

КРОТОВА В.И.

ПОТЕНЦИОМЕТРЫ



В. И. КРотова

ПОТЕНЦИОМЕТРЫ

Под редакцией проф. *Н. А. МАРЕНИНА*

ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД — 1940

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
От редакции	6
Предисловие	7
Введение	8

Часть 1

Потенциометры постоянного тока

<i>Глава I</i> — Развитие компенсационного метода измерений	10
Метод Потгендорфа	10
Метод дю-Буа-Реймонда	11
Метод Латнера Кларка	11
Метод Флеминга	12
Прибор Беетца	12
Потенциометр Кромптона	12
Потенциометр фирмы братьев Эллиот	13
Потенциометр фирмы Нальдера	14
Переносный потенциометр Хоуэлла	14
Усовершенствование Бутя и Рэлея	14
Первый потенциометр Фейсснера	15
Дальнейшие усовершенствования, предложенные Фейсснером	15
Усовершенствование конструкции потенциометра, внесенное Рапсом	16
Применение верньера Томсона-Варлея, предложенное Госселем	19
Потенциометр Карпантие	19
Добавление Фравке	20
Потенциометр Бругера	20
Потенциометр Лефельда для термоэлектрических измерений	22
Потенциометр Гаркера	22
Метод Линдек и Роте	23
Дальнейшее усовершенствование потенциометров для измерения малых электродвижущих сил	23
<i>Глава II</i> — Краткая теория метода компенсации и применения потенциометра постоянного тока для измерения основных электрических величин	24
<i>Глава III</i> — Общие замечания о современной конструкции потенциометров постоянного тока	27
Виды конструкций потенциометров, применяемых в настоящее время	27
Требования, предъявляемые к современной конструкции потенциометров постоянного тока	27
<i>Глава IV</i> — Описание схем и конструктивных особенностей различных потенциометров первого вида	28
Современная конструкция потенциометра Рапса	28
Потенциометр Фейсснера, сконструированный фирмой О. Вольфа	29
Усовершенствование потенциометра Вольфа, разработанное лабораторией Эппеля	34
Потенциометр Фейсснера, изготавливаемый фирмой Гартманн и Браун	35
Потенциометр Фейсснера, изготавливаемый фирмой Сименс и Гальске	36
Потенциометр фирмы Карпантие	39
Точный потенциометр фирмы „Кэمبرидж Ко“	41

	Стр.
Потенциометр фирмы Тинслея	42
Потенциометр фирмы Лидс и Нортруп, тип К	43
Точный потенциометр фирмы „Дженераль электрик К ⁰ “	44
Глава V. — Потенциометры, применяемые для измерения электродвижущих сил термопар	46
Общие замечания. Схема Гаусрата и его первый потенциометр	46
Расцепляющая схема Диссельхорста	48
Схема второго потенциометра Гаусрата	50
Вторая схема Диссельхорста	51
Потенциометр Диссельхорста (трехдекадный)	51
Схема Уайта	54
Пятидекадный потенциометр Диссельхорста	55
Потенциометр малого сопротивления с постоянной чувствительностью гальванометра	59
Современная конструкция потенциометра Уайта	61
Декада Франка Уеннера	63
Потенциометр по Уеннеру	64
Лабораторный потенциометр фирмы „Кэмбридж — Инструмент К ⁰ “ для измерения электродвижущих сил термопар	67
Новый потенциометр с разветвленной цепью питания	68
Глава VI. — Потенциометры с неполной компенсацией	72
Теория потенциометра с неполной компенсацией	72
Схема потенциометра Брукса с постоянным сопротивлением цепи гальванометра	76
Описание конструкции потенциометра Брукса „модель 3“, изготовленного фирмой Лидс и Нортруп	79
Специальный делитель напряжения, применяемый с третьей моделью потенциометра Брукса	82
Современная конструкция потенциометра по Бруксу, изготавливаемая фирмой Лидс и Нортруп, „модель № 7“	83
Потенциометр с неполной компенсацией по Карпентеру-Стансфильду	89
Упрощенный потенциометр с неполной компенсацией Илиовиса	90
Глава VII. — Технические потенциометры	94
Ступенчатый потенциометр по Шмидту	95
Технический потенциометр фирмы Сименс и Гальске	98
Потенциометр фирмы Шовен Арну	99
Переносный потенциометр для проверки вольтметров фирмы „Кэмбридж Инструмент К ⁰ “	100
Потенциометр проф. Н. Н. Пономарева для градуировки и проверки приборов	100
Техническое компенсационное устройство для проверки приборов фирмы Вестон	102
Технические потенциометры завода „Пирометр“ типов П ₆ и П _м	105
Пираметр завода „Пирометр“	105
Переносные потенциометры, служащие для измерения термоэлектродвижущих сил термопар на месте установки	106
Переносный потенциометр фирмы Лидс и Нортруп К ⁰	107
Переносный потенциометр завода „Пирометр“	108
Потенциометр для определения содержания водородных ионов фирмы Тинслей	109
Докторский потенциометр, изготавливаемый заводом „Эталон“ (модель № 9)	109
Глава VIII. — Практическое применение потенциометров постоянного тока	110
Выбор гальванометра и определение чувствительности метода измерения	110

	Стр.
О выборе типа потенциометра для точных измерений	114
Работа с потенциометрами и уход за ними	115
Некоторые замечания о точности измерений на потенциометрах постоянного тока и о способах уменьшения погрешности измерений.	116
Часть 2	
Потенциометры переменного тока	
<i>Глава IX.</i> — Компенсационный метод на переменном токе	118
Краткий исторический обзор	118
<i>Глава X.</i> — Общие замечания о компенсационном методе на переменном токе	120
Основной принцип метода	120
Погрешность измерения от несимметричной электродвижущей силы.	121
<i>Глава XI.</i> — Современные конструкции потенциометров переменного тока.	123
<i>Глава XII.</i> — Потенциометры с непосредственным отсчетом (потенциометры с отсчетом в полярных координатах)	124
Потенциометр переменного тока с двойным генератором Франке . .	125
Потенциометр Драйсдэла для постоянного и переменного токов . .	127
Потенциометр Круковского	132
Потенциометр Шарпа и Кроуфорда	136
Потенциометр завода „Электроаппарат“	136
Демонстрационный потенциометр переменного тока Кенэлли . . .	139
Потенциометры для измерения на радио-частотах	140
Ламповый потенциометр Уэнта	141
<i>Глава XIII.</i> — Потенциометры с отсчетом взаимно-перпендикулярных составляющих или комплексные потенциометры	144
Комплексный потенциометр Ларсена	144
Потенциометр Ларсена, выполненный Кенэлли и Филяндером . . .	145
Потенциометр Кэмпбелла-Ларсена	145
Компенсационная схема Дегинья, служащая для измерения малых углов на технических частотах	148
Компенсационная схема Шеринг-Альберти для проверки измерительных трансформаторов	150
Видоизменение схемы Ларсена для измерения малых напряжений на звуковых частотах (схема Паже)	151
Комплексный потенциометр Эрланга	153
Потенциометр Педерсена	156
Комплексный потенциометр Гейгера	157
Комплексный потенциометр Голла	163
Упрощенный комплексный потенциометр Голла переносного типа .	166
Комплексный потенциометр Гейгера с изолированными от цепи питания компенсирующими цепями	167
Комплексный потенциометр Гейгера для напряжений порядка 100 V .	168
Автоматический комплексный потенциометр Мартина Вальда . . .	169
Автоматический потенциометр с зависящим от сдвига фаз нулевым мотором	170
Автоматический потенциометр с двумя ферродинамическими приборами	171
<i>Глава XIV.</i> — Общие замечания о работе с потенциометрами переменного тока и сравнение некоторых из описанных типов	173
<i>Глава XV.</i> — Применение потенциометров переменного тока	176

ОТ РЕДАКЦИИ

Область применения потенциометров постоянного тока за последнее время значительно расширилась, и теперь не редкость встретить такой прибор, часто в специальном для данного измерения конструктивном оформлении, не только в исключительно электроизмерительных и исследовательских лабораториях, но и на заводах — в заводских лабораториях и в цехах для контроля производства.

Подобная же эволюция совершается и с потенциометрами переменного тока, правда, вследствие их специфических особенностей, в более замедленных темпах. В настоящее время имеется большое число различных конструкций потенциометров, с которыми инженеру и технику приходится не только уметь работать, но часто и произвести выбор наиболее пригодного типа для данного измерения. Однако такое полное и систематическое ознакомление с современными потенциометрами было довольно затруднительным, так как описания различных их типов и схем разбросаны в текущей специальной литературе, почти исключительно иностранной, если не считать довольно скудных сведений о потенциометрах, помещенных в соответствующих отделах учебников по электрометрии.

Настоящая книга в значительной мере заполняет этот пробел. Автор собрал здесь почти все имеющиеся схемы и конструкции потенциометров, включая выпущенные в самое последнее время, сопроводив их критическим разбором их достоинств и недостатков, достигаемой точности измерения и области применения. Читатель найдет в этой книге необходимые указания для выбора нужного типа потенциометра и для работы с ним.

Проф. Н. МАРЕНИН

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая книга имеет целью ознакомить читателей, с историческим развитием компенсационного метода измерений и с современными конструкциями потенциометров.

Большое количество имеющихся в настоящее время типов потенциометров и широкая область их применения заставляют обратить внимание на сравнительную оценку существующих типов потенциометров и на пригодность их для различных областей измерения с различными требованиями точности.

Особенности компенсации на переменном токе заставляют посвятить потенциометрам переменного тока специальный отдел и ввести главу об установках этих потенциометров.

Особое внимание, уделенное выбору нулевого прибора, объясняется большим влиянием параметров гальванометров как на чувствительность всей установки, так и на удобство и быстроту работы на потенциометре.

Ввиду того, что книга эта предназначена, главным образом, для работников научно-исследовательских институтов и лабораторий, в ней не уделено достаточного внимания отделу промышленных автоматических потенциометров, и лицам, интересующимся этим вопросом, предлагается обратиться к указанным в библиографии источникам.

В чертежах автор старался придерживаться стандартных обозначений, кроме некоторых чертежей, где схемы представлены в таком виде, в каком они были первоначально даны в оригинале.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение электрических величин: напряжения, тока, мощности, сопротивления — производится уравниванием усилия, создаваемого измеряемой величиной, при посредстве какой-либо противодействующей силы.

В стрелочных приборах это противодействие создается механической силой; закручиванием пружины, весом, увеличивающимся с увеличением отклонения подвижной части прибора, т. е. с увеличением измеряемой электрической величины.

В приборах нулевого типа, как например в мостах и потенциометрах, напряжение создаваемое измеряемой величиной, уравнивается напряжением, создаваемым внешним электрическим источником.

Мосты и потенциометры принципиально весьма близки друг к другу. Основным их различием является то, что в мостах производится непосредственное сравнение электрических сопротивлений, а в потенциометрах — электродвижущих сил (разностей потенциалов).

При измерении электродвижущих сил или разностей потенциалов методом компенсации, отношение электродвижущей силы измеряемой к электродвижущей силе образцовой определяется как отношение двух сопротивлений, по которым во время измерения проходит неизменяемый по величине ток.

Основным преимуществом измерения при посредстве потенциометра является то, что в момент компенсации измерений объект не нагружается никаким добавочным током, т. е. практически потенциометр, присоединяемый к некоторой схеме, имеет эквивалент сопротивления, равный бесконечности.

Таким образом компенсационным методом измеряется не разность потенциалов на зажимах источника, а его действительная электродвижущая сила. Вторым, вытекающим из первого, преимуществом измерения на потенциометрах является исключение влияния сопротивления проводов, идущих от измеряемого объекта к потенциометру.

Точность измерения, достигаемая при помощи потенциометров, значительно выше точности измерений на стрелочных приборах.

Применяя потенциометр и нормальный элемент Вестона, возможно производить непосредственное измерение электродвижущей силы. Применяя, кроме потенциометра и нормального элемента, еще и образцовое сопротивление, возможно производить измерения, из которых могут быть вычислены как ток и сопротивление, так и мощность.

Потенциометры применяются для весьма точных измерений электродвижущих сил и разностей потенциалов, в особенности таких источников и в таких схемах, нагружать которые добавочным током невозможно или нежелательно, как например, при измерениях электродвижу-

ших сил нормальных элементов, при измерениях РН, при измерениях силы тока по падению напряжения в образцовом сопротивлении и др. Хотя областью применения потенциометров являются, главным образом, измерения, производимые в лабораторных условиях, однако для измерений термоэлектродвижущих сил термопар потенциометры получили очень большое промышленное распространение.

Стремление повысить точность измерений на переменном токе и получить возможность сравнения действующих значений напряжения на переменном токе с основными электрическими единицами заставили разработать ряд конструкций потенциометров, применяемых как на постоянном, так и на переменном токе. Несмотря на то, что точность измерения на потенциометрах переменного тока значительно меньше точности измерения на постоянном токе, область их применения очень разнообразна, и потенциометры переменного тока получили большое распространение как в лабораторных условиях, так и в промышленности.

ПОТЕНЦИОМЕТРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГЛАВА I

РАЗВИТИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Изложенный в этой главе краткий исторический материал дает картину развития самого метода компенсации и постепенного усложнения и улучшения конструкции потенциометра и развития области его применения. Этот обзор доведен до начала XX столетия, когда уже были полностью разработаны теория и основные конструктивные виды потенциометров, позволяющие производить измерения с высокой степенью точности.

Метод Поггендорфа

Компенсационный метод измерения был предложен в 1841 г. Поггендорфом (Poggendorf) [108]. При измерении электродвижущих сил элементов, Поггендорф пришел к заключению, что точное измерение электродвижущей силы поляризующегося элемента возможно лишь при включении навстречу ему либо другой известной электродвижущей силы, либо известной разности потенциалов. В своем первом способе, схема включения которого ясна из рис. 1, Поггендорф замыкал некоторый вспомогательный, неполяризующийся элемент с электродвижущей силой большей, чем у испытуемого, на проволоку известного сопротивления R и электродвижущую силу этого элемента E_1 принимал за известную. Ток в этой цепи

$$I = \frac{E_1}{R + r},$$

где r — внутреннее сопротивление вспомогательного элемента, служившего образцовым. Испытуемый элемент Поггендорф присоединял к части сопротивления R — r_1 через гальванометр. Регулируя величину r_2 , т. е. того сопротивления, к которому присоединялся испытуемый элемент, он добивался возвращения на нуль подвижной части гальванометра. В этом случае ток в цепи гальванометра равен нулю, и испытуемый элемент тока не дает. Напряжение на зажимах сопротивления r_2 равно электродвижущей силе испытуемого элемента, $E_2 = \frac{E_1 r_2}{R + r}$. Как видно, в это выражение не входит величина внутреннего сопротивления испытуемого

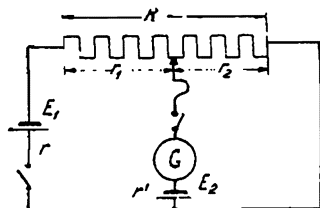


Рис. 1. Схема Поггендорфа.

элемента. При малой величине сопротивления r по сравнению с R и r_2 , возможно написать $\frac{E_2}{E_1} = \frac{r_2}{R}$: эта последняя формула упрощает подсчет, но вводит известную ошибку в результат измерения.

Анализируя точность полученных результатов, Поггендорф пришел к заключению, что основной причиной ошибки измерения является непостоянство силы тока в сопротивлении R , происходящее от непостоянства электродвижущей силы образцового элемента. Чтобы избежать влияния непостоянства силы тока, был предложен „второй способ Поггендорфа“, в котором сила тока измерялась при посредстве синус-гальванометра. В этом случае в момент компенсации электродвижущая сила испытуемого элемента $E_2 = Ir_2$. Точность измерения, указываемая Поггендорфом, не превосходила нескольких процентов. Благодаря трудности подгонки сопротивлений продолжительность измерений, по указанию Поггендорфа, была порядка нескольких часов.

Метод дю-Буа Реймонда

Дальнейшее усовершенствование метода компенсации было введено в 1861 г. дю-Буа Реймондом (Du Bois Reimond) [33], применившим калиброванную проволоку (в первом варианте латунную). Оба конца этой проволоки присоединялись к зажимам образцового элемента, а испытуемый элемент он присоединял одним полюсом к тому концу калиброванной проволоки, к которому присоединялся одноименный с ним полюс образцового элемента; другой полюс присоединялся через гальванометр к передвигаемому по проволоке движку. Усовершенствуя свой аппарат, дю-Буа Реймонд заменил латунную прямолинейную проволоку, длина которой равнялась 2 м, проволокой из платины, намотанной на эбонитовый цилиндр с нарезанными на нем спиральными канавками. Движок был изготовлен также из платины. На цилиндре были нанесены деления, и точное положение движка определялось при посредстве лупы. Точность измерения на этом приборе удалось повысить и компенсирование электродвижущих сил значительно ускорить. Формула для определения электродвижущей силы испытуемого элемента та же, что и у Поггендорфа. Ввиду однородности сопротивления проволоки, отношение сопротивлений может быть заменено отношением длин.

Метод Латимера Кларка

Практическое неудобство метода Поггендорфа и усовершенствования дю-Буа Реймонда состоит в том, что образцовый элемент дает ток при работе. В методе, предложенном Латимером Кларком в 1874 г., (Latimer Clark) [22], питание цепи потенциометра производится от постороннего, не являющегося образцовым, источника; к этому источнику предъявляется лишь требование достаточного постоянства напряжения на зажимах. Исследуемый и образцовый элементы компенсируются поочередно с напряжением на калиброванной проволоке. Если сопротивление, соответствующее электродвижущей силе образцового элемента, было R , а сопротивление, соответствующее электродвижущей силе испытуемого элемента, было R_1 , то:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

Как видно из этого выражения, нет необходимости знать величину внутреннего сопротивления образцового элемента. Это обстоятельство, а также измерение при помощи образцового элемента, без отдачи им тока, являются большими преимуществами метода Кларка. В практическом выполнении своего прибора, названного им потенциометром, Кларк применял образцовый элемент своей конструкции (называемый и в настоящее время элементом Кларка), который он присоединял к концам калиброванной проволоки через особый гальванометр; питание цепи потенциометра производилось от батареи аккумуляторов через регулировочный реостат, которым изменялся ток в цепи потенциометра и достигалась компенсация электродвижущей силы нормального элемента. Исследуемый элемент присоединялся, как и в приборе дю-Буа Реймонда, к концу калиброванной проволоки и к движку на ней. Для установления компенсации применялись два гальванометра. Калиброванная проволока прибора была разделена на 1000 частей, и при электродвижущей силе элемента Кларка, равной 1,457 V при 15°,5 C, каждое деление шкалы соответствовало 0,001457 V. Этот множитель не был постоянен при изменении температуры.

Метод Флеминга

Дальнейшее усовершенствование потенциометрического метода было внесено в 1882 г. Флемингом (Fleming) [40], впервые применившим потенциометр с прямым отсчетом (рис. 2). Один из полюсов образцового элемента он также присоединил к движку, причем уравнивание гальванометра производилось на длине проволоки, соответствующей его электродвижущей силе при данной температуре, изменением тока, питающего потенциометр. При компенсации электродвижущей силы образцового элемента Кларка, равной 1,434 V при температуре 15° C, движок устанавливался на 1434 деления, и цена деления была 0,001 V.

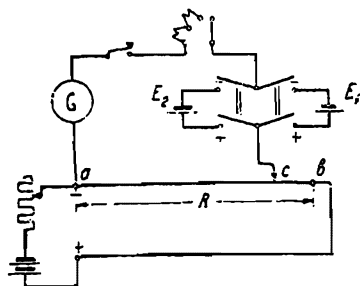


Рис. 2. Схема потенциометра Флеминга.

В схеме Флеминга для компенсации обоих элементов образцового и испытуемого, — применялся один и тот же гальванометр (см. рис. 2). Элементы приключались поочередно при помощи переключателя; так как движок давал контакт только при нажиме на него, то он, таким образом, играл роль ключа, замыкая элементы только на время наблюдения.

Небольшое усовершенствование, внесенное Флемингом, весьма облегчило работу на потенциометре.

Прибор Беетца

Дальнейшее развитие конструкции потенциометров было предложено в 1878 г. Беетцом (Beetz) [5], который впервые применил совместно с прямолинейной калиброванной проволокой, длиной в 1 м, два штеп-

сельных магазина, присоединенных к концам проволоки. Применение этих магазинов позволило увеличить сопротивление цепи потенциометра, не увеличивая длину проволоки. Это усовершенствование упростило конструкцию потенциометра, так как изготовление длинной калиброванной проволоки весьма затруднительно, а штепсельные магазины как бы увеличивают длину проволоки, не увеличивая геометрических размеров прибора. Однако, при изменении сопротивлений магазинов изменялось и сопротивление цепи потенциометра и необходимо было производить два отсчета, что удлиняло время работы и усложняло формулу подсчета.

Потенциометр Кромптона

Стремясь уменьшить влияние неточностей калибровки проволоки и упростить пользование потенциометром, Кромптон (Crompton) [23] в 1893 г. сконструировал потенциометр, общее сопротивление которого составлено из 14 катушек одинакового сопротивления, образующих 15-контактный рычажный реостат, и из калиброванной проволоки-реохорда, сопротивление которого равно сопротивлению одной катушки. Благодаря этой конструкции влияние неточности калибровки проволоки сводится к ничтожной величине. Принципиальная схема потенциометра Кромптона указана на рис. 3.

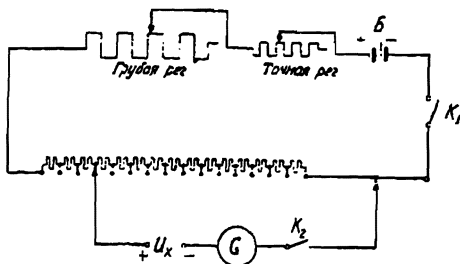


Рис. 3. Схема потенциометра Кромптона.

