

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И
НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра метрологии, стандартизации и сертификации

В.А. НИКИТИН
В.А. ЛУКОЯНОВ

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ МОСТАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2009

УДК 621.317.733(07)
ББК 31.221я7
Н 62

Рецензент

кандидат технических наук, доцент А. Л. Воробьев

Никитин, В. А.

Н62 Измерение параметров электрических цепей мостами постоянного тока: методические указания. / В. А. Никитин, В.А. Лукоянов
Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 31 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторно-практических работ по курсу «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» для студентов второго и третьего курса по специальностям 220301, 151001, 151002, 200503, 190601, 190603, 190702.

В методических указаниях изложен материал, позволяющий произвести расчет среднеквадратического отклонения и доверительной границы неисклученной систематической погрешности при измерении параметров электрической цепи мостом постоянного тока. Приведен требуемый для понимания рассматриваемых вопросов минимум теоретического материала, справочно–нормативные данные по параметрам электрических цепей.

ББК 31.221я7

© Никитин В.А.,
Лукоянов В.А. 2009
© ГОУ ОГУ, 2009

Содержание

Введение.....	4
1 Цель работы.....	5
2 Методы измерения сопротивления на постоянном токе.....	5
2.1 Прямые измерения.....	5
2.1 Косвенные измерения.....	8
3 Общие положения.....	8
4 Особенности поверки мостов постоянного тока.....	14
5 Мост постоянного тока типа Р333.....	17
5.1 Технические данные.....	17
5.2 Комплектность.....	18
5.3 Устройство и работа прибора.....	18
5.4 Меры безопасности.....	21
6 Порядок выполнения измерений.....	22
6.1 Измерения сопротивлений от 10 до 999900 Ом.....	22
6.2 Измерения сопротивлений от 9,999 до 0,005 Ом.....	23
7 Контрольные вопросы.....	24
8 Варианты для выполнения лабораторной работы.....	25
Список использованных источников.....	26
Приложение А Пример отчёта по лабораторной работе.....	27
Приложение Б Основные неисправности моста Р333 и методы их устранения.....	30

Введение

С процессами измерения в настоящее время имеет дело любой человек. Даже современный быт заполнен приборами и измерениями. А про технику говорить вообще не приходится, измерительный прибор главная часть любого производства, а измерение – важнейшая часть почти любой работы.

В современных условиях получение достоверной измерительной информации имеет важнейшее значение во всех отраслях народного хозяйства и в значительной степени предопределяет прогресс науки и техники. Качество готового изделия определяется качеством использованных в нем материалов, степенью соблюдения технологических режимов изготовления деталей и узлов, качеством сборки. На всех этих этапах неотъемлемой частью производства выступает метрологическое обеспечение. Измерения играют решающую роль в системе управления качеством продукции.

В данном методическом указании рассмотрены устройство и принцип работы моста постоянного тока для измерения параметров электрических цепей.

1 Цель работы

Ознакомиться с методами измерения сопротивлений на постоянном токе, устройством и принципом работы моста постоянного тока, правилами эксплуатации, методами определения параметров электрических цепей, а также с методами вычисления погрешностей измерений.

2 Методы измерения сопротивления на постоянном токе

Диапазон измеряемых в настоящее время сопротивлений достаточно широк (от 10^{-8} до 10^{17} Ом) и имеет тенденцию к дальнейшему расширению. Для измерений в столь широком диапазоне применяют самые разнообразные средства измерений, позволяющие прямо или косвенно находить значения неизвестных сопротивлений. Выбор средств и способов измерений в значительной мере зависит как от значений сопротивлений, так и от требуемой точности, условий измерений и других факторов. Особенности измерений сопротивлений в различных диапазонах обусловили существенное различие в достигнутой точности измерений. Так, если в диапазоне $1-10^6$ Ом относительная погрешность может составлять тысячные доли процента, то при измерении малых и больших сопротивлений она увеличивается до единиц процентов и более. Методы измерения сопротивлений можно условно разделить на прямые и косвенные.

2.1 Прямые измерения

К числу прямых методов измерения сопротивлений относятся измерения мостами постоянного тока, измерения электронными и магнитоэлектрическими омметрами.

При измерениях, когда не требуется высокой точности, применяют электронные и магнитоэлектрические омметры, выпускаемые в виде отдельных приборов, например Е6-10 или М371, или в составе комбинированных универсальных приборов, например В7-26, Щ4380, предназначенных для измерений токов и напряжений. Наиболее точные из этих приборов имеют классы точности 1,0-1,5. Следует иметь в виду, что такие омметры часто имеют неравномерную шкалу с диапазоном показаний от нуля до бесконечности Ом. Погрешности в таких приборах устанавливаются в процентах от длины шкалы.

Магнитоэлектрические омметры. На основе магнитоэлектрического измерительного механизма выпускают магнитоэлектрические омметры с последовательным включением механизма и объекта исследования.

При последовательном включении измерительного механизма и исследуемого объекта с измеряемым сопротивлением R_x угол отклонения подвижной части измерительного механизма:

$$\alpha = S_1 \cdot U / (R + R_x), \quad (1)$$

где $S_1 = Bs\omega/W$ - чувствительность измерительного механизма к току;

U - напряжение источника питания.

Как видно, при постоянном напряжении угол отклонения определяется значением R_x .

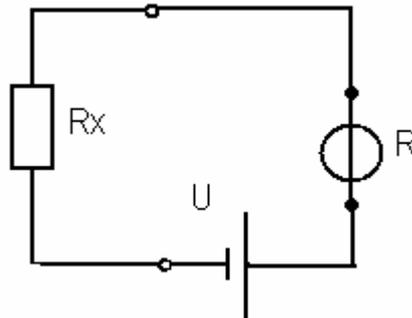


Рисунок 1- Схема омметра с последовательным включением измерительного механизма

Из выражения (1) видно, что шкалы омметров неравномерны. При последовательном включении максимальному углу отклонения подвижной части соответствует нулевое значение измеряемого сопротивления. Омметры с последовательным включением измерительного механизма и исследуемого объекта более пригодны для измерения больших сопротивлений.

