

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Практикум
ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторная работа 2

ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Киров С.А., Ананьева Н.Г.

2011

Задача посвящена знакомству с техникой измерений силы тока и напряжения в цепи постоянного тока с помощью многопредельных стрелочных вольтметров, амперметров, комбинированных приборов (тестеров).

Общие сведения

Для измерения силы тока применяют приборы, называемые амперметрами. В основе их работы лежит однозначная зависимость угла поворота стрелки индикатора, соединенной с подвижным узлом, от величины силы тока, протекающего через измерительный узел прибора [1]. Амперметры включают последовательно в разрыв цепи в том ее участке, где необходимо определить силу тока (***рис.1***). Шкалы амперметров обычно градуируют непосредственно в единицах силы тока: амперах (А или mA, μA).

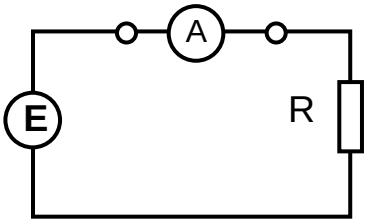


Рис. 1*. Подключение амперметра в исследуемую цепь:* **E***- ЭДС, действующая в цепи, R - сопротивление цепи.*

Чем меньше внутреннее сопротивление амперметра, тем меньшее изменение тока в цепи вызовет его включение. Поэтому для измерений силы тока амперметром должно выполняется условие: $r_A << R$, где r_A – внутреннее сопротивление прибора. Для расширения пределов измерений параллельно амперметру подключают резисторы, сопротивление которых меньше внутреннего сопротивления прибора. Их называют шунтами. Сопротивление шунта определяется из соотношения

$$r_ш = \frac{r_A}{n-1}$$

где n - число, показывающее во сколько раз увеличен предел измерения, $r_ш$ - величина сопротивления шунта. Внутри корпуса *многопредельных амперметров* размещают несколько различных шунтов. На лицевой панели указывают максимальные значения силы тока, которые могут быть измерены при выбранном положении переключателя пределов измерений. Часто многопредельные приборы имеют несколько шкал, которые соответствуют определенному пределу измерений. Если у прибора имеется единственная шкала, цена деления шкалы будет разной для каждого предела измерений.

Универсальные приборы позволяют выполнять измерения в цепях и постоянного, и переменного тока. *Комбинированные приборы* предназначены для измерения различных электрических величин (например, U, I, R или др.). При измерении силы постоянного тока универсальными и комбинированными приборами переключатель рода работы следует установить в положение, соответствующее измерению силы тока в режиме "постоянный ток" ("–"). Отсчет показаний при этом производится по той шкале, против которой указаны символы "–" и "А" (или "mA", "μA"). Во избежание выхода из строя прибора необходимо следить за полярностью его подключения в цепь.

Входную клемму прибора, обозначаемую символами "∗", "–" или "общ", подключают к той точке разрыва цепи, которая имеет меньший потенциал, относительно другой точки, подключаемой к входной клемме, обозначаемой символами "+" или "А".

Измерения силы тока желательно проводить, когда приблизительно известно ожидаемое значение (хотя бы по порядку величины). Если оно не известно, то **измерения следует начинать используя максимальный предел**, так как в этом случае вероятность превышения максимально допустимого значения силы тока в цепи для данного прибора (а следовательно, и выхода его из строя) будет наименьшей. Если при этом стрелка отклонится на слишком малый угол, то необходимо перейти на меньший предел, предварительно отключив прибор из цепи. Оптимальным можно считать выбор такого предела измерений, при котором стрелка индикатора в процессе измерения будет располагаться по центру или в правой части шкалы (но не зашкаливает!).

Для измерения напряжения на участке цепи (разности потенциалов между точками, ограничивающими исследуемый участок), применяют приборы - вольтметры, подключаемые параллельно исследуемому участку (***рис.2***). Фактически вольтметр (кроме приборов некоторых систем, например электростатической) представляет собой амперметр, шкала которого проградуирована в единицах напряжения – вольтах (В, мВ, мкВ, кВ). Однако в отличие от амперметров, внутреннее сопротивление вольтметра $r_в$ должно быть как можно больше сопротивления того участка цепи R, на котором проводятся измерения. В противном случае параллельное подключение прибора приведет к существенному изменению величины силы тока в цепи и, следовательно, к заметному изменению измеряемой разности потенциалов.