В этом потенциометре впервые оба полюса измеряемого элемента присоединяются к передвигаемым контактам на сопротивлениях потенциометра. Питание рабочей цепи потенциометра производится от батареи Б. Сопротивление каждой катушки потенциометра Кромптона равно 2,0 Ω . Проволока разделена на 1000 частей. При измерении электродвижущих сил (U_x) порядка одного вольта отсчет по этому прибору может быть произведен с точностью до 0,0001 V.

Потенциометр фирмы братьев Эллиот

Дальнейшее усовершенствование потенциометра Кромптона было достигнуто фирмой братьев Эллиот (Ellioth Brothers). 14 катушек потенциометра Кромптона заменено 149 катушками одинакового сопротивления и длинная калиброванной проволоки, сопротивление которой равно сопротивлению одной катушки, уменьшена до 8 см. Все катушки расположены по окружности и присоединены к 150 нумерованным контактам. Прибор удобен в применении, но труден в изготовлении, так как сопротивление всех катушек должно быть очень точно подогнано.

Этот прибор был несколько видоизменен в смысле расположения контактов Кэмпбеллом (Albert Campbell) [19], который ввел остроумное приспособление, упрощающее отсчет на потенциометре. Все движки магазинов потенциометра были заблокированы таким образом, что

каждый последующий может быть смещен со своего первого контакт. лишь в том случае, когда движок предыдущего магазина помещен на последнем контакте n (рис. 4). Изготавливаемые по этой схеме (рис. 4)

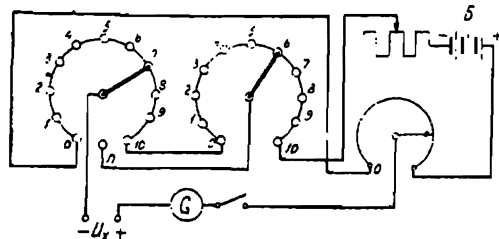


Рис. 4. Схема потенциометра фирмы Эллиот по Кэмпбеллу.

потенциометры с числом магазинов, доведенным до шести, применяются в настоящее время в Национальной физической лаборатории в Англии.

Потенциометр фирмы Нальдера

Аналогичное потенциометру фирмы Эллист применение большого числа катушек было

введено фирмой Нальдер (Nalder), в котором калиброванная проволока заменена вторым рычажным магазином со 100 катушками. Замечание относительно трудности подгонки большого числа катушек относится и к этому потенциометру.

Переносный потенциометр Хоуэлла

Ввиду встретившейся необходимости производить измерения напряжений на местах установки, Хоуэлл (Howell) [75] в 1888 г. предложил переносный вольтметр, в действительности являющийся особо приспособленным потенциометром (рис. 5). Гальванометр, образцовый элемент (Даниэль) (E_N) и все сопротивления помещены в переносной ящике, размером $165 \times 83 \times 32$ мм. При компенсации образцового элемента на постоянном сопротивлении 40Ω и сопротивлении реохорда от 0 до 20Ω , можно было измерять напряжение U_x на точках p и p' от 90 до 130 В . В этом приборе впервые потенциометр применялся не в лабораторной обстановке.

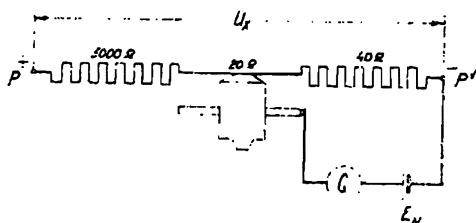


Рис. 5. Переносный потенциометр Хоуэлла.

Усовершенствование Бути и Рэля

Стремясь сконструировать потенциометр без калиброванной проволоки, Бути (Bouty) и Рэлей (Rayleigh) [111] применили два одинаковых штепсельных магазина R и R' (рис. 6). Чтобы общее сопротивление цепи потенциометра, а, следовательно, и сила тока вспомогательной батареи, при компенсации

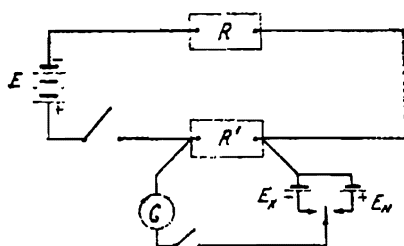


Рис. 6. Схема Бути и Рэля.

оставались неизменными, в магазине R' должны быть вынуты штепселя, соответствующие штепселям, вставленным в магазине R . В первоначальной схеме Бути управление при уравнивании представляло некоторую сложность, и при дальнейшем ее применении были внесены значительные изменения.

Первый потенциометр Фейсснера

В потенциометре Фейсснера (Feussner), [37], 1890 г., как и в схеме Бути, отсутствует калиброванная проволока (рис. 7). Ввиду того, что два рычажных магазина дают только два первых знака — тысячи и сотни, между магазинами впервые включена третья ступень — штепсельный магазин, общим сопротивлением в 100Ω . При компенсировании приходится вынимать или вставлять штепселя этого магазина, что изме-

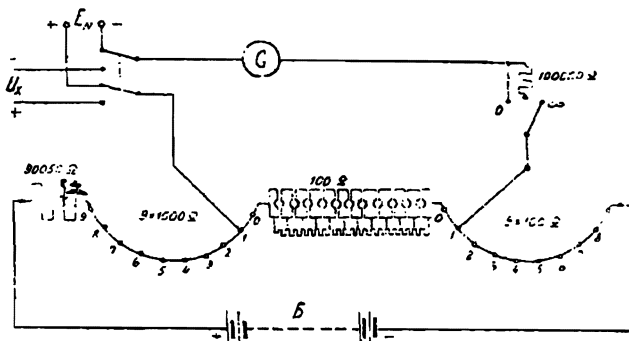


Рис. 7. Схема первого потенциометра Фейсснера.

няет общее сопротивление потенциометра. Благодаря этому изменению сопротивления, изменяется ток в цепи потенциометра. Чтобы это изменение не обуславливало большой погрешности результата измерения, в цепь потенциометра введено большое неизменяемое сопротивление, равное 90050Ω . Таким образом, сопротивление всей цепи потенциометра при всех вставленных штепселях магазина равно сопротивлению первого рычажного магазина — $9 \times 1000 = 9000 \Omega$, плюс сопротивление второго рычажного магазина — $9 \times 100 = 900 \Omega$, плюс 90050Ω . Все сопротивление штепсельного магазина равно 100Ω (при всех вынутых штепселях), и полное сопротивление потенциометра изменяется от величины 99950Ω до величины 100050Ω . Это изменение вызывает погрешность от изменения силы тока в потенциометре на $\frac{50,0 \cdot 100}{100000} = 0,05\%$ (в худшем случае). Ввиду того, что в то время точность измерения электродвижущей силы образцового элемента не превышала $0,05\%$, эта точность измерения казалась удовлетворительной.

Дальнейшие усовершенствования, предложенные Фейсснером

При увеличении точности измерения электродвижущих сил нормальных элементов и повышавшихся требованиях точности измерения на потенциометрах, Фейсснер, стараясь избежать изменения рабочего тока

в потенциометре при производстве компенсирования, изменил схему своего потенциометра. В третьей его модели [38] применена схема замещения, аналогичная схеме Бути. Схема этого потенциометра ясна из рис. 8. Магазин R_3 имеет суммарное сопротивление 90000 Ω , два рычажных магазина R_1 и R_2 состоят: первый из 9 катушек по 1000 Ω и второй из 9 катушек по 100 Ω . Как и в первом потенциометре Фейсснера между рычажными декадами включен применяемый для точной компенсации штепсельный магазин R с сопротивлениями от 0,1 до 50 Ω . Чтобы при компенсировании магазином R ток потенциометра не изменялся, в цепь введен аналогичный ему магазин R' , в котором имеются все главные сопротивления, заменяющие вынутые штепселя магазина R . Остаются незамещенными только самые малые значения (всего до 3 Ω),

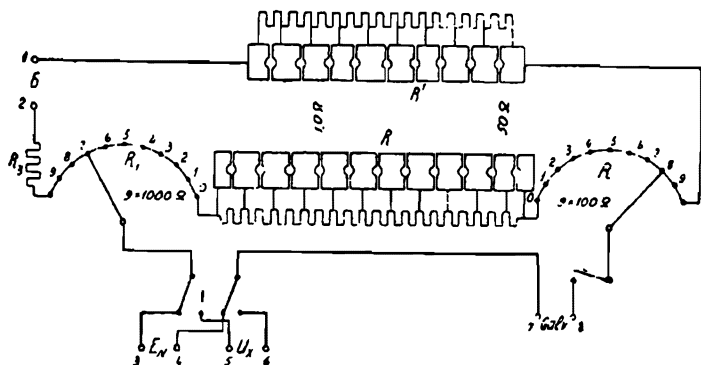


Рис. 8. Третья модель потенциометра Фейсснера.

что, конечно, практически не влияет на величину тока, так как наименьшее общее сопротивление потенциометра равно 100000 Ω .

Образцовым элементом для этого прибора служил элемент Кларка, электродвижущая сила которого, как уже указывалось выше, при 15° равна 1,434 V. При уравнивании образцового элемента последовательно с гальванометром включалось сопротивление 100000 Ω , которое выключалось только при полной компенсации. В этой конструкции предусмотрена возможность измерять напряжение от 0,014 и до 14,000 V. Напряжения свыше 14 V подаются на зажимы 1 и 2, а нормальный элемент остается на зажимах 3 и 4. Схема становится аналогичной первоначальной схеме Поггендорфа и схеме Хуэлла.

Этот третий вариант потенциометра Фейсснера был далее переработан в потенциометр с автоматической заменой сопротивлений конструктором О. Вольфом (Otto Wolf), в 1901 г., который изготовил потенциометр по схеме Фейсснера, применяемый и в настоящее время. Описание потенциометра Вольфа помещено в главе IV на стр. 29.

Усовершенствование конструкции потенциометра, внесенное Рапсом

Стремясь повысить точность первого потенциометра Фейсснера и упростить работу на нем, Рапс (Raps) [110], в 1895 г. разработал по-

тенсиометр с применением предложенного в 1866 г. Томсоном и Варлеем (Thomson a. Varley) устройства для шунтировки части сопротивления. Вторым усовершенствованием Рапса было предложенное им впервое особое сопротивление для компенсации образцового элемента. В этом потенциометре был применен незадолго перед тем сконструированный кадмиевый элемент Вестона (Weston). Электродвижущая сила элемента Вестона не так изменяется с изменением температуры, как электродвижущая сила элемента Кларка, поэтому в первом приборе Рапса нормальный элемент присоединялся через переключатель и гальванометр к неизменяемым сопротивлениям 10200 Ω , 1020 Ω или 102,0 Ω . Каждое из этих сопротивлений могло быть накоротко замкнуто штепселем. Рапс считал, что электродвижущая сила нормального элемента Вестона с достаточной приближенностью равна 1,02 V, и что поэтому сила тока в цепи потенциометра соответственно устанавливается: при компенсации на

сопротивлении 10200 Ω	— 0,0001 A
1020 „	— 0,001 „
102,0 „	— 0,01 „

При измерениях напряжений свыше 1 V и до 150 V измеряемое напряжение питает потенциометр (питающая вспомогательная батарея не включена). Цепь потенциометра состоит из сопротивления включенной части штепсельного магазина до 150000 Ω (вне прибора) и одного из сопротивлений 10200, 1020 или 102 Ω . Величина напряжений находится соответственно умножением тока потенциометра — 0,0001, 0,001 или 0,01 A на величину включенного сопротивления. В этом случае метод измерения аналогичен методу Фейсснера в третьей модели его потенциометра для напряжений свыше 14 V.

Все изложенное ясно из чертежа (рис. 9), где весь путь тока при измерении больших напряжений показан толстыми линиями. Переключатель k_1 должен при этом находиться в своем верхнем положении. При измерении напряжений ниже 1 V применяется питающая потенциометр аккумуляторная батарея Б. Переключатель k_1 находится в нижнем положении. Цепь потенциометра состоит из рычажной декады R_1 , состоящей из одиннадцати катушек по 1000 Ω каждая, рычажной декады R_2 , состоящей из девяти катушек по 0,1 Ω каждая, рычажной декады R_3 , состоящей из 10 катушек по 10 Ω , штепсельной декады, содержащей сопротивления 10200, 1020, 102,0 Ω и регулировочной декады до 150000 Ω . Движок декады R_1 , так же как и декады R_3 , имеет двойную щетку; каждая из этих щеток перекрывает один из соседних контактов магазина R_1 или R_3 . Эти щетки соединены с концами другой рычажной декады R_4 (или R_5). Таким образом, сопротивление декады R_4 шунтирует в декаде R_1 ту секцию, к концам которой присоединены в тот момент щетки. Если обозначим сопротивление секции, равное 1000 Ω , через r_1 , сопротивление шунтирующей декады — через r_2 , и напряжение на концах секции — через u (в том случае, когда щетки ее не перекрывают), напряжение u' на секции в том случае, когда щетки ее перекрывают, равно

$$u' = \frac{I r_1 r_2}{r_1 + r_2} = \frac{u \cdot r_2}{r_1 + r_2},$$

где I — ток в неравветвленной части декады R_1 . Если сопротивление r_2 состоит из n одинаковых секций сопротивлением r_0 каждая, т. е. $r_2 = n \cdot r_0$, напряжение

$$u' = \frac{n \cdot n \cdot r_0}{r_1 + n r_0}.$$

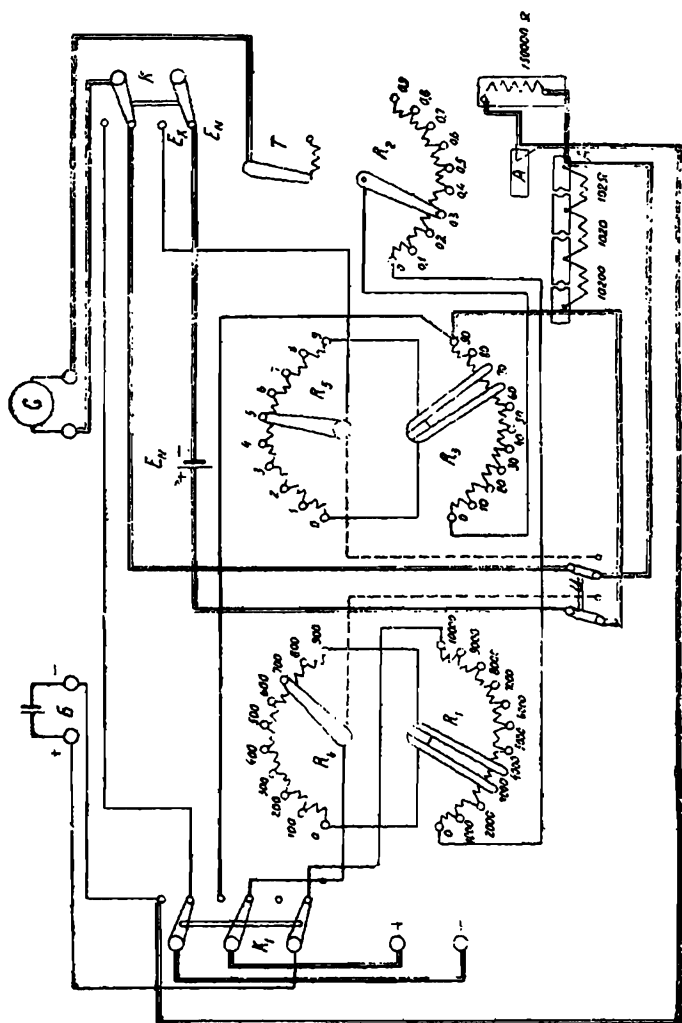


Рис. 9. Схема потенциостра Рапса.

На какой-либо k — той секции декады R_4 будет напряжение

$$u_k = \frac{n \cdot n \cdot r_0}{r_1 + n r_0} \cdot \frac{k}{n} = \frac{n \cdot k r_0}{r_1 + n r_0}.$$

Каждая секция декады R_4 имеет сопротивление 1000 Ω , а все число секций $n = 9$. Тогда

$$u_k = \frac{n \cdot k \cdot 1000}{1000 + 9 \cdot 1000} = k \frac{n}{10},$$

т. е. каждое положение декады R_4 указывает число десятых долей величины, указанной декадой R_1 . Такое же точно рассуждение относится и к декадам R_3 и R_5 , в которых сопротивление каждой катушки равно 10Ω .

Уравновешивание производится попеременно перемещением переключателя k_2 .

Отсчет производится с точностью до пятого знака. Последний знак обуславливается магазином R_2 . Перемещение рычага этой декады изменяет рабочий ток потенциометра (до $0,1\%$); этого можно избежать, изменяя соответственно сопротивление регулировочной декады. Потенциометр Рапса, претерпев известные изменения, имеет большое распространение до настоящего времени. Описание современной конструкции см. в главе IV, стр. 28.

Применение верньера Томсона-Варлея, предложенное Госселемом

Шунтирование катушек декады, аналогичное примененному Рапсом, предложено Госселемом (M. Gosselin) [66] в 1898 г. В этой схеме шунтируются две катушки первой декады, второй декадой, последовательно включенной с добавочным сопротивлением; две катушки второй шунтируются третьей декадой с добавочным сопротивлением и т. д. Величина добавочного сопротивления подсчитывается так, чтобы отношение разности потенциалов на двух соседних контактах декады к разности потенциалов на двух соседних контактах следующей декады равнялось 10. Все катушки этого потенциометра были взяты одинакового сопротивления, кроме трех катушек добавочных сопротивлений.

Потенциометр Карпантье

Тот же принцип Томсона-Варлея был применен, с некоторым изменением, в потенциометре Карпантье (Carpentier) [21]. В этом приборе включены последовательно две декады 11×1000 и $11 \times 10 \Omega$. Две катушки из этих декад перекрываются двойными щетками и присоединяются к двум другим декадам, соответственно 10×200 и $10 \times 2 \Omega$. Таким образом, сопротивление шунтированной части декад равно

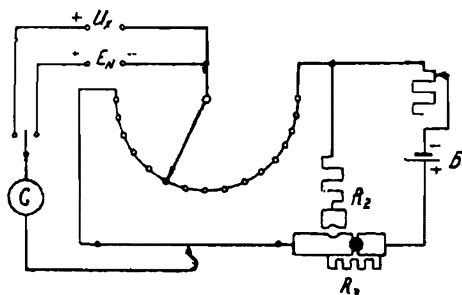
$$\frac{2000 \cdot 10 \cdot 200}{200 \cdot 10 + 2000} = 1000 \Omega \text{ и } \frac{20 \cdot 10 \cdot 2}{2 \cdot 10 + 20} = 10 \Omega,$$

а каждые два соседних контакта шунтирующих декад дают $0,1$ разности потенциалов двух соседних контактов шунтированной декады.

Вторым усовершенствованием, внесенным в потенциометр Карпантье, было расширение предела измерения перемещением большого сопротивления в 10000Ω , включенного последовательно с декадами. При включении 10000Ω между декадами потенциометр может измерять разности потенциалов до $2,01 \text{ V}$; при включении вне декад потенциометр может измерять разности потенциалов до $1,01 \text{ V}$. Этот потенциометр применяется до настоящего времени и более подробно описан в главе IV, стр. 39.

Добавление Франке

Франке (R. Franke) [43] ввел добавление к потенциометру Кромптона, применив приспособление, позволяющее уменьшить пределы измеряемых напряжений и, следовательно, повысить в некоторых случаях точность измерения. Устройство этого приспособления ясно из рис. 10. Уравновесив нормальный элемент, как обычно, на соответствующем его электродвижущей силе положении движков, для измерения малого неизвестного напряжения, уменьшают силу тока в потенциометре точно в 10 или 100 раз. Для этой цели применены два сопротивления— R_2 и R_3 , величина и назначение которых ясны из следующего. Обозначим через R_1 все сопротивление потенциометра. Подбирая соответственным образом величину параллельного сопротивления R_2 и последовательного R_3 , можем уменьшить величину тока в измерительной цепи потенциометра в желаемое число раз, оставляя без изменения ток, отдаваемый питающей батареей. Для этой цели R_2 должно быть равно $\frac{R_1}{9}$ при уменьшении силы тока в 10 раз и $\frac{R_1}{99}$ при уменьшении силы тока в 100 раз. Так как общее сопротивление должно остаться равным прежнему, то добавочное сопротивление R_3 может быть найдено из уравнения



но $\frac{R_1}{9}$ при уменьшении силы тока в 10 раз и $\frac{R_1}{99}$ при уменьшении силы тока в 100 раз. Так как общее сопротивление должно остаться равным прежнему, то добавочное сопротивление R_3 может быть найдено из уравнения

Рис. 10. Схема потенциометра Франке.

$$R_3 = R_1 - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

при $R_2 = \frac{R_1}{9}$ сопротивление $R_3 = \frac{9}{10} R_1$

и при $R_2 = \frac{R_1}{99}$ сопротивление $R_3 = \frac{99}{100} R_1$.

С этим потенциометром для измерения больших напряжений, Франке применил делитель напряжения, позволяющий измерять напряжения до 1600 V. В дальнейшем Франке видоизменил свой потенциометр, заменив проволочный реохорд магазином с катушками и передвижным ползуном, так как PTR¹ не утверждало типа потенциометров со скользящим контактом. Для получения большего числа знаков отсчета Франке применил схему, аналогичную схеме Госселена, с двумя шунтируемыми катушками, как в потенциометре Карпантие.

Потенциометр Бругера

Интересная по своей конструкции модель была предложена в 1900 г. Бругером (Ph. Bruger) [16]. Конструктор имел целью дать возможность быстро, без подсчетов, произвести отсчет на потенциометре и не менять при компенсировании силы рабочего тока потенциометра. Для этой цели он применил специальный многократный рычажный переключатель,

¹ Физико-технический институт (Берлин).