Электронные омметры. Эти приборы имеют широкий диапазон измеряемых сопротивлений и достаточно просты в эксплуатации. Точность таких омметров, как правило, невысока: приведенная погрешность составляет единицы процентов и увеличивается до 10-15 % при измерении особо больших сопротивлений ($R > 10^{12}$ Ом). В основе работы электронных омметров лежит преобразование измеряемого сопротивления в функционально связанное с ним напряжение постоянного тока, которое подается на магнитоэлектрический измерительный механизм; при этом шкала измерительного механизма градуируется в единицах сопротивления. Наибольшее распространение получила схема омметра, изображенная на рисунке (2), где ИСН- источник стабильного напряжения, УПТ- усилитель постоянного тока, ИМ- измерительный механизм, R_x - измеряемое сопротивление, R_0 - известное сопротивление, U_x - напряжение, функционально связанное с измеряемым сопротивлением R_x .

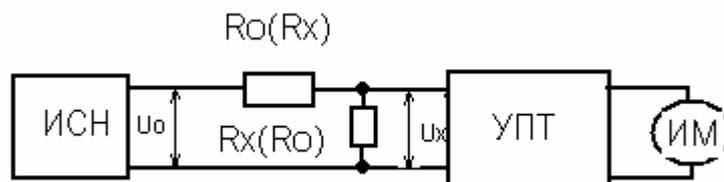


Рисунок 2- Функциональная схема электронного омметра с усилителем постоянного тока

В омметрах построенных по данной схеме, используется усилитель постоянного тока (УПТ) с большим входным сопротивлением. Поэтому пренебрегая шунтирующим влиянием, имеем

$$\alpha = k \cdot U_x = k \cdot U_0 R_x / (R_0 + R_x) \quad (2)$$

где α - угол отклонения подвижной части измерительного механизма; k - коэффициент преобразования усилителя постоянного тока и измерительного механизма. Для повышения точности отсчитывания весь диапазон измерений омметра разбивают на поддиапазоны, каждому из которых соответствует свое значение сопротивления R_0 . Этим достигается изменение цены деления шкалы для одних и тех же значений измеряемых сопротивлений R_x . Переключением R_0 выбирают наиболее удобную шкалу для отсчитывания показаний в требуемом диапазоне измерений.

Для уменьшения погрешности измерений, вызванных нестабильностью работы отдельных узлов, особенно усилителя постоянного тока УПТ, в таких омметрах предусматривают регулировки «Установка нуля» при замкнутых входных зажимах ($R_x = 0$) и «Установка ∞ » при разомкнутых зажимах ($R_x \rightarrow \infty$). Эти регулировки осуществляют путем изменения коэффициента преобразования усилителя и установки «нуля» его выходного сигнала.

Измерение малых сопротивлений. Сопротивления в диапазонах от единиц Ом до 10^{-8} Ом измеряют двойными и одинарными мостами постоянного тока. При измерении таких сопротивлений существенное влияние на результат измерения оказывают сопротивления контактов и подводящих проводов, а также контактная термо-ЭДС. Для уменьшения этого влияния применяют четырехзажимную схему подключения исследуемого объекта к приборам, а измерения производят при разных направлениях постоянного тока (в мостах). При измерении очень малых сопротивлений для обеспечения необходимой чувствительности моста требуется через исследуемый объект пропускать большие токи. Так, при измерении мостом Р 3009 в диапазоне 10^{-8} - 10^{-6} Ом питание моста осуществляется током 200 А, при измерении сопротивлений 10^{-6} - 10^{-5} Ом - 15А. Это ограничивает область его применения.

Измерение больших сопротивлений. При измерении сопротивлений, больших 10^6 - 10^8 Ом, применяют одинарные мосты постоянного тока. Сложность измерения больших сопротивлений определяется прежде всего шунтирующим влиянием сопротивления изоляции между входными зажимами приборов, которое при изготовлении и дестабилизирующем влиянии внешних факторов (температура, влажность, загрязнение) не может быть обеспечено постоянным. Кроме того, токи, притекающие через объекты с большим сопротивлением, становятся весьма малыми, что предъявляет высокие требования к чувствительности средств измерений. В связи с этим приходится повышать напряжение на исследуемом объектом до сотен и даже тысяч вольт.

2.1 Косвенные измерения

Наиболее распространенным и чаще применимым косвенным методом измерения сопротивления является способ амперметра и вольтметра. Этот способ может применяться для измерения различных по значению сопротивлений. Достоинство этого способа заключается в том, что через резистор можно пропускать такой же ток, как и ток, протекающий через объект в рабочих условиях, что важно при измерении нелинейных сопротивлений, т.е. таких сопротивлений, значения которых зависят от тока. Значение сопротивления можно определить по закону Ома. Однако при этом возникает погрешность за счет шунтирующего влияния вольтметра и внутреннего сопротивления амперметра.

Метод амперметра и вольтметра может быть использован и для измерения очень больших сопротивлений, например сопротивлений изолирующих материалов.

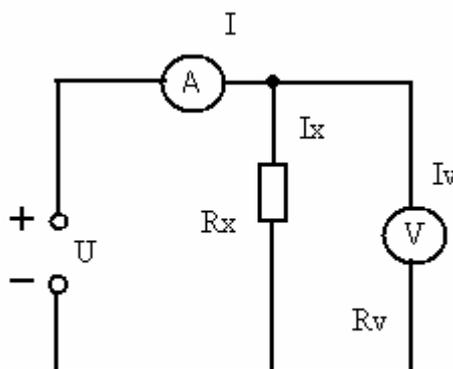


Рисунок 3- Схема измерения сопротивления способом амперметра-вольтметра

3 Общие положения о мостах постоянного тока

Одним из наиболее эффективных средств измерений параметров электрических цепей являются мосты постоянного и переменного тока. Широко применяются они и в поверочных лабораториях в качестве образцовых средств при поверке мер электрических величин. Выпускаемые промышленностью мосты позволяют измерять сопротивления, емкости, индуктивности и связанные с ними параметры: постоянные времени катушек сопротивления, добротности катушек индуктивности, тангенсы угла потерь конденсаторов с погрешностью от единиц до тысячных долей процента.

