# Метрология и радиоизмерения

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

*к выполнению лабораторных работ № 1, 2*
*для студентов специальности 11.05.01*
*«Радиоэлектронные системы и комплексы»*
*очной формы обучения*

Воронеж 2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

# Метрология и радиоизмерения

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

*к выполнению лабораторных работ № 1, 2*
*для студентов специальности 11.05.01*
*«Радиоэлектронные системы и комплексы»*
*очной формы обучения*

Воронеж 2022

УДК 721:53(073)
ББК 38.113я7-5

*Составитель Ю. В. Худяков*

**Метрология и радиоизмерения**: методические указания к выполнению лабораторных работ № 1, 2 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Ю. В. Худяков. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022.– 29 с.

В методических указаниях рассматриваются принципы работы амперметров и вольтметров магнитоэлектрической системы. Тематика лабораторной работы соответствует рабочей программе дисциплины «Метрология и радиоизмерения».

Предназначены для студентов 3 курса специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МиР_УМД_ЛР1,2.pdf.

Ил. 15. Табл. 4. Библиогр.: 4 назв.

**УДК 721:53(073)**
**ББК 38.113я7-5**

**Рецензент** – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор кафедры радиотехники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета*

## ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания к выполнению лабораторных работ составлены в соответствии с программой курса «Метрология и радиоизмерения» для специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

В указаниях рассматриваются принципы работы амперметров магнитоэлектрической системы, методика расчета и моделирования работы амперметра для различных измерительных головок.

## 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1
## АМПЕРМЕТРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Целью лабораторной работы является изучение принципов работы амперметров магнитоэлектрической системы. Варианты заданий представлены в таблице 1.

Таблица 1

Варианты заданий

| № варианта (в списке группы) | Максимальный измеряемый ток $I_{PI1}$, А | Напряжение $U_{G1}$ в измеряемой цепи, В | Точность измерения $\delta_{PI1}$, % | Ток полного отклонения измерительной головки $I_{no}$, мА | Класс точности измерительной головки $\delta_{Iu}$, % | Сопротивление измерительной головки $R_u$, Ом |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,01 | 10 | 0,5 | 0,02 | 0,05 | 2500 |
| 2 | 0,02 | 12 | 0,2 | 0,03 | 0,1 | 2200 |
| 3 | 0,03 | 15 | 0,8 | 0,05 | 0,2 | 2000 |
| 4 | 0,05 | 18 | 1,0 | 0,1 | 0,5 | 1800 |
| 5 | 0,1 | 20 | 2,0 | 0,25 | 1,0 | 1200 |
| 6 | 0,2 | 24 | 3,0 | 0,3 | 1,5 | 1000 |
| 7 | 0,25 | 27 | 5,0 | 0,5 | 2,5 | 900 |
| 8 | 0,3 | 30 | 6,0 | 0,6 | 4,0 | 1000 |
| 9 | 0,5 | 32 | 0,8 | 1,5 | 0,2 | 800 |
| 10 | 0,6 | 35 | 1,0 | 2,0 | 0,5 | 500 |
| 11 | 0,75 | 40 | 2,0 | 2,5 | 1,0 | 700 |
| 12 | 1,0 | 42 | 3,0 | 3,0 | 1,5 | 500 |
| 13 | 1,5 | 45 | 5,0 | 5,0 | 2,5 | 600 |
| 14 | 2,0 | 50 | 2,0 | 0,6 | 1,0 | 800 |
| 15 | 2,5 | 63 | 4,0 | 0,75 | 1,5 | 400 |

Окончание табл.1

| № варианта (в списке группы) | Максимальный измеряемый ток $I_{PI1}$, А | Напряжение $U_{G1}$ в измеряемой цепи, В | Точность измерения $\delta_{PI1}$, % | Ток полного отклонения измерительной головки $I_{no}$, мА | Класс точности измерительной головки $\delta_{Iu}$, % | Сопротивление измерительной головки $R_u$, Ом |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 16 | 3,0 | 75 | 4,0 | 1,0 | 2,5 | 500 |
| 17 | 5,0 | 100 | 5,0 | 1,5 | 4,0 | 300 |
| 18 | 6,0 | 10 | 0,5 | 2,0 | 0,05 | 250 |
| 19 | 7,5 | 12 | 0,2 | 2,5 | 0,1 | 400 |
| 20 | 10,0 | 15 | 0,8 | 3,0 | 0,2 | 600 |
| 21 | 15,0 | 18 | 1,0 | 5,0 | 0,5 | 100 |
| 22 | 20,0 | 20 | 2,0 | 6,0 | 1,0 | 50 |
| 23 | 25,0 | 30 | 3,0 | 7,5 | 1,5 | 35 |
| 24 | 30,0 | 50 | 5,0 | 10,0 | 2,5 | 40 |
| 25 | 50,0 | 18 | 6,0 | 3,0 | 4,0 | 50 |

## 1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Несмотря на все большее распространение цифровых электроизмерительных приборов, в настоящее время промышленностью выпускаются и находятся в эксплуатации большое число средств измерений, основанных на преобразовании электромагнитной энергии, подводимой к прибору, в механическую энергию перемещения подвижной части. Широкий диапазон измеряемых величин, конструкционное разнообразие, незначительное потребление энергии выгодно отличают такие электромеханические приборы, а порой делают их применение единственно возможным для ряда измерительных приборов.

Среди разнообразия электромеханических систем наиболее широкое распространение получили приборы магнитоэлектрической системы, в которых вращающий момент рамки с указателем создается взаимодействием между полем постоянного магнита и одним или несколькими проводниками (на рамке) с током. Магнитоэлектрические приборы изготавливаются с подвижной рамкой, но есть конструкции и с подвижным магнитом.

К достоинствам данной системы следует отнести высокую чувствительность и точность, равномерную шкалу, относительно небольшое влияние внешних полей. К недостаткам – невозможность измерения в цепях с переменным током без дополнительных устройств и чувствительность к перегрузкам.

В целях унификации маркировки типономиналов приборов систему, к которой относится измерительный механизм, обозначают следующими буквенными индексами: М – магнитоэлектрическая, Э – электромагнитная, Д – электродинамическая, С – электростатическая.

Для характеристики основных режимов и условий работы электроизмерительных приборов непосредственного отсчета на их шкалах в зонах свободного пространства от рабочей части имеются условные обозначения.

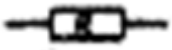
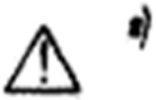
Наиболее употребительные из них приведены в табл. 2.

Таблица 2

Условные обозначения электроизмерительных приборов

| Обозначение по МЭК 51 | Наименование | Условное обозначение |
|---|---|---|
| B-1 | Ток постоянный |  |
| B-2 | Ток переменный (однофазный) | |
| B-3 | Ток постоянный и переменных | |
| C-1 | Напряжение испытательное 500 В | |
| C-2 | Напряжение испытательное, превышающее 500 В (например, 2 кВ) | |
| D-1 | Прибор применять при вертикальном положении шкалы | |
| D-2 | Прибор применять при горизонтальном положении шкалы | |
| F-1 | Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой | |
| F-3 | Прибор магнитоэлектрический с подвижным магнитом | |
| F-5 | Прибор электрический | |
| F-7 | Прибор электродинамический | |

Окончание табл. 2

| Обозначение по МЭК 51 | Наименование | Условное обозначение |
|---|---|---|
| F-16 | Прибор электростатический | |
| F-18 | Термопреобразователь неизолированный | |
| F-19 | Термопреобразователь изолированный | |
| F-20 | Преобразователь электронный в измерительной цепи | |
| F-21 | Преобразователь электронный в вспомогательной цепи | |
| F-22 | Выпрямитель | |
| F-23 | Шунт | |
| F-24 | Сопротивление добавочное |  |
| F-27 | Экран электростатический | |
| F-28 | Экран магнитный | |
| F-31 | Зажим для заземления | |
| F-33 | Ссылка на соответствующий документ |  |
| F-35 | Часть вспомогательная общая | |

Цифра 1) в случае встроенных преобразователей обозначения F-18, F-19, F-20, F-22 сочетаются с обозначением прибора, например с F-1. В случае внешних преобразователей обозначения F-18, F-19, F-20, F-22 сочетаются с обозначениями F-35.