конструкция которого показана на рис. 11. Схема всего потенциометра видна на рис. 12. Весь потенциометр состоит из четырех магазинов и общее его сопротивление равно $10\,000\ \Omega$. Включение магазинов R_3 и R_4 производится последовательно с магазинами R_1 и R_2 при помощи упомянутого выше поворотного переключателя. Пластины переключателя (18) соединены между собой попарно и укреплены на изолирующем диске D (см. рис. 11). Эти пластины соединяют между собой соседние катушки магазинов R_1 или R_2 и присоединяют обыкновенные рычажные магазины R_3 или R_4 . Кроме 18 парных пластин, на поворотном переключателе имеются две одиночные пластины F и F' . Эти пластины соединены с зажимом батареи, с одной стороны, и с промежуточным магазином R , с другой, т. е. служат для подвода питающего потенциометр рабочего тока. При повороте многократного переключателя магазинов R_1 или R_2 подвод тока производится к другой паре контактов, но полное сопротивление цепи потенциометра остается неизменным. Только при точной компенсации при пользовании штепсельным¹ магазином, общее сопротивление

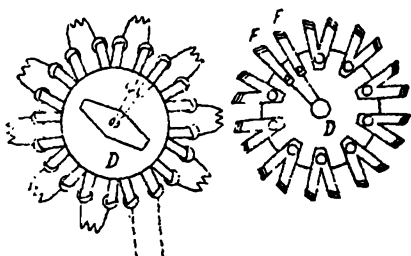


Рис. 11. Рычажный переключатель Бругера.

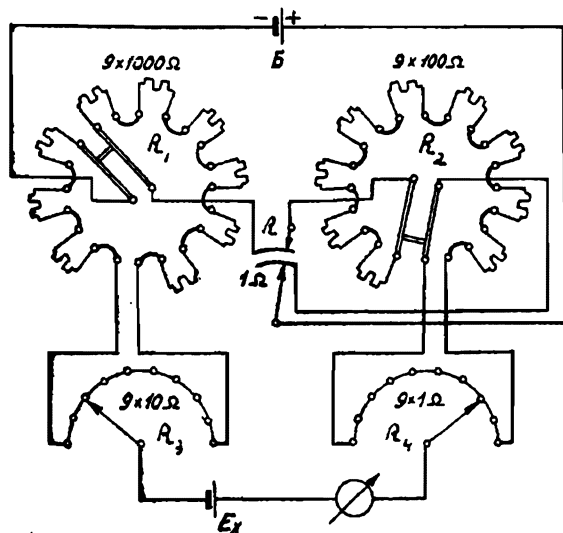


Рис. 12. Схема потенциометра Бругера

потенциометра изменяется на $\pm 1\ \Omega$, т. е. на $0,01\%$. Это острое изменение позволяет применять вдвое меньшее число катушек, чем это необходимо в потенциометре Фейснера-Вольфа. Дальнейшим усовершенствованием потенциометра Бругера была замена штепсельного магазина R двойным проволочным реохордом (рис. 12).

Недостатком этого потенциометра является слишком большое число контактов и трудное исполнение

рычажного многоконтактного переключателя, обеспечивающего достаточно надежный контакт каждого рычага.

¹ На рис. 12 показана более поздняя схема с двойным проволочным реохордом вместо штепсельного магазина.

Потенциометр Лефельда для термоэлектрических измерений

Для измерения малых электродвижущих сил источников имеющих малое сопротивление, как например, термопары (сопротивление порядка нескольких ом), применение обычных потенциометров практически невозможно, так как ввиду большого компенсирующего сопротивления, оказывающегося включенным последовательно с гальванометром, чувствительность гальванометра недостаточна, и отсчет по движкам потенциометра дает слишком мало знаков. Лефельд (R. A. Lehfeldt) [95] сконструировал потенциометр, сопротивление которого в цепи компенсации не превышает нескольких омов. В этом потенциометре ток от питающей батареи проходит неизменяемое сопротивление 100, 1000 или 10 000 Ω (в зависимости от положения переключателя), затем рычажный реостат, состоящий из 20 сопротивлений по 0,1 Ω и калиброванную проволоку с сопротивлением в 0,1 Ω . Второй переключатель служит для присоединения гальванометра попеременно: в цепь нормального элемента и в цепь измеряемой термопары. В зависимости от положения первого переключателя рабочий ток устанавливается по нормальному элементу так, чтобы падение напряжения на 0,1 Ω было около 1000, 100 или 10 μV . В этом потенциометре в цепь термопары, кроме ее сопротивления и сопротивления гальванометра, включается сопротивление 2 Ω . Отсчет по этому прибору не дает большого числа знаков, и на точность результата измерения могут влиять паразитные термоэлектродвижущие силы, возникающие при перемещении щеток. Этот потенциометр является первым потенциометром такого малого сопротивления,

однако, по изложенным выше причинам достаточного повышения точности измерения малых электродвижущих сил он не обеспечивает.

Потенциометр Гаркера

Стремясь увеличить точность измерения малых электродвижущих сил, Гаркер (Dr. I. A. Harker) [68] разработал потенциометр малого сопро-

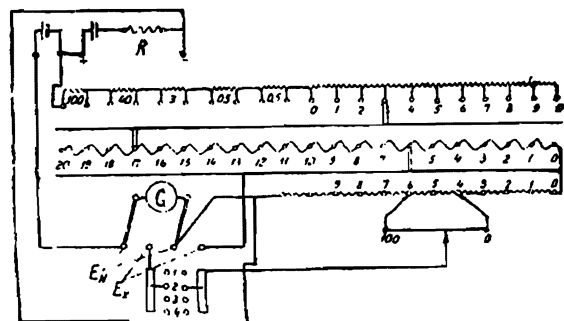


Рис. 13. Схема потенциометра Гаркера.

тивления по несколько другой схеме, особенностью которой является то, что вся цепь потенциометра состоит из двух частей: дополнительных сопротивлений для установки тока по нормальному элементу и собственно потенциометра, падение напряжения на зажимах которого служит для компенсации измеряемой электродвижущей силы. Величина дополнительного сопротивления может изменяться в зависимости от электродвижущей силы нормального элемента, замыканием накоротко, отдельных катушек. Рис. 13 поясняет сказанное. Как это ясно из схемы, сопротивления собственно потенциометра включаются последовательно с дополнительным магазином. Величина включаемого сопротивления потен-

циометра в омах устанавливается равной $100 E_n$, где E_n — электродвижущая сила нормального элемента. Компенсационная цепь потенциометра состоит из 20 сопротивлений по $0,1 \Omega$, последовательно включенных с 11 сопротивлениями по $0,01 \Omega$. Ввиду того, что два сопротивления шунтируются всегда калиброванной проволокой сопротивлением $0,02 \Omega$, общее сопротивление потенциометра в рабочей его части равно: $20 \times 0,1 + 9 \cdot 0,01 + \frac{0,02}{2} = 2,1 \Omega$. Эта величина непостоянна при применении различных нормальных элементов и зависит от величины электродвижущей силы этих последних. На схеме рис. 13 сопротивление рабочей цепи потенциометра равно $1,8 \Omega$, так как $0,3 \Omega$ (контакты 18, 19 и 20) в цепь не включены. Для уменьшения влияния контактов Гаркер применял медные полосы большого сечения с укрепленными на них медными чашечками, куда была налита ртуть. Эти полосы помещались параллельно контактам магазинов. Самые контакты представляли собой также чашечки со ртутью. Переключения производились при посредстве толстых медных соединительных дужек, концы которых опускались в ртуть. Различные термопары присоединялись также ртутными контактами. Применение ртутных контактов усложняло пользование этим потенциометром, так как для получения хорошего контакта необходимо часто чистить ртуть.

Метод Линдек и Роте

При исследовании электродвижущих сил термопар Линдек и Роте (St. Lindeck u. Rothe) [96] в PTR применили „второй метод Поггендорфа“. В применявшихся обычно потенциометрах искомая электродвижущая сила находилась сравнением с электродвижущей силой нормального элемента последовательной компенсацией, что достигалось изменением замыкающего компенсационную цепь сопротивления. Во втором методе Линдека и Роте искомая электродвижущая сила находится по показанию амперметра и компенсация достигается изменением силы тока в образцовом сопротивлении, к концам которого через гальванометр присоединена U_x — термопара ТП. Рис. 14 поясняет вышесказанное. При соот-

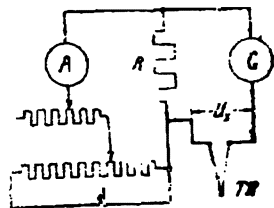


Рис. 14. Схема Линдек и Роте.

ответственно выбранном образцовом сопротивлении, достаточно чувствительном гальванометре малого сопротивления и миллиамперметре с достаточно постоянными поправками шкалы, — возможно измерять малые электродвижущие силы порядка $20\text{—}30 \text{ mV}$ с точностью до $0,1\%$.

Дальнейшее усовершенствование потенциометров для измерения малых электродвижущих сил

Как уже указывалось выше, при измерении очень малых величин разностей потенциалов, например, электродвижущих сил термопар, величина термоэлектрических сил, возникающих при перемещении контактных щеток на рычажных магазинах, может значительно исказить результаты и понизить точность измерения. Поэтому были применены схемы потен-

жиметров малого сопротивления, в которых переменные контакты входили в цепь питающей батареи, а измеряемая электродвижущая сила присоединялась к постоянным зажимам. Эта схема потенциометров с различными видоизменениями применяется в настоящее время; более подробное ее описание приведено в главе V.

ГЛАВА II

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ ПОТЕНЦИОМЕТРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Метод компенсации, как это уже было указано в главе I, основан на встречном включении двух электродвижущих сил. Большая электродвижущая сила присоединяется ко всему сопротивлению; меньшая — к его части. Для определения величины измеряемой электродвижущей силы (разности потенциалов) в международных единицах производится сравнение ее с электродвижущей силой образцового нормального элемента. Конструкция нормального элемента не позволяет нагружать его сколько-нибудь значительным током (более $1 \mu A$), и сравнение производится попеременным уравниванием электродвижущей силы нормального элемента и испытываемой электродвижущей силы, измеряемой разностью потенциалов на сопротивлении, величина которого измерена с достаточной точностью. Разность потенциалов на этом сопротивлении создается постоянным по величине током, получаемым от источника, обладающего достаточно постоянной электродвижущей силой. Если неизвестная разность потенциалов была уравновешена на сопротивлении компенсационной цепи R_1 , а электродвижущая сила нормального элемента — на сопротивлении R_0 , причем рабочий ток I в цепи потенциометра оставался неизменен, имеем

$$IR_1 = u_x \text{ и } IR_0 = E_{н.},$$

откуда

$$u_x = E_{н.} \frac{R_1}{R_0}.$$

Практически в потенциометре устанавливается, так называемый, рабочий ток, имеющий какое-нибудь круглое значение, определенное для данного потенциометра, например, $0,1 \text{ mA}$. $E_{н.}$ уравнивается в этом случае на величине сопротивления в омах, соответствующей значению его электродвижущей силы в вольтах, деленной на величину рабочего тока в амперах. Так, например, в потенциометрах большого сопротивления, при электродвижущей силе нормального элемента, равной $1,01834 \text{ V}$ (элемент Вестона), установка силы рабочего тока производится при компенсации $E_{н.}$ на сопротивлении $10183,4 \Omega$; тогда сила рабочего тока
$$I = \frac{1,01834}{10183,4} = 0,0001 \text{ A}.$$

Постоянство величины рабочего тока потенциометра является первым условием для получения достаточной точности измерения. Для питания рабочей цепи обычно применяется аккумуляторная батарея напряжением от 2 до 6 V (в зависимости от конструкции потенциометра), емкостью около 40 Ah. Для гарантирования устойчивости режима батарея должна

находиться в наиболее выгодных условиях работы, т. е. не должна быть только-что заряжена, но и не должна быть близка к разряду.

Все измерения, производимые при посредстве потенциометров, сводятся к измерению разностей потенциалов на данных зажимах. В момент компенсации измеряемый источник электродвижущей силы тока не дает, и измерение разности потенциалов на зажимах источника производится без какого-либо добавочного падения напряжения, т. е. измеряется его внутренняя электродвижущая сила. При измерении разности потенциалов на каком-либо сопротивлении провода, соединяющие измеряемый объект с потенциометром, тока не несут и в расчет не должны быть приняты. Отсюда вытекает возможность применения компенсационного метода для измерения силы тока и сопротивлений; для этой цели применяются образцовые, так называемые, нормальные сопротивления, изготовляемые из хорошо состаренного манганина. Измеряемый ток проходит через образцовое сопротивление, разность потенциалов от потенциальных зажимов которого подается на потенциометр (через гальванометр). Если эта разность потенциалов уравновешена на сопротивлении рабочей цепи потенциометра R_1 в омах, сила тока рабочей цепи потенциометра I в амперах установлена по электродвижущей силе нормального элемента и величина образцового сопротивления R_{nc} в омах, то сила измеряемого тока

$$I_x = \frac{R_o I}{R_{nc}} \text{ в амперах.}$$

Величина отсчета на потенциометре $R_1 I$, равная u_x — разности потенциалов, обычно непосредственно отсчитывается по положению движков в вольтах, и

$$I_x = \frac{u_x}{R_{nc}} \text{ в амперах.}$$

При измерении сопротивления производится сравнение разности потенциалов на зажимах нормального и измеряемого сопротивлений. Если в первом случае при компенсации разности потенциалов на образцовом сопротивлении отсчет по положению движков потенциометра равен u_1 , что соответствует разности потенциалов IR_1 , а при компенсации разности потенциалов на измеряемом сопротивлении отсчет равен u_2 , что соответствует IR_2 , причем образцовое сопротивление и измеряемое соединены последовательно

$$R_x = R_{nc} \frac{u_2}{u_1} = R_{nc} \frac{IR_2}{IR_1},$$

то при вспомогательном токе I , постоянном по величине,

$$R_x = R_{nc} \frac{R_2}{R_1}.$$

Для расширения пределов измерения электродвижущих сил на потенциометре применяются, так называемые, делители напряжения, на которые подается полное измеряемое напряжение. К потенциометру присоединяется определенная часть сопротивления делителя. Подаваемое на потенциометр напряжение равно

$$u_x' = u_x \frac{r}{R},$$

где R — полное сопротивление делителя, а r — сопротивление присоединяемой к потенциометру его части. Необходимо отметить, что присоеди-

няемый делитель напряжения берет от измеряемого источника некоторый ток, и в этом случае все устройство — потенциометр плюс делитель — измеряет разность потенциалов на зажимах делителя.

Все принципиальные схемы измерений на потенциометрах могут быть сведены к шести основным схемам, изображенным на рис. 15. Схема *a* является схемой, при которой сила рабочего тока устанавливается по миллиамперметру без нормального элемента.

Эта схема в потенциометрах применяется только в случае производства каких-либо измерений, не требующих большой точности. Схема *b* — нормальная схема потенциометра при измерении электродвижущих сил порядка 1,0 В, т. е. одного порядка с электродвижущей силой нормального элемента.

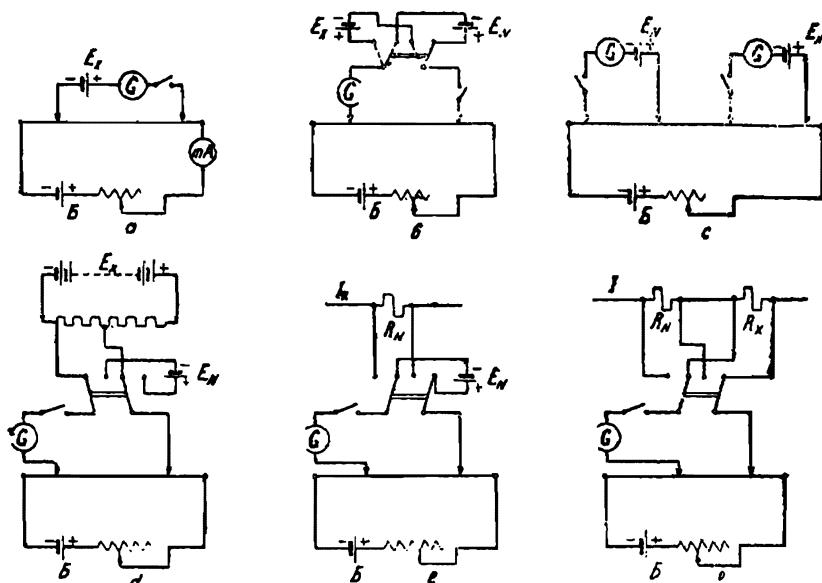


Рис. 15. Принципиальные схемы измерения на потенциометрах.

Схема *c* применяется в потенциометрах для измерения малых электродвижущих сил и в некоторых потенциометрах большого сопротивления, например, потенциометр Рапса; нормальный элемент компенсируется на сопротивлении значительно большем, чем сопротивление, компенсирующее измеряемую электродвижущую силу.

Оба сопротивления друг с другом связаны, но не перекрываются.

Схемы *d*, *e* и *f* показывают включения потенциометра для измерения напряжений выше предела измерения потенциометра с применением делителя напряжения (схема *d*), для измерения силы тока с применением образцового сопротивления (схема *e*) и для измерения сопротивления (схема *f*).

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О СОВРЕМЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Виды конструкций потенциометров, применяемых в настоящее время

Применяемые в настоящее время конструкции потенциометров могут быть разбиты на несколько категорий, — отчасти по преследуемым ими целям измерения, отчасти по особенностям конструкции. Эта разбивка, может быть, не очень удачна, так как резкое разделение потенциометров на различные виды установить невозможно, но она позволяет их как-то классифицировать, что несколько облегчает рассмотрение их конструкций.

Первым видом потенциометров, наиболее распространенным по количеству разработанных моделей, являются потенциометры, служащие для точных лабораторных измерений. Этот вид может быть разбит на две группы: а) потенциометры высокого сопротивления, сила рабочего тока которых порядка 0,1—1,0 мА, и б) потенциометры малого сопротивления, рабочий ток которых достигает нескольких десятков миллиампер. И те и другие потенциометры обычно дают возможность измерять разности потенциалов порядка 1,0 В с точностью до пятого десятичного знака.

Вторым видом потенциометров являются точные потенциометры, служащие для измерения малых электродвижущих сил, например, электродвижущих сил термопар (порядка 10—20 мВ).

Третьим видом потенциометров являются потенциометры с неполной компенсацией, позволяющие производить измерения хотя и с несколько меньшей точностью, чем на потенциометрах первого вида, но зато и с меньшей затратой времени.

К следующему, четвертому, виду относятся потенциометры, служащие для производства простейших заводских измерений, не требующих большой затраты времени и лабораторной точности, а, следовательно, и большой квалификации измерителя.

Требования, предъявляемые к современной конструкции потенциометров постоянного тока

К потенциометрам современной конструкции предъявляются следующие основные требования:

1. Неизменяемость рабочего тока в цепи потенциометра при уравнивании.
2. Простота отсчета измеряемых величин без каких-либо сложных вычислений.
3. Возможность отсчета по положению движков потенциометра достаточного числа знаков.
4. Независимое включение измеряемой электродвижущей силы и образцового (нормального) элемента.
5. Применение для изготовления катушек материалов, сопротивление которых почти не изменяется с изменением температуры (хорошо составленный марганец).

6. Отсутствие возникновения в контактах и в местах спайки термо-электродвижущих сил.

Это требование имеет, главным образом, большое значение для потенциометров, применяемых для измерения малых электродвижущих сил (термопары), так как возникающая паразитная термо-электродвижущая сила может совершенно исказить результат измерения.

ГЛАВА IV

ОПИСАНИЕ СХЕМ И КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ ПЕРВОГО ВИДА

В настоящее время почти все значительные фирмы, изготавливающие измерительные приборы, занимаются также и изготовлением потенциометров. Поэтому, количество конструкций потенциометров настолько велико, что ознакомить читателя со всеми существующими типами не представляется возможным. В дальнейшем описании приведены конструкции потенциометров, либо наиболее распространенные в настоящее время, либо имеющие какие-нибудь интересные конструктивные особенности, повышающие точность измерения и упрощающие и ускоряющие работу на потенциометре.

Современная конструкция потенциометра Рапса

Потенциометр Рапса имеет по настоящее время большое распространение. Он изготавливается фирмой Сименс и Гальске в Германии и заводом „Эталон“ в СССР. Основная идея потенциометра Рапса, предложенная в 1895 г. (см. главу I), не претерпела никаких существенных изменений. В современных конструкциях сделаны лишь некоторые полезные добавления и небольшие изменения. Нормальный элемент (через гальванометр) присоединяется не к штепсельному магазину с неизменными сопротивлениями 10200, 1020 или 102,0 Ω , а к постоянному сопротивлению 10180 Ω , включенному последовательно с сопротивлением, величину которого возможно изменять от 0 до 10 Ω . Схема (рис. 16) поясняет сказанное. Переставляемый на этом сопротивлении рычаг не является собственно настоящим передвижным рычагом, а изготовлен в виде медной пластины. Эта пластина закрепляется в положении, соответствующем электродвижущей силе данного элемента при данной температуре, при посредстве винта, обеспечивающего достаточную надежность и неизменность контакта. Как это видно из величины сопротивления, на котором компенсируется электродвижущая сила нормального элемента, сила рабочего тока потенциометра устанавливается равной 0,1 мА. В виду применения в настоящее время для измерения больших напряжений соответствующих делителей напряжения, специальные для этой цели выводы (к сопротивлению до 150000 Ω), специальные соединения и переключатель в новой конструкции уничтожены. Предел измерения на этом приборе непосредственно без делителя напряжения достигает 1,1 V. Общее сопротивление его составляет около 40000 Ω . В приборе имеется особое защитное сопротивление для предохранения гальванометра и

нормального элемента; ключ гальванометра включает измеряемую цепь предварительно через это сопротивление, равное 50000Ω . В приборе, изготовляемом фирмой Сименс и Гальске, концы сопротивлений потенциометра выведены к особым зажимам; это сделано для получения воз-

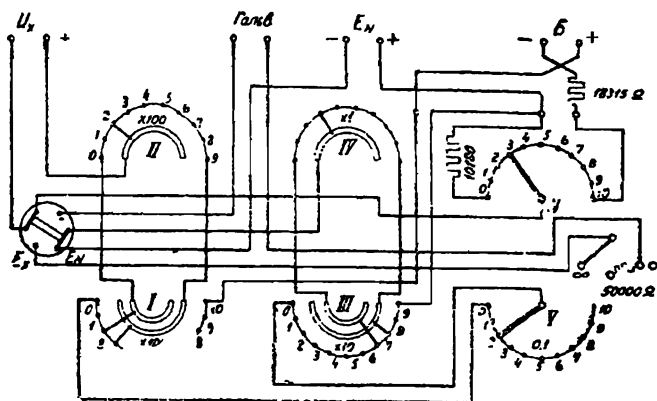


Рис. 16. Современная схема потенциометра Рапса.