Принципиальная схема любого моста может быть представлена в виде эквивалентной схемы, состоящей из четырех последовательно включенных сопротивлений $Z_1 - Z_4$, образующих замкнутый четырехугольник (Рисунок 4).

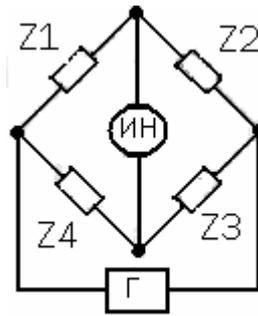


Рисунок 4- Принципиальная схема моста

Ветви, включающие в себя эти сопротивления, называются плечами моста. Мост имеет две диагонали, в одну из которых включен источник питания Г- диагональ питания, а в другую- индикатор нуля ИИ- измерительная диагональ. Реальная схема моста может состоять из большего числа плеч, иметь большее число сопротивлений и более сложный вид.

Как известно, ток в измерительной диагонали моста равен нулю, когда произведение сопротивлений противолежащих плеч равны между собой:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad (3)$$

Если в одно из плеч моста, например Z_4 , включено неизвестное сопротивление, то, изменяя сопротивления других плеч, можно добиться отсутствия тока в измерительной диагонали и, зная сопротивления плеч $Z_1 - Z_3$, рассчитать значение неизвестного сопротивления.

В качестве индикаторов тока в мостах постоянного тока применяют на постоянном токе магнитоэлектрические гальванометры и чувствительные микроамперметры и микровольтметры.

Поскольку на постоянном токе реактивные параметры не влияют на работу цепи, вместо $Z_1 - Z_4$ можно подставить сопротивления постоянному току $R_1 - R_4$ и получить условие равновесия моста постоянного тока. Если неизвестное сопротивление включено в четвертое плечо, то его значение

$$R_x = R_1 \frac{R_3}{R_2} \quad (4)$$

Таким образом, при измерении одинарным мостом для получения результата необходимо знать сопротивление плеча R_1 (плечо сравнения) и отношение сопротивлений R_3 и R_2 (плечи отношения).

Плечо сравнения выполняют в виде рычажного магазина сопротивлений. Плечи отношений представляют собой набор резисторов, которые при помощи переключателя могут быть включены в различных сочетаниях. Номинальное значение отношения R_3/R_2 равно 10^n (n - положительное или отрицательное число).

Одинарные мосты применяют при измерении сопротивлений от десятков Ом и выше. При измерении малых сопротивлений одинарным мостом появляются большие погрешности вследствие влияния сопротивления соединительных проводов и переходных сопротивлений контактов.

или одним числом c . Многодиапазонные мосты на разных поддиапазонах могут иметь разные классы точности. Предел допускаемой основной погрешности мостов (в процентах) выражается формулой:

$$\delta_{\text{дон}} = \pm \left[c + d \left(\frac{R_K}{R} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

где c и d - постоянные коэффициенты, численно равные числителю и знаменателю в обозначении класса точности;

R_K - верхний предел измерения на данном поддиапазоне, Ом;

R - значение измеряемого сопротивления, Ом.

При $d < 0,01c$ предел допускаемой основной погрешности:

$$\delta_{\text{дон}} = c \quad (8)$$

Значение c может быть от 0,001 до 10, значение d должно удовлетворять условию $0,01c \leq d \leq 0,1c$.

На основную погрешность моста влияет ряд факторов: погрешность резисторов плеча сравнения, погрешности резисторов плеч отношений, сопротивления соединительных проводов и контактов, наличие токов утечки, электрических и магнитных полей, недостаточная чувствительность гальванометра и самой мостовой цепи.

Под чувствительностью моста понимают отношение изменения показаний указателя равновесия моста к вызвавшему его изменению сопротивления регулируемого плеча:

$$S = \Delta\alpha / \Delta R \quad (9)$$

Если мостовая цепь малочувствительна, то заметное отклонение указателя при нарушении равновесия получается лишь при значительном отклонении регулируемого сопротивления от значения, соответствующего равновесию моста. Вследствие этого при уравнивании моста не удастся установить точного значения этого сопротивления, что влечет за собой появление погрешностей. Очевидно, что эти погрешности будут тем больше, чем меньше чувствительность моста.

Существует три способа повышения чувствительности мостовых цепей: увеличение напряжения источника питания, подбор оптимальных параметров элементов мостовой цепи, повышение чувствительности указателя равновесия.

Первый способ ограничен предельными значениями тока или напряжения, на которые рассчитаны элементы цепи. Второй способ учитывается на стадии конструирования моста. Одно из условий получения большой чувствительности состоит в том, чтобы сопротивления плеч моста по обе стороны измерительной диагонали были близки по значению. Третий способ заключается в применении электронных указателей равновесия, обладающих высокой чувствительностью.

Стандартом установлено, что чувствительность нулевого указателя, встроенного в мост, должна быть такой, чтобы изменение сопротивления регулируемого плеча или отношения плеч на значение, равное пределу

основной допускаемой погрешности при минимальном напряжении питания, установленном для данного моста, вызывало отклонение указателя не менее чем на одно деление шкалы. Этим же требованием можно руководствоваться при выборе нулевого указателя для указателя моста, в который он не встроен.

Основные технические данные некоторых мостов постоянного тока, применяемых в поверочных лабораториях, приведены в таблице 1.