Цифра 2) в условном обозначении – смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации.

Кроме типа измерительной системы, в группе знаков условных обозначений указывают устойчивость прибора к климатическим воздействиям (А – приборы для работы в закрытых сухих, отапливаемых помещениях; Б, В1, Б2, Б3 – для работы в закрытых не отапливаемых помещениях; В, В1, В2, В3 – для работы в полевых и морских условиях), класс точности, величина испытательного напряжения и другие сведения.

В качестве примера на рис. 1 пока дана шкала прибора магнитоэлектрической системы М4200, использующегося в качестве миллиамперметра.

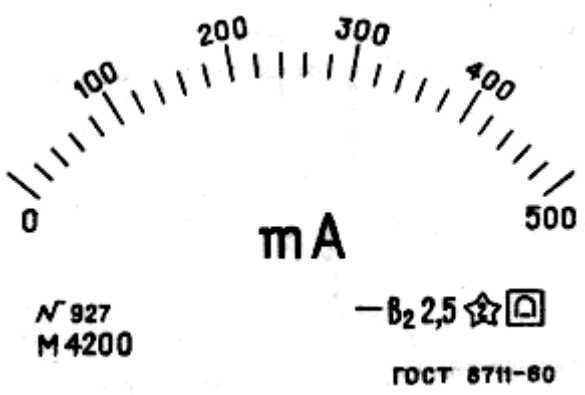



**Рис. 1.** Шкала прибора магнитоэлектрической системы М4200

В левой части внизу указаны тип измерительного прибора и его заводской номер. В правой – условия применения для измерений в цепях постоянного тока с возможностью работы в полевых условиях и при повышенной влажности; класс точности 2,5; измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ, соответствует требованиям ГОСТу.

О возможном применении прибора для тех или иных измерений можно судить по таким его характеристикам, как класс точности и чувствительность.

По классу точности существуют приборы классов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Эти числа выражают основную, наибольшую допустимую, приведенную относительную погрешность приборов.

Наиболее точными являются приборы класса 0,05. Погрешность выражается в процентах относительно максимального значения рабочей части шкалы прибора.

Пример – предел измерения миллиамперметра 100 мА, число делений на шкале 100, класс точности прибора 1 (что соответствует ±1 %). В этом случае разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины может быть не более ± 1 мА.

Для приборов с двусторонней шкалой, то есть с нулем посередине, погрешность выражается в процентах от суммы конечных значений рабочей части шкалы. Если у второго миллиамперметра с такой же длиной шкалы предельное значение измеряемой величины 10 мА, число делений на шкале токе 100, то для первого прибора на интервал измерения величины в 1 мА приходится одно деление шкалы, а для второго прибора 10.

Это означает, что вторым прибором можно измерять значения параметров с точностью до 0,1, а первым — только до 1 мА, т. е. у второго прибора разрешающая способность выше.

Эта способность измерительного устройства характеризует его чувствительность, которая определяется количеством единиц измеряемой величины, отсчитываемых на одно деление.

К основным электрическим параметрам, определяющим возможность использования прибора для данных условий работы, относятся ток полного отклонения ($I_{no}$), т. е. наибольший ток, при котором стрелка отклоняется до конечной отметки шкалы, и сопротивление рамки прибора ($R_u$). Значение первого параметра определяется максимальным значением шкалы прибора.

Так, например, если имеется миллиамперметр с конечной отметкой шкалы 100, то это соответствует току полного отклонения 100 мА. Такой прибор можно включать только в те цепи, токи в которых не превышают 100 мА. Величину второго параметра ($R_u$) часто указывают на шкале прибора.

Если значения параметров для конкретного прибора неизвестны, их нетрудно определить самостоятельно. Для этого потребуется гальванический элемент, образцовый миллиамперметр, переменный резистор с сопротивлением в несколько килоом, дополнительный постоянный резистор ($R_д$) для ограничения тока в измеряемой цепи.

Сопротивление резистора $R_д$ рассчитывается, исходя из напряжения источника питания и известного тока полного отклонения образцового миллиамперметра, по закону Ома. Исследуемый измерительный прибор (ИП) включается в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.

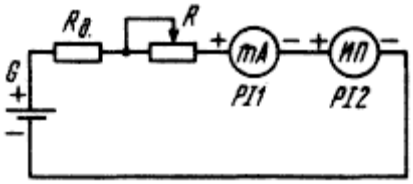



**Рис. 2.** Схема включения амперметра

Переменным резистором *R* регулируют ток в цепи до такого значения, при котором стрелка ИП *PI2* установится против конечной отметки шкалы. Значение этого тока, отсчитанное по шкале образцового прибора *PI1*, и будет током полного отклонения стрелки исследуемого прибора. Для определения сопротивления рамки исследуемого измерительного прибора нужно воспользоваться схемой на рис. 3.

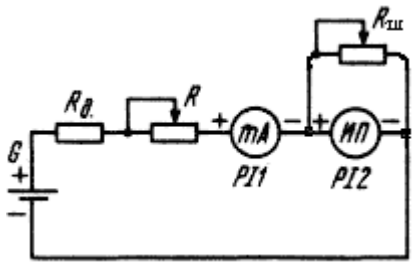



**Рис. 3.** Схема включения измерительного прибора при определении сопротивления его рамки

Отличается она от предыдущей включением шунта – резистором $R_ш$, подключенным параллельно обмотке рамки (*PI2*).

В данном случае сопротивление шунта выбрано в пределах 1...6,8 кОм. Изменением его сопротивления добиваются уменьшения показания *PI2* вдвое. Затем переменным резистором *R* по образцовому миллиамперметру *PI1* восстанавливают определенное ранее значение тока полного отклонения.

Последовательной неоднократной регулировкой $R_ш$ и *R* добиваются соответствия тока в цепи, равного начальному, т. е. току полного отклонения ИП, а ток непосредственно через ИП должен быть вдвое меньшим. Когда будет достигнуто такое состояние, ток через ИП и $R_ш$ становится одинаковым, следовательно, и сопротивления параллельных ветвей тоже одинаковы. Измерив омметром сопротивление рабочей части $R_ш$ (по схеме между средним и правым выводами), находим второй неизвестный параметр.

Применение шунтов позволяет расширить пределы показаний миллиамперметра или амперметра (но при этом ухудшаются разрешающая способность, чувствительность при измерениях). Расчет сопротивления шунта производят по формуле:

$$R_ш = \frac{R_u}{n-1}$$

где $R_ш$, $R_u$ – соответственно сопротивления шунта и прибора без шунта, Ом; *n* – число, показывающее, во сколько раз должен быть увеличен предел измерений.

Прибор без шунта называют измерительной головкой. В зависимости от сопротивления шунта в качестве этого элемента могут быть использованы медный провод на катушке, металлическая пластина, нормализованный (стандартный) резистор с малым допуском отклонения сопротивления. Отечественной промышленностью выпускаются калиброванные наружные шунты (НШ), рассчитанные на определенные номинальные токи и падения напряжения на них (45, 60, 75, 100 и 300 мВ).

Некоторые типы приборов магнитоэлектрической системы (наиболее распространенных в практике измерений) и их характеристики приведены в табл. 3. В данной таблице для каждого типа приборов указаны виды

измеряемой величины, а для каждого вида измерений класс точности выпускаемого прибора и верхний предел измерения. Для каждого измерителя тока приведены его внутреннее сопротивление (или интервал сопротивлений, в пределах которых может быть изготовлена рамка в зависимости от чувствительности прибора), а для измерителей напряжения ток полного отклонения стрелочного прибора.