можности измерять независимо одно от другого сопротивление, предназначенные для присоединения нормального элемента, и общее сопротивление рабочей цепи потенциометра. Чтобы можно было производить измерение сопротивления каждой катушки в отдельности, на наружных

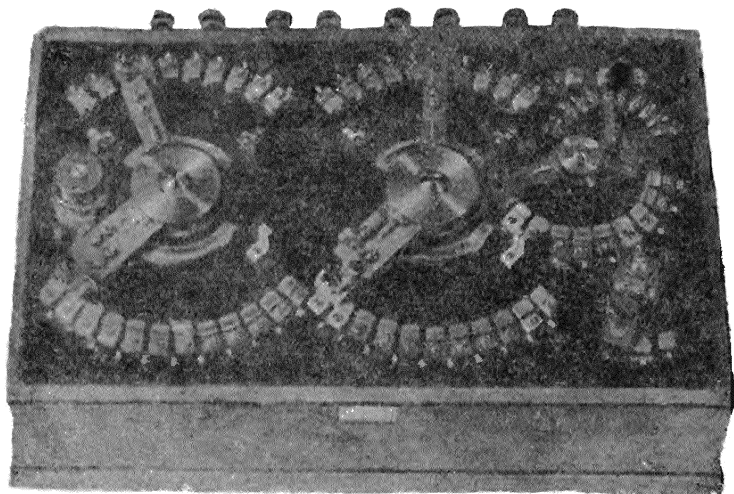


Рис. 17. Внешний вид потенциометра Рапса.

пластинах контактов имеются особые винты. Для питания потенциометра должна быть взята аккумуляторная батарея, напряжением 4 V .

Конструкция потенциометра типа Рапса имеет в виду применение международного нормального элемента Вестона (насыщенного). В другой

конструкции предусмотрено применение ненасыщенного нормального элемента Вестона, электродвижущая сила которого не зависит от изменения температуры. Ненасыщенный нормальный элемент присоединяется к штепсельному магазину, аналогичному магазину, первой модели Рапса (1895 г.) для установки тока 0,1, 1 и 10 мА. (Катушки сопротивления этого последнего потенциометра рассчитаны соответственно на силу тока до 10 мА). Предел измерения без делителя составляет соответственно: 1,1 В, 11 В и 110 В.

Этот последний вариант потенциометра удобен для проверки вольтметров. Однако, большая точность изготавливаемых в настоящее время делителей напряжения дает возможность применения и в этом случае потенциометра Рапса обычного вида. Завод „Эталон“ изготавливает потенциометры типа Рапса для работы с международным нормальным элементом. Внешний вид потенциометра Рапса показан на рис. 17.

Потенциометр Фейсснера, сконструированный фирмой О. Вольфа

Потенциометр О. Вольфа является одним из наиболее распространенных, а также наиболее точных потенциометров. Первая модель по-

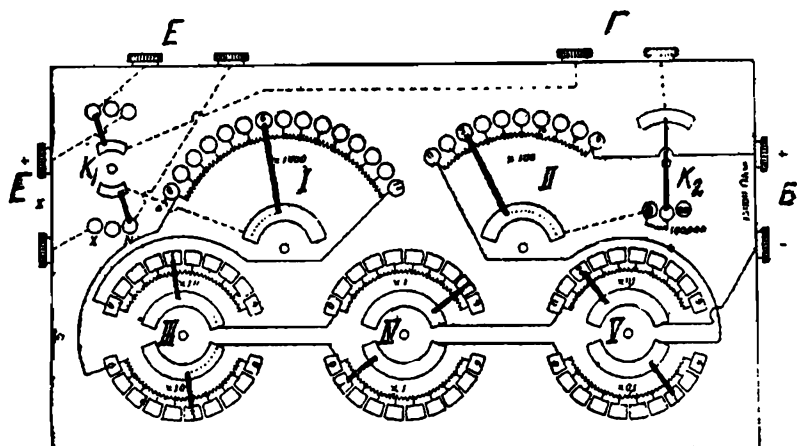


Рис. 18. Схема потенциометра Вольфа.

тенциометра изготовлена в 1901 г. для PTR. В основу положена схема третьего варианта потенциометра Фейсснера (см. главу I). Для получения большего числа цифр отсчета, число декад доведено до пяти. Для сохранения постоянства сопротивления цепи потенциометра при компенсации, нет надобности переставлять штепселя, как в третьей модели Фейсснера. Все замещения происходят автоматически. Схема соединений потенциометра Вольфа указана на рис. 18. Вся цепь потенциометра состоит из двух одиночных декад и трех двойных. Наибольшее сопротивление имеет первая декада (I), состоящая из 14 катушек по 1000 Ом каждая. Вторая одиночная декада (II) имеет 9 катушек по 100 Ом каждая. Третьей, четвертой и пятой декады (III, IV и V) двойные, и сконструированы так, что двойные рычаги при повороте выключают

в верхнем магазине столько катушек, сколько включают в нижнем, и, наоборот, благодаря чему все сопротивление цепи потенциометра остается неизменным. Двойные декады состоят: *III* — из 9 катушек по 10 Ω каждая, *IV* — из 9 катушек по 1 Ω каждая и *V* — из 9 катушек по 0,1 Ω каждая. Таким образом полное сопротивление потенциометра остается все время постоянным и равно 14999,9 Ω . Специальный переключатель на три направления k_1 , находящийся слева (среднее положение пустое), дает возможность включить в компенсационную цепь последовательно с гальванометром либо измеряемую разность потенциалов, либо нормальный элемент. Гальванометр переключателем k_2 присоединяется в цепь сперва через предохранительное сопротивление 100 000 Ω , а затем это сопротивление при окончательной компенсации выводится. Это предусмотрено не только для того, чтобы предохранить гальванометр, но и, главным образом, для того, чтобы нормальный элемент при наполной компенсации не давал скольконибудь значительного тока. При установлении тока потенциометра движки прибора устанавливаются на величину, соответствующую электродвижущей силе нормального элемента. Введенным в цепь питающей батареи реостатом устанавливается ток такой величины, чтобы гальванометр не давал отклонения. При установленном таким образом токе, величина E_x (при компенсации) непосредственно отсчитывается по положению рычагов в десятичной системе без всякого перемножения. Максимальная разность потенциалов, измеряемая непосредственно на этом потенциометре, равна 1,49999 V, причем первые две цифры (1, 4) отсчитываются на первой декаде.

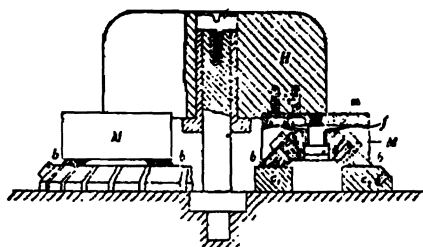


Рис. 19. Щетки потенциометра Вольфа

Ввиду того что сопротивления контактов двойных магазинов входят в величину полного сопротивления потенциометра, на их конструкцию обращено особенное внимание. Каждый двойной контакт имеет две щетки, перекрывающие центральную и одну из наружных пластин. Каждая щетка изготовлена из 20 бронзовых пластинок, толщиной около 0,15 мм. Эти пластинки спаяны и привинчены к специальному профрезерованному держателю и укреплены так, что, благодаря проложеним между ними подобным, но более коротким пластинкам, неплотно прилегают друг к другу. Это дает каждой пластинке возможность пружинить и поэтому плотно прилегать к контактной поверхности. Для той же цели пластинки имеют наклон к поверхности контакта (около 45°). Чтобы срабатывание поверхности контактных пластин по возможности было меньше, щетки расположены несколько косо к радиусу вращения.

Конструкция остальной части двойного рычажного контакта видна из рис. 19. Держатель m укреплен при посредстве болтов s_1 в латунном башмаке M . В отверстии держателя m болт проходит свободно и пружина f прижимает щетку b к контактной пластине (c_1 и c_2). Башмак M привинчен двумя винтами к эбонитовой рукоятке H . По исследованиям PTR величина сопротивления двойной щетки с двумя переходными

контактами составляет около $0,0002 \Omega$. Переходное сопротивление такого контакта весьма небольшое при хорошем состоянии контактных пластин, но при загрязнении их может достигнуть относительно больших значений и повлиять на точность измерения. Поэтому при работе на потенциометре Вольфа необходимо следить за состоянием контактных пластин и щеток, и время от времени промывать их спиртом. Для измерения сопротивления каждой катушки в контактных пластинах предусмотрены соответствующие винты, что значительно упрощает испытание этого потенциометра. На рис. 20 показан внешний вид потенциометра.

Первая модель потенциометра Вольфа, представляя собой весьма совершенную в смысле точности исполнения конструкцию, обладает одним существенным недостатком. Во время измерений производится обычно часто повторяемая проверка тока потенциометра нормальным элементом.

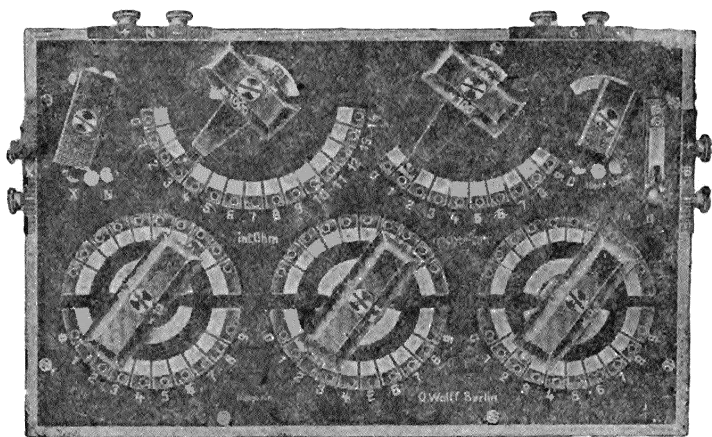


Рис. 20. Внешний вид потенциометра Вольфа.

Для этой цели каждый раз необходимо переводить все рычаги в положения, соответствующие электродвижущей силе нормального элемента, что, конечно, замедляет и усложняет работу. В новой конструкции потенциометра Вольфа, по предложению Брукса (Brooks) [9] этот недостаток устранен тем, что нормальный элемент приключается к определенной части сопротивления рабочей цепи. Схема видна на рис. 21. В этом потенциометре число катушек декады I доведено до 18. Один полюс нормального элемента присоединен между восьмым и девятым контактом декады I. Кроме имеющихся в первой модели пяти магазинов, в новой модели добавлена специально для присоединения нормального элемента шестая декада. Второй полюс нормального элемента присоединяется к движку этой декады, благодаря чему возможно изменять величину сопротивления соответствующего электродвижущей силе нормального элемента, от $1,0180$ до $1,0190 \Omega$. Это добавление позволяет применять различные нормальные элементы Вестона и учитывать изменение их электродвижущей силы при изменении температуры. Таким образом в этом потенциометре для проверки силы рабочего тока не надо перемещать рычаги декад I, II, III, IV и V. При установленном рычаге на

декаде VI достаточно повернуть переключатель k на букву N и нажать ключ гальванометра. Ввиду увеличения числа катушек декады I, максимальная разность потенциалов, измеряемая этим потенциометром, увеличивается до 1,89999 V.

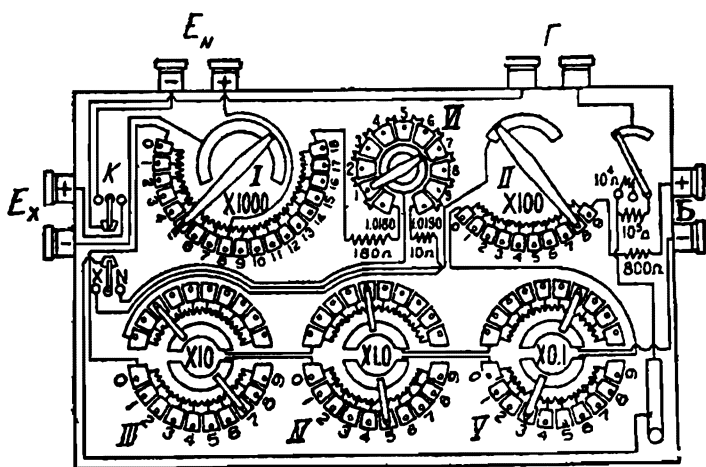


Рис. 21. Схема потенциометра Вольфа с добавлением Брукса.

Кроме описанной обычной конструкции потенциометра, фирма О. Вольф в настоящее время изготавливает комбинированный прибор: потенциометр — мост Уитстона. Для этой цели в потенциометре встроены штепсельный магазин (сдвоенный) и добавлен ряд контактов в переключателях, благодаря чему потенциометр простой перестановкой переключ-

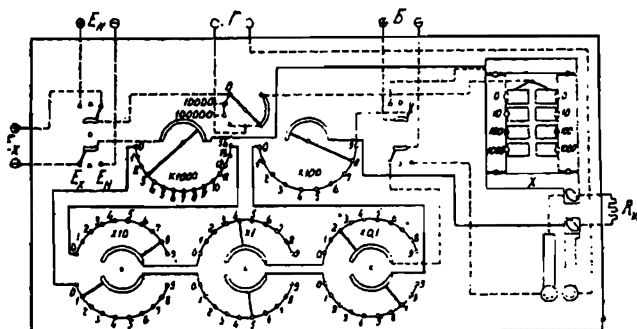


Рис. 22. Схема потенциометра Вольфа с мостом Уитстона.

чателей и вставкой штепселей превращается в мост. Рис. 22 поясняет схему этого прибора. Этот комбинированный прибор, более громоздкий, чем потенциометр нормального типа, несмотря на свою универсальность, не всегда удобен в лабораториях, так как весьма часто приходится производить измерения разностей потенциалов и сопротивления в разных цепях одновременно, и наличие отдельного моста безусловно более же-

лательно. В такой же комбинированной модели более поздней конструкции предусмотрена еще возможность уменьшения в 10 раз падения напряжения на сопротивлении, т. е. уменьшение предела измерения, что достигается устройством, аналогичным способу Франке, при посредстве двух сопротивлений, пересоединяемых штепселем.

Усовершенствование потенциометра Вольфа, разработанное лабораторией Эпплея

Как было указано выше, переходное сопротивление контактов двойных магазинов потенциометра Вольфа при загрязнении контактной поверхности может вести к уменьшению точности измерений на потенциометре. В лаборатории Эпплея (Eppley Laboratory, Newport) Марион Эпплей и Уильям Грей (Marion Eppley a. William R. Gray) [36] разработали конструкцию точного потенциометра типа Фейсснера-Вольфа. Этот

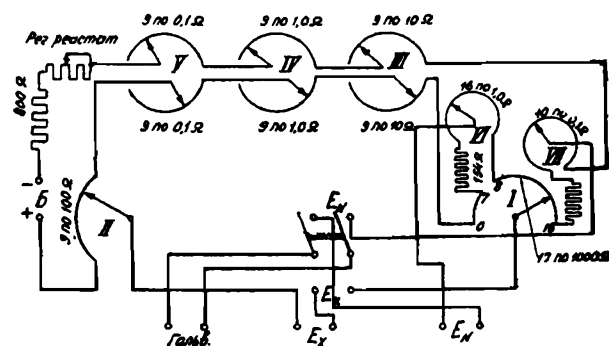


Рис. 23. Схема потенциометра Эпплея.

потенциометр отличается от новейшей модели потенциометра Вольфа дополнительными частями. Учитывая несоответствие того, что для измерения электродвижущей силы нормального элемента имеется лишь одна декада, дающая только четвертый десятичный знак, тогда как для измеряемой электродвижущей силы есть возможность отсчитать пятый знак, введен добавочный магазин, присоединенный между седьмым и восьмым контактами 18×1000 -омной декады I, как это показано на рис. 23. Эта добавочная декада VI имеет шестнадцать катушек по 1Ω каждая. Для того, чтобы общее сопротивление между седьмым и восьмым контактами было равно 1000Ω , имеется добавочное сопротивление, равное 984Ω . Нормальный элемент присоединяется одним полюсом к движку добавочной декады, а другим — к движку декады VII, аналогичной декаде VI в потенциометре Вольфа. Это устройство позволяет уравновесить электродвижущую силу нормального элемента с точностью до пятого десятичного знака.

Вторым добавлением было помещение рычажных реостатов в самом потенциометре, регулирующих силу рабочего тока потенциометра и обуславливающих грубую, среднюю и тонкую регулировку. Для самой грубой регулировки предусмотрен штепсельный магазин с тремя штепселями с сопротивлениями $2 \times 1000 \Omega$ и $1 \times 3000 \Omega$.

В дальнейшем введено еще усовершенствование, исключающее влияние соединительных проводов между декадами I и III и между II и V на сопротивление контакта при положении щетки на первом контакте. Сопротивление первых катушек обоих магазинов I и II измеряется и подгоняется с манганиновым проводником, соединяющим первый контакт

с движком соответствующей декады III и V. Соответственно холостые нулевые контакты декад I и II соединены с сопротивлениями декад III и V медным проводником большого сечения, сопротивление которого при нулевом положении движков входит только в потенциальную цепь. Для уничтожения лишнего числа контактов уничтожены средние пластины декад III, IV и V. Вместо этого ток подведение посредством к щеткам при помощи гибких проводников, скрученных в виде спиралей (рис. 24). Для повышения точности измерений все сопротивления потенциометра помещены в масле, перемешиваемом приводимой во вращение мотором мешалкой.

Потенциометр Фейсснера, изготавливаемый фирмой Гартманн и Браун

Кроме схемы двойных декад, примененной в потенциометрах Фейсснера-Вольфа, Фейсснер разработал потенциометр с применением верньера

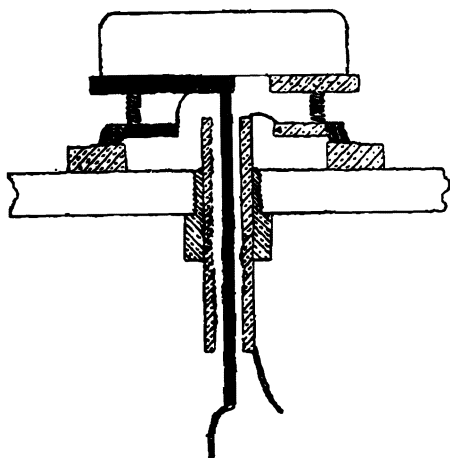


Рис. 24. Щетки потенциометра Эпплея.

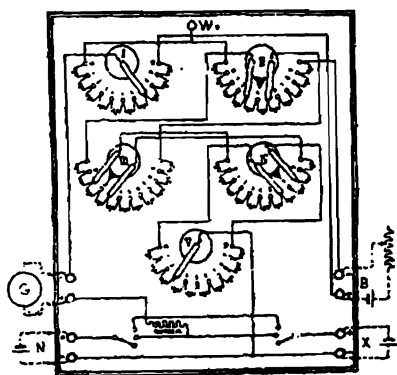


Рис. 25. Схема соединений потенциометра фирмы Гартманн и Браун по Фейсснеру.

Томсона-Варлея с несколько иным включением, чем это применено в потенциометре Рапса. Принципиальная схема этого включения видна из рис. 25 [38]. Если мы имеем какую-либо декаду с 11 катушками, присоединенными к 12 контактам, и если двойная щетка перекрывает два несмежных (через один) контакта, и к щеткам присоединено сопротивление, равное сопротивлению двух катушек, то общее сопротивление декады равно:

$$r \cdot 9 + \frac{2r \cdot 2r}{2r + 2r} = 10 r,$$

Где r — сопротивление одной катушки. Как и в первой декаде, сопротивление второй декады может быть составлено из 11 катушек сопротивлением r' , причем две из них шунтируются новым сопротивлением, величина которого равна $2r'$. При r' , равном $0,2r$, величина нового

шунтирующего сопротивления должна быть $0,2r' = 0,04r$. Аналогичным рассуждением находим сопротивление следующей декады:

$$r'' = \frac{0,2 \cdot r'}{10} \cdot 2 = 0,04 \cdot r' = 0,008r.$$

В последней декаде есть только одиночная щетка и число катушек должно быть равно десяти. В потенциометре Фейсснера $r = 100 \Omega$. Тогда первая шунтированная декада (II) состоит из 11 катушек сопротивлением 100Ω , вторая декада (III) — из 11 катушек по 20Ω , третья декада (IV) — из 11 катушек по 4Ω и последняя — четвертая — декада (V) — из 10 катушек по $0,8 \Omega$. Таким образом общее сопротивление первой шунтированной декады (со всеми параллельно включенными остальными декадами) равно $100 \times 10 = 1000 \Omega$, второй — $10 \cdot 20 = 200 \Omega$ и последней — $10 \cdot 0,8 = 8 \Omega$. Установив обычным способом при посредстве нормального элемента силу рабочего тока потенциометра, равную $0,1 \text{ mA}$, будем иметь следующее распределение токов: по декаде II в той части, где не перекрывают щетки, будет ток $I = 0,1 \text{ mA}$, в разветвленной части сила тока равна $\frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ mA}$ (сопротивления обеих параллельных ветвей равны друг другу и ток делится пополам). В декаде III ток в неразветвленной части равен $0,05 \text{ mA}$, а в разветвленной $\frac{0,05}{2} = 0,025 \text{ mA}$. В декаде IV ток равен $0,025 \text{ mA}$ и $0,0125 \text{ mA}$ в разветвленной части, и в последней декаде (V) ток равен $0,0125 \text{ mA}$. Последовательно с серией декад II, III, IV и V присоединена обычная декада I, имеющая 10 катушек по 1000Ω .