Таблица 1- Основные технические данные мостов постоянного тока

Тип моста	Диапазон измерений, Ом	Класс точности	Число декад	Конструктивные особенности
1	2	3	4	5
P369	$10^{-4} - 10^{-3}$	1,0	6	Одинарный мост с автономной поверкой. Измерения проводятся по 2- и 4-зажимной схемам. Основные узлы моста термостатированы. Питание моста осуществляется от сети переменного тока. Мост выполнен в виде отдельных блоков: измерительного, питания, автокомпенсатора напряжения(индикатора нуля) и усилителя
	$10^{-3} - 10^{-2}$	0,1		
	$10^{-2} - 10^{-1}$	0,05		
	$10^{-1} - 1$	0,02		
	$1 - 10^6$	0,005		
	$10^6 - 10^7$	0,01		
	$10^7 - 10^8$	0,02		
	$10^8 - 10^9$	0,2		
	$10^9 - 10^{10}$	2,0		
P3009	$10^{-8} - 10^{-7}$	2,0	6	Одинарно-двойной мост с поэлементной подстройкой и поверкой. Измерения проводятся по 2- и 4-зажимной схемам. Мост состоит из измерительного блока, автокомпенсатора и усилителя. Источник питания измерительной цепи в состав моста не входит.
	$10^{-7} - 10^{-6}$	0,2		
	$10^{-6} - 10^{-5}$	0,2		
	$10^{-5} - 10^{-4}$	0,05		
	$10^{-4} - 10^{-2}$	0,02		
	$10^{-2} - 10^2$	0,01		
	$10^2 - 10^8$	0,02		
	$10^8 - 10^9$	0,5		
	$10^9 - 10^{10}$	1,0		
P39	$10^{-8} - 10^{-7}$	2,0	6	Одинарно-двойной мост с поэлементной подстройкой и поверкой. Измерения проводятся по 2- и 4-зажимной схемам. Мост рассчитан на стабилизированное питание постоянным током от 1 до 50 В. В качестве нуль-индикатора применяется микровольтнаноамперметр P325.
	$10^{-7} - 10^{-5}$	0,2		
	$10^{-5} - 10^{-4}$	0,05		
	$10^{-4} - 10^{-2}$	0,02		
	$10^{-2} - 10^2$	0,01		
	$10^2 - 10^8$	0,02		

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
МОД-61	$10^{-8} - 10^{-7}$ $10^{-7} - 10^{-6}$ $10^{-6} - 10^{-5}$ $10^{-5} - 10^{-8}$	1,0 0,2 0,1 0,05	7	Одинарный мост с питанием от сети переменного тока. Измерения могут проводиться по 2- и 4-зажимной схемам.
P4053	$10^{-8} - 10^{-7}$ $10^{-7} - 10^{-5}$ $10^{-5} - 10^{-4}$ $10^{-4} - 10^{-2}$ $10^{-2} - 10^2$ $10^2 - 10^8$	2,0 0,05 0,1 0,5 2,0 10,0	5	Одинарный мост постоянного тока с встроенным нуль-индикатором и питанием от сети переменного тока.
P4060	$10^{-1} - 10^{-1}$ 1-10 $10 - 10^{10}$ $10^{11} - 10^{12}$ $10^{12} - 10^{12}$	1,0 0,5 0,05 0,5 5,0	5	Одинарный мост постоянного тока с встроенным нуль-индикатором и питанием от сети переменного тока.
P4056	$10^{-2} - 10^{-1}$ $10^{-1} - 1$ 1-10 $10 - 10^2$ $10^2 - 10^{-9}$ $10^9 - 10^{10}$ $10^{10} - 10^{12}$ $10^{12} - 10^{13}$ $10^{13} - 10^{14}$ $10^{14} - 10^{15}$	5,0 0,5 0,05 0,02 0,02 0,05 1,0 2,0 10,0	5	Одинарный мост постоянного тока с питанием от сети переменного тока и отдельным нулевым индикатором. Позволяет измерять как абсолютное значение сопротивления, так и относительное отклонение сопротивления от номинального, а также малые напряжения (от 10^{-4} до 10 В) и токи (от 10^{-13} до 10^{-7} А)

На основе мостов постоянного тока созданы поверочные установки, служащие для поверки приборов сопротивления. Эти установки позволяют производить комплектную и поэлементную поверку магазинов сопротивления, поэлементную поверку мостов и потенциометров постоянного тока.

4 Особенности поверки мостов постоянного тока

Поверка моста производится по ГОСТ 8.449-81. Поверка мостов постоянного тока включает в себя следующие операции: внешний осмотр, проверку электрической прочности и сопротивления изоляции, опробование, поверку параметров встроенного указателя равновесия, определение основной погрешности моста.

Методика поверки моста зависит от его точности, конструкции, диапазона измерений. Мосты невысокого класса точности (0,1 и хуже) с магнитоэлектрическим указателем равновесия поверяют комплектно; более точные мосты подвергают поэлементной поверке; мосты классов точности 0,01 и выше имеют устройства для автономной поверки. Заметим, что комплектная поверка не позволяет определить поправки к показаниям моста.

При опробовании проверяют исправность и плавную работу всех переключателей, наличие и исправность съемных частей, плавность хода органов регулировки, работу механического корректора встроенного указателя равновесия, а также возможность уравнивания моста на всех поддиапазонах. С последней операцией целесообразно совместить проверку чувствительности встроенного указателя равновесия, хотя это не совсем точное название, поскольку проверяется чувствительность моста в целом. И если чувствительность указателя не зависит от значения измеряемого сопротивления, то чувствительность измерительной цепи, а следовательно, и всего моста в разных точках диапазона будет различной. Поэтому проверку чувствительности выполняют на нижней и верхней границах каждого поддиапазона измерений. Для этого к мосту подключают поочередно резисторы с сопротивлением, близким к проверяемым значениям. При минимальном нормированном напряжении питания производят уравнивание моста, после чего изменяют сопротивление плеча сравнения (на значение равное пределу допускаемой основной погрешности). Отклонение указателя равновесия моста должно быть при этом не менее одного деления. Рассмотренная методика определения чувствительности применима в тех случаях, когда у встроенного указателя не нормирована погрешность.

В наиболее точных мостах указателем равновесия служит микровольтметр или микроамперметр с электронным (или иным) усилителем. Эти приборы позволяют не только установить наличие тока (напряжения) в измерительной диагонали моста, но и измерить его значение с нормированной погрешностью. Такие указатели следует рассматривать как микровольтметр и микроамперметр и поверять в соответствии с правилами поверки амперметров и вольтметров.

Определение основной погрешности моста может быть произведено комплектно и поэлементно.

Комплектный метод является предпочтительным, поскольку поверка при этом максимально приближена к условиям эксплуатации, позволяет сразу выявить все недостатки моста, повышает производительность. Однако этот

метод не дает возможности определить поправки ко всем показаниям поверяемого моста. Сущность метода заключается в измерении поверяемым мостом образцовых мер сопротивления. Образцовый магазин сопротивлений подключают к поверяемому мосту. На диапазоне, выбранном за основной, последовательно устанавливают все основные отсчеты и производят уравнивание моста изменением сопротивления образцового магазина, по показаниям которого и отсчитывают действительные значения измеряемого сопротивления.