Пример. Прибор типа М900: микроамперметр – выпускается с классом точности 1,0 и 1,5; пределы измерений, мкА – 5-0-5 (шкала прибора с нулем посередине), 0-10, 10-0-10, 0-15, 0-20, 0-25 (в таблице даны значения только минимального и максимального пределов измерений – 5 мкА и 25 мкА); внутреннее сопротивление прибора с пределом измерения 5 мкА – 5000 Ом, 25 мкА – 800 Ом; милливольтметр – выпускается с классом точности 1,0 и 1,5; пределы измерений, мВ – 5-0-5, 0-10, 10-0-10, 0-15, 0-20, 0-25; ток полного отклонения 1 мА. Более подробные сведения о характеристиках и условиях применения электроизмерительных приборов, методах измерений, а также о приборах, не вошедших в приводимую таблицу, можно найти в литературе [1-3].

Таблица 3

Характеристики приборов магнитоэлектрической системы

| Тип прибора | Вид измеряемой величины | Класс точности | Верхние пределы измерений (в единицах измеряемой величины) | Rп, Ом | Iп.о. мА | Габариты, мм | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| М24 | мкА мА | 1,0; 1,5 1,0; 1,5; 2,5 | 50...450 1,5... 15 | 2500...30 365 | | 120Х105Х59 | 0,45 |
| | мВ | 1,5; 2,5 | 8,2...100 | | 1 | 120Х105Х59 | 0,45 |
| | В | 1,0; 1,5 | 0,1...100 | | 1 | 120Х105Х59 | 0,45 |
| М93 | мкА | 1,0; 1,5 | 50...1000 | 1900...15 | | 120ХЮ5Х64 | 0,3 |
| М94 | мкА | 1,0; 1,5 | 50...1000 | 3930...90 | | 120ХЮ5Х64 | 0,3 |
| М96 | мкА | 1,5 | 300 | 2000 | | 120ХЮ5Х59 | 0,5 |
| М97 | мкА | 1,5 | 20...200 | 1000 | | 120Х105Х54 | 0,6 |
| М132 | мкА | 1,5 | 5...300 | 6500...30 | | 80Х80Х68 | 0,2 |
| М206 | мА | 2,5; 4,0 | 15...30 с НШ 60 мВ | | | 63Х63Х51 | 0,2 |
| | А | 2,5; 4,0 | 100...500 с НШ 75 мВ | 220...200 | | 63Х63Х51 | 0,2 |
| | В | 2,5 | 1;3 с ДС 20 кОм; 5 с ДС 100 кОм | | 0,1 | 63Х63Х51 | 0,2 |
| М224 | мА | 2,5 | 2...5 (с НШ 1000 Ом) | 2000...50 000 | | 83Х83Х54 | 0,4 |
| | В | 2,5 | 10 | | 0,1 | 83Х83Х54 | 0,4 |
| М261М | мкА | 1,5; 2,5 | 50...500 | 2600...150 | | 63Х63Х61 | 0,15 |
| | мВ | 2,5 | 10...45 | | 1 | 63Х63Х61 | 0,15 |
| | В | 2,5 | 300 с ДС 6 МОм | | 1 | 63Х63Х61 | 0,15 |
| М262М | мА | 2,5 | 1...500 | 90..0,2 | | 63Х63Х61 | 0,15 |
| | А | 2,5 | 1...10 | 100 | | 63Х63Х61 | 0,15 |
| | мВ | 2,5 | 7; 150 | | 5 | 63Х63Х61 | 0,15 |
| | В | 2,5 | 3...300; 600 с ДС0,6 МОм; 1500 с ДС 1,5 МОм; 3000 с ДС 3 МОм | | 5 | 63Х63Х56 | 0,15 |

Продолжение табл.3

| Тип прибора | Вид измеряемой величины | Класс точности | Верхние пределы измерений (в единицах измеряемой величины) | Rп, Ом | Iп.о. мА | Габариты, мм | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| М263М | мкА | 1,5; 2,5 | 50...500 | 2600...150 | | 80Х80Х56 | 0,2 |
| | мВ | 2,5 | 15...45 | | 5 | 80Х80Х56 | 0,2 |
| | В | 2,5 | 300 с ДС Р102 | | 5 | 80Х80Х56 | 0,2 |
| М264М | мА | 2,5 | 1...500 | 100...1 | | 80Х80Х56 | 0,2 |
| | А | 2,5 | 1...10 | 100 | 5 | 80Х80Х56 | 0,2 |
| | мВ | 2,5 | 5...150 | | 5 | 80Х80Х56 | 0,2 |
| | В | 2,5 | 3...300;600 с ДС 0,6 МОм; 1500 с ДС 1,5 МОм; 3000 с ДС 3 МОм | | | 80Х80Х56 | 0,2 |
| М265 | мкА | 1,0; 1,5 | 50.. 1000 | 3000.. .80 | | 105Х120Х73 | 0,35 |
| | мВ | 1,0; 1,5 | 10...45 | | 1,5 | 105Х120Х73 | 0,35 |
| М266 | мкА мА | 1,0; 1,5 1,0; 1,5 | 50...500 50...1000 | 3000...150 1500...150 | | 160Х140Х75 | 0,85 |
| М494 | мкА | 1,5; 2,5 | 50... 100 | 2300...700 | | 83Х83Х54 | 0,4 |
| М592 | мкА | 2,5 | 50...100 | 2800... 800 | | 63Х63Х51 | 0,2 |
| М900 | мкА мВ | 1,0; 1,5 1,0; 1,5 | 5...25 5...25 | 5000...800 | 1 | 120Х105Х64 | 0,6 |
| М901 | мкА | 1,0; 1,5 | 50...1000 | 1900.. .15 | | 100Х90Х69 | 0,2 |
| М903 | мА А<br>В | 1,0; 1,5 1,0; 1,5<br>1,0; 1,5 | 1...300 1...5<br>1...600 | 9.. .1,7<br>1,7 | 0,5 | 120Х120Х64 | 0,3 |
| М906 | мкА мА | 1,0; 1,5<br>2,5 | 50.. .1000 1...10 | 200...5<br>2500...20 | | 120ХЮ5Х58 | 0,45 |
| М907 | мкА мА | 0,5; 1,0 0,5; 1,0 | 20...500 1...20 | 10...2<br>100...50 | | 160Х140Х75 | 0,85 |
| М1131 | мкА мА В | 4,0 4,0 4,0 | 100...500 1...10 6 | 4000...20<br>180...25 | 5 | 30Х30Х50 | 0,06 |
| Ml360 | мкА<br>мА | 2,5 2,5 | 25...500 1...10 | 1350...22<br>22...4 | | 60Х60Х82 | 0,45 |
| М1400 | мкА мА | 1,5 1,5 | 25...500 1...10 | 1350...22<br>22...4 | | 80Х80Х82 | 0,55 |
| М1690А | мкА мА | 1,0 1,0 | 20...500 1...10 | 1100...50<br>22...3 | | 120ХЮ5Х75 | 0,7 |
| М1692 | мкА | 0,5; 1,0 | 10...500 | И 000...220 | | 120ХЮ5Х75 | 0,7 |
| М1792 | мА | 0,5; 1,0 | 1...10 | 110... 11 | | 160Х140Х75 | 0,8 |
| М2001 | мА А<br>В | 2,5<br>2,5 | 1...500 1...10 20... 7500 (с НШ 75 мВ) 1,5...450 | 350...3<br>9...1 | 1 | 60Х60Х68 | 0,23 |
| М2003 | мкА | 1,5; 2,5 | 25...1000 | 3000...500 | | 80Х80Х55 | 0,35 |
| М4200 | мА | 1,5; 2,5 | 1...600 | 600... 7 | | 80Х80Х49 | 0,2 |
| М4201 | мВ | 1,5; 2,5 | 45...1000 | | 1,5 | 80Х80Х49 | 0,2 |
| М4202 | А В | 1,5; 2,5 1,5; 2,5 | 1...10; 20...6000; (с НШ 75 мВ) 2...600; 1000...3000 (с ДС Р103 М) | 8...1 | 1,1 5 | 60Х60Х49 | 0,15 |

