроводников, является постоянной. Поэтому именно эти вещества обычно используются для создания резисторов — элементов с постоянным сопротивлением  $R$ .

#### 1.1.4. Динамические вольт-амперные характеристики. Зарядные токи и токи утечки конденсатора

Как правило, измерения ВАХ проводят с использованием медленно меняющегося напряжения, регистрируя при этом зависимость  $I(U)$ . Такие ВАХ называются динамическими. Если в цепь включен реактивный элемент (т.е. импеданс цепи имеет не только вещественную составляющую, но и мнимую), форма ВАХ начинает зависеть от направления и скорости изменения напряжения. Величину  $u = \frac{dU}{dt}$  обычно называют скоростью развертки по напряжению,  $[u] = \left[\frac{B}{c}\right]$ . Наибольший интерес вызывает измерение динамических ВАХ конденсаторных структур. Для идеального конденсатора, имеющего емкость  $C$ , заряд на обкладках  $Q$  связан с приложенным напряжением соотношением

$$Q = CU. \quad (10)$$

Зарядный ток через конденсатор, вызванный изменением заряда на обкладках при изменении напряжения  $U$ , получается дифференцированием соотношения (10)

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt},$$

т.е.

$$I = Cu. \quad (11)$$

При изменении направления развертки на противоположное  $u$  меняет знак, а значит, меняет знак  $I$  (рис.1.4). По известному значению  $u$  и измеренной величине тока  $I$  можно определить величину емкости  $C$ .

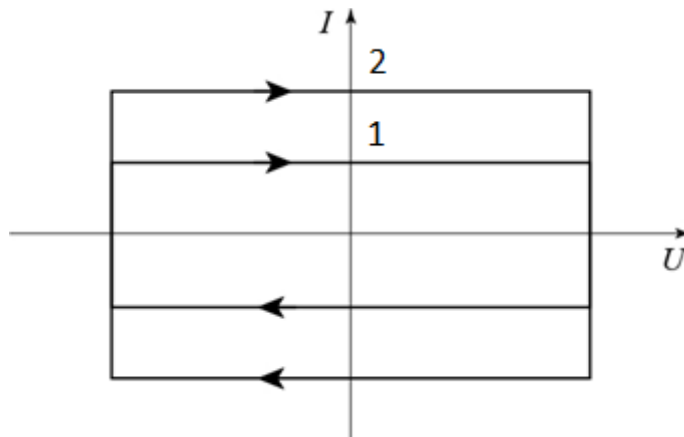


Рис.1.4. Динамическая ВАХ идеального конденсатора без утечки при двух различных постоянных скорости развертки ( $u_2 = 2u_1$ ; стрелкой показано направление развертки).

Часто, например для электролитических конденсаторов, ситуация осложняется из-за неидеальности конденсатора – присутствия сквозных токов (так называемых токов утечки), величина которых, вообще говоря, не зависит от скорости развертки  $u$  (рис.1.5).

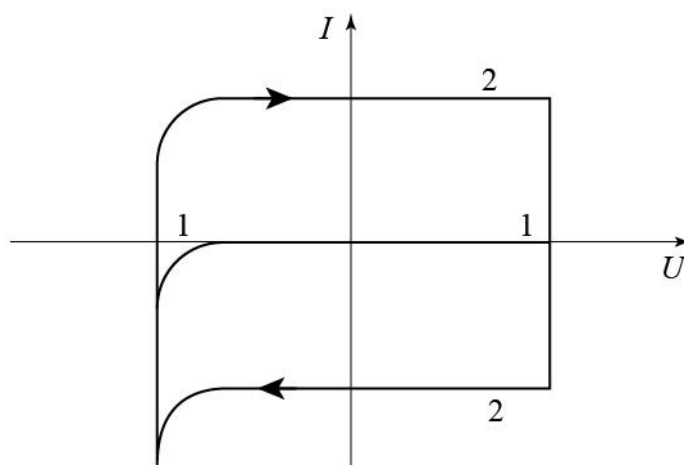


Рис.1.5. Динамическая ВАХ конденсатора с утечкой (1– токи утечки при  $u=0$ ; 2– ВАХ при пилообразной развертке по напряжению, когда  $u = u_0$  при «прямом» направлении развертки, и  $u = -u_0$  при «обратном» направлении).

В этом случае емкость можно определить по ширине петли гистерезиса  $\Delta I$  по оси  $I$ , которая равна  $2Cu$ , а ток утечки — по среднему значению при прямом (от  $U < 0$  к  $U > 0$ ) и обратном проходах.

Несимметричность ВАХ электролитического конденсатора связана с тем, что при одной полярности приложенного напряжения металл, к которому проникает электролит через микропоры окисла, окисляется, микропоры закрываются, и токи утечки очень малы вплоть до напряжения пробоя основной части окисла. А при другой полярности окисел в области микропор растворяется, и токи утечек из-за этого быстро нарастают. Поэтому электролитические конденсаторы всегда включают в строго определенной полярности по постоянному напряжению.

## 1.2. Измерение вольт-амперных характеристик с помощью АЦП и ЦАП

### 1.2.1. Цифро-аналоговые преобразователи

В компьютерах информация представляется в двоичном коде в виде цифровых сигналов. При этом одному уровню напряжения сопоставляется логическое значение 0, а другому 1. Существуют специальные устройства, называемые цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП), которые дают на выходе напряжение (т.е. аналоговый сигнал), пропорциональное величине входного кода. Это делается благодаря сложной схеме коммутаторов и делителей внутри ЦАП. Если обозначить входной код  $M_{\text{вх}}$ , а выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ , то

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{ЦАП}}(M_{\text{вх}} - M_0) , \quad (12)$$

где  $K_{\text{ЦАП}}$  — коэффициент преобразования,  $M_0$  — код сдвига нулевого уровня.