Из этих рассуждений можно определить, чему соответствует каждая единица всех пяти декад.

В декаде	I	$U_1 = I_1 r_0 = 0,0001 \cdot 1000 = 0,1 \text{ V}$
"	II	$U_2 = I_2 r_1 = 0,0001 \cdot 100 = 0,01 \text{ V}$
"	III	$U_3 = I_3 r_2 = 0,00005 \cdot 20 = 0,001 \text{ V}$
"	IV	$U_4 = I_4 r_3 = 0,000025 \cdot 40 = 0,0001 \text{ V}$
"	V	$U_5 = I_5 r_4 = 0,0000125 \cdot 0,8 = 0,00001 \text{ V}$

Общее сопротивление потенциометра вместе с магазином I равно: $10 \cdot r_0 + 10 \cdot r_1 = 10 \cdot 1000 + 10 \cdot 100 = 11\,000 \Omega$.

Компенсируемая цепь присоединяется через гальванометр к рычагам на декадах I и V. При компенсации нормального элемента необходимо установить на всех декадах сопротивление, соответствующее величине его электродвижущей силы. Так например, при электродвижущей силе нормального элемента, равной $1,01834 \text{ V}$, рычаг декады I устанавливается на контакт 10, рычаг декады II — на контакт 1, декады III — на контакт 8, декады IV — на контакт 3 и декады V — на контакт 4.

По этой схеме изготавливает потенциометры фирма Гартманн и Браун (Hartmann u. Braun) [71]. Предельное измеряемое напряжение на этих потенциометрах (без делителя) $1,1 \text{ V}$.

Потенциометр Фейсснера, изготавливаемый фирмой Сименс и Гальске

Несколько изменена описанная выше схема в универсальном потенциометре Фейсснера, изготавливаемом фирмой Сименс и Гальске (Siemens u. Halske) [38]. К декаде, имеющей в потенциометре Гартмана и Браун

10 катушек сопротивлением 1000Ω каждая, добавлен один лишний контакт, уравнивающий электродвижущую силу нормального элемента. Общее сопротивление между десятым и одиннадцатым контактами равно 1000Ω (так же, как и между остальными), но оно состоит из: катушки сопротивлением 810Ω , рычажной декады сопротивлением 10Ω (однооными катушками) и второй катушки сопротивлением 180Ω . Схема соединений ясна из рис. 26. К рычагу этой добавочной декады переключателем присоединяется через гальванометр один полюс нормального элемента, второй полюс которого непосредственно присоединяется к нулевому контакту первой декады. Таким образом электродвижущая сила нормального элемента уравнивается разностью потенциалов на сопротивлении 10×1000 плюс 180Ω и плюс число омов, установленное на декаде VI сопротивлением 10Ω . Это последнее число устанавливается по величине электродвижущей силы данного нормального элемента при данной температуре. Так например, при электродвижущей силе нормального элемента, равной $1,0184 \text{ V}$, движок на декаде VI устанавливается на контакт 4, и сила тока потенциометра изменяется до уравнивания подвижной системы гальванометра. Тогда сила тока в рабочей цепи потенциометра равна $0,0001 \text{ A}$.

Это устройство, упрощающее уравнивание нормального элемента, как указано выше, значительно облегчает и ускоряет работу. Однако, ввиду того, что нормальный элемент уравнивается на сопротивлении, дающем только пять знаков величины электродвижущей силы, точность отсчета на последней декаде V потенциометра не является гарантированной и при помощи ее возможно только более полное уравнивание подвижной системы гальванометра. Этот потенциометр позволяет устанавливать рабочий ток, не применяя внешних реостатов, так как три рычажных реостата: $R_1—10 \times 100$, $R_2—10 \times 10$ и $R_3—10 \times 1 \Omega$ —помещены в самом потенциометре. Переключатель K_1 и зажимы для присоединения аккумуляторной батареи, нормального элемента и гальванометра помещены на правой стороне прибора. Самому

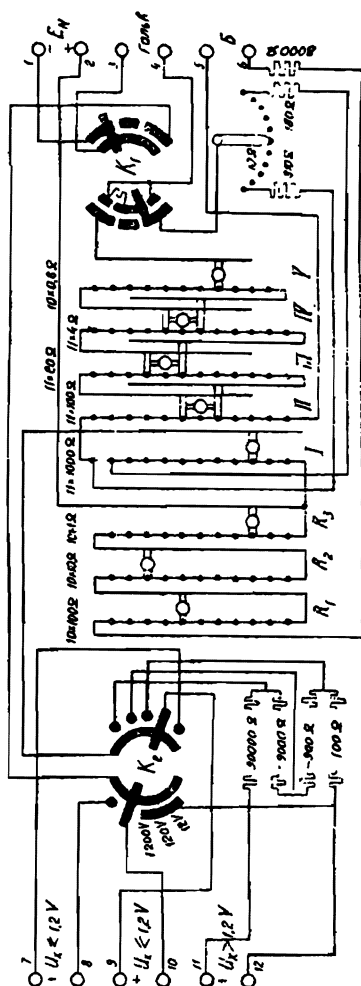


Рис. 26. Схема соединений потенциометра фирмы Сименс и Гальске по Фейснеру.

потенциометру придана оригинальная цилиндрическая форма. На левой стороне прибора помещается особый переключатель k_2 на пять направлений, при помощи которого возможно подать на потенциометр любое из желаемых напряжений от зажимов: 7—8, 9—10 или 11—12. На два последних зажима подаются напряжения свыше 1,2 V, так как предельным напряжением, уравнишиваемым на этом потенциометре, при нормальной силе рабочего тока является 1,2 V; зажимы 11—12 присоединены к делителю напряжения с общим сопротивлением 100000 Ω (делитель расположен также на левой стороне прибора), от которого отбираются на переключатель k_2 — 0,1, 0,01 и 0,001 от измеряемого напряжения, соответственно при производстве измерений до 12, до 120 или до 1200 V. Общее сопротивление этого потенциометра составляется из $(11 \cdot 1000 + 10 \times 100 + 8000) \Omega$ плюс сопротивление регулировочных реостатов. Добавочное сопротивление 8000 Ω помещено на правой стороне потенциометра. Переключатель гальванометра k_1 имеет пять положений. В среднем положении цепь гальванометра розомкнута. При перестановке рычага переключателя на любой из соседних со средним контактов, гальванометр включается последовательно с большим сопротивлением, предохраняющим как нормальный элемент, так и гальванометр. В крайних положениях гальванометр включен непосредственно в измеряемую цепь.

Благодаря цилиндрической форме прибора контактные пластины расположены на дисках, ось которых горизонтальна. Щетки связаны с подвижным диском, на котором нанесены цифры, указывающие их положение на контактной пластинке. Каждая щетка изготовлена из пружинящих бронзовых пластин, благодаря чему плотно прижимается к контакту. Для возможности осмотра и выверки потенциометра, нижняя его крышка снимается.

Для точной работы этого потенциометра очень большое значение имеет состояние поверхности контактов и щеток, так как, по указаниям Фейсснера, переходное сопротивление контакта щеток, не превосходящее 0,001 Ω при хорошем состоянии соприкасающихся поверхностей, легко может достигнуть 0,01 Ω при загрязненных поверхностях. Поэтому при работе на этом потенциометре приходится достаточно часто производить осмотр и прочистку контактов, что возможно сделать только сняв нижнюю крышку. Это недостаток потенциометра, так как чтобы снять крышку, необходимо перевернуть потенциометр, обычно отсоединив от него все провода.

Корпус прибора металлический, поэтому рекомендуется устанавливать его во время работы на изолирующих подставках.

Как указано выше, нормальная сила рабочего тока этого потенциометра равна 0,1 mA, причем наибольшее измеряемое без делителя напряжение равно 1,2 V. При необходимости измерять без делителя напряжение свыше 1,2 V, возможно увеличить питающий потенциометр рабочий ток до 0,2 mA. Уравнивание нормального элемента в этом случае производится уже на рабочем сопротивлении, составляющем половину устанавливаемого ранее. Катушки сопротивлений этого потенциометра рассчитаны таким образом, что возможно и дальнейшее увеличение рабочего тока, однако, не больше, чем до 2—3 mA.

Потенциометр фирмы Карпантие

Изготавливаемый французской фирмой Карпантие (J. Carpentier) с 1901 г. [1] до настоящего времени потенциометр имеет большое распространение в лабораториях Франции. В схеме этого потенциометра использованы также двойные щетки Томсона-Варлея (рис. 27). Специальный переключатель k служит для включения двух одинаковых сопротивлений R и R' по 10 000 Ω каждое. При правом положении переключателя k сопротивление 10 000 Ω включено до рычажной декады R_1 , а при левом его положении второе сопротивление, тоже равное 10 000 Ω , включено между рычажными декадами R_1 и R_8 . Рычажные декады R_1 и R_3 состоят: из одиннадцати катушек по 1000 Ω каждая в декаде R_1 и из одиннадцати катушек по 10 Ω каждая в декаде R_8 . Двойные щетки H и H' присоединяют параллельно двум катушкам

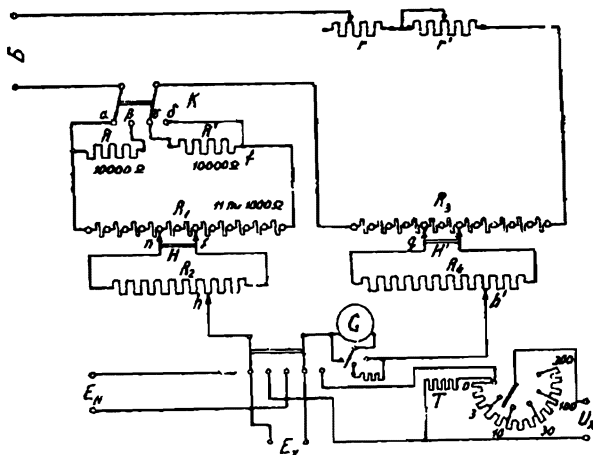


Рис. 27. Схема потенциометра фирмы Карпантие.

декады R_1 равное им сопротивление декады R_2 , равное 2000 Ω , а параллельно двум катушкам декады R_3 — декада R_4 сопротивлением 20 Ω . Декада R_2 имеет 10 катушек по 200 Ω каждая, а декада R_4 — 10 катушек по 2 Ω . Ввиду того, что какие-либо две катушки декад R_1 и R_3 всегда шунтированы равным им сопротивлением, общее сопротивление декады $R_1 = 9 \cdot 1000 + \frac{2000}{2} = 10\,000$ Ω , а декады $R_3 = 9 \cdot 10 + \frac{20}{2} = 100$ Ω .

Все сопротивление рабочей цепи потенциометра Карпантие равно R (или R') + R_1 + $R_3 = 10\,000 + 10\,000 + 100 = 20\,100$ Ω . Это сопротивление остается неизменным при любом положении переключателя K и щеток H и H' . Рычажные реостаты r и r' , помещенные на крышке потенциометра, позволяют производить регулировку тока потенциометра. Компенсирование производится перемещением одиночных щеток h и h' на декадах R_2 и R_4 и двойных щеток H и H' на декадах R_1 и R_3 . Уравновешивающая измеряемую электродвижущую силу разность потенциалов на щетках h и h' при положении переключателя K , как указано на рис. 27, равна:

$$u_h - u_{h'} = u_x = (u_h - u_p) + (u_p - u_f) + (u_f - u_r) + (u_r - u_q) + (u_q - u_{h'})$$

обозначив n_2 , n_1 , n_3 и n_4 число катушек, включенных между h и p , между p и f , между γ и q и между q и h' и силу тока в последовательной цепи потенциометра через I , имеем:

$$u_h - u_p = 200 \frac{I}{2} n_2 = 100 I n_2; \quad u_p - u_f = 1000 I n_1; \quad u_f - u_\gamma = 10\,000 I; \\ u_\gamma - u_q = 10 I n_3; \quad u_q - u_{h'} = 2 \frac{I}{2} \cdot n_4 = I n_4.$$

Таким образом, компенсируемое напряжение

$$u_x = (10\,000 + 1000 \cdot n_1 + 100 \cdot n_2 + 10 \cdot n_3 + n_4) I.$$

Если рабочая сила тока потенциометра установлена равной 0,0001 А, то

$$u_x = 1 + \frac{n_1}{10} + \frac{n_2}{100} + \frac{n_3}{1000} + \frac{n_4}{10\,000} \text{ В.}$$

Рассуждением, аналогичным предыдущему, выводится, что при правом положении переключателя k

$$u_x = \frac{n_1}{10} + \frac{n_2}{100} + \frac{n_3}{1000} + \frac{n_4}{10\,000} \text{ В.}$$

Таким образом, при правом положении переключателя предел измеряемой потенциометром разности потенциалов равен 1,1 В, а при левом — 2,1 В. На верхней крышке прибора установлен переключатель, позволяющий присоединять к компенсирующей цепи потенциометра поочередно нормальный элемент и испытуемый. При нормальном элементе Вестона, имеющем электродвижущую силу 1,0183 В, переключатель k ставится в левое положение, и отсчеты по рычагам должны быть: на R_1 — 0; на R_2 — 1; на R_3 — 8 и на R_4 — 3. В этом случае рабочий ток потенциометра будет равен требуемой величине, т. е. 0,1 мА.

Как и в большинстве других потенциометров, гальванометр для безопасности включается предварительно через предохранительное сопротивление. Этому потенциометру придана оригинальная форма — в виде арифмометра Однера. Все рычаги магазинов, так же как и переключатель k и переключатель гальванометра, помещены на криволинейной его поверхности. Цифры у рычагов указывают число включенных катушек. Регулировочные реостаты r и r' , все зажимы и переключатель $E_N - E_x$ помещены на верхней горизонтальной крышке. Для расширения предела измерения свыше 2,1 В имеется делитель напряжения с рычажным переключением. Ступени этого делителя — 1000 Ω , 2000 Ω , 7000 Ω , 20 000 Ω , 70 000 Ω и 200 000 Ω . Ввиду того, что на потенциометр через гальванометр подается напряжение, имеющееся на первом сопротивлении T 1000 Ω , наибольшее измеряемое напряжение может быть равно:

$$\frac{(1000 + 2000 + 7000 + 20\,000 + 70\,000 + 200\,000) \cdot 2,1}{1000} = \frac{300\,000 \cdot 2,1}{1000} = 630 \text{ В.}$$

Переключатель делителя напряжения помещен на верхней крышке прибора.

Этот потенциометр удобен в работе. Точность измерения на нем до 0,01% при измерении величин порядка 1 В. В виду того, что сопротивление контактов двойных щеток входит в цепь рабочего тока

потенциометра, большое значение имеет состояние их поверхности. Поэтому, при работе щеток необходимо следить за их чистотой и часто промывать. Это — недостаток прибора, так как чтобы просмотреть щетки, необходимо прибор раскрыть.

Точный потенциометр фирмы „Кэмбридж“

(Cambridge Vernier Potentiometer)

В этом потенциометре, как и в трех предыдущих типах, применен принцип двойных щеток (верньера) Томсона-Варлея.

Рабочая цепь этого потенциометра состоит из рычажной декады, имеющей 17 катушек по 100 Ω каждая и из второй декады, имеющей 11 катушек по 10 Ω . Параллельно двум катушкам второй декады сдвоенными щетками присоединяется декада с 11 катушками по 2 Ω , 2 катушки которого, в свою очередь, также шунтируются декадой сопротивлением 0,4 Ω . Рассуждением, аналогичным произведенному ранее (потенциометр по Фейснеру Гартманн и Браун), получаем, что все сопротивление потенциометра равно:

$$100 \cdot 17 + 9 \cdot 10 + \frac{2 \cdot 10}{2} = 1800 \Omega.$$

При силе рабочего тока, равной 1 мА, предел измерения этим потенциометром 1,8 В.

По конструктивным соображениям 17 катушек первой декады разбиты на две серии контактов (см. схему соединений, рис. 28), составляющих две отдельные декады; механическая конструкция обеих декад такова, что благодаря взаимной блокировке цифра, соответствующая перекрываемому щеткой контакту, видна только у одной из этих декад. Эта конструктивная особенность обеспечивает правильность отсчета.

Катушки отдельных декад укреплены на изолирующих круглых рамах и соединены друг с другом латунными полосами. Рамы сидят на неподвижной горизонтальной оси, на которой вращаются диски из нейзильбера с укрепленными на них щетками. Для удобства вращения щеток боковые поверхности дисков снабжены насечкой. Положение щеток указывается цифрой в окошке, и благодаря имеющимся фиксаторам остановка в среднем (между контактами) положении невозможна. Для установки тока по электродвижущей силе нормального элемента Вестона, равной 1,0183 В, служит неизменное сопротивление, равное 1018,3 Ω . Имеющийся в потенциометре двухполюсный переключатель позволяет произвести быструю проверку рабочего тока потенциометра. Гальванометр включается двойным ключом, сперва замыкающим цепь гальванометра через предохранительное сопротивление, которое

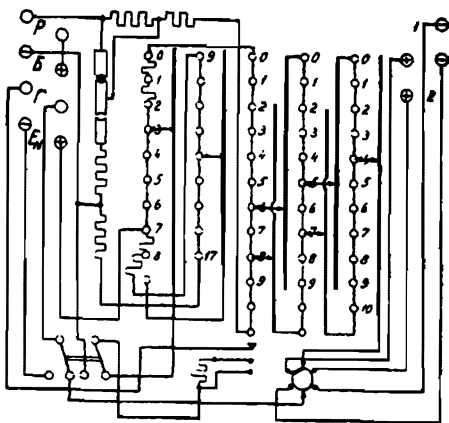


Рис. 28. Схема потенциометра фирмы „Кэмбридж К0“.

затем замыкается накоротко. Шестиполюсный переключатель позволяет включать попеременно две измерительные цепи в цепь гальванометра, что весьма удобно при проверке ваттметров и при измерении сопротивлений.

В виду того, что в этом потенциометре имеется только пять декад, из которых каждое деление первых двух соответствует 0,1 V (при рабочем токе в 1 мА), одно деление третьей соответствует 0,01 V, четвертой — 0,001 V и пятой — 0,0001 V, весь отсчет производится с точностью, не большей четвертого десятичного знака. При необходимости большей точности фирма Кэмбридж изготовляет такие же потенциометры с шестью декадами с точностью отсчета до пятого десятичного знака. В этом случае точность установки рабочего тока потенциометра по постоянному сопротивлению 1018,3 Ω недостаточна, и это сопротивление может изменяться в пределах от 1018,2 до 1018,6 Ω . Для изменения пределов измерения в этом потенциометре имеется штепсельный переключатель (по методу Франке, см. главу I), позволяющий уменьшить предел измерения в 10 раз, т. е. до 0,18 000 Ω .

Внешний вид этого потенциометра сходен с арифмометром Однера. Все зажимы вынесены на боковые стенки потенциометра, а все переключатели находятся на его горизонтальной поверхности. Декады и щетки закрыты во время работы крышкой из нейзильбера с отверстиями, в которых видны цифры.

Потенциометр фирмы Тинслея

(Tinsley a. C^o)

В этом потенциометре также применен принцип верньера Томсона-Варлея. Чтобы не применять больше одной пары двойных щеток, но все же иметь достаточное число знаков без линейной проволоки, рычажные декады имеют очень большое число контактов. Рабочая цепь этого потенциометра состоит из рычажной декады, имеющей 20 катушек по 10 Ω каждая, последовательно соединенной с декадой, имеющей 100 катушек по 0,001 Ω каждая. Двойными щетками параллельно любым двум катушкам первой декады присоединяется декада сопротивлением 20 Ω , состоящая из 100 катушек по 0,2 Ω каждая. При силе рабочего тока $I = 0,01$ А, падение напряжения на одной катушке первой декады $u_1 = 10,0 \cdot 0,01 = 0,1$ V, на одной катушке второй $u_2 = \frac{0,01}{2} \cdot 0,2 = 0,001$ V и на одной катушке третьей $u_3 = 0,01 \cdot 0,001 = 0,00001$ V.

Отсчет по потенциометру может производиться с точностью до пятого десятичного знака. Ввиду того, что две катушки первой декады всегда шунтированы второй, общее сопротивление рабочей цепи потенциометра равно 190,1 Ω и предел измерения 1,901 Ω . Этот предел измерения может быть уменьшен в 10 раз специальным переключателем. Переключатель на три направления дает возможность производить быстрые пересоединения двух измеряемых источников и проверку рабочего тока потенциометра нормальным элементом Вестона.

Для установки рабочего тока в потенциометре имеются два реостата — для грубой и тонкой регулировки.

Схема соединений этого потенциометра показана на рис. 29.

Недостатком этого потенциометра является очень большое число контактов, за чистотой которых необходимо всегда следить во время работы. Большое число катушек усложняет также и изготовление потенциометра, так как все сопротивления катушек должны быть очень точно подогнаны. Ввиду того, что сопротивление контакта двойных щеток входит в величину сопротивления второй декады, необходимо следить за чистотой трущихся частей парных щеток и всех контактов первой декады.