Продолжение табл. 3

| Тип прибора | Вид измеряемой величины | Класс точности | Верхние пределы измерений (в единицах измеряемой величины) | Rп, Ом | Iп.о. мА | Габариты, мм | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| М4203 | мА А<br><br>В | 2,5; 4,0 2,5; 4,0<br><br>2,5; 4,0 | 1...600 1...3; 5...6000 (с НШ 75 мВ) 2...600; 1000...3000 (с ДС Р103) | 600. .1 | 1<br><br>5 | 40Х40Х50 | 0,125 |
| М4204 | мкА | 1,5; 2,5 | 10...1000 | 20 000...200 | | 80Х80Х49 | 0,2 |
| М4205 | мкА | 1,5; 2,5 | 10...1000 | 20 000...200 | | 60Х60Х49 | 0,15 |
| М4206 | мкА | 2,5; 4,0 | 10...1000 | 20 000... 200 | | 40Х40Х49 | 0,125 |
| М4210 | мВ | 1,5; 2,5 | 25...1000 | | 3 | 80Х80Х49 | 0,2 |
| М4211 | мВ | 1,5; 2,5 | 25...1000 | | 3 | 60Х60Х48 | 0,15 |
| М4212 | мВ | 2,5; 4,0 | 25...1000 | | 3 | 40Х40Х50 | 0,1 |
| М4222 | мА | 4,0 | 1...50 | 500...10 | | 20Х20Х35 | 0,03 |
| М4223 | В | 4,0 | 3...300 | | 1,1 | 30Х30Х35 | 0,07 |
| М4224 | В | 4,0 | 3...300 | | 1,1 | 21Х40Х50 | 0,04 |
| М4231 | мкА мА<br><br>А | 4,0 | 500 1...600 1...5; 10...50 (с НШ 75 мВ) | 600 200... 10 4...1 | | 40Х40Х48 | 0,125 |
| | В | 4,0 | 3...50; 75.. .600 (с ДС Р4200) | | 5 | 40Х40Х48 | 0,125 |
| М4233 | мА А<br><br>В | 2,5<br><br>2,5 | 1...500 1...10; 20...4000 (с НШ 75 мВ) 3...600; 1000...3000 (с ДС Р103) | 75...2 3...1 | 1,1<br><br>5 | 80Х80Х55 | 0,3 |
| М4240 | мкА | 1,5; 2,5 | 2,5...Ю | 4500...200 | | 80Х80Х49 | 0,2 |
| М4241 | мкА | 1,5; 2,5 | 2,5..ЛО | 4500...200 | | 60Х60Х52 | 0,15 |
| М4244 | мкА | 1,5; 2,5 | 5...30 | 70 000.. .10 000 | | 80Х80Х59 | 0,3 |
| М4247 | мкА | 4,0 | 50...1000 | 4000...1400 | | 21Х40Х53 | 0,035 |
| М4248 | мкА | 2,5; 4,0 | 50...1000 | 4000.. .1400 | | 21Х54Х58 | 0,04 |
| М4250 | мА А<br><br>В | 1,5; 2,5 1,5; 2,5<br><br>1,5; 2,5 | 1...50 20...6000 (с НШ 75 мВ)<br><br>1 | 85...2 | 1,1 | 80Х80Х46 | 0,2 |
| М4252М | мкА | 1,5 | 25. ..1000 | 10000...800 | | 80Х80Х47 | 0,15 |
| М42004 | мкА | 1,5; 2,5 | 5...30 | 20 000...6000 | | 80Х80Х49 | 0,2 |
| М42005 | мкА | 1,5; 2,5 | 5...30 | 20 000...6000 | | 60Х60Х48 | 0,15 |
| М42006 | мкА | 2,5; 4,0 | 5...30 | 20 000...6000 | | 40Х40Х50 | 0,1 |
| М42007 | мкА | 1,5; 2,5 | 5...30 | 20 000.. .6000 | | 80Х80Х49 | 0,2 |
| М42008 | мкА | 1,5; 2,5 | 5...30 | 20 000...6000 | | 60Х60Х49 | 0,15 |
| М42009 | мкА | 2,5; 4,0 | 5...30 | 20 000...6000 | | 40Х40Х49 | 0,125 |
| М42100 | мА | 1,5; 2,5 | 1...600 | 45...1 | | 80Х80Х50 | 0,2 |
| М42101 | А В | 1,5; 2,5 1,5; 2,5 | 1...6000 0,075...3000 | 1 | 1,1...30 | 60Х60Х50 | 0,15 |

Окончание табл. 3

| Тип прибора | Вид измеряемой величины | Класс точности | Верхние пределы измерений (в единицах измеряемой величины) | Rп, Ом | Iп.о. мА | Габариты, мм | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| М42102 | мкА | 1,5 | 25...1000 | 4000...200 | | 70Х70Х48 | 0,2 |
| М42103 | мкА | 1,5 | 25... 1000 | 1000...20 | | 60Х60Х50 | 0,15 |
| М42104 | мВ | 1,5; 2,5 | 25...1000 | | 3 | 80Х80Х50 | 0,2 |
| М42105 | мВ | 1,5; 2,5 | 25...1000 | | 3 | 60Х60Х50 | 0,15 |
| М42106 | мкА<br><br>мВ | 2,5; 4,0 2,5; 4,0 | 50... 1000<br><br>25.. 1000 | 7000...350 | 3 | 40Х40Х53 | 0.07<br><br>0,07 |

## 1.2. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АМПЕРМЕТРА ДЛЯ ЗАДАННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ

Ток полного отклонения измерительной головки согласно ТЗ равен Iпо = 1 мА, сопротивление рамки измерительной головки равно Rи = 1 кОм, а систематическая погрешность $\delta_{Iu} - 1$ %. Необходимо рассчитать сопротивление шунта, чтобы полное отклонение стрелки амперметра PI2 соответствовало току IPI1 = 1 А (максимальный измеряемый ток), а его систематическая погрешность $\delta_{PI2}$ не превышала 2 %.

Расчет сопротивления шунта производят по формуле:

$$R_{ш} = \frac{R_u}{n-1}$$

где $R_ш$, $R_и$ — соответственно сопротивления шунта и измерительной головки , Ом; $n$ — число, показывающее, во сколько раз должен быть увеличен предел измерений.

Коэффициент $n$ определяем по формуле:

$$n = \frac{I_{PI1}}{I_{no}} = \frac{1000}{1} = 1000.$$

Определяем сопротивление шунта $R_ø$ :

$$R_{ш} = \frac{R_u}{n-1} = \frac{1000}{999} \approx 1{,}001 \text{ Ом}.$$

Проверим результаты расчета с использованием идеального источника тока *G1* на 1 А и эталонного амперметра *PI1* с помощью программы EWB5.12. Схема моделирования с результатами представлена на рисунке 4.

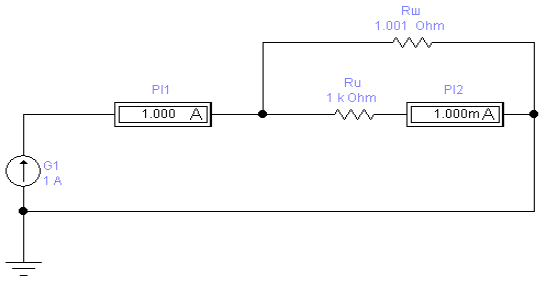



**Рис. 4.** Схема моделирования с результатами с идеальным источником тока

Проверим результаты расчета для реальной электрической цепи с помощью программы EWB5.12. Напряжение $U_{G1}$ в этой цепи согласно ТЗ задается источником напряжения G1 составляет 10 В. Для получения тока величиной $I_{PI1}$ = 1 А необходимо включить в эту цепь сопротивление нагрузки $R_H$, величина которого будет равняться:

$$R_H = \frac{U_{G1}}{I_{PI1}} = \frac{10}{1} = 10 \text{ Ом}$$

Составим модель с использованием только эталонного амперметра *PI1*, представленную на рисунке 5.