Если величина входного кода  $M_{\text{вх}}$  изменяется на 1, то есть на единицу младшего разряда,  $U_{\text{вых}}$  меняется на величину  $K_{\text{ЦАП}}$ . Поэтому  $K_{\text{ЦАП}}$  иногда называют значением младшего разряда (МР) ЦАП. Для однополярных ЦАП

величина  $M_0$ , как правило, близка к нулю, хотя бывают и исключения из этого правила. В биполярных ЦАП величина  $M_0$  обычно близка к половине максимального кода ЦАП. Однако ЦАП неидеальны и имеют погрешности преобразования. Погрешности бывают четырех типов:

- сдвиг уровня: значение  $M_0$  отличается от паспортного;
- погрешность масштабного коэффициента: значение  $K_{\text{ЦАП}}$  отличается от паспортного;
- нелинейность: зависимость  $U_{\text{вых}}$  от  $M_{\text{вх}}$  не является линейной. Отклонения от линейности обычно оценивают в значениях младшего разряда (МР). Различают дифференциальную (для двух соседних значений кода) и интегральную (для всей или части шкалы) нелинейность;
- погрешность установления выходного напряжения: напряжение на выходе ЦАП устанавливается не мгновенно, а через некоторое время после изменения входного кода.

Основной характеристикой ЦАП является его разрядность. Так, ЦАП с разрядностью 10 имеет 10 цифровых входов и может давать на выходе  $2^{10}=1024$  различных значения напряжения.

Выход ЦАП бывает либо монополярным (например, монополярный 10-разрядный ЦАП со значением МР = 0.005 В дает выходное напряжение от 0 до 5.115 В), либо биполярным (например, от -10.23 В до +10.23 В для биполярного 11-разрядного ЦАП со значением МР 10 мВ). Чем выше разрядность ЦАП, тем точнее с его помощью можно установить требуемое выходное напряжение — как правило, погрешность не превышает 1–3 МР.

### 1.2.2. Аналого-цифровые преобразователи. Преобразователи ток–напряжение

Для ввода информации об аналоговых сигналах в компьютер используют аналого-цифровые преобразователи (АЦП). В отличие от ЦАП существует



очень много различных типов АЦП, т.к. имеются разные методы преобразования. Основными характеристиками АЦП являются разрядность и время преобразования. Следующей по важности характеристикой является нелинейность АЦП (в полной аналогии с ЦАП различают дифференциальную и интегральную нелинейность). Наиболее типичны АЦП с разрядностью 8–14 и временем преобразования от десятков наносекунд до нескольких миллисекунд. Как правило, чем выше разрядность АЦП, тем ниже его быстродействие. АЦП могут работать либо в монополярном (например, от 0 до +5 В), либо в биполярном режимах (например, от –5 до +5 В), в зависимости от их конструкции. Диапазон входного напряжения АЦП обычно лежит в области от –10 до +10 В.

Рассмотрим простейший алгоритм преобразования напряжение-код. В заданный момент времени на АЦП приходит цифровой сигнал «начать преобразование». Этот сигнал может поступать либо от компьютера (как в данной работе), либо от внешнего источника сигнала. После прихода этого сигнала (его часто называют сигналом «старт») АЦП начинает сравнение величины входного сигнала с внутренними эталонными напряжениями в своей схеме, и через некоторое время на выходе АЦП появляется цифровой сигнал «преобразование закончено» и выходной код  $M_{\text{вых}}$  соответствующий входному напряжению  $U_{\text{вх}}$ . Выходной код  $M_{\text{вых}}$  связан со входным напряжением  $U_{\text{вх}}$  соотношением

$$U_{\text{вх}} = K_{\text{АЦП}}(M_{\text{вых}} - M_0), \quad (13)$$

где  $M_0$  — код, соответствующий нулевому входному напряжению.

С помощью АЦП можно измерять не только напряжение, но также ток, сопротивление и другие величины. Для этого существуют, так называемые преобразователи «ток – напряжение», «сопротивление – напряжение» и т. д. На рис.1.6 приведена схема работы преобразователя ток – напряжение на основе операционного усилителя (ОУ) с отрицательной обратной связью.

Операционный усилитель (ОУ) — усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и, как правило, единственным выходом, имеющий высокий коэффициент усиления. ОУ имеет также два вывода по питанию (двухполярное:  $\pm U$  или однополярное:  $+U$  и земля). Эти пять выводов имеются в любом ОУ и принципиально необходимы для его работы.

Отрицательной обратной связью называется эффект подачи части выходного напряжения усилителя через резистор  $R_0$  на его инвертирующий вход (обозначенный на схеме кружком), где оно алгебраически суммируется со входным напряжением. За счет отрицательной обратной связи в точке «а» поддерживается потенциал равный нулю. Входы ОУ имеют большое сопротивление (до гигаОм), поэтому можно считать, что ток через них не течет. Входной ток  $I_{вх}$  течет через резистор  $R_0$ , а весь преобразователь ведет себя как амперметр, подключенный одной клеммой к «земле».