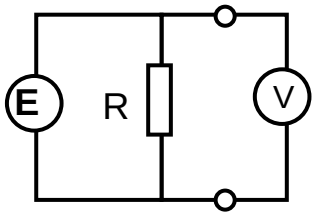


Рис. 2*. Подключение вольтметра:* ***E*** *- ЭДС, R - сопротивление, на котором измеряется напряжение.*

Для расширения пределов измерений последовательно с вольтметром включают добавочные сопротивления $r_д$, величина которых может быть определена из соотношения

$$r_д = (n–1)r_в$$

где n – число, определяющее во сколько раз требуется увеличить предел измерений. Размещение нескольких добавочных сопротивлений и переключателя, позволяющего их подключать к индикатору, внутри корпуса прибора, дает возможность конструировать многопредельные вольтметры. На их лицевых панелях рядом с переключателем пределов измерений указывают *максимальные значения разности потенциалов*, которые могут быть измерены при том или ином положении переключателя.

При выполнении измерений в целях постоянного тока следует, так же как и при измерениях силы тока, соблюдать полярность подключения прибора к цепи. При использовании комбинированных многопредельных приборов переключатель рода работы должен быть установлен в положение, соответствующее измерению напряжения в цепи постоянного тока (оно обычно обозначается символами "–","+U", "–U" или "V"). Отсчет показаний производится по тем шкалам, рядом с которыми указаны символы "V" и "–". Цена делений определяется для каждого предела измерений или для каждой шкалы в отдельности.

Большой точности измерения напряжения можно достичь, если воспользоваться ламповыми, транзисторными или электронно-цифровыми вольтметрами. Их внутреннее сопротивление, как правило, значительно превышает внутреннее сопротивление обычных стрелочных вольтметров.

В силу конструктивных особенностей и способов преобразования исследуемой величины в показания прибора, при выполнении измерений, а также перед их началом, необходимо периодически **проверять правильность установки нулевого значения** по шкале или цифровому индикатору. Для этого переключатель режимов работы необходимо установить в положение "контроль нуля" (иногда оно обозначается символом ">0<") и **замкнуть накоротко входные клеммы прибора**. При необходимости регулировка нулевого положения стрелки или установка нулевого значения на индикаторе осуществляется вращением ручки переменного резистора, рядом с которым на лицевой панели указывают "установка нуля" или ">0<").

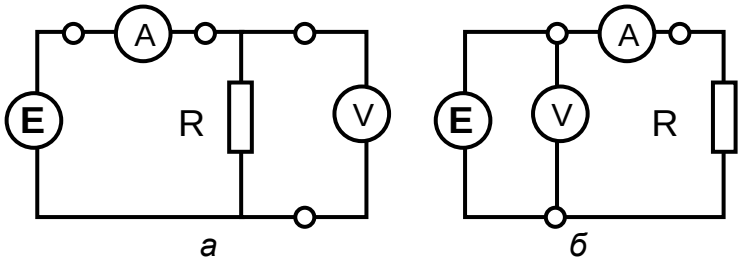


***Рис. 3**. Два варианта схем включения приборов при одновременном измерении силы тока и напряжения*

При выполнении одновременных измерений силы тока и напряжения в цепи возможны два варианта подключения приборов, представленные на ***рис.3***. Вариантом (а) можно пользоваться, когда внутреннее сопротивление вольтметра $r_в$ значительно превышает сопротивление участка цепи R, а вторым (б) – когда внутреннее сопротивление амперметра r_A значительно меньше величин R (объясните, почему).

Практическая часть

При выполнении задачи используются различные электроизмерительные приборы. Их описания и инструкции по эксплуатации выдаются перед работой. **Перед началом измерений все приборы нужно подготовить к работе согласно их инструкциям.**

Главная операция при подготовке прибора к работе – установка нуля:

а) механическая (для стрелочных приборов) – до включения прибора необходимо проверить нулевое положение стрелки,
б) электрическая – провести до начала измерений, после прогрева приборов (прогрев занимает обычно около 10 -15 минут). При переключении диапазонов измерений нулевое положение стрелки может нарушатся – проверяйте «0» на каждом диапазоне измерений!