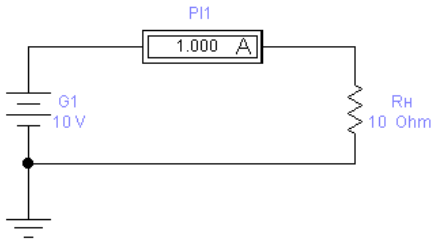



**Рис. 5.** Схема моделирования с результатами реальной цепи с эталонным амперметром

Далее включим в эту схему синтезированный нами амперметр *PI2*. Результаты моделирования представлены на рисунке 6.

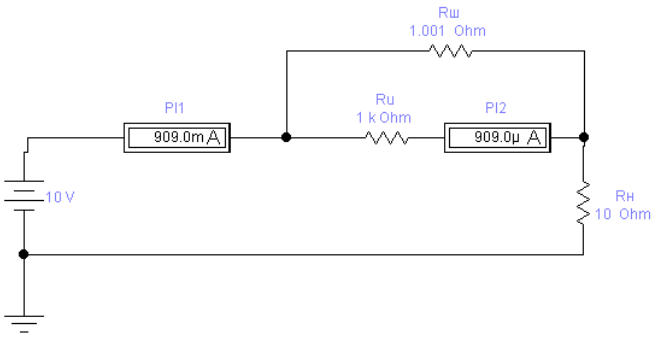



**Рис. 6.** Схема моделирования с результатами с измерительной головкой, имеющей сопротивление рамки 1 кОм и тока полного отклонения 1 мА

Результаты моделирования показали, что синтезированный нами амперметр изменил величину тока в цепи с 1 А до 0,909 А, тем самым изменил параметры исходной цепи. Относительное отклонение тока в цепи $\delta_I$ (систематическая ошибка), связанное с использованием для измерения тока синтезированного амперметра составила

$$\delta_I = \frac{1 - 0{,}909}{1} = \frac{0{,}091}{1} = 9{,}1\%,$$

что обусловлено внесением в исходную цепь дополнительного сопротивления. Полученные результаты по величине погрешности измерения тока существенно отличаются от заданных в ТЗ: 9,1 % вместо 2 %.

Уменьшить эту погрешность можно за счет уменьшения сопротивления шунта $R_{ш}$. Это уменьшение можно получить за счет подбора другой измерительной головки с меньшими сопротивлением рамки $R_u$ и (или) током полного отклонения $I_{no}$.

Обычно $R_u >> R_ø$. В этом случае погрешность, обусловленная внесением в исходную цепь дополнительного сопротивления, будет определяется как:

$$\delta_I = \frac{R_{ш}}{R_H},$$

где $R_H$ - сопротивление цепи, включенное последовательно с амперметром.

На рисунках 5 и 6 это сопротивление нагрузки.

Отсюда при известном значении $\delta_I$ можно определить

$R_{ш} = R_H \cdot \delta_I$.

В свою очередь погрешность, обусловленная внесением в исходную цепь дополнительного сопротивления, можно найти на основании данных ТЗ

$$\delta_I = \delta_{PI2} - \delta_{Iu} = 2 - 1 = 1\%.$$

Тогда $R_{ш} = 10 \cdot 0{,}01 = 0{,}1$ Ом.

При сохранении величины тока максимального отклонения измерительной головки согласно ТЗ, равной $I_{noТЗ} = 1$ мА новое значение сопротивление рамки измерительной головки

$$R_u = R_{ш} \cdot (n - 1) = 0{,}1 \cdot 999 \approx 100 \text{ Ом}.$$

Промоделируем в EWB схему, представленную на рисунке 6, с новыми параметрами $R_u$ и $R_ш$. Результаты моделирования представлены на рисунке 7.

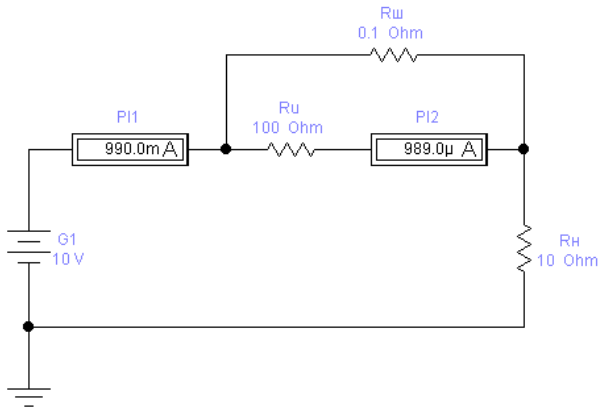



**Рис. 7.** Результаты моделирования с измерительной головкой, имеющей сопротивление рамки 100 Ом и тока полного отклонения 1 мА

При сохранении величины сопротивления рамки измерительной головки согласно ТЗ, равной $R_{uТЗ} = 1$ кОм, новое значение числа *n*, показывающее, во

сколько раз должен быть уменьшен предел тока полного отклонения $I_{по}$ рамки измерительной головки будет равен

$$n = \frac{R_{uТЗ}}{R_{ш}} + 1 = \frac{1000}{0{,}1} + 1 \approx 10^4 .$$

В этом случае измерительная головка должна иметь ток полного отклонения $I_{по}$, равный

$$I_{по} = \frac{I_{PI1}}{n} = \frac{1}{10^4} = 10^{-4}\,\text{А или } 0{,}1\,\text{мА}.$$

Промоделируем в EWB схему, представленную на рисунке 6, с новыми параметрами $I_{по}$ и $R_ш$. Результаты моделирования представлены на рисунке 8.

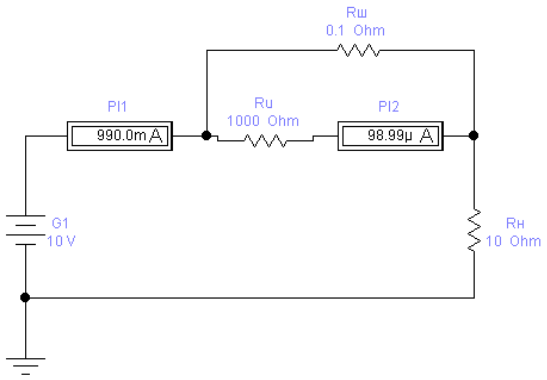



**Рис. 8.** Результаты моделирования с измерительной головкой, имеющей сопротивление рамки 1000 Ом и тока полного отклонения 0,1 мА

Результаты моделирования показали, что синтезированный нами амперметр изменил величину тока в цепи с 1 А до 0,99 А, тем самым всё- таки несколько изменил параметры исходной цепи, но в пределах требования ТЗ. Относительное отклонение тока в цепи $\delta_I$ (систематическая ошибка) , связанное с использованием для измерения тока синтезированного амперметра составила

$$\delta_I = \frac{1 - 0{,}99}{1} = \frac{0{,}01}{1} = 1\%,$$

что соответствует требованию ТЗ.

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2
## ВОЛЬТМЕТРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Целью лабораторной работы является изучение принципов работы вольтметров магнитоэлектрической системы. Варианты заданий представлены в таблице 4.