Основным называют диапазон, на котором погрешность определяют для всех значений плеча сравнения. Диапазон, выбранный за основной, должен удовлетворять следующим требованиям: должен иметь наименьшую для данного моста нормированную погрешность; сопротивления плеч отношения основного диапазона должны быть не менее 10 Ом для мостов с пределом допускаемой основной погрешности 0,05 % и не менее 1 Ом для всех остальных мостов (эти значения плеч отношения также называют основными); имеющиеся образцовые меры сопротивления должны позволять определить погрешности для всех значений плеча сравнения на основном диапазоне (для наиболее распространенных мостов за основной обычно принимают диапазон с пределами измерений от 0,1 до 10 000 Ом).

Выбор проверяемых показаний в мостах постоянного тока имеет свои особенности. Определение погрешности каждого показания каждой декады в отдельности при нулевых показаниях остальных декад невозможно, так как при нулевых показаниях старших декад существенно уменьшается чувствительность моста, и проверяемое показание может вообще оказаться вне диапазона, в котором нормирована погрешность. Поэтому погрешность старших декад плеча сравнения определяют для каждого отсчета в отдельности - эти отсчеты называют основными, младшие декады проверяют в сочетании с наименьшим из основных отсчетов - эти отсчеты называют неосновными.

Определение погрешности комплектным методом выполняется не всегда из-за отсутствия регулируемых мер сопротивления. Особенно трудно применить этот метод при проверке четырехзахжимных и двойных мостов, т.е. мостов, предназначенных для измерения малых сопротивлений. В этих случаях применяют поэлементный метод проверки.

Поэлементный метод определения погрешности заключается в измерении при помощи образцового моста или потенциометра сопротивлений отдельных резисторов, составляющих поверяемый мост. По результатам этих измерений расчетным путем определяют погрешность моста.

Методика измерения поэлементным методом идентична с проверкой магазинов сопротивлений. После определения действительных значений сопротивлений плеч вычисляют их относительные погрешности: δ_1 - погрешность плеча сравнения, δ_2 и δ_3 - погрешность плеч отношения.

Общую относительную погрешность δ поверяемого моста вычисляют по формулам:

для одинарного моста-

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 - \delta_3 \quad (10)$$

при этом значения δ_1, δ_2 и δ_3 берут такими, чтобы получить максимальное значение δ ;

для одинарного моста, у которого определена погрешность плеч отношения $\delta_{2,3}$ -

$$\delta = \delta_1 + \delta_{2,3} \quad (11)$$

при этом значения δ_1 и $\delta_{2,3}$ следует брать такими, какие рекомендованы инструкцией по использованию поверяемого моста и соответствуют диапазону измерений моста;

для двойного моста:

$$\delta = \delta_0 + (\delta_1 + \delta_2) + k[(\delta_1 - \delta_1') - (\delta_2 - \delta_2')] \quad (12)$$

где δ_0 - относительная погрешность образцовой катушки сопротивления; $\delta_1, \delta_2, \delta_1', \delta_2'$ - относительная погрешность плеч R_1, R_2, R_1', R_2' соответственно;

$$k = r / (R_0 + R_x) \quad (13)$$

- отношение сопротивления перемычки к сумме образцового и измеряемого сопротивлений.

Следует иметь в виду, что технической документацией нормируется, помимо общей погрешности моста, погрешности отдельных плеч. Для мостов, находящихся в эксплуатации и выпускаемых из ремонта, предел допускаемой погрешности отдельных увеличивается вдвое по сравнению с нормируемым значением при выпуске из производства. Однако и при этом результирующая погрешность моста не должна превышать допускаемой для данного класса точности.

Как комплектный, так и поэлементный методы поверки имеют свои достоинства и недостатки. Комплектный метод, как правило, не позволяет определить погрешности на малых пределах измерений. Поэлементный метод отличается трудоемкостью. Поэтому в практике поверки мостов используют сочетание этих двух методов.

5 Мост постоянного тока типа Р333

5.1 Технические данные

Мост постоянного тока Р333 предназначен для:

- а) измерения сопротивлений по схеме одинарного моста;
- б) определения места повреждения кабеля посредством петли Варлея;
- в) определения места повреждения кабеля посредством петли Муррея;
- г) измерения асимметрии проводов;
- д) использования моста как магазина сопротивления.

Мост предназначен для работы при температуре окружающего воздуха от 10 до 35 °С и относительной влажности воздуха до 80 %. Нормальная температура эксплуатации (20±5) °С при работе моста в классе 0,5; от 10 до 35 °С при работе моста в классах точности 1,0 и 5,0. Класс точности моста и предел основной допускаемой погрешности показаний моста, выраженный в процентах от номинального значения измеряемого сопротивления, не превышает значений, указанных в таблице 2.

Таблица 2- Технические данные моста

Класс точности	Предел допускаемой основной погрешности	Диапазон измерения, Ом
0,5	±0,5	от 1 до 99990
1,0	±1,0	от $1 \cdot 10^{-1}$ до 0,9999
5,0	±5,0	от 10^5 до 999900

Сопротивление ступеней старшей декады плеча сравнения моста 1000 Ом. Сопротивление плеч отношения не менее 10 Ом. Начальное сопротивление магазина сравнительного плеча, т.е. сопротивление при установке всех декад переключателей на нулевые показания не превышает 0,02 Ом. Вариация начального сопротивления магазина сравнительного плеча, вызванная изменением переходных сопротивлений и контактов переключающих устройств, не превышает 0,003 Ом. Предел допускаемой дополнительной погрешности моста, вызываемый изменением температуры окружающего воздуха от 10 до 35 °С для класса точности 0,5 не превышает на каждые 10 °С изменения температуры предела допускаемой основной погрешности. Предел допускаемой основной погрешности для классов точности 1,0 и 5,0 сохраняется на всем диапазоне температур. Сопротивление изоляции между всеми токоведущими цепями моста и его корпусом при температуре от 10 до 35 °С и влажности 80 % - 200 Ом. Габаритные размеры 300×230×150 мм, масса не более 5 кг.