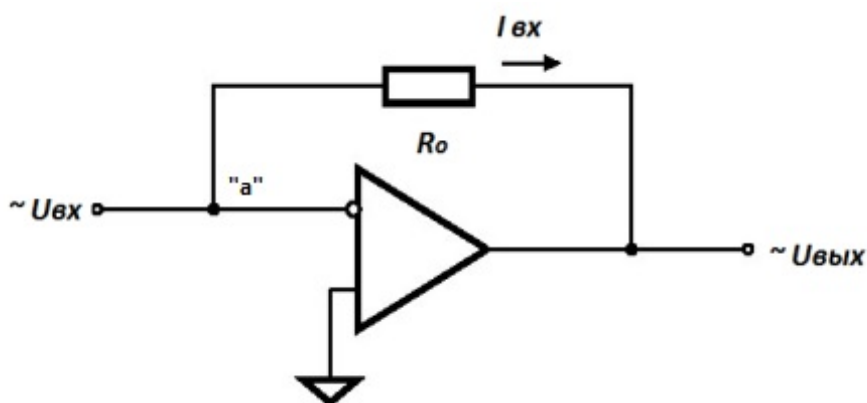


Рис.1. 6 Преобразователь ток – напряжение.

Выходное напряжение связано со входным током соотношением

$$U_{вх} = -I_{вх}R_0. \quad (14)$$

ОУ может быть также включен в схему как повторитель напряжения. (рис.1.7).

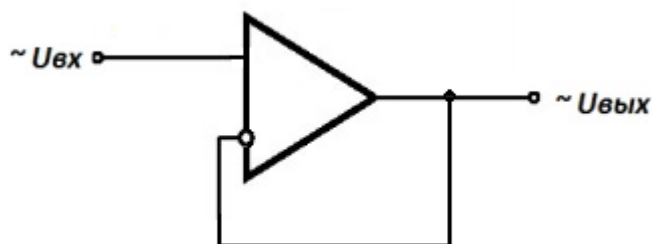


Рис.1.7 Повторитель на ОУ.

Поскольку выход ЦАПа myDAQ является маломощным (единицы миллиампер), а ряд изучаемых элементов являются низкоомными, повторитель на ОУ используется как буферный усилитель для исключения влияния низкоомной нагрузки на источник напряжения с высоким выходным сопротивлением. Значение тока в цепи в этом случае можно найти по падению напряжения на низкоомном резисторе, включенном в цепь после выхода операционного усилителя.

## 2. Экспериментальная установка и программное обеспечение

Перед выполнением данной работы необходимо выполнить лабораторные работы «№1–NI. Создание виртуальных приборов в среде LabView», «№2–NI. Программирование виртуальных приборов в среде LabView» и «№3- NI. Программирование в среде LabView цифровых портов ввода-вывода устройства сбора данных NI myDAQ».

### 2.1. Экспериментальная установка

В лабораторной работе динамические вольт-амперные характеристики элементов электрической цепи переменного тока ВАХ исследуются с помощью подключенного к компьютеру устройства сбора данных NI

MyDAQ. Общий вид экспериментальной установки для выполнения лабораторной работы показан на рис. 2.7.

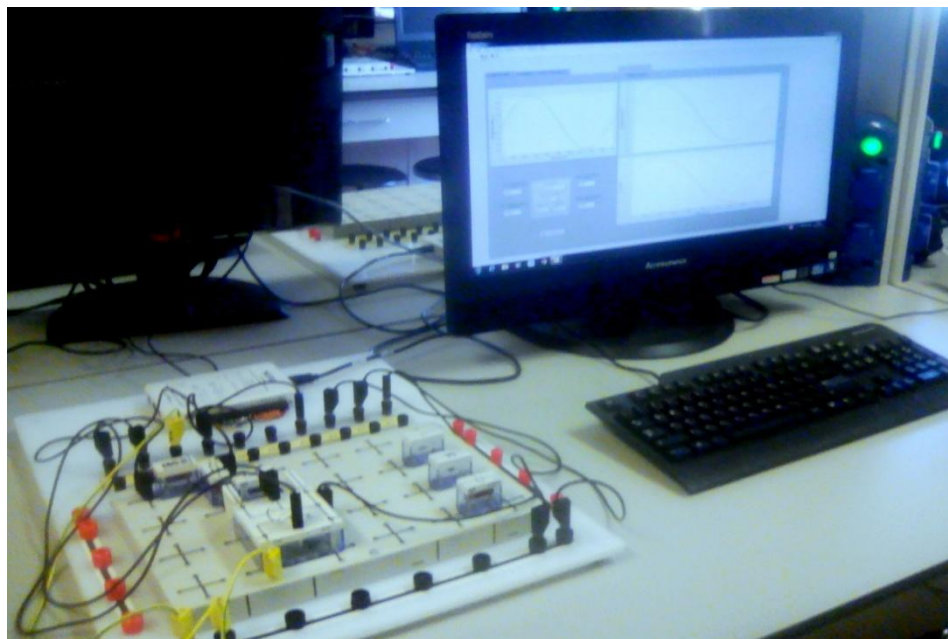


Рис. 2.7 . Общий вид экспериментальной установки для изучения ВАХ элементов электрической цепи.

Установка состоит из следующих частей:

- 1) Компьютер с предустановленным программным обеспечением LabVIEW National Instruments.
- 2) Модуль NI myDAQ (DAQ – Data Acquisition, сбор данных), подключаемый к USB-порту компьютера ( рис.2.8).
- 3) Наборная панель и устанавливаемые на неё элементы (резисторы, диоды, стабилитроны, конденсаторы, переключки).

Номиналы используемых в лабораторной работе элементов:

Резисторы R: 100 Ом, 1 кОм, 10 кОм.

Конденсаторы C: 1 мкФ, 4.7 мкФ, 10 мкФ.

Диод : 1N4007.

Стабилитроны: КС139, ZPD3.3.

Светодиод : AL307.

- 4) Соединительные кабели и провода.