Таблица 4

Варианты заданий

| № варианта (в списке группы) | Максимальное измеряемое напряжение $U_n$, В | Внутреннее сопротивление цепи $R_i$, кОм | Точность измерения $\delta_{PV2}$, % | Ток полного отклонения измерительной головки $I_{no}$, мА | Класс точности измерительной головки $\delta_{lu}$, % | Сопротивление измерительной головки $R_u$, Ом |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0,1 | 0,5 | 0,02 | 0,05 | 2500 |
| 2 | 2 | 0,3 | 0,2 | 0,03 | 0,1 | 2200 |
| 3 | 3 | 0,5 | 0,8 | 0,05 | 0,2 | 2000 |
| 4 | 5 | 0,5 | 1,0 | 0,1 | 0,5 | 1800 |
| 5 | 10 | 0,8 | 2,0 | 0,25 | 1,0 | 1200 |
| 6 | 12 | 1,0 | 3,0 | 0,3 | 1,5 | 1000 |
| 7 | 15 | 1,0 | 5,0 | 0,5 | 2,5 | 900 |
| 8 | 20 | 2,0 | 6,0 | 0,6 | 4,0 | 1000 |
| 9 | 25 | 5,0 | 0,8 | 1,5 | 0,2 | 800 |
| 10 | 30 | 10,0 | 1,0 | 2,0 | 0,5 | 500 |
| 11 | 50 | 50,0 | 2,0 | 2,5 | 1,0 | 700 |
| 12 | 75 | 10,0 | 3,0 | 3,0 | 1,5 | 500 |
| 13 | 100 | 20,0 | 5,0 | 5,0 | 2,5 | 600 |
| 14 | 150 | 30,0 | 2,0 | 0,6 | 1,0 | 800 |
| 15 | 200 | 40,0 | 4,0 | 0,75 | 1,5 | 400 |
| 16 | 300 | 10,0 | 4,0 | 1,0 | 2,5 | 500 |
| 17 | 500 | 30,0 | 5,0 | 1,5 | 4,0 | 300 |

Окончание табл. 4

| № варианта (в списке группы) | Максимальное измеряемое напряжение $U_n$, В | Внутреннее сопротивление цепи $R_i$, кОм | Точность измерения $\delta_{PV2}$, % | Ток полного отклонения измерительной головки $I_{no}$, мА | Класс точности измерительной головки $\delta_{lu}$, % | Сопротивление измерительной головки $R_u$, Ом |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 18 | 1000 | 50,0 | 0,5 | 2,0 | 0,05 | 250 |
| 19 | 1500 | 100 | 0,2 | 2,5 | 0,1 | 400 |
| 20 | 2000 | 100 | 0,8 | 3,0 | 0,2 | 600 |
| 21 | 3000 | 100 | 1,0 | 5,0 | 0,5 | 100 |
| 22 | 5000 | 200 | 2,0 | 6,0 | 1,0 | 50 |
| 23 | 7500 | 200 | 3,0 | 7,5 | 1,5 | 35 |
| 24 | 10000 | 300 | 5,0 | 10,0 | 2,5 | 40 |
| 25 | 20000 | 500 | 6,0 | 3,0 | 4,0 | 50 |

## 2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Несмотря на все большее распространение цифровых электроизмерительных приборов, в настоящее время промышленностью выпускаются и находятся в эксплуатации большое число средств измерений, основанных на преобразовании электромагнитной энергии, подводимой к прибору, в механическую энергию перемещения подвижной части. Широкий диапазон измеряемых величин, конструкционное разнообразие, незначительное потребление энергии выгодно отличают такие электромеханические приборы, а порой делают их применение единственно возможным для ряда измерительных приборов.

Среди разнообразия электромеханических систем наиболее широкое распространение получили приборы магнитоэлектрической системы, в которых вращающий момент рамки с указателем создается взаимодействием между полем постоянного магнита и одним или несколькими проводниками (на рамке) с током. Магнитоэлектрические приборы изготавливаются с подвижной рамкой, но есть конструкции и с подвижным магнитом.

К достоинствам данной системы следует отнести высокую чувствительность и точность, равномерную шкалу, относительно небольшое влияние внешних полей. К недостаткам – невозможность измерения в цепях с переменным током без дополнительных устройств и чувствительность к перегрузкам.

В целях унификации маркировки типономиналов приборов систему, к которой относится измерительный механизм, обозначают следующими

буквенными индексами: М – магнитоэлектрическая, Э – электромагнитная, Д – электродинамическая, С – электростатическая.

Для характеристики основных режимов и условий работы электроизмерительных приборов непосредственного отсчета на их шкалах в зонах свободного пространства от рабочей части имеются условные обозначения. Наиболее употребительные из них были приведены в табл. 2.

Кроме типа измерительной системы, в группе знаков условных обозначений указывают устойчивость прибора к климатическим воздействиям (А – приборы для работы в закрытых сухих, отапливаемых помещениях; Б, В1, Б2, БЗ – для работы в закрытых не отапливаемых помещениях; В, В1, В2, В3 – для работы в полевых и морских условиях), класс точности, величина испытательного напряжения и другие сведения.

В качестве примера на рис. 9 пока дана шкала прибора магнитоэлектрической системы М4200, использующегося в качестве миллиамперметра.

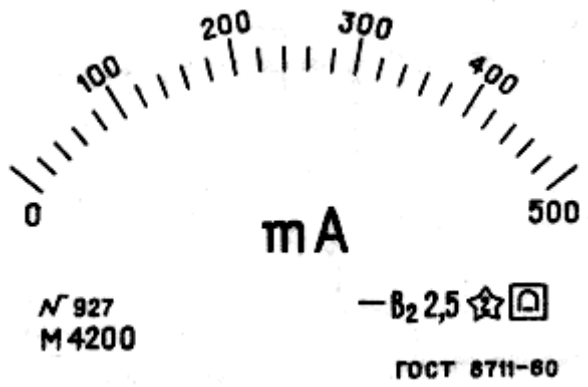



**Рис. 9.** шкала прибора магнитоэлектрической системы М4200

В левой части внизу указаны тип измерительного прибора и его заводской номер.

В правой – условия применения для измерений в цепях постоянного тока с возможностью работы в полевых условиях и при повышенной влажности; класс точности 2,5; измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ, соответствует требованиям ГОСТу.

О возможном применении прибора для тех или иных измерений можно судить по таким его характеристикам, как класс точности и чувствительность.

По классу точности существуют приборы классов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4. Эти числа выражают основную, наибольшую допустимую, приведенную относительную погрешность приборов.

Наиболее точными являются приборы класса 0,05. Погрешность выражается в процентах относительно максимального значения рабочей части шкалы прибора.

Пример – предел измерения миллиамперметра 100 мА, число делений на шкале 100, класс точности прибора 1 (что соответствует ±1 %). В этом случае

разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины может быть не более ± 1 мА.

Для приборов с двусторонней шкалой, то есть с нулем посередине, погрешность выражается в процентах от суммы конечных значений рабочей части шкалы. Если у второго миллиамперметра с такой же длиной шкалы предельное значение измеряемой величины 10 мА, число делений на шкале токе 100, то для первого прибора на интервал измерения величины в 1 мА приходится одно деление шкалы, а для второго прибора 10.

Это означает, что вторым прибором можно измерять значения параметров с точностью до 0,1, а первым – только до 1 мА, т. е. у второго прибора разрешающая способность выше.

Эта способность измерительного устройства характеризует его чувствительность, которая определяется количеством единиц измеряемой величины, отсчитываемых на одно деление.

К основным электрическим параметрам, определяющим возможность использования прибора для данных условий работы, относятся ток полного отклонения ($I_{no}$), т. е. наибольший ток, при котором стрелка отклоняется до конечной отметки шкалы, и сопротивление рамки прибора ($R_u$). Значение первого параметра определяется максимальным значением шкалы прибора.

Так, например, если имеется миллиамперметр с конечной отметкой шкалы 100, то это соответствует току полного отклонения 100 мА. Такой прибор можно включать только в те цепи, токи в которых не превышают 100 мА. Величину второго параметра ($R_u$) часто указывают на шкале прибора.

Если значения параметров для конкретного прибора неизвестны, их нетрудно определить самостоятельно. Для этого потребуется гальванический элемент, образцовый миллиамперметр, переменный резистор с сопротивлением в несколько килоом, дополнительный постоянный резистор ($R_д$) для ограничения тока в измеряемой цепи.

Сопротивление резистора $R_д$ рассчитывается, исходя из напряжения источника питания и известного тока полного отклонения образцового миллиамперметра, по закону Ома. Исследуемый измерительный прибор (ИП) включается в соответствии со схемой, приведенной на рис. 10.