В некоторых приборах предусмотрена операция балансировки – можно отрегулировать нулевое положение стрелки так, чтобы при изменении пределов измерений показания прибора, при закороченных входных клеммах, оставались нулевыми. Но операция балансировки очень трудоемкая, требует определенных навыков в работе с приборами, студенты не проводят ее.

Упражнение 1. Измерение напряжения в цепи постоянного тока.

Необходимо выполнить ряд измерений напряжения в цепи постоянного тока. Цепь состоит из резисторов, размещенных на учебной плате – ***рис.4***. Установленные на плате кнопки в нормальном положении ***замкнуты***. При нажатии они ***размыкают*** соответствующий участок цепи, что дает возможность измерить силу тока, подключив в разрыв амперметр.
Клеммы **А** и **В** подключают соединительными проводами к источнику постоянного тока, напряжение которого можно установить в пределах 1÷25 В. При подсоединении к клеммам **А** и **В** источник должен быть выключен, а ручки регулировки установлены в крайнее положение, соответствующее минимуму выходного напряжения. После этого источник включают, а по вольтметру, подключенному к клеммам А-В, устанавливают заданное напряжение. **Все измерения необходимо выполнить для одного напряжения источника, заданного преподавателем, которое нужно записать.**

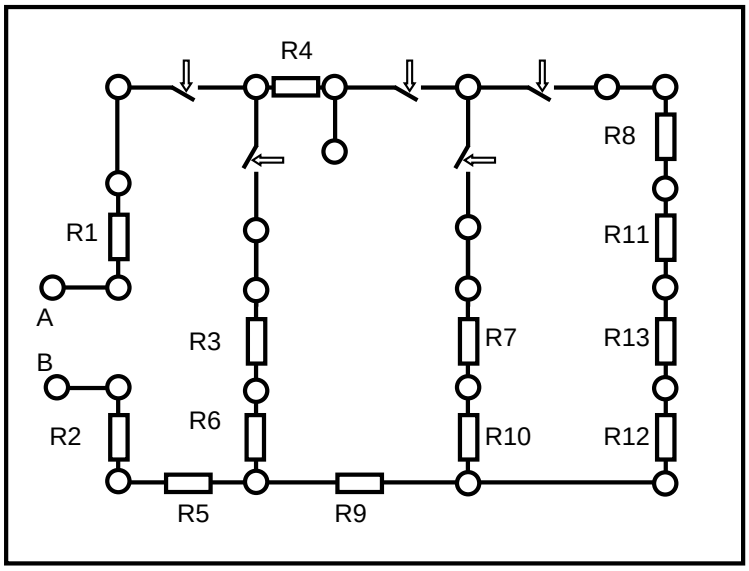


Рис. 4*. Схема блока резисторов.*

Измерения проводятся для резисторов, номера которых задаются преподавателем (3 - 5 резисторов).
Вольтметр поочередно подключают параллельно каждому резистору. Каждое измерение выполняют один раз и определяют погрешность измерения, учитывая класс точности прибора и погрешность считывания.
Все результаты измерений следует оформить в виде таблицы.

Таблица 1. Измерение сила тока и напряжения на заданном резисторе, расчет его сопротивления. ***Плата № … . Напряжение питания U =… .***

N	*Упр.1.*				*Упр.2.*				R, Ом	ΔR, Ом
	U, В	$\Delta_{приб}$,В	$\Delta_{счит}$,В	Δ_U,В	I, А	$\Delta_{пр}$,А	$\Delta_{сч}$,А	Δ_I,А		
R5										
R7										
…										

Упражнение 2. Измерение силы тока в различных участках цепи

НЕ МЕНЯЯ напряжение на источнике питания, измерьте силу тока на тех же резисторах, что и при выполнении первого упражнения. В качестве измерительного прибора применяется комбинированный прибор, включаемый в режиме измерения силы постоянного тока.

Для измерения силы тока в последовательном участке цепи нужно подключить амперметр параллельно кнопке, размыкающую данную цепь, и нажать на кнопку. Амперметр не обязательно подключать рядом с измеряемым резистором, он может быть в любом месте последовательной цепи, в которую входит данный резистор.