5.2 Комплектность

Комплект поставки моста постоянного тока Р333 представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Комплектность моста Р333

Наименование объекта	Количество
Мост	1 шт.
Гальванические элементы	5 шт.
Гибкие соединительные проводники общим сопротивлением не более 0,005 Ом	2 шт.
Техническое описание и инструкции	1 экз.
Документ, удостоверяющий качество	1 экз.

5.3 Устройство и работа прибора

Прибор смонтирован на горизонтальной пластмассовой панели, помещенной в пластмассовый корпус со съёмной крышкой. Корпус моста защищает переключатели и сопротивления от механических повреждений. Мост имеет внутреннюю батарею питания, состоящую из пяти элементов, расположенных в кассете на лицевой панели моста. Встроенный в мост нулевой прибор имеет приспособление для установки его указателя на нулевую отметку шкалы и устройство для регулировки его чувствительности. Время установления показаний встроенного нулевого прибора при его включении не превышает 4 секунды. Встроенный прибор имеет антипараллаксное устройство.

Мост имеет зажимы для присоединения внешнего нулевого прибора, внешнего источника питания и соответствующее блокировочное устройство, исключающее возможность присоединения внешнего источника питания параллельно встроенному.

Принципиальная схема моста приведена на рисунке 6.

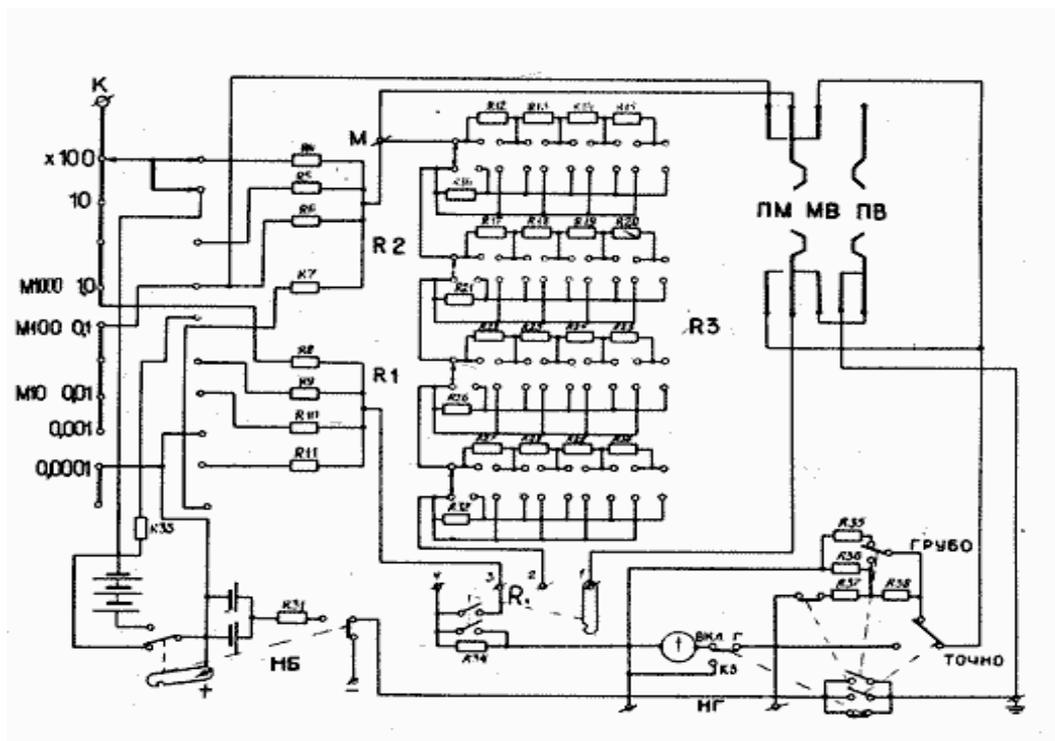


Рисунок 6 – Принципиальная электрическая схема моста постоянного тока

Параметры элементов схемы моста приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры элементов схем моста

Обозначение на схеме	Наименование	Технические характеристики	Количество, шт
1	2	3	4
R4, R10	Катушка	10 Ом	2
R5, R9	Катушка	100 Ом	2
R6, R8	Катушка	1000 Ом	2
R7	Катушка	10000 Ом	1
R11	Катушка	1 Ом	1
R12...R15	Катушка	2000 Ом	4
R16	Катушка	1000 Ом	1
R17...R20	Катушка	200 Ом	4
R21	Катушка	100 Ом	1
R22...R25	Катушка	20 Ом	4
R26	Катушка	10 Ом	1
R27...R31	Катушка	2 Ом	5
R32	Катушка	1 Ом	1
R33	Резистор МЛТ-0,25-200 Ом±5%	200 Ом	1
R34	Резистор МЛТ-0,5-390 Ом ±5%	390 Ом	1

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
R35, R36	Резистор МЛТ-0,25- 51 Ом $\pm 10\%$	51 Ом	2
R37, R38	Резистор МЛТ-0,25- 1 кОм $\pm 10\%$	1 кОм	2

Измерительная часть схемы представляет собой четырехплечный мост, в сравнительном плече которого включен четырехдекадный плавнорегулируемый магазин сопротивлений с верхним пределом измерения 9999 Ом. Каждая декада сравнительного плеча построена по сокращенной пятикатушечной схеме. Эта схема позволяет получать в каждой декаде девять номинальных значений сопротивлений.

Декада плеч отношений содержит восемь катушек сопротивлений. При помощи переключателя плеч отношений производится включение различных комбинаций этих сопротивлений: 1000:10; 1000:100; 1000:1000; 10:1000; 1:1000 и 1:10000 Ом, которым соответствуют значения множителя $n=100; 10; 1; 0,1; 0,01; 0,001$ и $0,0001$, нанесенные вокруг ручки декады плеч отношений.

При измерении низкоомных сопротивлений по четырехзажимной схеме включения применено раздельное подключение элементов моста к измеряемому сопротивлению (Рисунок 7).