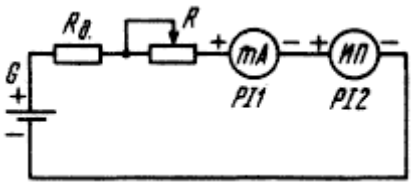



**Рис. 10.** Схема включения измерительного прибора

Переменным резистором *R* регулируют ток в цепи до такого значения, при котором стрелка ИП *PI2* установится против конечной отметки шкалы. Значение этого тока, отсчитанное по шкале образцового прибора *PI1*, и будет

током полного отклонения стрелки исследуемого прибора. Для определения сопротивления рамки исследуемого измерительного прибора нужно воспользоваться схемой на рис. 3.

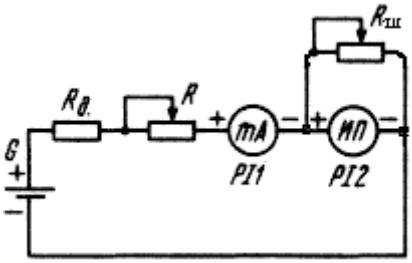



**Рис. 11.** Схема включения измерительного прибора при определении сопротивления его рамки

Отличается она от предыдущей включением шунта – резистором $R_ш$, подключенным параллельно обмотке рамки (*PI2*).

В данном случае сопротивление шунта выбрано в пределах 1...6,8 кОм. Изменением его сопротивления добиваются уменьшения показания *PI2* вдвое. Затем переменным резистором *R* по образцовому миллиамперметру *PI1* восстанавливают определенное ранее значение тока полного отклонения.

Последовательной неоднократной регулировкой $R_ш$ и *R* добиваются соответствия тока в цепи, равного начальному, т. е. току полного отклонения ИП, а ток непосредственно через ИП должен быть вдвое меньшим. Когда будет достигнуто такое состояние, ток через ИП и $R_ш$ становится одинаковым, следовательно, и сопротивления параллельных ветвей тоже одинаковы. Измерив омметром сопротивление рабочей части $R_ш$ (по схеме между средним и правым выводами), находим второй неизвестный параметр.

Применение шунтов позволяет расширить пределы показаний миллиамперметра или амперметра (но при этом ухудшаются разрешающая способность, чувствительность при измерениях). Расчет сопротивления шунта производят по формуле

$$R_ш = \frac{R_u}{n-1},$$

где $R_ш$, $R_u$ – соответственно сопротивления шунта и прибора без шунта, Ом; *n* – число, показывающее, во сколько раз должен быть увеличен предел измерений.

Прибор без шунта называют измерительной головкой.В зависимости от сопротивления шунта в качестве этого элемента могут быть использованы медный провод на катушке, металлическая пластина, нормализованный (стандартный) резистор с малым допуском отклонения сопротивления. Отечественной промышленностью выпускаются калиброванные наружные шунты (НШ), рассчитанные на определенные номинальные токи и падения напряжения на них (45, 60, 75, 100 и 300 мВ).

Для измерения миллиамперметром или амперметром напряжения последовательно с прибором следует включить добавочный резистор. В этом

случае входное сопротивление получившегося вольтметра будет складываться из сопротивлений рамки стрелочного прибора и добавочного резистора (ДС). Последнее для имеющегося прибора и необходимой измеряемой величины напряжения можно определить по формуле

$$R_Д = \frac{U_n}{I_{no}} - R_u,$$

где $U_n$ – измеряемое напряжение, В; $R_Д$, $R_u$ – соответственно дополнительное сопротивления и сопротивления измерительной головки, Ом; $I_{no}$ – ток полного отклонения измерительной головки, А.

Входное сопротивление вольтметра на разных пределах измерений разное, поэтому удобнее оценивать вольтметр его входным сопротивлением, отнесенным к 1В измеряемой величины (относительное сопротивление, Ом/В). Чем больше относительное входное сопротивление, тем меньше прибор влияет на параметры измеряемой цепи и тем точнее (при прочих равных условиях) будут производимые вольтметром измерения.

Некоторые типы приборов магнитоэлектрической системы (наиболее распространенных в практике измерений) и их характеристики были приведены в табл. 3. В данной таблице для каждого типа приборов указаны виды измеряемой величины, а для каждого вида измерений класс точности выпускаемого прибора и верхний предел измерения. Для каждого измерителя тока приведены его внутреннее сопротивление (или интервал сопротивлений, в пределах которых может быть изготовлена рамка в зависимости от чувствительности прибора), а для измерителей напряжения ток полного отклонения стрелочного прибора.

Пример. Прибор типа М900: микроамперметр – выпускается с классом точности 1,0 и 1,5; пределы измерений, мкА – 5-0-5 (шкала прибора с нулем посередине), 0-10, 10-0-10, 0-15, 0-20, 0-25 (в таблице даны значения только минимального и максимального пределов измерений – 5 мкА и 25 мкА); внутреннее сопротивление прибора с пределом измерения 5 мкА – 5000 Ом, 25 мкА – 800 Ом; милливольтметр – выпускается с классом точности 1,0 и 1,5; пределы измерений, мВ – 5-0-5, 0-10, 10-0-10, 0-15, 0-20, 0-25; ток полного отклонения 1 мА. Более подробные сведения о характеристиках и условиях применения электроизмерительных приборов, методах измерений, а также о приборах, не вошедших в приводимую таблицу, можно найти в литературе [1-3].

## 2.2. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТМЕТРА ДЛЯ ЗАДАННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ

Ток полного отклонения измерительной головки согласно ТЗ равен $I_{no}$ = 1 мА, сопротивление рамки измерительной головки равно $R_u$ = 1 кОм, а систематическая погрешность $\delta_{Iu}$ – 1 %. Необходимо рассчитать добавочное сопротивление, чтобы полное отклонение стрелки вольтметра *PV2*

соответствовало напряжению $U_n$ = 10 В, внутреннее сопротивление цепи $R_i$ равное 1 кОм, а его систематическая погрешность $\delta_{PI2}$ не превышала 2 %.

Расчет добавочного сопротивления производят по формуле:

$$R_Д = \frac{U_n}{I_{no}} - R_u,$$

где $U_n$ – измеряемое напряжение, В; $R_Д$, $R_u$ – соответственно сопротивления шунта и измерительной головки, Ом; $I_{no}$ – ток полного отклонения измерительной головки, А.

Определяем величину добавочного сопротивления согласно данным, указанных в ТЗ

$$R_Д = \frac{10}{0,001} - 1000 = 9000 \text{ Ом или } 9 \text{ кОм}$$

Проверим результаты расчета с использованием идеального источника напряжения *G1* на 10 В и эталонного вольтметра *PV1* с помощью программы EWB5.12. Результаты моделирования представлены на рисунке 12.

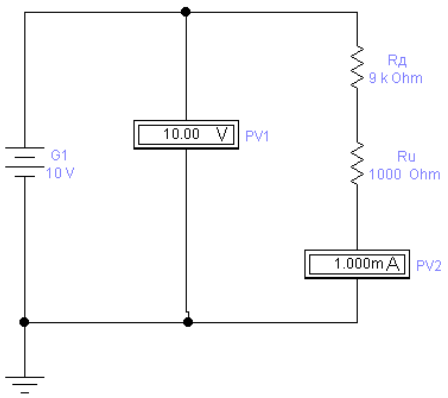



**Рис. 12.** Результаты моделирования с идеальным источником напряжения

Проверим результаты расчета для реальной электрической цепи, имеющей внутренне сопротивление $R_i$ равное 1 кОм с помощью программы EWB5.12. Сначала составим модель с использованием только эталонного вольтметра *PV1*, представленную на рисунке 13.

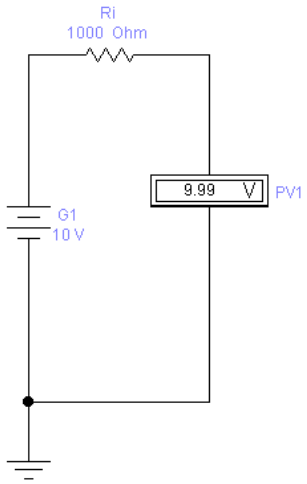



**Рис. 13.** Результаты моделирования реальной цепи с эталонным вольтметром

Любой эталонный вольтметр имеет конечные значения входного сопротивления, поэтому он также также влияет на параметры измеряемой реальной цепи, поэтому измеренное им напряжение 9,99 В несколько отличается от истинного 10 В.