Во избежание выхода из строя стрелочного прибора необходимо внимательно следить за соблюдением полярности его подключения и за выбором пределов измерений. Начинать измерения нужно с самого грубого диапазона.

Результаты всех измерений заносят в указанную выше таблицу. По результатам измерений, полученным в первом и втором упражнении, рассчитывают сопротивления заданных резисторов с оценкой погрешностей измерения.

Упражнение 3. Одновременное измерение напряжения и силы тока

В этом упражнении измерения проводятся на тех же резисторах, НЕ МЕНЯЯ напряжение на источнике питания. Вольтметр и амперметр к измеряемому резистору нужно подключить ***одновременно*** согласно варианту, показанному на ***рис.3а***. По измеренным значениям *U* и *I* рассчитываются сопротивления данных резисторов с оценкой погрешностей. Результаты нужно занести в таблицу, аналогичную первой.

Поскольку используемый в задаче амперметр имеет сопротивление, сравнимое с сопротивлением некоторых резисторов, его подключение может заметно изменить распределение токов и напряжений на элементах платы, и результаты измерений и расчета сопротивлений будут отличаться от полученных выше в упражнениях 1-2.

Упражнение 4. Измерение вольтамперной характеристики резистора для расчета сопротивления методом МНК.

Вольтамперной характеристикой (*ВАХ*) элемента называется зависимость тока от напряжения или напряжения от тока на данном элементе.
Для резистора вольтамперная характеристика – прямая линия, по углу наклона которой можно определить сопротивление резистора.
Рассчитывая значения сопротивлений резистора по измерениям силы тока и напряжения, мы ограничены точностью приборов. Чтобы улучшить точность результата, используя те же приборы, можно провести совместные измерения (силы тока и напряжения) при разных напряжениях питания в цепи и рассчитать сопротивление, используя **Метод Наименьших Квадратов** – **МНК** [4].

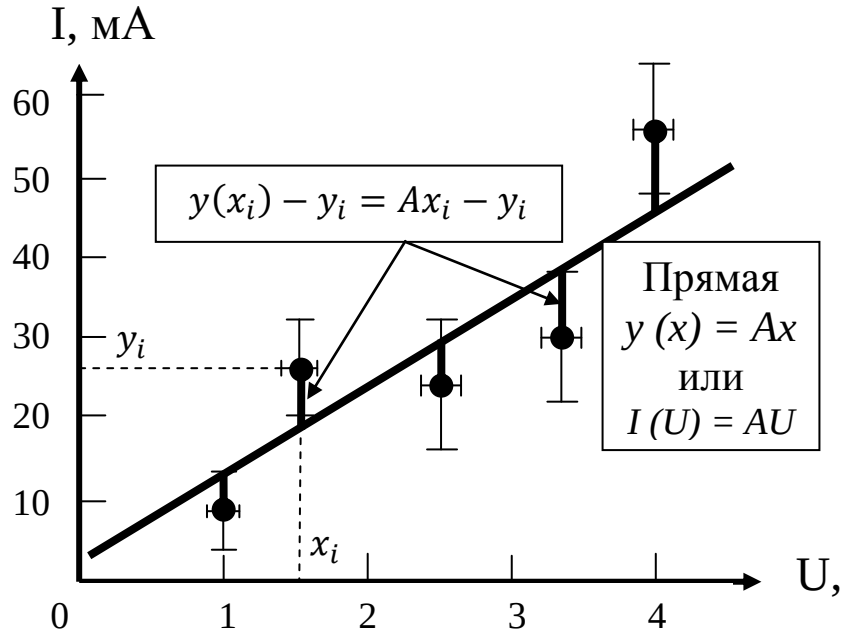


Рис.5*. Построение прямой методом наименьших квадратов.*

Собрать схему для одновременного измерения силы тока и напряжения для одного из резисторов из упражнения 1- 3 (резистор задает преподаватель или выбираете самостоятельно).
Регулируя напряжение питания от 0 до 20 – 25 В снять 10 - 12 точек зависимости силы тока от напряжения на резисторе. Занести в таблицу измеренные значения *I* и *U* (с погрешностями уже полными).
Построим график зависимости *I (U)* ***(рис.5)***. Нанесите на график экспериментальные точки с погрешностями. Суть метода МНК в том, что провести прямую через эти точки надо так, чтобы сумма квадратов длин отрезков от экспериментальных точек до прямой была минимальна. Прямая линия описывается уравнением $y\,(x) = Ax + B$ или в нашем, частном