Потенциометр фирмы Лидс и Нортруп, тип К

Потенциометр Лидс и Нортруп (Leeds and Northrup) [93] серии *K* имеет очень большое распространение. Его основной особенностью является длинная калиброванная проволока, длиной 12 футов, т. е. около 3,048 м. Вся рабочая цепь этого потенциометра состоит только из двух сопротивлений — одной рычажной декады *AD* (рис. 30), состоящей из

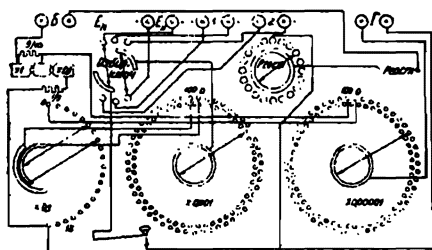


Рис. 29. Схема потенциометра фирмы Тинслея.

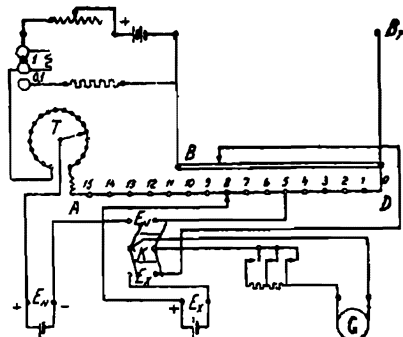


Рис. 30. Схема потенциометра фирмы Лидс и Нортруп, тип К.

15 катушек сопротивлением 5Ω каждая, и упомянутой выше калиброванной проволоки *DB*, общим сопротивлением $5,5 \Omega$, намотанной на мраморном цилиндре. Цилиндр защищен вращающимся деревянным кожухом, на котором и помещен скользящий контакт. Отсчет полных оборотов проволоки производится по стеклянной шкале с делениями, а отсчет сотых долей оборота — по делениям, расположенным на защитном кожухе. Вся длина проволоки разделена на 1100 частей и равна одиннадцати полным оборотам барабана. Общее сопротивление рабочей цепи потенциометра равно $80,5 \Omega$. Для установки рабочего тока потенциометра по электродвижущей силе нормального элемента предусмотрена добавочная декада *T*. Нормальный элемент двухполюсным переключателем (на схеме *k*) одним полюсом (отрицательным на схеме) через гальванометр, присоединяется неподвижно к пятому контакту декады *AD*, а другим — к рычагу декады *T*. Общее сопротивление декады $T = 0,14 \Omega$. Сопротивления, к которым присоединяется нормальный элемент, могут быть установлены от 50,83 до 50,97 Ω , соответственно для электродвижущих сил нормального элемента от 1,0166 до 1,0194 В. Таким образом, сила рабочего тока потенциометра устанавливается равной 0,02 А. При этой силе тока падение напряжения на одной

катушке декады AD равно $5 \times 0,02 = 0,1$ V, а падение напряжения на калиброванной проволоке DB равно $5,5 \cdot 0,02 = 0,11$ V. Падение напряжения, соответствующее одному полному обороту защитного кожуха, равно $\frac{0,11}{11} = 0,01$ V и для 0,01 оборота — 0,0001 V. Таким образом, наибольшая измеряемая этим потенциометром электродвижущая сила равна $15 \cdot 0,1 + 0,11 = 1,61$ V, а точность отсчета равна четырем десятичным знакам, т. е. $0,01\%$, при измерении напряжений порядка 1 V. В потенциометре имеется штепсельное устройство, аналогичное подобному же устройству в потенциометре Франке; оно позволяет уменьшать предел измерения в 10 раз.

Два реостата — один для грубой и другой для тонкой регулировки силы рабочего тока — встроены в прибор; их рукоятки помещены на правой боковой стенке потенциометра. Безусловным достоинством этого

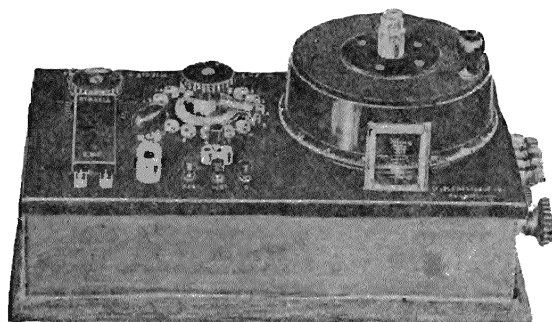


Рис. 31. Внешний вид потенциометра фирмы Лидс и Нортруп, тип К.

потенциометра является большое удобство работы на нем. Применение этого потенциометра для измерений, не требующих точности до пятого десятичного знака, дает хорошие результаты измерения. Проволока реохорда достаточно хорошо калибрована и точность до четвертого знака вполне гарантирована.

Однако, необходимо заметить, что при очень продолжительной работе (несколько лет почти непрерывно) не исключена возможность некоторого срабатывания (истирания) проволоки подвижным контактом, что может повлечь за собой некоторую неуверенность в точности отсчета последнего знака. Это замечание может одинаково относиться ко всем потенциометрам, имеющим калиброванную проволоку, по которой производится отсчет последних десятичных знаков. Внешний вид этого потенциометра показан на рис. 31.

Точный потенциометр фирмы „Дженераль Электрик К²⁴“

Этот потенциометр разработан Бобиером и О. Брайаном (Bobier a. O. Bryan) [7], главным образом, для измерения небольших электродвижущих сил, чем и вызваны некоторые особенности его конструкции. Рабочая цепь его состоит из двух частей: SS' , служащей для присоединения нормального элемента при установке рабочего тока (слева на рис. 32) и MM' собственно рабочей цепи потенциометра. По части SS' всегда проходит полный ток потенциометра. Ток, проходящий по части MM' , в зависимости от положения штепселя в гнезде XI или в гнезде XO, I будет либо равен току в части SS' , либо составлять лишь 0,1 от него. При положении штепселя в том и в другом гнезде, общее сопротивление цепи MM' , равное 219,98 Ω , не меняется. При

положительный полюс нормального элемента. Замыкание цепи гальванометра происходит сперва через большое сопротивление ($0,1 \text{ M}\Omega$), которое дальнейшим нажимом ключа замыкается накоротко. При помощи нормального элемента и соответствующего сопротивления цепи SS' сила рабочего тока устанавливается равной $0,01 \text{ A}$. Рабочая цепь состоит из последовательно включенных декад: одной A , состоящей из 21 катушки сопротивлением $10 \text{ }\Omega$ каждая и второй B , из 10 катушек сопротивлением $1 \text{ }\Omega$ каждая. Каждая из этих двух декад имеет по две соединенные механические щетки (Томсон-Варлей), к которым присоединены декады, дающие следующие знаки отсчета. Подсчет сопротивлений этих декад и добавочного сопротивления к ним производится на основании следующих соображений. Каждая катушка одноомной декады B при рабочем токе $0,01 \text{ A}$ имеет разность потенциалов $0,01 \text{ V}$. Чтобы каждая катушка декады C имела разность потенциалов $0,001 \text{ V}$, сопротивление ее

должно быть равно $r_2 = \frac{r_1 + R^1}{10}$, где r_1 — сопротивление одной катушки декады B (в данном случае 1Ω) и R — полное сопротивление шунтирующей цепи. Чтобы ток в декаде C был мал, сопротивление одной катушки декады C' взято сравнительно большим $r_2 = 10$, и величина всего сопротивления шунта $R = 10 \cdot r_2 - r_1 = 100 - 1 = 99\Omega$. Декада C состоит из 9 катушек по 10Ω каждая и добавочного сопротивления, равного 9Ω . Подсчет сопротивления, шунтирующего одну катушку декады A , производится аналогичным образом. Сопротивление одной катушки декады D выбрано 10Ω . Эта декада состоит из 9 катушек, а добавочное сопротивление к ней — из неизменного сопротивления 9890Ω и двойной декады E (аналогичной декаде Вольфа), неизменяемое сопротивление которой равно 10Ω и составлено из 10 парных катушек сопротивлением 1Ω каждая. Отсчет на декаде D соответствует тысячным долям вольт, а на декаде E — сотысячным. Ввиду назначения этого потенциометра для измерения малых электродвижущих сил, сопротивления первых катушек декад B , C и D подогнано совместно с подводящими проводами.

Предел измерения этого потенциометра равен $2,1V$ при штепселе, помещенном в гнезде XI , и $0,21V$ при штепселе в гнезде XO , I , ступенями в $10\mu V$ в первом случае и в $1\mu V$ во втором.

В СССР подобные потенциометры изготавливаются заводом „Эталон“ (Ленинград).

Этот потенциометр является переходным типом к потенциометрам, служащим для измерения малых электродвижущих сил, например, электродвижущих сил термопар.

В следующей главе рассмотрены эти специальные типы потенциометров.

ГЛАВА V

ПОТЕНЦИОМЕТРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ ТЕРМОПАР

Общие замечания

Применение обычных точных потенциометров постоянного тока для измерения малых электродвижущих сил порядка термоэлектродвижущих сил термопар имеет ряд существенных недостатков, сильно влияющих на точность измерения. Этими недостатками являются:

- а) Слишком большое сопротивление потенциометра, вследствие чего вольтовая чувствительность гальванометра, включенного последовательно с термопарой, недостаточна для измерения малых электродвижущих сил.
- б) Недостаточно точный отсчет по движкам потенциометра вследствие очень малого значения измеряемой величины.

¹ Это утверждение вытекает из следующего: $\frac{I-i}{i} = \frac{R}{r_1}$, где I — ток в неразветвленной части цепи и i — ток в шунте; но, так как по условию $I r_1 = 10 i r_2$, то $I r_1 = 10 i r_2 = i (r_1 + R)$, откуда: $r_2 = \frac{r_1 + R}{10}$.

в) Влияние непостоянства переходного сопротивления контактов.

г) Возникновение при передвижении щеток магазинов паразитных термоэлектродвижущих сил, могущих совершенно исказить результат измерения малой электродвижущей силы.

Специальные потенциометры для измерения малых термоэлектродвижущих сил, описанные в первой главе (потенциометр Лефельда и потенциометр Гаркера) не были достаточно удобны в применении: первый не давал достаточной точности, а второй затруднял работу применением большого числа ртутных контактов. Не гарантирует достаточной точности и описанный выше метод Линдек и Рота, так как точность его измерения ограничивается точностью отсчета по миллиамперметру.

Схема Гаусрата и его первый потенциометр

Стремясь избежать влияния переходного сопротивления контактов и возникновения термоэлектродвижущих сил, Гаусрат (H. Hausrath) [72] разработал весьма интересную по

своей идее расщепляющую схему, сопротивление которой остается неизменным при всех положениях щеток. Это устройство указано на рис. 33. Оно состоит из двух расположенных параллельно рядов контактов, к которым присоединены сопротивления, изготовленные из манганиновой проволоки.

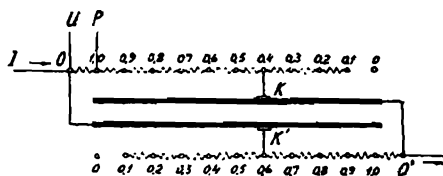


Рис. 33. Расщепляющая схема Гаусрата.

Две параллельные контактные полосы со скользящими на них двойными щетками K и K' включают обе серии сопротивлений параллельно, причем так, что общее сопротивление между точками o' и u остается неизменным. Щетки K и K' друг от друга изолированы, но механически связаны. Общее сопротивление в первой модели схемы было равно 1Ω . Около контактов указаны цифры, обозначающие проводимость данной ступени в сименсах (считая от o' в нижнем ряду и от o в верхнем); сумма отсчетов по обоим щеткам дает общую проводимость всей схемы 1 сименс. Токи в обеих параллельных ветвях прямо пропорциональны отсчету по цифре соответствующего положению щеток контакта. При силе тока во внешней цепи, равной $1,0$ А при расположении щеток, указанном на рис. 33, ток в верхнем элементе $I_1 = 0,4$ А, а в нижнем — $I_2 = 0,6$ А. Напряжение на сопротивлении $1,0 \Omega$ между точками u и p изменяется при изменении положения щеток, и отсчет по верхней щетке непосредственно указывает напряжение на $u - p$ (при общем токе $1,0$ А). Таким образом, присоединяя компенсируемую электродвижущую силу к зажимам $u - p$ и перемещая щетки, мы можем изменять компенсирующее напряжение от $1,0$ и до $0,1$ В (через $0,1$ В), не изменяя общего сопротивления всей цепи и не имея в цепи измеряемой электродвижущей силы скользящих контактов. Применение этого остроумного приспособления позволило разработать схему потенциометра, в котором компенсируемая электродвижущая сила присоединена к неизменным зажимам. Основной особенностью этого потенциометра является включение отдельных его составных элементов не последовательно, как в обычных

потенциометрах, а параллельно. В своем потенциометре Гаусрат применил две схемы равных суммарных сопротивлений: в $1,0 \Omega$ и в $0,1 \Omega$, соединенных между собой двумя калиброванными проволоками, присоединенными таким образом, что при перемещении связанных механически контактов k и k' сопротивление обеих параллельных цепей остается неизменным. К этим контактам подводится питающий потенциометр ток.

На рис. 34 показана схема первого потенциометра Гаусрата. Компенсируемая электродвижущая сила присоединяется к зажимам P_1 и P_2 и ввиду того, что токи в обеих схемах равного сопротивления подгонкой сопротивлений R_1 и R_2 устанавливаются одинаковыми, отсчет по правому движку равен 0,1 отсчета по левому. Дальнейшее число знаков получается по проволоке, общее сопротивление которой равно

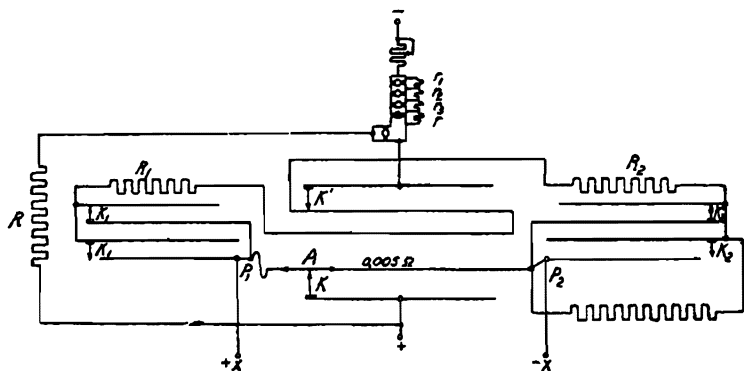


Рис. 34. Схема первого потенциометра Гаусрата.

$0,005 \Omega$. Потенциометр градуируется так, что при положении щетки k на A разность потенциалов между точками P_2 и P_1 равна нулю. Сила рабочего тока потенциометра, равная удвоенному току каждой из половин, устанавливается с помощью нормального элемента на сопротивлениях r_1 , r_2 или r_3 равной $0,2 \text{ mA}$, 2 mA или 20 mA . Щетки k_1 и k_1' , также как и щетки k_2 и k_2' , связаны между собой. Показания на k_1 и k_2 вычитаются, так как токи в обоих элементах направлены на щетки k . Гаусрат дает таблицу, в которой указывает значения $P_1 - P_2$ при различных положениях щеток.

Расщепляющая схема Диссельхорста

Диссельхорст (H. Diesselhorst) [25] разработал схему, аналогичную расщепляющей схеме Гаусрата, также свободную от возникновения термоэлектродвижущих сил в контактах измеряемой электродвижущей силы. Эта схема имеет меньшее число катушек сопротивления, чем аналогичная схема Гаусрата (15 вместо 20), обладает также постоянным сопротивлением для тока I (рис. 35) и состоит из 10 одинаковых сопротивлений, присоединенных к 10 расположенным по кругу контактным пластинам. Эти пластины имеют нумерацию от 0 до 9. Ток подводится с одной стороны к точке O , а с другой — к любой из контактных пла-

стин при посредстве рычага B . Этот рычаг также перекрывает соответствующую пластину второго ряда расположенных по кругу пластин: от противоположной точки O пластины q ток I отводится. Компенсирующее напряжение отбирается от пластин 0 и 9 и, при перемещении рычага B , эта равенность потенциалов на $P_1 - P_2$ изменяется. При положении рычага B на каком-либо контакте (назовем его через x) ток разветвляется в обеих половинах цепи сопротивлений xr и $(10-x)r$, где r — величина сопротивления одной катушки. Общее сопротивление обеих параллельных ветвей наружного ряда катушек между точками 0 и x будет равно:

$$R_x = \frac{xr \cdot (10-x)r}{[x + (10-x)]r} = \frac{x \cdot (10-x)}{10} r,$$

и разность потенциалов на точках 0 и x :

$$IR_x = \frac{x(10-x)}{10} \cdot r \cdot I,$$

где I — сила тока по внешней цепи. Тогда сила тока I'' в части сопротивления $(10-x)r$, а следовательно и в единичном сопротивлении $0-9$ будет равна:

$$I'' = \frac{IR_x}{(10-x)r} = \frac{x \cdot (10-x)r}{10(10-x)r} I = \frac{x}{10} I,$$

и компенсирующее напряжение на точках ($P_1 - P_2$)

$$u_x = \frac{x}{10} rI.$$

Если величина тока I при перемещении рычага B не изменяется, u_x может быть изменено от 0 до $0,9$ какой-то постоянной величины. Как видно из формулы, при перемещении рычага B общее сопротивление R_x обеих параллельных ветвей изменяется от наибольшей величины $R_5 = 5r/2 \Omega$ при положении щетки на $x=5$ до $R_0=0$ при $x=0$. При $x=1$ или 9 , $R_9=R_1$ также, как и $R_2=R_8$ и т. д., так как обе стороны от $x=5$ симметричны. Чтобы общее сопротивление оставалось неизменным, предусмотрен внутренний ряд контактов с присоединенными к ним катушками, величина сопротивления которых $R_{доп}$ определяется из расчета, чтобы общее сопротивление всей цепи всегда было равно $R_5 = 2,5r$. При каком-либо x общее сопротивление

$$R = R_{доп} + R_x = 2,5 \Omega; \text{ и } R_x = \frac{x(10-x)}{10} r;$$

откуда

$$R_{доп} = \left[2,5 - \frac{x(10-x)}{10} \right] r = \frac{25r}{10} - \frac{x(10-x)r}{10}.$$

Отсюда получаем:

при $x=0$	— $R_{доп} = 2,5r$
$x=1$ или 9	— $R_{доп} = 1,6r$
$x=2$ или 8	— $R_{доп} = 0,9r$
$x=3$ или 7	— $R_{доп} = 0,4r$
$x=4$ или 6	— $R_{доп} = 0,1r$
$x=5$	— $R_{доп} = 0$

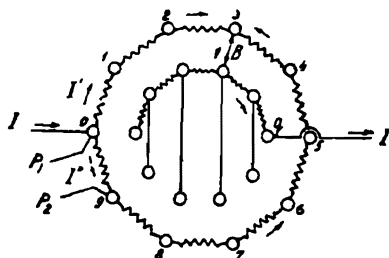


Рис. 35. Расщепляющая схема Диссельхорста.

и величина отдельных сопротивлений: по внутреннему ряду $(5-4)=0,1r$, $(4-3)=0,3r$, $(3-2)=0,5r$, $(2-1)=0,7r$, $(1-0)=0,9r$.

Преимущество схемы Диссельхорста по сравнению со схемой Гаусрата состоит в наличии только одного рычага с двойной щеткой, что, конечно, уменьшает вредное влияние контакта. Так же, как и в схеме Гаусрата, измеряемая электродвижущая сила присоединяется без контактов, которые вынесены в цепь главного тока к значительно большим сопротивлениям.

Схема второго потенциометра Гаусрата

В этом потенциометре [73] применена схема Диссельхорста и вместо калиброванной проволоки, имеющейся в первом потенциометре Гаусрата, введена двойная рычажная декада малого сопротивления ($10 \times 0,005 \Omega$), подвод питающего тока производится к этой декаде (рис. 36). Единич-

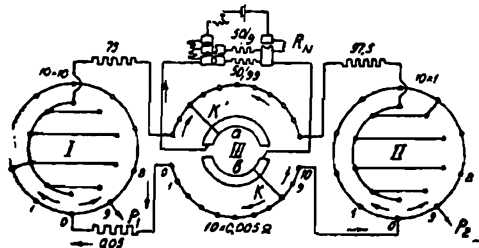


Рис. 36. Схема второго потенциометра Гаусрата.

ное сопротивление левой расщепляющей декады (I) по схеме Диссельхорста равно 10Ω , такой же правой декады (II) — 1Ω . Сопротивление каждой из обеих параллельных ветвей (от a до b) равно 100Ω и при напряжении на $a-b$, равном $1,0 \text{ V}$, ток I_{ab} в каждой ветви равен $0,01 \text{ A}$. Компенсируемое напряжение присоединяется к точкам P_1 и P_2 обеих декад I и II. Ввиду

того, что токи в обеих компенсирующих параллельных ветвях средней декады имеют направление в левой ветви от щетки k к зажиму P_1 и в правой ветви от щетки k к зажиму P_2 , разность потенциалов обеих его ветвей вычитается, таким образом средняя декада имела бы нуль посередине. Для установки нуля в начале контактов имеется в левой ветви добавочное сопротивление, равное $0,05 \Omega$, уравнивающее при положении движков на нулях падение напряжения в средней декаде, равное $10 \times 0,005 \cdot I \text{ V}$. Сила тока в нерасщепленной цепи равная $0,02 \text{ A}$, устанавливается при посредстве нормального элемента на сопротивлении R_N . Рабочая сила тока в компенсирующей цепи может быть изменена перестановкой штепселей в устройстве, аналогичном устройству потенциометра Франке (см. главу I). При отсчете x_1 — на I декаде, x_2 — на II декаде и x_3 — на III декаде, имеем следующее компенсируемое напряжение u_x .

$$\begin{aligned} u_x &= I_{ab} \left\{ \frac{x_1}{10} + 0,05 + x_3 \cdot 0,005 - 0,005 (10 - x_2) - \frac{x_2}{10} \cdot 1 \right\} = \\ &= I_{ab} \left(\frac{x_1}{10} + 0,01 \cdot x_3 - \frac{x_2}{10} \cdot 1 \right) = 0,01 (x_1 + 0,01 x_3 - 0,1 x_2) = \\ &= 0,01 x_1 - 0,001 x_2 + 0,0001 x_3. \end{aligned}$$

Вследствие применения в этом потенциометре рычажной декады, вместо калиброванной проволоки, может оказаться невозможным до-

стигнуть полного уравнивания гальванометра, и окончательный результат измерения должен быть получен из комбинации отсчетов по движкам потенциометра и по отклонению гальванометра. Однако для того, чтобы иметь всегда одинаковой ценности (в вольтах) отсчет по гальванометру, этот последний должен быть замкнут на постоянное по величине сопротивление. При перемещении рычагов это сопротивление, по подсчету Гаусрата, изменяется в самом худшем случае (при сопротивлении цепи питающей батареи между щетками k и k' равно нулю, что практически невозможно) только на $10^{-1}\%$, что, влияя на величины четвертого и пятого знака, весьма мало повлияет на точность измерения всей величины $U_x (\pm 0,0001\%)$.