Далее включим в эту схему синтезированный нами вольтметр *PV2*. Результаты моделирования представлены на рисунке 14.

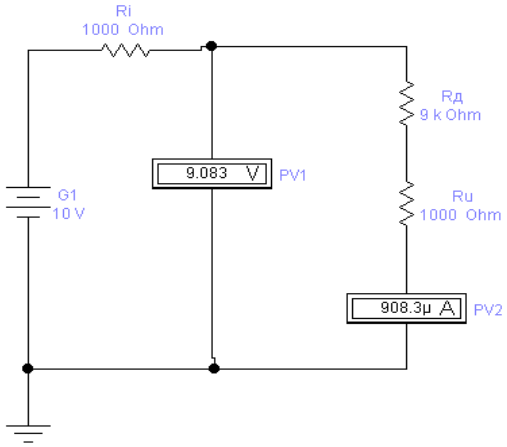



**Рис. 14.** Результаты моделирования с измерительной головкой, имеющей сопротивление рамки 1 кОм и тока полного отклонения 1 мА

Результаты моделирования показали, что синтезированный нами вольтметр изменил величину напряжения в цепи с 9,99 В до 9,083 В, тем самым изменил параметры исходной цепи. Относительное отклонение напряжения в цепи $\delta_U$ (систематическая ошибка), связанное с использованием для измерения напряжения синтезированного вольтметра составила

$$\delta_U = \frac{9,99 - 9,083}{9,99} = \frac{0,907}{9,99} = 9,08\ \%,$$

что обусловлено внесением в исходную цепь дополнительного сопротивления.

Уменьшить это отклонение можно за счет увеличения значения добавочного сопротивления $R_{Д}$ и сопротивлением рамки $R_u$. Это увеличение можно получить за счет подбора другой измерительной головки с меньшим током полного отклонения $I_{no}$.

Погрешность, обусловленная внесением в исходную цепь дополнительного сопротивления, можно определить как

$$\delta_U = \frac{R_i}{R_Д + R_u + R_i} = \frac{1000}{9000 + 1000 + 1000} = 9{,}09\ \%,$$

где $R_Д + R_u + R_i$ – сопротивление цепи, включенное последовательно с измерительной головкой, Ом.

В свою очередь погрешность, обусловленная внесением в исходную цепь дополнительного сопротивления, можно найти на основании данных ТЗ

$$\delta_U = \delta_{PV2} - \delta_{Uu} = 2 - 1 = 1\%.$$

Отсюда при известном значении $\delta_U$ можно определить $R_Д$:

$$R_Д = \frac{R_i}{\delta_U} - R_u - R_i = \frac{1000}{0{,}01} - 1000 - 1000 = 98000 \text{ Ом или } 98 \text{ кОм}.$$

Тогда сопротивление цепи, включенное последовательно с измерительной головкой будет равно

$$R_Д + R_u + R_i = 98 + 1 + 1 = 100 \text{ кОм}.$$

Ток полного отклонения $I_{no}$ определим по формуле

$$I_{no} = \frac{U_n}{R_Д + R_u + R_i} = \frac{10}{10^5} = 10^{-4} = 0{,}1 \text{ мА}$$

Промоделируем в EWB схему, представленную на рисунке 10, с новыми параметрами $R_u$ и $R_Д$. Результаты моделирования представлены на рисунке 15.

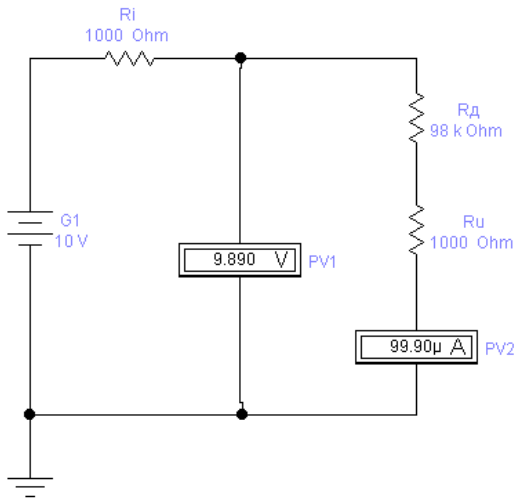



**Рис. 15.** Результаты моделирования вольтметра с измерительной головкой, имеющей сопротивление рамки 1000 Ом и тока полного отклонения 0,1 мА

Результаты моделирования показали, что синтезированный нами амперметр изменил величину напряжения в цепи с 9,99 В до 9,89 В, тем самым всё- таки несколько изменил параметры исходной цепи, но в пределах требования ТЗ. Относительное отклонение тока в цепи $\delta_I$ (систематическая ошибка), связанное с использованием для измерения тока синтезированного амперметра составила

$$\delta_U = \frac{9,99 - 9,89}{9,99} = \frac{0,1}{9,99} \approx 1\ \%,$$

Выводы: наиболее точные результаты измерения напряжения вольтметрами со стрелочными измерительными головками магнитоэлектрической системы получаются при наиболее высоком классе точности и минимальном токе полного отклонения самой головки. При выборе измерительной головки необходимо учитывать конструктивные и экономические её параметры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные методические указания направлены на изучение принципов работы амперметров и вольтметров магнитоэлектрической системы.

Наиболее точные результаты измерения тока синтезированными амперметрами со стрелочными измерительными головками магнитоэлектрической системы получаются при наиболее высоком классом точности и минимальными сопротивлением рамки и тока полного отклонения самой измерительной головки. При выборе измерительной головки необходимо учитывать конструктивные и экономические её параметры.

В случае измерения напряжения вольтметрами со стрелочными измерительными головками магнитоэлектрической системы Наиболее точные результаты получаются при наиболее высоком классе точности и минимальном токе полного отклонения самой головки. При выборе измерительной головки необходимо учитывать конструктивные и экономические её параметры.

При необходимости углубить теоретические знания по рассмотренным темам следует обратиться к библиографическому списку.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нефедов В.И. Метрология и радиоизмерения: учебник для вузов / В.И. Нефедов, А.С. Сигов, В.К. Бирюков [и др.]; ред. В.И. Нефедов – 2 изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2006 – 526 с.
2. Муратов А. В.Метрология, стандартизация и технические измерения: учебное пособие / А. В. Муратов - Воронеж. гос. техн. ун-т. - Воронеж: [б. и.], 2011 (Воронеж, 2011). - 245 с.
3. Димов Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник: допущено МО РФ / Ю.В. Димов - 3-е изд. - СПб. : Питер, 2010 (СПб. : Печатный двор им. А. М. Горького, 2005). - 432 с.
4. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: учебник для вузов : допущено МО РФ / под ред. В. И. Нефедова, А. С. Сигова. - изд. 3-е, перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 2005 (Смоленск : Смоленская обл. типография им. В. И. Смирнова, 2005). - 598 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ..... 3
1. Лабораторная работа №1. Амперметры магнитоэлектрической системы .... 3
1.1. Теоретические сведения ..... 4
1.2. Расчет и моделирование амперметра для заданной измерительной головки ..... 13
2. Лабораторная работа №2. Вольтметры магнитоэлектрической системы ... 16
2.1. Теоретические сведения ..... 18
2.2. Расчет и моделирование вольтметра для заданной измерительной головки ..... 22
Заключение ..... 26
Библиографический список ..... 27

# Метрология и радиоизмерения

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

*к выполнению лабораторных работ № 1,2*
*для студентов специальности 11.05.01*
*«Радиоэлектронные системы и комплексы»*
*очной формы обучения*

Составитель
Худяков Юрий Васильевич

В авторской редакции

Подписано к изданию 14.09.2022.
Уч.-изд. л. 1,5.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84