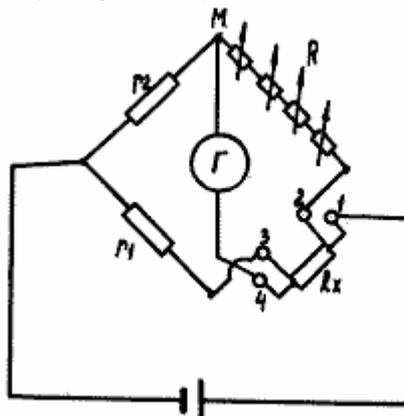


Рисунок 7 – Схема подключения элементов моста к измеряемому сопротивлению

При таком включении сопротивления двух соединительных проводников входят в сопротивления плеч моста, а сопротивления двух других соединительных проводников входят в цепь гальванометра и источника питания, чем практически исключается влияние этих проводников на погрешность измерения.

При измерении больших сопротивлений по двухзажимной схеме включения работа моста осуществляется по схеме, приведенной на рисунке 8.

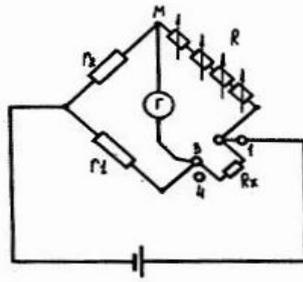


Рисунок 8 – Схема измерения высокоомных измерений

На измерительной панели моста предусмотрены зажимы для подключения наружного источника питания. При подключении наружного источника постоянного тока к зажимам переключатель открывается и внутренний источник автоматически отключается от измерительной части моста.

5.4 Меры безопасности

Мост необходимо надежно установить на рабочем месте. Перед включением моста в рабочую схему необходимо зачистить контактируемые поверхности пяти элементов встроенного источника питания, вставить их в кассету моста и закрыть плотно крышку. В случае отсутствия питания произвести отгибку контактов в кассете моста. Перед началом работы необходимо покрутить ручки переключателей декад 5-6 раз. К работе на приборе допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

6 Порядок выполнения измерений

6.1 Измерение сопротивлений от 10 до 999900 Ом

Измерение сопротивлений от 10 до 999900 Ом производится по двухзажимной схеме включения, для чего необходимо:

а) замкнуть зажимы 1 и 2 с помощью перемычки, при этом зажимы 3 и 4 замкнутся автоматически;

б) переключатель схемы поставить в положение «МВ»;

в) подключить измеряемое сопротивление к зажимам 2 и 3;

г) установить переключатель плеч отношений на соответствующий множитель согласно таблице 5 в зависимости от предполагаемой величины R_x ;

д) установить на четырех декадах сравнительного плеча ожидаемое сопротивление;

е) нажать кнопку «Вкл». Если при таком нажатии наблюдается резкий отброс стрелки- это свидетельствует о неправильно выбранном множителе n ; ручкой «П5» выберите множитель n таким образом, чтобы отклонение стрелки не превышало 0,2-0,4 мм от нулевой отметки, после чего зафиксировать кнопку «Включение гальванометра» и перейти на измерение при нажатой кнопке «грубо»; уравнивание схемы производить ручками П1-П4 (до тех пор пока стрелка гальванометра не станет на нуль);

ж) нажать кнопку «точно» и окончательно уравновесить мост;

з) вычислить сопротивление по формуле:

$$R_x = nR \quad (14)$$

где $n = \frac{r_1}{r_2}$ - множитель, устанавливаемый на декаде плеч отношения;

R - сопротивление сравнительного плеча;

и) после окончания измерений кнопки «Вкл», «грубо» и «точно» отжать.

Таблица 5- Рекомендуемые множители n

Измеряемое сопротивление R_x , Ом	Рекомендуемые множители n	Напряжения источника питания моста, В	
		внутренняя батарея	наружная батарея
1	2	3	4
$5 \cdot 10^{-3} - 0,0999$ $0,1 - 0,9999$	0,0001	-	1,5
1-9,999	0,0010	1,5	1...1,5
10-99,99	0,0100		1,5...3

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4
100-999,9 1000-9999	0,1000 1,0000	3,0	3-10
10000-50000 50000-99990	10,000	6,0	10-16
100000- 999900	100,00	-	10,16

6.2 Измерение сопротивлений от 9,999 до 0,005 Ом

Измерение сопротивлений от 9,999 до 0,005 Ом производится по четырехзажимной схеме включения, для чего необходимо:

- а) перемычку, соединяющую зажимы 1 и 2 отсоединить;
- б) измеряемое сопротивление присоединить к зажимам 1,2,3 и 4 с помощью четырех проводников(сопротивление проводников, идущих от зажимов 2 и 3 должно быть не более 0,005 Ом);
- в) процесс уравнивания и подсчет результатов измерения производится так же, как и при измерении от 10 до 999900 Ом.

7 Контрольные вопросы

- 1 Опишите принципиальную схему любого моста.
- 2 Что понимают под чувствительностью моста?
- 3 Опишите способы повышения чувствительности моста.
- 4 Какие операции включает в себя поверка мостов?
- 5 Какие методы поверки мостов существуют? Какой из них является предпочтительным? Почему?
- 6 Опишите процессы измерения сопротивлений разных значений с помощью моста постоянного тока?
- 7 Какие основные понятия используются в лабораторной работе?

8 Варианты для выполнения лабораторной работы

Сп. № Гр. СС-1,2	Сопротивление, Ом	Сп. № Гр. СС-1,2	Сопротивление, Ом
1	120	17	1000
2	130	18	900
3	140	19	300
4	150	20	5
5	2	21	0,5
6	0,01	22	10
7	15	23	150
8	20	24	200
9	25	25	100
10	30	26	10000
11	35	27	500
12	40	28	600
13	45	29	700
14	50	30	400
15	55	31	450
16	60	32	550

Список использованных источников

1 **Никитин, В. А.** Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие / В. А. Никитин, С. В. Бойко.– 2-е изд. перераб. и доп. – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ, 2007. – 462 с.

2 **Любимов, Л.И.** Поверка средств электрических измерений: справочная книга / Л.И. Любимов, Е.З. Шапиро. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ие, 1987.-296с.:ил.

3 ГОСТ 8.449-81. ГСИ. Мосты постоянного тока измерительные Введён 01.01.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 12 с.