Вторая схема Диссельхорста

Как и в схеме Гаусрата, в первой схеме Диссельхорста применен принцип, положенный также в основу аппаратуры Линдек и Ротэ (см. главу I), изменения не величины компенсационного сопротивления, а силы компенсационного тока. Во второй схеме Диссельхорста [25] (рис. 37) изменяется величина компенсационного сопротивления,

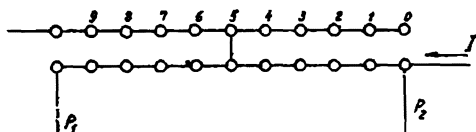


Рис. 37. Вторая схема Диссельхорста.

хотя зажимы, к которым присоединяется компенсируемая цепь, остаются неизменными. Двойной ряд одинаковых сопротивлений перекрывается подвижной щеткой и тогда, как видно из схемы, общее сопротивление цепи тока I остается неизменным. Компенсируемая цепь присоединяется к точкам P_1 и P_2 , и разность потенциалов u_x на контактах $P_1—P_2$ при положении щетки на каком-либо контакте $x—u_x = x \cdot r \cdot I$, где I —сила тока в элементе и r —сопротивление одной катушки. Могущая возникнуть в контактах термоэлектродвижущая сила приходится на цепь главного тока I и влияния на компенсационную цепь не окажет. При сопротивлении каждой катушки, равном 10Ω и при общем числе катушек, равном 10 —общее сопротивление в цепи рабочего тока остается неизменным и равным $10 \cdot r = 10 \cdot 10 = 100 \Omega$. В случае необходимости иметь цепь малого сопротивления, можно уменьшить сопротивление катушки до желаемой величины. При подгонке сопротивления каждой катушки должно быть обращено внимание, главным образом, на точную подгонку катушек ряда $P_1—P_2$, так как катушки второго ряда в компенсационную цепь не входят и служат только замещающими катушками в цепи большого сопротивления, почему неточность в их подгонке меньше повлияет на точность результата.

Потенциометр Диссельхорста (трехдекадный)

В этом потенциометре Диссельхорст применил также параллельное включение магазинов, как это сделал в своем потенциометре Гаусрат. Токи в обеих ветвях потенциометра между собой не равны, а имеют

постоянное соотношение: $I_1/I_2 = m$. Обозначив общий ток внешней цепи потенциометра через I , имеем:

$$I_1 = \frac{m}{m+1} \cdot I, \quad I_2 = \frac{1}{m+1} \cdot I$$

(обычно $m=10$). Этот принцип был впервые применен Диссельхорстом в видоизмененном потенциометре Гаусрата, но затем он предложил свой потенциометр, изображенный на рис. 38. При $m=10$, ток в декаде III равен 0,1 тока декады II. Средняя двойная декада состоит из 2×11 равных катушек, имеющих сопротивление по a_1 омов каждая и 12 контактов, из которых 11 имеют положительное обозначение от 0 до 10 и один — обозначение —1. Обе крайних также двойных декады, явля-

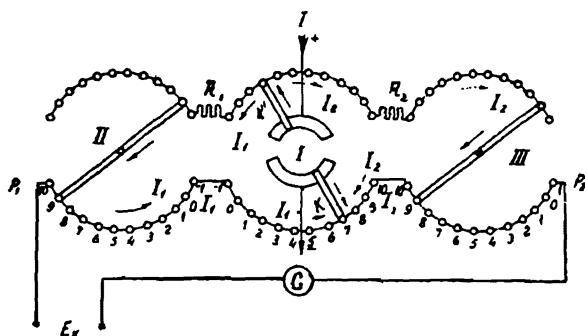


Рис. 38. Схема трехдекадного потенциометра Диссельхорста.

щихся собственно вторыми схемами Диссельхорста, имеют также по 11 катушек: —1; 0...10. Нумерации крайних декад идут справа налево, средней — слева направо. Обозначим сопротивление одной катушки декады II через a_2 , декады III — через a_3 . Ток I подводится к движкам средней декады и, как сказано, разветвляется

на токи I_1 и I_2 . Компенсирующее напряжение u_x между точками P_1 и P_2 равно алгебраической сумме напряжений между щеткой k и точкой P_1 и между щеткой k и точкой P_2 .

$$u_x = \{(x_2 + 1)a_2 + (x_1 + 1)a_1\} I_1 - \{(10 - x_1)a_1 + (10 - x_3)a_3\} I_2 = \\ = x_2 a_2 I_1 + x_1 a_1 (I_1 + I_2) + x_3 a_3 I_2 + a_2 I_1 + a_1 I_1 - 10 a_1 I_2 - 10 a_3 I_2.$$

Ввиду того, что $I_1 = 10 I_2$, имеем $a_1 I_1 - 10 a_1 I_2 = 0$. При $a_2 = a_3$ (как это будет видно далее), выражение $a_2 I_1 - 10 a_3 I_2$ также превращается в нуль и так как $I_1 + I_2 = I$, где I ток внешней цепи, то выражение для компенсирующего напряжения превращается в:

$$u_x = x_2 a_2 I_1 + x_1 a_1 I + x_3 a_3 I_2.$$

Это выражение должно быть равно

$$u_x = I \left(x_1 + \frac{x_2}{10} + \frac{x_3}{100} \right),$$

откуда, подставляя значения

$$I_1 = \frac{m}{m+1} I \text{ и } I_2 = \frac{1}{m+1} I$$

и приравнявая их почленно, получим:

$$x_1 \cdot a_1 \cdot I = x_1 \cdot I.$$

Отсюда $a_1 = 1,0 \Omega$. Точно так же:

$$x_2 \cdot a_2 \cdot I_1 = x_2 \cdot a_2 \cdot \frac{m}{m+1} \cdot I = \frac{x_2}{10} \cdot I$$

и

$$x_3 \cdot a_3 \cdot I_2 = x_3 \cdot a_3 \cdot \frac{1}{m+1} \cdot I = \frac{x_3}{100} \cdot I.$$

Из этих уравнений имеем:

$$a_2 = \frac{m+1}{10 \cdot m}; \quad a_3 = \frac{m+1}{100}$$

и, так как m принято равным 10, то $a_2 = a_3 = 0,11 \Omega$. Отрицательные катушки на декадах I и II необходимы для правильной установки нуля. При положении всех щеток на нулях, имеем:

$$u_x = (a_2 \cdot 1 + a_1 \cdot 1) I_1 - (a_1 \cdot 10 + a_3 \cdot 10) I_2 = 0.$$

Добавочные сопротивления в обеих параллельных ветвях потенциометра подобраны так, чтобы $I_1/I_2 = 10$ и чтобы общее сопротивление потенциометра было равно 90Ω . Тогда добавочное сопротивление левой ветви $R_1 = 86,79 \Omega$ и правой $R_2 = 977,79 \Omega$.

Для установки силы рабочего тока по нормальному элементу в этом потенциометре Диссельхорст применял дополнительное устройство, схема которого указана на рис. 39. Неизменяемое сопротивление между обеими рычажными декадами равно 10180Ω , а сопротивление декад — $12 \times 1 \Omega$ и $10 \times 0,1 \Omega$.

Питающая батарея присоединяется к зажимам Б; нормальный элемент через гальванометр присоединяется к рычагам декад. Сопротивление, замыкающее нормальный элемент, возможно изменять в пределах от 10180Ω до 10193Ω в зависимости от электродвижущей силы данного элемента при данной температуре.

Для округления сопротивления этой цепи до 10200Ω имеется добавочная катушка r , сопротивление которой равно 7Ω . При положении рычагов на сопротивлениях, соответствующих 10000-кратной электродвижущей силе нормального элемента, сила тока устанавливается равной $0,0001 \text{ A}$. Чтобы иметь возможность установить силу тока во внешней цепи больше этой величины, имеется ряд штепселей, замыкающих накоротко сопротивления r_1 , r_2 , и r_3 . Величина этих сопротивлений определяется так: $^1 r_1 = \frac{10200}{999} \Omega$ (общее сопротивление равно $10,2 \Omega$, $I = 0,1 \text{ A}$); $r_1 + r_2 = \frac{10200}{99} \Omega$ (общее сопротивление равно $102,0 \Omega$, $I = 0,01 \text{ A}$ и $r_2 = 92,820 \Omega$); $r_1 + r_2 + r_3 = \frac{10200}{9} \Omega$ (общее сопротивление равно 1020Ω , $I = 0,001 \text{ A}$, $r_3 = 1030,3 \Omega$).

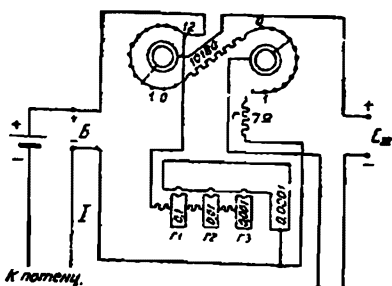


Рис. 39. Схема дополнительного устройства Диссельхорста.

¹ Вывод этих отношений см. в главе I, потенциометр Р. Франке [44].

Внешний вид этого прибора в изготовлении Вольфа показан на рис. 40, а на рис. 41 показана схема его присоединения к потенциометру Диссельхорста (внутренняя схема магазинов показана схематически).

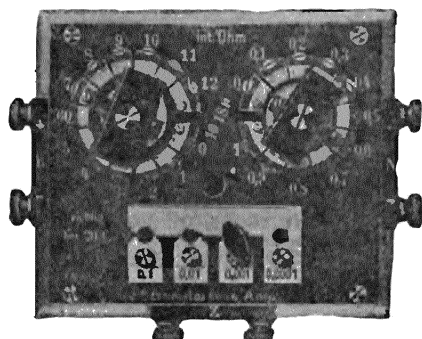


Рис. 40. Внешний вид дополнительного устройства Диссельхорста.

Присоединение в цепь гальванометра, нормального элемента или измеряемой электродвижущей силы производится переключателем, помещенным на потенциометре. В схеме

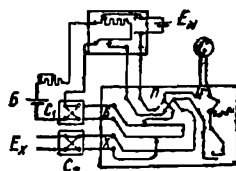


Рис. 41. Схема соединения потенциометра с дополнительным устройством Диссельхорста.

указаны переключатели c_1 и c_2 , позволяющие изменять направление тока в потенциометре и полярность измеряемого объекта.

Схема Уайта

Чтобы иметь возможность отсчитывать следующий десятичный знак свыше трех, получаемых на описанных выше потенциометрах Гаусрата и Диссельхорста, Уайт (Walter P White) [130] разработал особую схему, состоящую из неизменяемого сопротивления, параллельно которому включается рычажный магазин; величины сопротивлений катушек этого ма-

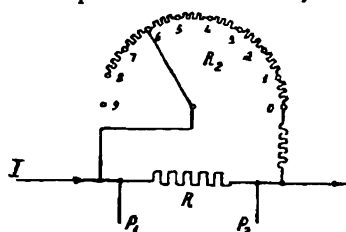


Рис. 42. Схема Уайта.

газина между собой не равны и подсчитываются особым образом. Эта схема изображена на рис. 42. Предположим, что неизменяемое сопротивление $R_1 = 1,0 \Omega$. Сопротивление обеих параллельных ветвей $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1 \cdot R_2}{1 + R_2}$, где R_2 сопротивление шунтирующего R_1 магазина при данном положении щетки; суммарное сопротивление при перемещении щетки изменяется и, если подобная

схема включена в цепь потенциометра, общее сопротивление цепи не остается постоянным, поэтому необходимо наличие второй аналогичной схемы, щетки которой связаны с первой. Перемещение щетки на декаде II должно добавлять сопротивление, компенсирующее уменьшение сопротивления, создаваемое первым. Подсчет сопротивлений шунтирующих и добавочных магазинов этой схемы производится в зависимости от всей конструкции потенциометра и приведен ниже (см. пятидекадный потенциометр Диссельхорста).

Пятидекадный потенциометр Диссельхорста

Этот потенциометр в основной своей конструкции аналогичен описанному выше трехдекадному потенциометру Диссельхорста. Для получения четвертого и пятого десятичных знаков отсчета в этом потенциометре имеются две двойные декады, выполненные по схеме Уайта. Аналогично трехдекадному потенциометру Диссельхорста и в этом потенциометре питающий ток в точках k_1 и k_1' разделяется на две неравные части (рис. 43); в левой части потенциометра проходит ток I_1 , равной $10/11$ всего питающего тока I , и в правой части — ток $I_2 = 1/11$ тока I ; декады IV и V механически связаны с соответствующими декадами IV' и V' , причем при перемещении рычагов общее сопротивление как в правой, так и в левой цепи остается неизменным. Декады I , II и III аналогичны таким же декадам в трехдекадном потенциометре Диссельхорста, поэтому полный питающий ток и параллельные токи I_1 и I_2 остаются

при всех перемещениях рычагов неизменными. Каждая катушка двоякой средней декады I (I') имеет сопротивление 1Ω , катушки декад II и III — сопротивление $0,11 \Omega$; декада IV шунтирует одноименную катушку ($-1,0$ первой декады) своим переменным сопротивлением. Величина этого сопротивления может быть вычислена на основании следующих соображений: по схеме (рис. 43) видно, что при положении рычага декады IV на контакте 10 — сопротивление шунтирующей цепи равно бесконечности, и общее сопротивление обеих параллельных цепей $R = 1 \Omega$. С другой стороны, одно деление на декаде III соответствует разности потенциалов $I_2 \cdot 0,11 = I \cdot 0,01 \text{ В}$. Для получения на декаде IV отсчета следующего знака, перемещение рычага этой декады на один контакт должно соответствовать изменению разности потенциалов на $0,0011 \cdot I_2 = 0,001 \text{ В}$. При рычаге декады IV на контакте 10

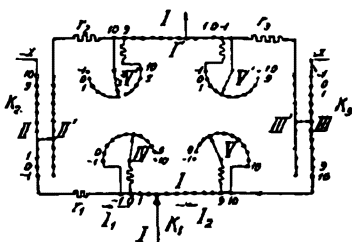


Рис. 43. Схема пятидекадного потенциометра Диссельхорста.

сопротивление шунтирующей цепи равно бесконечности, и общее сопротивление обеих параллельных цепей $R = 1 \Omega$. С другой стороны, одно деление на декаде III соответствует разности потенциалов $I_2 \cdot 0,11 = I \cdot 0,01 \text{ В}$. Для получения на декаде IV отсчета следующего знака, перемещение рычага этой декады на один контакт должно соответствовать изменению разности потенциалов на $0,0011 \cdot I_2 = 0,001 \text{ В}$. При рычаге декады IV на контакте 10

$$\frac{R(x_{10})}{1 + R(x_{10})} = R_{IV''} + 0,0011 \cdot 10 = 1,$$

откуда число $R_{IV''} = 1 - 0,011 = 0,989$, и выражение принимает вид

$$\frac{R(x_k)}{1 + R(x_k)} = 0,989 + 0,0011 \cdot x_k,$$

где $R(x_k)$ — все шунтирующее сопротивление при рычаге магавина на контакте x_k (x_k — числовое обозначение контакта). Подставляя все значения x_k от -1 до 10 , получаем величину неизменяемого сопротивления $R(x_1) = 81,64 \Omega$ и все значения сопротивлений IV декады:

Сопротивления		Сопротивление	
между	омы	между	омы
—1 и 0	8,264	5 и 6	45,41
0 и 1	10,101	6 и 7	75,80
1 и 2	12,626	7 и 8	151,51
2 и 3	16,234	8 и 9	454,54
3 и 4	21,645	9 и 10	∞
4 и 5	30,300		

Для получения на декаде V следующего знака отсчета, перемещение рычага на один контакт должно соответствовать изменению разности потенциалов на $0,0011 I_2 = 0,0001 I$. Величина сопротивлений декады V подсчитана так же, как для декады IV , только, как это видно из схемы, обозначения контактов иные, чем в декаде IV и величина постоянного члена формулы определяется иначе:

$$\frac{R_{(xk)}}{1 + R_{(xk)}} = R_V'' - 0,0011 \cdot x_k.$$

Это выражение равно единице при $x_k = -1$ (цепь шунтирующего сопротивления разомкнута), т. е.

$$\frac{R_{(xk)}}{1 + R_{(xk)}} = R_V'' - 0,0011 (-1) = R_V'' + 0,0011 = 1,$$

откуда $R_V'' = 1 - 0,0011 = 0,9989 \Omega$.

Величина добавочного неизменного сопротивления равна, как и ранее, $81,64 \Omega$; катушка с наименьшим сопротивлением $8,264 \Omega$ расположена между 9 и 10 контактами; катушка, имеющая сопротивление $10,101 \Omega$, — между 8 и 9 контактами и т. д. Замещающие декады аналогичны основным: IV — аналогична V' и V аналогична IV' . Таким образом мы имеем выражения для сопротивления соответствующих декад:

$$\begin{aligned} R_{IV} &= 0,9890 + 0,0011 \cdot x_{IV} \\ R_{IV'} &= 0,9989 - 0,0011 \cdot x_{IV} \\ R_V &= 0,9989 - 0,0011 \cdot x_V \\ R_{V'} &= 0,9890 + 0,0011 \cdot x_V. \end{aligned}$$

Величина добавочных сопротивлений $r_1 + r_2$ и r_3 вычисляется из условия, что сопротивление правой части потенциометра должно быть в 10 раз больше сопротивления левой его части и в этом потенциометре равно: $r_1 + r_2 = 86,800 \Omega$ и $r_3 = 977,80$.

Величина напряжения, компенсирующего измеряемую электродвижущую силу, равна разности напряжений на правой и левой частях потенциометра.

Величина добавочного сопротивления r_1 определяется из условия необходимости равенства обоих напряжений как правой, так и левой части при положении всех движков на нуле, так как при этом величина компенсирующей электродвижущей силы должна быть равна нулю. В этом случае

$$\begin{aligned} I_1 \{x_1 \cdot 1 + 0,9890 + 0,0011 x_{IV} + r_1 + 0,11 (x_{II} + 1)\} - \\ - I_2 \{(10 - x_1) 1 + 0,9989 - 0,0011 \cdot x_V + 0,11 (10 - x_{III})\} = 0, \end{aligned}$$

откуда, подставляя значения $x_I, x_{II}, x_{III}, x_{IV}$ и x_V , равные нулю, и значения $I_1 = \frac{10}{11} \cdot I$ и $I_2 = \frac{1}{11} \cdot I$, получаем:

$$\frac{I}{11}(9,890 + 10r_1 + 1,1) = (10 + 0,9989 + 1,1) \frac{I}{11}.$$

Следовательно сопротивление $r_1 = 0,01089 \Omega$. Точная подгонка величины этого сопротивления производится при установке всех движков на нулях так, чтобы разность потенциалов между точками $+x$ и $-x$ была равна нулю, чем учитываются все небольшие неточности подгонки остальных сопротивлений. Точно так же подгонка сопротивлений r_2 и r_3 производится в готовом приборе установкой токов I_1 и I_2 .

При любом значении x , выражение для компенсирующего напряжения принимает вид:

$$u_x = \frac{I}{11} \cdot (x_I \cdot 11 + x_{II} \cdot 1,1 + x_{III} \cdot 0,11 + x_{IV} \cdot 0,011 + x_V \cdot 0,0011) = \\ = I \{x_I + 0,1 \cdot x_{II} + 0,01 \cdot x_{III} + 0,001 \cdot x_{IV} + 0,0001 \cdot x_V\}.$$

Таким образом и в этом потенциометре разность потенциалов из точек $+x$ и $-x$ измеряется суммой отсчетов по всем пяти рычажным декадам.

Сила рабочего тока в этом потенциометре устанавливается, как и в трехдекадном, при посредстве вспомогательного описанного выше магазина сопротивлений (см. рис. 39).

Общая схема присоединения этого дополнительного магазина, гальванометра и питающей батареи показана на рис. 41, на котором дана упрощенная схема потенциометра. Для исключения влияния могущих возникнуть вредных термоэлектродвижущих сил схема обычно составляется с переключателями, позволяющими производить отсчет два раза, изменяя направление тока в потенциометре и полярность измеряемой электродвижущей силы. Сопротивление левой параллельной цепи этого потенциометра между точками k_1 и k_2 , как и в трехдекадном, $R_c = 99 \Omega$, сопротивление правой его цепи $R_D = 990 \Omega$ и общее сопротивление в цепи рабочего тока

$$R = \frac{R_c R_D}{R_c + R_D} = \frac{99 \cdot 990}{99 + 990} = 90 \Omega.$$

При производстве большого числа измерений, в особенности в случае колеблющейся величины компенсируемой электродвижущей силы, что может иметь место при непостоянной температуре горячего спая термпары, отсчет последних десятичных знаков измеряемой величины может производиться по отклонению подвижной части гальванометра. Чтобы разность потенциалов, соответствующая одному делению шкалы гальванометра, была неизменна при всех положениях движков, сопротивление цепи гальванометра должно быть постоянным при любой величине измеряемой электродвижущей силы.