Все виртуальные приборы на основе NI myDAQ — это программы, которые используют имеющиеся внутри NI myDAQ аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи для измерения напряжений и токов. Параметры ЦАП и АЦП:

ЦАП: диапазон выходного напряжения:  $\pm 10$  В.

разрядность: 16.

полярность : двухполярный.

АЦП: диапазон измеряемых напряжений:  $\pm 10$  В.

разрядность: 16.

полярность: двухполярный.



Рис.2.8. Устройство сбора данных NI myDAQ.

В NI myDAQ имеются аналоговые входы (AI — Analog Input) для регистрации аналоговых сигналов с помощью АЦП, аналоговые выходы (AO — Analog Output) для получения аналоговых сигналов с помощью ЦАП, цифровые входы и выходы (DIO— Digital Input/Output), а также вход и выход аудиосигналов.

В NI myDAQ имеется три источника питания:  $\pm 15$ в, +5в. Источники  $\pm 15$ в могут быть использованы для питания аналоговых компонентов (например,

операционных усилителей, и линейных регуляторов напряжения). Источник +5В может быть использован для питания цифровых компонентов, таких как логические устройства.

Разъемы AGND и DGND — аналоговая и цифровая земля, соответственно, служат в качестве опорных уровней напряжения для AI, AO ±15В и DIO для источника +5В.

## 2.2. Схема установки для измерения динамических вольт-амперных характеристик

Управление измерениями для получения ВАХ осуществляется с помощью схемы, показанной на рис. 2.9.

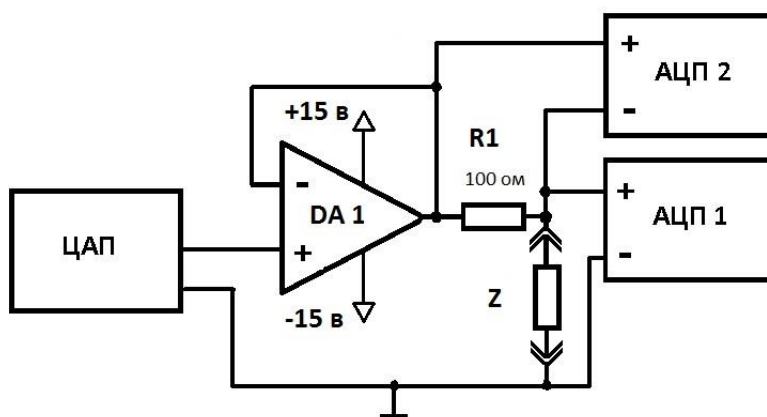


Рис.2. 9. Схема установки для измерения ВАХ элементов цепи.

В комплекте NI myDAQ имеется один АЦП и два аналоговых измерительных канала AI0 и AI1. Эти каналы могут быть настроены в качестве дифференциального входа общего назначения с высоким сопротивлением по напряжению, что позволяет точнее производить измерения малых токов и напряжений. Аналоговые входы мультиплексируемые — это означает, что для обработки данных обоих каналов используется один аналого-цифровой преобразователь АЦП,

программно переключаемый на необходимый канал. На схеме установки (рис.2.9) эти каналы обозначены как АЦП1 и АЦП2.

*Замечание: цифровой мультиметр DMM имеет малую точность измерений (~1%) и использует программное тактирование от операционной системы, поэтому скорость обновления его данных зависит от загрузки компьютера и времени опроса USB порта, подключенного к myDAQ, что затрудняет синхронизацию чтения и записи измеряемого сигнала. По этим причинам в данной работе DMM не применяется.*

Выход ЦАП АО0 через повторитель напряжения на операционном усилителе DA1 подсоединен через резистор R1 к верхней по схеме клемме исследуемого элемента цепи «Z», напряжение на нем измеряется с помощью АЦП1. По падению напряжения на резисторе R<sub>1</sub> подключенного к входам АЦП 2 вычисляется протекающий через цепь ток.

Все элементы схемы располагаются на наборной панели. Напомним, что для удобства в экспериментальной установке, предлагаемой для выполнения лабораторной работы, винтовые клеммы 20-контактного разъема NI myDAQ соединены проводами с соответствующими клеммами наборной панели, имеющими те же обозначения. С клемм наборной панели сигналы можно подавать в нужные точки электрической схемы.

Схема подключения выходных разъемов к входам исследуемой цепи показана на рис. 2.10.

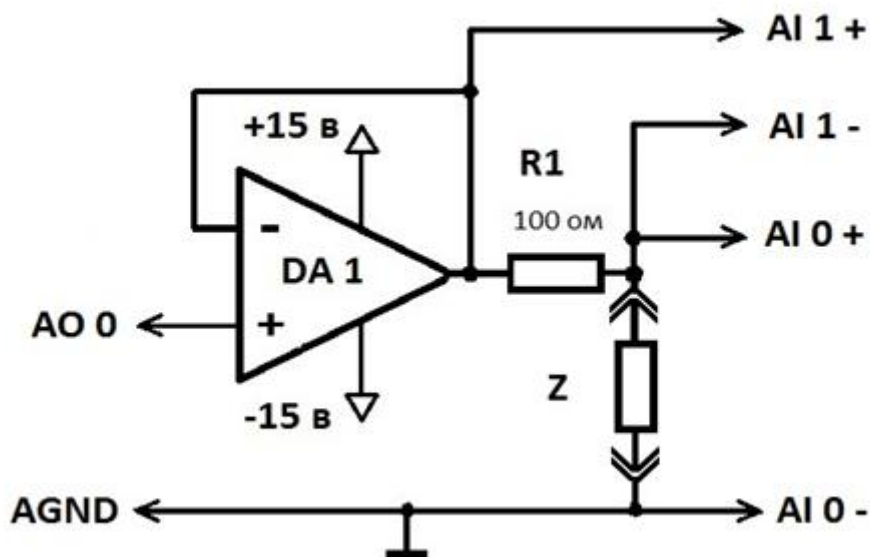


Рис.2.10. Схема подключения разъемов для измерения ВАХ.