4 **Авдеев, Б.Я.** Основы метрологии и электрические измерения: учебник для вузов / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк. – 6-е изд. перераб. и доп.- Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ие, 1987.- 480 с.: ил.

Приложение А (обязательное)

Пример отчёта по лабораторной работе

Задание: Измерить сопротивление проводника с помощью моста постоянного тока. Найти СКО и доверительную границу НСП. По нормативно–технической документации измеряемое сопротивление проводника должно иметь значение (1000 ± 1) Ом.

В технической документации средства измерений указано, что необходимое число измерений может быть равно одному, т.к. точность данного прибора в большей мере зависит от точности используемого нульиндикатора, а не от числа измерений. Но для точности данных произведем 3 измерения.

В ходе эксперимента и ряда вычислений получили значения измеряемого сопротивления, представленные в таблице А.1.

Таблица А.1 – Карта измерительных наблюдений

Наблюдение	Показание прибора, Ом
1	999
2	1000
3	1001

Вычисляем среднее арифметическое по формуле (А.1)

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (\text{А.1})$$

где x_i – текущее значение,
 n – число измерений.

$$\bar{X} = \frac{1000 + 999 + 1001}{3} = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ Ом};$$

Вычислим среднеквадратическое отклонение (СКО) результата наблюдения по формуле (А.2)

$$S(X) = \sqrt{\frac{(1000 - 1000)^2 + (999 - 1000)^2 + (1001 - 1000)^2}{2}} = \sqrt{\frac{2}{2}} = 1; \quad (\text{А2})$$

Находим границу не исключённого остатка систематической погрешности, при числе не исключённых систематических погрешностей $N \leq 3$ по формуле (A.3):

$$\Theta = \pm \left| \sum_{i=1}^n \Theta_i \right| = \Delta_c + \Delta_{оп} + \Delta_{усл} \quad (A.3)$$

$$\Delta_c = 10$$

$$\Delta_{оп} = 0,01\% \cdot 10 = 0,1$$

$$\Delta_{усл.} = 0$$

$$\Theta(P) = 0,1 + 1 = 1,1$$

Вычислим доверительную границу погрешности результата измерений

$$\frac{\Theta(P)}{S(x)} = \frac{1,1}{1} = 1,1,$$

Так как 2,1 входит в интервал $[0,8; 8]$, то вычислим доверительную границу погрешности результата измерения по формуле (A.4)

$$\Delta = K(P) \cdot [\Theta(P) + \epsilon(P)], \quad (A.4)$$

Находим суммарный коэффициент γ по формуле (A.5)

$$\gamma = \frac{\Theta(P)}{\sqrt{3} \cdot K(P) \cdot S(x)}, \quad (A.5)$$

$$\gamma = \frac{1,1}{\sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 1} = 0,482$$

Таблица A.2 – Поправочный коэффициент

m	K(P)
5 и более	1,45
4	1,4
3	1,3
2	1,2

Определяем $K_{\Sigma(\gamma)}$ – значение коэффициента определяем по формуле (А.6)

$$K_p = K_{\Sigma(\gamma)} = \frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{1+\gamma}, \quad (\text{А.6})$$

$$K_p = K_{\Sigma(\gamma)} = \frac{\sqrt{1+0,482^2}}{1+0,482} = 0,831$$

Находим доверительную границу суммарной составляющей по формуле (А.7)

$$\zeta(P) = Z_{p/2} \cdot S(X), \quad (\text{А.7})$$

где $Z_{p/2}$ – точка нормирования функции Лапласа, отвечающая вероятности P , т.к. $P=0,95$, то по таблице А.3 $Z_{p/2}=1,414$.

Таблица А.3 – Значение функции Лапласа

N	Значение $Z_{p/2}$ при P		
	0,9	0,95	0,99
3	1,412	1,414	1,414
4	1,689	1,710	1,728
5	1,869	1,917	1,972
6	1,996	2,067	2,161
7	2,093	2,182	2,310
8	2,172	2,273	2,431
9	2,237	2,349	2,532
10	2,294	2,414	2,753

$$\zeta(P) = 1,414 \cdot 1 = 1,414;$$

$$\Delta = 0,831 \cdot (1,1 + 1,414) = 2,09$$

Находим отношения $v_i = |x_i - x_{cp}|$,

$$v_1=5; \quad v_2=0; \quad v_3=5.$$

Т.к. $v_i < z(\pi/2) \cdot S(x)$, то ни один из результатов не является промахом.

Вывод по проведенной лабораторной работе: Результат измерений можно записать в следующей форме: $A=(1000 \pm 2,09)$ Ом.

Приложение Б (справочное)

Характерные неисправности моста Р333 и методы их устранения

Таблица Б.1- Характерные неисправности моста Р333

Наименование неисправности, внешнее проявление и дополнительные признаки	Вероятная причина	Метод устранения
1	2	3
При уравнивании моста указатель гальванометра не отклоняется	1. Неисправен гальванометр	Проверить исправность гальванометра и в случае неисправности подключить наружный гальванометр
	2. Обрыв в диагонали питания моста (питание от наружной батареи)	Проверить цепи между точками подключения наружной батареи и вершинами моста; подпаять оборванный конец провода
	3. Обрыв в диагонали гальванометра моста	Проверить между точками подключения гальванометра и вершинами моста; подпаять оборванный конец провода
	4. Обрыв диагонали питания моста (питание от внутренней батареи)	Проверить цепи между точками подключения внутренней батареи и вершинами моста; подпаять оборванный конец провода
	1. Собранная схема измерения не соответствует рекомендуемой для данного диапазона измерения	Проверить схему в соответствии с измеряемым сопротивлением

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3
<p>Мост постоянного тока не уравнивается</p>	<p>2. Обрыв или короткое замыкание измеряемого сопротивления</p>	<p>Проверить целостность измеряемого сопротивления</p>
	<p>3. Обрыв или короткое замыкание плеч моста</p>	<p>Проверить качество щеток и контактов декадных переключателей, при сильном загрязнении контактов щеток почистить их миткалю, смоченной в чистом авиационном бензине и смазать тонким слоем бескислотного технического вазелина. Проверить все резисторы декад плеча сравнения и плеч отношений. Заменить неисправный резистор другим. Устранить дефекты в монтаже плеч</p>