случае, *I (U) = AU*. Для того, чтобы найти угол наклона прямой (и из него вычислить сопротивление резистора), составим функционал из суммы квадратов длин отрезков от экспериментальных точек до прямой с учетом погрешностей:

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{(Ax_i - y_i)^2}{\sigma_i^2}$$

Из условия минимума этого функционала по параметру *A* получим (дифференцируем функционал по параметру *A*, производную приравниваем к «0»):

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{x_i{}^2}{\sigma_i^2}} \quad (1)$$

Параметр *A* – это косвенно измеренная величина (через прямо измеренные величины $\{y_i\}$ с погрешностями $\{\sigma_i\}$). Найдем погрешность параметра *A* по формуле косвенных измерений, получим:

$$(\Delta A)^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} \frac{x_i{}^2}{\sigma_i^2}} \quad (2)$$

Постройте график зависимости *I*(*U*) методом МНК; определите сопротивление резистора, сравните с полученными ранее результатами.
Замечание. МНК применим, когда величина *X* измерена точно (погрешность по независимой переменной *X* пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью по *Y)*. В данной задаче можно подобрать на большинстве резисторов такие диапазоны изменений *I* и *U*, что это условие можно выполнить. Измерения напряжения действительно проводятся несколько более точным прибором. Кроме того, регулируя напряжение питания, вы будете *выставлять* значения напряжений и исключите погрешность считывания.

Упражнение 5. Измерение вольтамперной характеристики нелинейного элемента

ВАХ является основной характеристикой нелинейного элемента, необходимой для описания его работы в электрических цепях. Измерения *ВАХ* можно проводить как на постоянном токе, так и на переменном токе, т.е. в динамическом режиме. В данном упражнении измеряется *ВАХ* полупроводникового *p/n* перехода на постоянном токе.
Типичная ВАХ полупроводниковых элементов с одним *p/n* переходом представлена на ***рис. 6*** (краткие сведения о некоторых полупроводниковых элементах можно получить в [3], но это не обязательно, для выполнения задачи достаточно информации, приведенной ниже).

Полупроводниковые выпрямительные ***диоды*** работают на прямой и обратной ветках ВАХ до пробоя: пропускают ток только в одном направлении. Пробой вызывает необратимые разрушения.

В отличие от обычного выпрямительного диода, ***стабилитрон*** не разрушаясь, работает в режиме электрического пробоя (если ток через него не превышает допустимых значений).

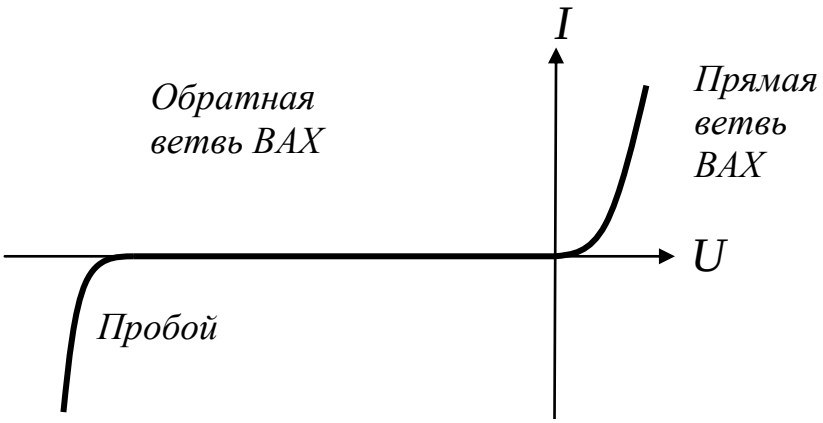


Рис. 6*. Типичная характеристика полупроводникового элемента с одним p|n переходом*

Светодиоды работают в прямом режиме. Напряжения пробоя у них небольшие (единицы Вольт). При кратковременном единичном включении в обратной полярности небольшого напряжения свойства светодиода после пробоя могут восстановиться, а могут вызывать и необратимые разрушения. Поэтому необходимо соблюдать полярность подключения светодиода или для безопасности работы параллельно, навстречу ему, подключать диод (например, при работе с переменным током).