Источником сигнала служат выходы ЦАП АО0 и АГНД, для измерения падения напряжения на R1 – разъемы АИ1+ и АИ1- (АЦП2), для измерения напряжения на исследуемом элементе Z – разъемы АИ0+ и АИ0- (АЦП1).

### 2.3. Программное обеспечение

Работа состоит из следующих разделов: «Измерения», «Графики — ВАХ, U(t), I(t), R(U), r(U)», «Сопротивления». В качестве примера реальной программы на рис.2.11 приведена часть блок-диаграммы (Block Diagram) виртуального прибора для раздела «Измерения».



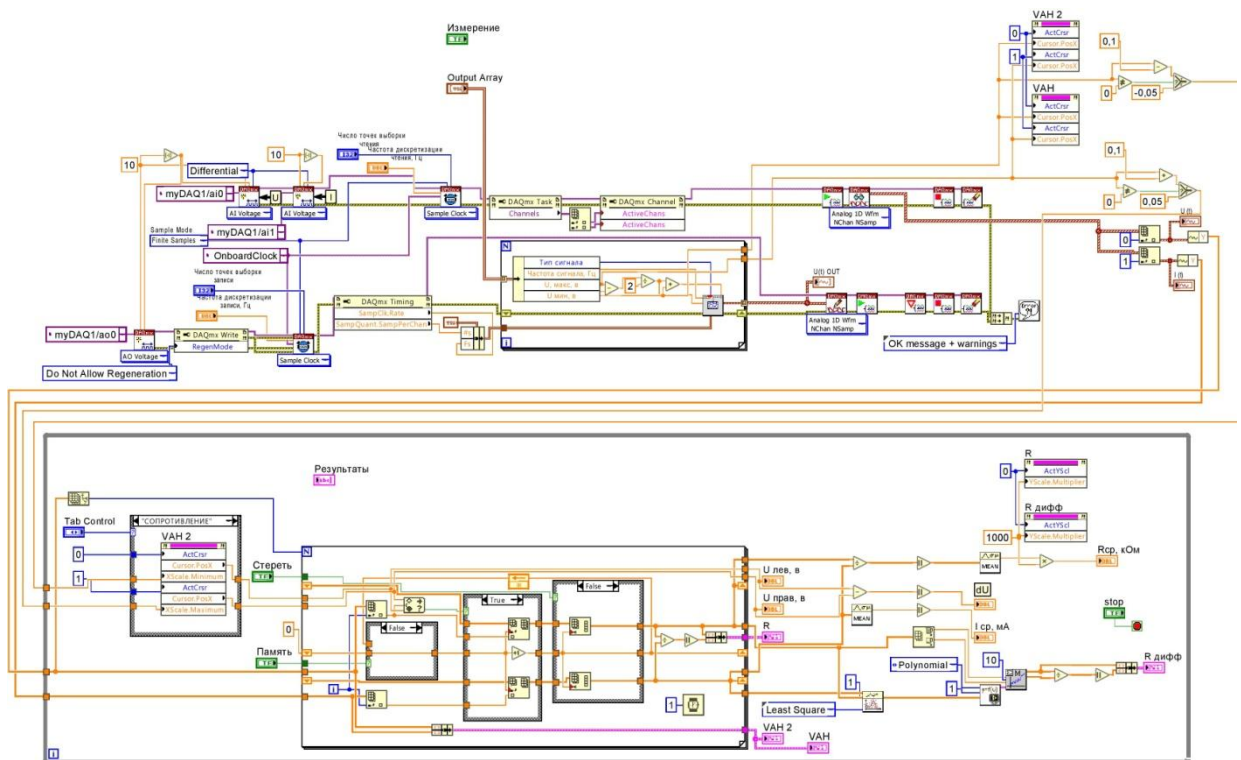


Рис.2.11. Блок-диаграмма виртуального прибора для раздела «Измерения».

Лицевая панель (Front Panel) виртуального прибора в разделе «Измерения» с элементами управления и вывода результатов показана на рис. 2.12. Вы можете выбирать форму сигнала, изменять его частоту и границы изменения напряжения на выходе ЦАП.

Слева и справа расположены иконки элементов управления, позволяющих задавать число точек в выборке генерируемого сигнала (Число точек выборки записи), его частоту дискретизации (Частота дискретизации записи), а также число точек в выборке измеряемого на исследуемом элементе сигнала (Число точек выборки чтения) и его частоту дискретизации (Частота дискретизации чтения).

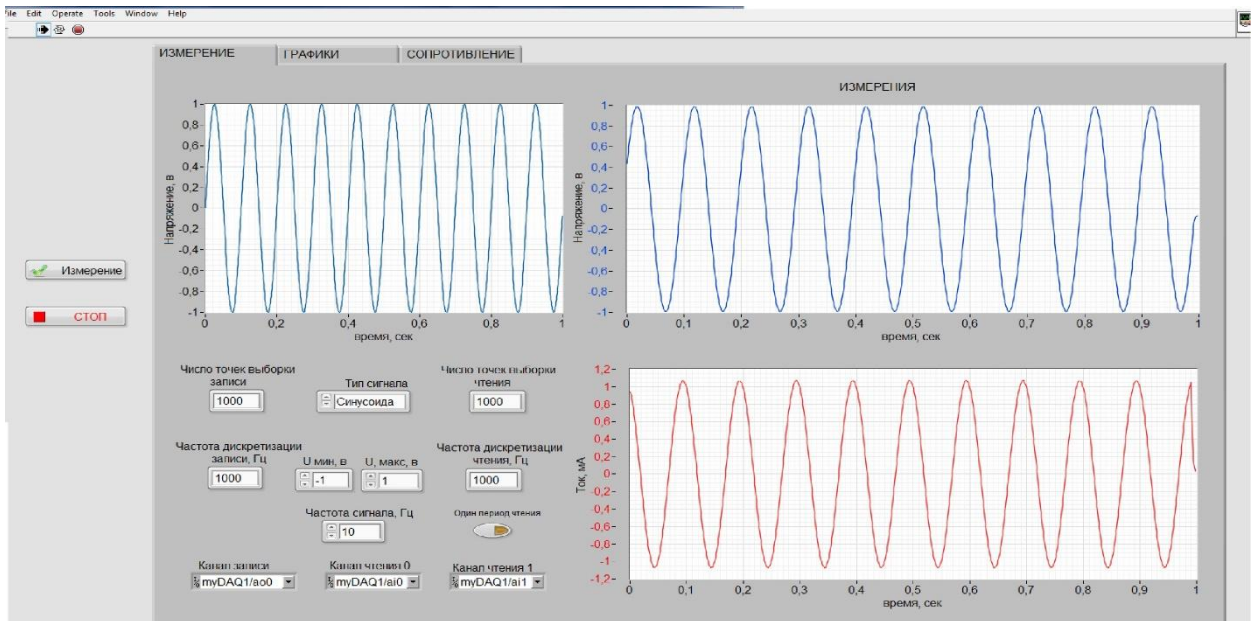


Рис. 2.12. Лицевая панель виртуального прибора в режиме «Измерения».

Комбинируя значения этих параметров и частоту сигнала, вы можете получать различные по длительности порции данных, выводимых на экран виртуального осциллографа. Как во всяком виртуальном приборе LabView, программа запускается кнопкой «Run». После изменения в случае необходимости параметров генерируемого сигнала (формы, частоты и т. д.) новая порция данных получается при нажатии на кнопку «Измерения». На экране осциллографа можно наблюдать графики  $U(t)$  для генерируемого сигнала, а также графики  $U(t)$ ,  $I(t)$  на исследуемом элементе. Изменяя параметры измерений, можно оптимизировать получаемые графики, добиваясь их наилучшего совпадения с теоретическими. Кнопка «Один период чтения» отображает графики  $U(t)$  и  $I(t)$  для одного периода. В полях «канал записи», «канал чтения 1» и «канал чтения 2» необходимо выбрать подключенный к установке myDAQ ( myDAQ/ao0, myDAQ/ai0, myDAQ/ai1, соответственно).

В разделе «Графики» (рис.2.13) на экране виртуального осциллографа можно наблюдать вольт-амперные характеристики ВАХ для исследуемого элемента, а также графические зависимости интегрального и

дифференциального сопротивления от напряжения  $R(U)$  и  $r(U)$ .



Рис. 2.13. Лицевая панель прибора в разделе «Графики».

Перемещая реперы (красная и зеленая вертикальные линии на графике ВАХ), можно выделять область изменения напряжения, в которой рассматриваются данные. Значение  $U$  для реперов отображаются в полях «cursor L» и «cursor R». Кнопка «Память» позволяет сохранять результаты предыдущих измерений и отображать их всех на осциллографе, кнопка «Стереть» удаляет все данные и очищает экран.

Для графика интегрального сопротивления предусмотрена возможность отобразить только точки измерения без построения графика (для этого служит переключатель «линия» «точка»).

Обдумайте самостоятельно, по какому алгоритму получаются точки на графиках  $R(U)$ . График для дифференциального сопротивления  $r(U)$  строится в среде LabView «методом скользящего среднего».

Лицевая панель прибора в разделе «Сопротивления» показана на рис 2.14.

Перемещая реперы и выделяя таким образом различные участки ВАХ исследуемого элемента, вы получаете в соответствующих окнах под графиком ВАХ значения интегрального сопротивления  $R$  и среднего тока на выделенном участке. Кнопка «окно» позволяет показать на всем экране осциллографа только участок между реперами. Обдумайте самостоятельно, как вычисляются эти величины. Полученные значения занесите в таблицу «Результаты» с помощью кнопки «Записать в таблицу». Заполненную таблицу можно сохранить, нажав на кнопку «Сохранить таблицу». При ее нажатии откроется окно программы «Excel» с таблицей результатов измерений, а чтобы сохранить график ВАХ, нажмите кнопку «Сохранить график», в обоих случаях имя файла и место его сохранения Вы выбираете по своему усмотрению.