В упражнении проводятся измерения ВАХ на двух светодиодах: для того, чтобы не работать на обратной ветви ВАХ (в целях безопасности светодиода) используются два светодиода (в некоторых вариантах эти два светодиода смонтированы внутри корпуса), подключенных параллельно, навстречу друг другу.

Поскольку у полупроводниковых элементов с *p/n* переходом нелинейная зависимость силы тока от напряжения, для них не указывают значение рабочего напряжения: небольшое изменение напряжения может вызвать значительное (в десятки раз) изменение тока. Для светодиодов указывают рабочий и предельно допустимый токи. Для светодиодов **предельно допустимый ток** обычно не превышает 10 – 20 мА (в данной задаче **10 мА**).

Собрать схему для измерения ВАХ (***рис. 7***).

Дополнительный резистор *R*, включенный последовательно со светодиодами, необходим для

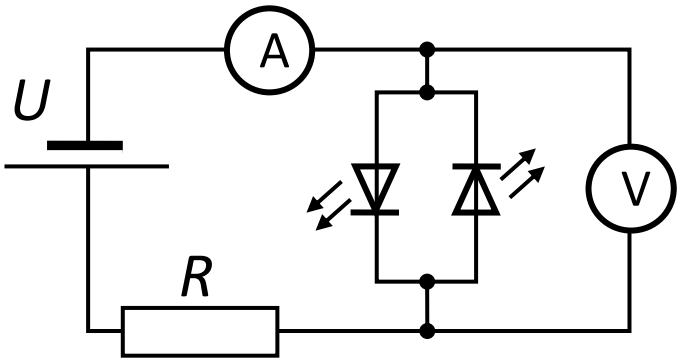


Рис . 7. *Схема для измерения вольтамперной характеристики светодиода.*

ограничения максимального тока и подобран таким, чтобы можно было подавать на схему любое напряжение от –25 до +25 В. При непосредственном подключении светодиода к источнику тока он может сгореть. Наличие такого ограничительного сопротивления, как правило, обязательно при включении в цепь любых нелинейных элементов, способных к резким скачкам тока.

Измерение ВАХ состоит в регистрации тока $I(U)$ и напряжения U на светодиоде, при изменении напряжения с блока питания, приблизительно в пределах (–20 … +20) В. Чтобы не превысить **предельно допустимый ток на светодиоде – 10 мА**, напряжение питания будем регулировать, **устанавливая ток** в цепи от 0 до 10 мА с шагом 0,1- 1 мА (выбирается из условия четкого представления хода *ВАХ* во всех ее участках).

При построении графика нужно выбрать наиболее удобный масштаб. На графике нужно изобразить интервалы погрешностей экспериментальных точек.

Оформление упражнения включает: схему измерения, ***номер платы***, таблицу данных, расчетные формулы, график.

Примерные вопросы к допуску и сдаче задачи

- *Системы стрелочных измерительных приборов [1]*
- *Условные обозначения на стрелочных измерительных приборах разных систем [2]*
- *Влияние собственных сопротивлений амперметра и вольтметра на точность измерений силы тока и напряжений.*
- *Почему в упражнении 3 вольтметр и амперметр рекомендуется подключить к измеряемому резистору по варианту Рис.3а?*
- *Для какой части вольтамперной характеристики диода вольтметр и амперметр лучше подключать по варианту Рис.3а и Рис.3б?*
- *Как оценить погрешности измерений стрелочными приборами?*
- *Проведите полные выкладки формул (1) и (2) МНК.*
- *Что такое коэффициент взаимной корреляции ([4], с. 32)?*

Литература

1. Д.А. Соболев, «Введение в технику физического эксперимента» 1993 г. Изд. МГУ: §3,4,5,8,9,10;
2. там же; Приложение, табл. I-IV (с.164-167).
3. там же; § 25.
4. И.В. Митин, В.С. Русаков. Анализ и обработка экспериментальных данных. 2002г. Изд. МГУ: V. Обработка результатов совместных измерений.