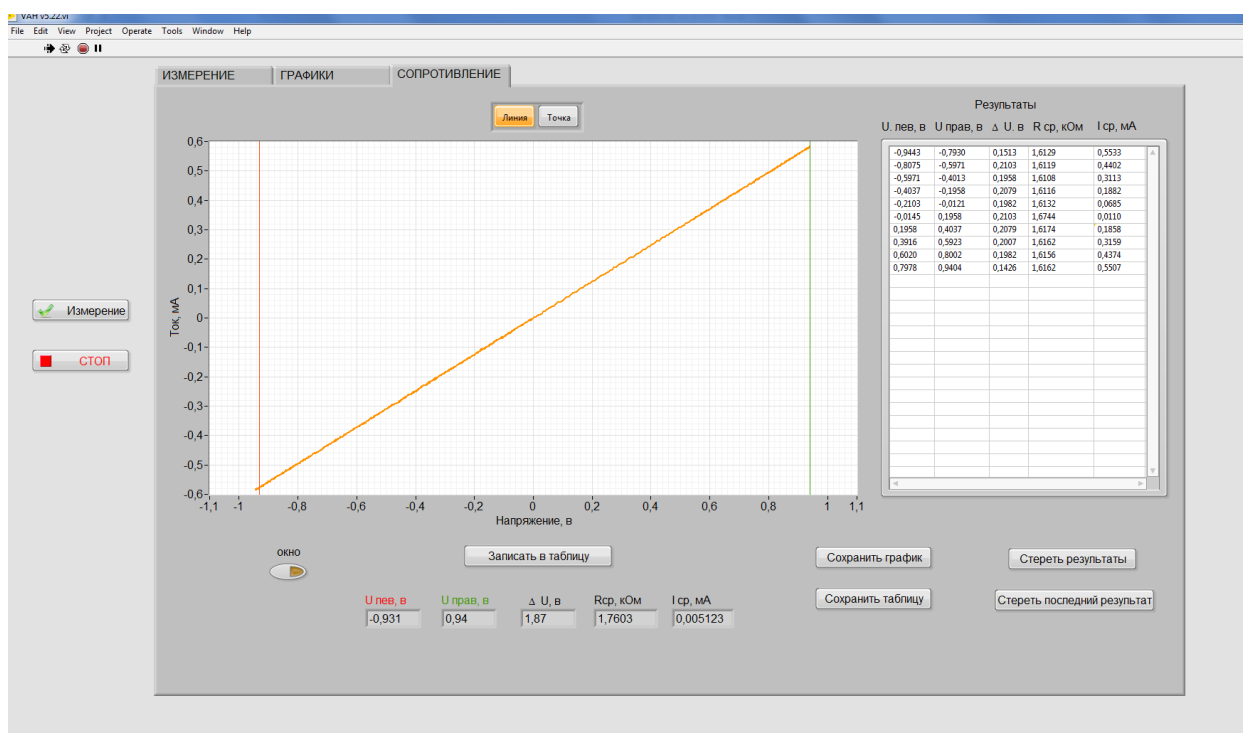


Рис. 2.14. Лицевая панель прибора в режиме «Сопротивление».

При работе с ВАХ резистора по результатам  $(\Delta U, I_{cp})$  можно оценить погрешности установки, связанные с измерениями тока. При анализе резистор считается идеально линейным элементом.

### 3. Контрольные вопросы

1. Что такое дрейфовая скорость носителей? Как связана дрейфовая скорость носителей в проводнике с локальной напряженностью электрического поля?
2. Запишите закон Ома в интегральной и дифференциальной форме. В каких случаях выполняется, а в каких нарушается закон Ома?
3. Что такое динамические вольт-амперные характеристики? Как выглядят ВАХ резистора? Диода? Стабилитрона? Как будет выглядеть ВАХ этих элементов, если поменять полярность их включения ( перевернуть элемент)?
4. Подумайте, как работает программа, позволяющая при обработке данных определять сопротивление резистора по ВАХ. Как влияет на результаты измерения интегрального сопротивления резистора неучитываемый постоянный сдвиг нуля АЦП, регистрирующий напряжение на элементе? Нарисуйте ВАХ резистора и сделайте вывод, при каких значениях напряжения это влияние больше – при больших или близких к нулю.
5. Нарисуйте простейшую схему выпрямителя на одном диоде. Поясните графиком закон изменения выходного напряжения от времени  $U_{\text{вых}}(t)$  при синусоидальном входном напряжении  $U_{\text{вх}}$ . Объясните, как можно сгладить пульсации  $U_{\text{вых}}$  используя конденсатор.
6. На какой ветви ВАХ происходит стабилизация напряжения у стабилитрона?
7. Как определить по ВАХ стабилитрона напряжение пробоя и ток стабилизации?
8. Нарисуйте ВАХ конденсатора при пилообразном входном напряжении. Как можно определить емкость конденсатора по петле гистерезиса? Как в этом случае оценить по ВАХ ток утечки конденсатора?
9. Нарисуйте графики параметрической зависимости
  - а)  $x(t)=x_0 \sin(\omega t)$ ,  $y(t)=y_0 \cos(\omega t)$ ;
  - б)  $x(t)=x_0 \sin(\omega t)$ ,  $y(t)=y_0 \sin(\omega t)$ ;

в)  $x(t)=x_0 \sin(\omega t)$ ,  $y(t)=y_0 \sin(\omega t+\varphi)$ ,  $0 < \varphi < \pi/2$ .

10. Какой вид имеет ВАХ конденсатора при подаче на вход синусоидально изменяющегося напряжения? Почему? Как определить емкость конденсатора по ВАХ? Какие измерения необходимо для этого сделать?

11. Какова зависимость от времени тока через конденсатор  $I(t)$ , если подаваемое на него напряжение изменяется со временем а) синусоидально, б) линейно? в) по закону «меандра»?

#### 4. Задания

Для выполнения работы необходимо запустить на рабочем столе ярлык «Вольт-амперные характеристики». Все полученные в ходе выполнения заданий результаты заносите в рабочий журнал.

##### Задание 1. Измерение ВАХ и сопротивления резисторов.

##### Оценка погрешностей и ограничений измерительной аппаратуры

Задание 1.1. Дифференциальное и интегральное сопротивление резистора – синусоидальный сигнал

Поместите исследуемый резистор в электрическую цепь на место элемента цепи  $Z$ . Задайте режим синусоидального изменения напряжения, проведите измерения ВАХ. Измените параметры сигнала, для того, чтобы оптимизировать получившиеся графики.

Воспользуйтесь возможностями программы «Сопротивления» для анализа погрешностей части установки, связанной с измерениями токов (отклонения от среднего значения, нелинейность характеристики, сдвиг по уровню). Сравните значения дифференциальных и интегральных сопротивлений для резистора на различных участках ВАХ. Проведите оценку диапазона токов и оптимальной выборки длительности сигнала, в котором возможны корректные измерения. Оцените погрешность определения интегрального сопротивления  $R$  на различных участках ВАХ.

Задание 1.2. Дифференциальное и интегральное сопротивление резистора – пилообразный сигнал

Подайте на резистор сигнал с линейной разверткой по напряжению, снимите ВАХ. Какие выводы следуют из анализа ВАХ в этом случае? Изменился ли диапазон токов для определения  $R$  с той же погрешностью, что в задании 1.1?

Задание 1.3. Измерения и анализ результатов для резистора другого номинала

Повторите измерения и анализ результатов для резистора другого номинала.

Задание 2. Измерение ВАХ, интегрального и дифференциального сопротивления диодов.  
Исследование простейшего выпрямителя на одном диоде

Задание 2.1. ВАХ диода, его дифференциальное и интегральное сопротивление

Включите исследуемый диод, учитывая его полярность, в электрическую цепь. Задайте режим пилообразной развертки по напряжению. Проведите измерения ВАХ диода. Проанализируйте и объясните вид графиков зависимости напряжения  $U(t)$  и тока  $I(t)$  через диод при измерениях в прямом и обратном направлении. Объясните графики зависимости дифференциального сопротивления диода от приложенного напряжения в прямом и обратном направлении. С помощью программы «Сопротивления» проведите оценку интегрального сопротивления диода на отдельных участках ВАХ при положительном и отрицательном напряжении. Подумайте, как при этом разумно выбирать границы напряжения («шаг») в прямом и обратном направлении.

Оцените прямое падение напряжения на диоде и величину токов утечки при различных обратных напряжениях.

Выберите синусоидальный сигнал изменения входного напряжения, проведите измерения ВАХ. Проанализируйте полученные графики, объясните их сходство и отличия от графиков для пилообразной развертки.

Повторите измерения и анализ графиков для прямоугольного изменения входного напряжения.

## Задание 2.2. Простейший выпрямитель

Соберите схему простейшего выпрямителя на диоде, исследованном в предыдущем задании (Рис. 1.2). Не забудьте, что сопротивление нагрузки  $R_1$  должно быть намного больше сопротивления диода  $R_{пр}$  на прямой ветви  $R_1 \gg R_{пр}$ , но намного меньше его обратного сопротивления  $R_1 \ll R_{обр}$ . Измерьте величину тока в прямом и обратном направлении и оцените коэффициент выпрямления  $K$ .

Подсоедините к клеммам электрической цепи светодиод (полупроводниковый диод, создающий излучение при протекании тока в прямом направлении). Подайте на светодиод синусоидально изменяющееся напряжение с частотой 1 Гц, задав диапазон выходного напряжения ЦАП  $\pm 3$  вольта, объясните наблюдающийся эффект. Измените частоту сигнала в 2 раза, в 10 раз. Объясните получившийся эффект. Подайте на светодиод линейно изменяющееся напряжение, объясните наблюдающийся эффект.

## Задание 3. Измерение параметров стабилитронов

Включите исследуемый стабилитрон в электрическую цепь согласно рис.1.3. Задайте режим пилообразной развертки по напряжению. Проведите измерения ВАХ стабилитрона. Оцените величину напряжения стабилизации  $U_{ст}$ , средний ток стабилизации  $I_{ст}$ , дифференциальное сопротивление  $r$  в режиме стабилизации.

## Задание 4. Измерение ВАХ и параметров электролитического конденсатора

### Задание 4.1 ВАХ конденсатора – синусоидальный сигнал

Включите исследуемый конденсатор в электрическую цепь. Задайте синусоидальный режим развертки по напряжению. Измерьте ВАХ, объясните



ее форму. Проанализируйте графики зависимости напряжения  $U(t)$  и тока  $I(t)$  через конденсатор. Оцените постоянную времени установления напряжения на конденсаторе.

Проведите расчет емкости конденсатора (воспользуйтесь формулой 11).

#### Задание 4.2. ВАХ конденсатора – пилообразный сигнал

Проведите измерение ВАХ конденсатора с емкостями 1 мкФ, 4.7 мкФ и 10 мкФ при некоторой скорости пилообразной развертки. Объясните вид полученной ВАХ, оцените постоянную времени установления напряжения на конденсаторе. По измеренным значениям тока определите скорость развертки.

Включите в электрическую цепь конденсатор неизвестной емкости. Измерьте его динамическую ВАХ. Используя полученное ранее значение скорости развертки проведите расчет емкости конденсатора. Оцените постоянную времени установления напряжения на конденсаторе.

#### Задание 4.3. ВАХ конденсатора – прямоугольный сигнал

Выберите режим прямоугольного изменения входного напряжения. Включите в электрическую цепь конденсатор, исследованный в задании 4.1. Измерьте ВАХ, объясните ее форму. Проведите оценку постоянной времени установления напряжения на конденсаторе, сравните с результатами, полученными в заданиях 4.1 и 4.2.

В.В.Монахов, О.В. Огинец, С.Н.Жоголь, М.Г. Яковлева

**Исследование вольт-амперных характеристик элементов электрической цепи с помощью устройства сбора данных NI myDAQ**

Учебно-методическое пособие

Издание прошло редакционно-корректорскую правку