Цепь потенциометра между точками $+x$ и $-x$, на которую замкнут гальванометр, состоит из двух параллельных ветвей, присоединенных к рычагам декад II и III и последовательно соединенных со свободными (без тока) сопротивлениями этих же декад — между точками $-x$ — k_2

и $+x - k_8$ (рис. 43). Обозначив через R' и R'' величины обоих параллельных сопротивлений (R' — верхнее и R'' — нижнее), получим сопротивление цепи гальванометра при разомкнутой цепи питающей батареи:

$$R_x = (10 - x_{II}) 0,11 + \frac{R' \cdot R''}{R' + R''} + (x_{III} + 1) 0,11.$$

Подставляя значения R' и R'' , выраженные через x_I , x_{II} и т. д., имеем:

$$R_x = 14,35 - 0,0027 (x_{II} - x_{III}) + 0,0011 (x_{IV} - x_V) \Omega.$$

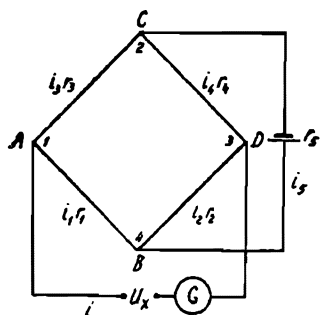


Рис. 44. Упрощенная схема потенциометра с параллельными ветвями.

Как было указано, при выводе этого выражения, цепь питающей батареи считалась разомкнутой. В действительности сопротивление внешней цепи равно не бесконечности, а конечной величине, которую обозначим через r_5 .

Возьмем схему потенциометра в упрощенном виде (рис. 44) моста Уитстона. Как известно, сопротивление цепи гальванометра между точками $A-D$ при r_5 , равном бесконечности, равно $-\frac{(r_1 + r_2) \cdot (r_3 + r_4)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}$, где значения r_1 , r_2 , r_3 и r_4 ясны из чертежа. При r_5 , не равном бесконечности, величина сопротивления между точками $1-3$ изменится на величину:

$$\Delta R_x' = -\frac{1}{r_5 + \frac{(r_1 + r_2) \cdot (r_3 + r_4)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}} \cdot \left(\frac{r_1 \cdot r_4 + r_2 \cdot r_3}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} \right)^2.$$

Заменяя в этом выражении обозначения r_1 , r_2 , r_3 и r_4 соответствующими значениями декад и сопротивлений и подставляя постоянное сопротивление цепи батареи

$$R = \frac{(r_1 + r_2) (r_3 + r_4)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4},$$

имеем:

$$\Delta R_x' = -\frac{1}{R + r_5} \left(x_I + \frac{x_{II}}{10} + \frac{x_{III}}{100} + \frac{x_{IV}}{1000} + \frac{x_V}{10000} \right)^2.$$

Подставляя эту величину в уравнение для R_x , получаем $R_x = 14,35 - 0,0027 (x_{II} - x_{III}) + 0,0011 (x_{IV} - x_V) + \Delta R_x'$. Оба средних члена в наиболее невыгодном случае не превышают в сумме $0,04 \Omega$. Значение $\Delta R_x'$ тем меньше, чем больше величина $(R + r_5)$. Ввиду того, что величина R всегда равна 90Ω , а часть $\Delta R_x'$, зависящая от x_{II} , в худшем случае (при $x_{II} = 10$) меньше $\frac{1}{90} \Omega \left(\frac{1}{R + r_5} \left(\frac{x_{II}}{10} \right)^2 = \frac{1}{90 + r_5} \cdot 1 \right)$ и остальные члены с x_{III} , x_{IV} и x_V соответственно в 10^3 , 100^3 и 1000^2 раз меньше, необходимо принимать во внимание лишь член уравнения, содержащий x_I , и выражение для R_x принимает упрощенный вид:

$$R_x = 14,35 - \frac{x_I^2}{R + r_5}.$$

При рабочем токе потенциометра, равном 0,001 А, и при питании от одного аккумулятора величина $(R + r_6)$ равна 2000 Ω . Величина поправки в этом случае $\frac{x_1^2}{(R + r_6)} = \frac{x_1^2}{2000} \Omega$ и в наиболее невыгодном случае — при $x_1 = 10$ — не превышает $1/20 \Omega$, и может не приниматься во внимание. При питании цепи потенциометра током 0,01 А, величина $(R + r_6)$ равна только 200 Ω . В этом случае выражение $\frac{x_1^2}{R + r_6}$ может оказаться равным $1/2 \Omega$, что при суммарном сопротивлении цепи гальванометра, равном 50 Ω , вызовет изменение сопротивления на 1,0%. Чтобы избежать этого, можно питать потенциометр не от одного аккумулятора, а от батареи аккумуляторов, вводя в цепь соответственно большее добавочное сопротивление.

Величина термоэлектродвижущей силы, возникающей при перемещении любых контактов, по указаниям конструктора, не превышает $10^{-6} \Omega$. Электродвижущие силы, возникающие при перемещении контактов k_1 и k_2 , прибавляются (или вычитаются) к электродвижущей силе питающей батареи (2 В) и могут не приниматься во внимание. При перемещении щеток декад II и III возникает термоэлектродвижущая сила, которая может изменить токи параллельных ветвей потенциометра I_1 , и I_2 и, следовательно, внести добавочную погрешность измерения. Обозначив величину этой паразитной термоэлектродвижущей силы ϵ , получим для изменения тока в обеих параллельных ветвях выражение:

$$\Delta I_1 = \Delta I_2 = \frac{\epsilon}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}$$

(значения r_1 , r_2 , r_3 и r_4 см. рис. 44); величина погрешности измерения электродвижущей силы

$$\Delta e = \pm \frac{\epsilon \cdot (r_1 + r_2)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}.$$

Подставляя наибольшие значения $(r_1 + r_2) = 14,42 \Omega$ и $r_1 + r_2 + r_3 + r_4 = 1089 \Omega$, имеем:

$$\Delta e = \frac{\epsilon (r_1 + r_2)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} = \frac{14,42}{1089} \epsilon,$$

что составит только 1,3% от величины ϵ .

Такими же точно рассуждениями можно установить, что погрешность, вносимая паразитными термоэлектродвижущими силами, возникающими при перемещении рычаговмагазинов IV и V, не превышает 1,2% от величины ϵ .

Таким образом возможно считать потенциометр Диссельхорста свободным от термоэлектродвижущих сил, возникающих при перемещении щеток.

Потенциометр малого сопротивления с постоянной чувствительностью гальванометра

Во всех описанных выше потенциометрах сопротивление цепи гальванометра и, следовательно, его чувствительность при перемещении рычаговмагазинов не остаются постоянными. Уайт [130] рассмотрел выражение для сопротивления цепи-гальванометра и вывел формулу

зависимости этого сопротивления от положения рычагов. Сопротивление цепи гальванометра между точками $+x$ и $-x$ может быть выведено элементарным подсчетом на основании обоих законов Кирхгофа. Рассмотрим показанную на рис. 44 упрощенную схему соединений потенциометра. Обозначив ток гальванометра через i и токи в ветвях (1—4), (4—3); (1—2); (2—3) и 5 через i_1, i_2, i_3, i_4 и i_5 , имеем по первому закону Кирхгофа: для узла $B: i_2 = i_1 + i_5$; для узла $A: i = i_1 + i_3$ и для узла $D: i = i_2 + i_4$. Далее, обозначив сопротивление в тех же ветвях через r_1, r_2, r_3, r_4 и r_5 , имеем по второму закону Кирхгофа: для контура $ABC: i_3 r_3 + i_5 r_5 - i_1 r_1 = 0$ и для контура $CBD: i_4 r_4 - i_2 r_2 - i_5 r_5 = 0$. Исключая из этих последних уравнений i_2, i_3 и i_4 , имеем:

$$(i - i_1) r_3 - i_1 r_1 = -i_5 r_5; \text{ откуда } i r_3 - i_1 (r_1 + r_3) = -i_5 r_5 \quad (1)$$

$$(i - i_1 - i_5) r_4 - (i_5 + i_1) r_2 = i_5 r_5, \text{ откуда } i r_4 - i_1 (r_2 + r_4) = i_5 (r_5 + r_2 + r_4). \quad (2)$$

Умножая первое уравнение на $(r_2 + r_4)$ и второе на $(r_1 + r_3)$, получаем из первого уравнения:

$$i r_3 (r_2 + r_4) - i_1 (r_1 + r_3) (r_2 + r_4) = -i_5 r_5 (r_2 + r_4),$$

и из второго уравнения:

$$i r_4 (r_1 + r_3) - i_1 (r_2 + r_4) (r_1 + r_3) = i_5 (r_5 + r_2 + r_4) (r_1 + r_3).$$

Вычитая одно уравнение из другого, получаем:

$$i [r_4 (r_1 + r_3) - r_3 (r_2 + r_4)] = i_5 [(r_5 + r_2 + r_4) (r_1 + r_3) + r_5 (r_2 + r_4)],$$

откуда

$$i_5 = i \frac{r_1 r_4 - r_2 r_3}{r_5 (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + (r_2 + r_4) (r_1 + r_3)}. \quad (3)$$

Имея зависимость между током в цепи гальванометра и током в ветви батарей, можно вычислить все сопротивление между точками A и D . Это сопротивление является частным от деления разности потенциалов на этих точках ($u_A - u_D$) и тока i в цепи гальванометра. Обозначив это сопротивление через R' , имеем

$$R' = \frac{u_A - u_D}{i},$$

но $u_A - u_D = i_1 r_1 + i_2 r_2$, откуда, подставляя $i_2 = i_1 + i_5$, имеем:

$$u_A - u_D = i_1 (r_1 + r_2) + i_5 r_2.$$

Подставляя значение i_1 из уравнения (1) и значение i_5 из уравнения (3) и производя необходимые сокращения и преобразования, получаем:

$$R' = \frac{u_A - u_D}{i} = \frac{r_5 (r_1 + r_2) (r_3 + r_4) + r_1 r_2 (r_3 + r_4) + r_3 r_4 (r_1 + r_2)}{r_5 (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + (r_1 + r_3) (r_2 + r_4)}$$

Это выражение может быть преобразовано в другое, более простое выражение, если обозначить: $(r_2 + r_4) = (r_1 + r_3)$ через R'' ; эта величина не изменяется при всех положениях движков. Для простоты обозначим

¹ При расчете величины суммарных сопротивлений нет необходимости вводить в уравнение электродвижущую силу батарей.

величину компенсирующего сопротивления $(r_1 + r_2)$ через R_k . Тогда выражение (4) примет вид:

$$R' = \frac{R''r_1(R'' - r_1) + R'' \cdot r_2(R'' - r_2) + R_k(2R'' - R_k) \cdot r_5}{R''^2 + 2 \cdot R'' \cdot r_5}. \quad (5)$$

По этой формуле Уайт подсчитывает величину добавочных сопротивлений, служащих для поддержания постоянной величины сопротивления цепи гальванометра. Схема потенциометра Уайта изображена на рис. 45. На этой схеме добавочные сопротивления обозначены через ρ_1 и ρ_2 . В отличие от потенциометра Диссельхорста в этом потенциометре токи в обеих параллельных ветвях равны. Сопротивления катушек декады II равны 0,1 сопротивлений катушек декады I. В основном этот потенциометр аналогичен потенциометру Гаусрата. По движкам можно отсчитать только три знака. Отсчет большего числа знаков производится по гальванометру, причем точность отсчета может быть доведена до 0,1 μ V.

Этот же потенциометр Уайт разработал также и с декадами IV и V, однако, конструкция этого последнего потенциометра сложнее конструкции потенциометра Диссельхорста и большого распространения не получила.

Современная конструкция потенциометра Уайта

Во всех описанных выше потенциометрах, предназначенных для измерений электродвижущих сил термопар, компенсируемая разность потенциалов отбиралась от двух включенных параллельно в цепь питающей батареи половин потенциометра. Для получения достаточного постоянства рабочего тока сопротивление цепи батареи должно быть достаточно велико. С другой стороны, для получения большой чувствительности гальванометра желательно иметь малую величину компенсирующего сопротивления. Эти требования трудно выполнимы для потенциометров ввиду того, что обе ветви в цепи батареи присоединены параллельно, а в цепи гальванометра последовательно. Чтобы избежать этих недостатков, Уайт [132] разработал потенциометр, основанный на совершенно ином, до него не применявшемся, принципе.

В новом потенциометре имеются две совершенно независимо питаемые цепи, как бы два отдельных потенциометра. На рис. 46 показана принципиальная схема соединений этого двоянного потенциометра. Каждая половина этого потенциометра имеет два магазина, особые регулировочные реостаты и сопротивление для установки рабочего тока по нормальному элементу. Сопротивление, к которому присоединяется нормальный элемент, в потенциометре на более высокие разности потенциалов в десять раз меньше, чем аналогичное сопротивление в потенциометре на меньшие разности потенциалов и, таким образом сила тока в цепи второго потенциометра составляет 0,1 тока в первом.

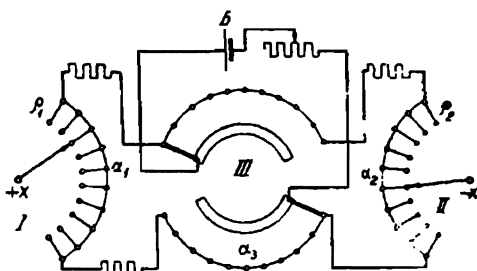


Рис. 45. Схема первого потенциометра Уайта.

Как видно из рис. 46, конструкция потенциометра на малые потенциалы такова, что контакты рычагов декад *III* и *IV* введены в цепь питающей батареи, а не компенсируемой электродвижущей силы, благодаря чему могущие возникнуть при перемещении рычагов вредные термоэлектродвижущие силы не окажут влияния на величину отсчета. Чтобы при перемещении рычагов декад *III* и *IV* не изменялась сила рабочего тока, между контактом и соответственной катушкой магазина введены добавочные сопротивления, замещающие сопротивление выключенной его части. С другой стороны, ввиду того, что в этом потенциометре имеется четыре ступени, при которых невозможно достигнуть полного равновесия подвижной системы гальванометра, левый потенциометр *AB* имеет ряд добавочных сопротивлений, аналогичных сопротивлениям в потенциометре Уайта первого типа, благодаря чему общее сопротивление цепи гальванометра остается постоянным. Поэтому

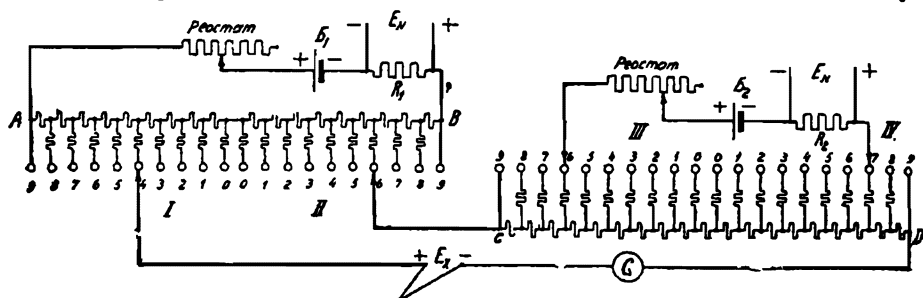


Рис. 46. Принципиальная схема потенциометра Уайта с двойным питанием.

отсчет последних знаков можно производить по отклонению подвижной системы гальванометра. Потенциометры по описанной выше схеме изготавливает фирма Лидс и Нортруп (Leeds u. Northrup Co) на два предела измерений: 0,1 V и 0,01 V.

В практической схеме имеется целый ряд добавлений. Предусмотрена возможность установки тока потенциометра по нормальному элементу, учитывая величину его электродвижущей силы в пределах от 1,0179 до 1,0194 V, для чего, кроме постоянных сопротивлений имеются добавочные изменяемые сопротивления. Для повышения точности измерения малых электродвижущих сил термопар в этом потенциометре предусмотрена возможность определения могущих возникнуть паразитных электродвижущих сил, величина которых может быть введена в виде поправки в дальнейшие измерения. Для этой цели имеются специальные переключатели, позволяющие отсоединить от потенциометра как питающие батареи, так и измеряемую термопару: при этом для сохранения постоянной чувствительности гальванометра вводится вместо термопары равное ей сопротивление. В цепь потенциометра включается гальванометр и по его отклонению определяется величина паразитной электродвижущей силы. Реостаты для регулировки тока обеих половин потенциометра встроены в прибор; общий переключатель контроллерного типа позволяет быстро произвести пересоединение на любое из четырех положений: 1) „проба“ (определение паразитных электродвижущих сил); 2) установка рабочего тока потенциометра высших потенциалов А; 3) уста-

новка рабочего тока потенциометра низших потенциалов B (по нормальному элементу) и 4) E_x — измерение электродвижущей силы термопары. Для предохранения гальванометра в прибор встроен переключатель, имеющий четыре положения: O — цепь гальванометра разом-

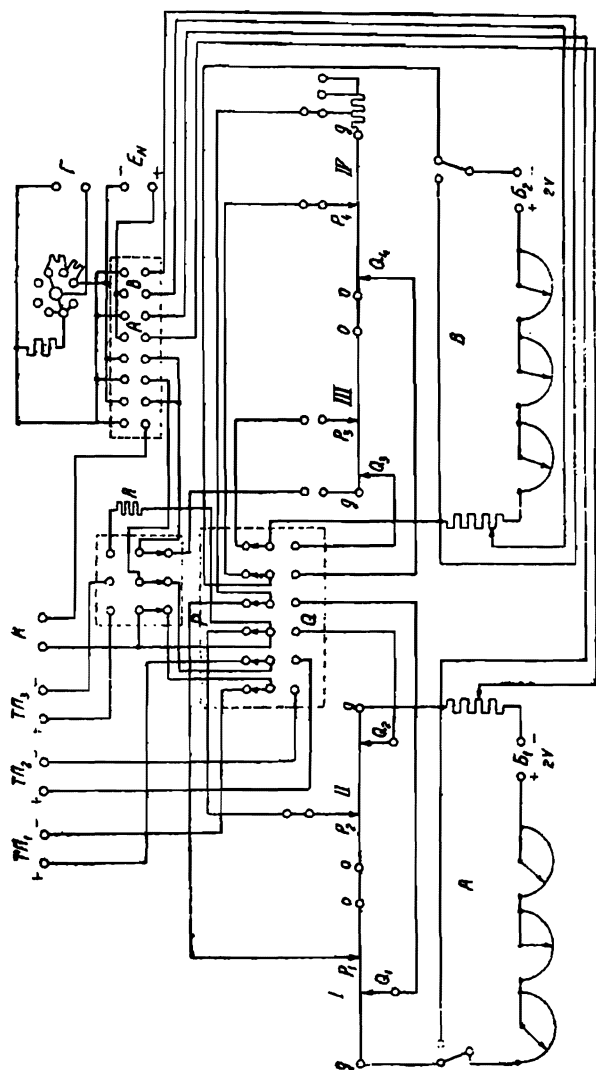


Рис. 47. Схема двойного потенциометра фирмы Лидс и Нортруп по схеме Уайта.

кнуто; R — большое сопротивление включено последовательно с гальванометром, а успокаивающее сопротивление включено параллельно; O, I — гальванометр включен последовательно с таким сопротивлением, что его чувствительность составляет — $0,1$ от его максимальной чувствительности, и — I — гальванометр включен непосредственно в цепь.

Питание этого потенциометра производится от двух аккумуляторов. По указанию изготовляющей потенциометры фирмы для двух видов потенциометров применяются следующие гальванометры той же фирмы: для потенциометров на $100000 \mu V$ применяется гальванометр чувствительностью $0,5 \text{ мм}$ на $1 \mu V$ (критическое сопротивление 300Ω), а для потенциометров на $10000 \mu V$ — гальванометр, чувствительностью 5 мм на $1 \mu V$. При этих гальванометрах гарантирована точность отсчета пятого знака после запятой ($10 \mu V$) в первом потенциометре и шестого знака ($1 \mu V$) во втором.

Ввиду того, что весьма часто приходится производить измерения нескольких температур одновременно, фирма Лидс и Нортруп дает конструкцию потенциометра Уайта, позволяющую производить поочередные измерения электродвижущих сил двух термопар, причем переключение с одной термопары на другую производится очень быстро, без перестановки рычагов магазинов. Для этого число рычагов удвоено.

Схема рис. 47 поясняет вышесказанное. В этом потенциометре, кроме зажимов для двух термопар $ТП_1$ и $ТП_2$, электродвижущие силы которых измеряются на рычагах P или Q , имеются еще зажимы для дифференциальной термопары $ТП_3$, которая специальным переключателем присоединяется через добавочное сопротивление непосредственно к зажимам гальванометра. Отсчет в этом случае производится прямо по отклонениям гальванометра. Кроме этих зажимов, на крышке прибора имеется ряд зажимов, предназначенных специально для выверки сопротивлений отдельных частей потенциометра.

Этот потенциометр, хотя и несколько более громоздок, чем одиночный потенциометр Уайта той же фирмы Лидс и Нортруп, но в некоторых случаях весьма удобен и получил большое распространение в США. Применяя соответственные гальванометры (как указано в описании предыдущего потенциометра), можно получить точность измерения до $10 \mu V$ в модели на $100000 \mu V$ и до $1 \mu V$ в модели до $10000 \mu V$.

Декада Франка Уеннера

Франк Уеннер (Dr. Frank Wenner) [127] разработал устройство, в котором контакты так расположены в цепи тока, что могущие возникнуть термоэлектродвижущие силы и изменения сопротивления контактов весьма мало влияют на результат измерения. Схема этой декады, предназначенной Уеннером для магазинов, служащих для измерения малых долей вольта в потенциометрах, для измерения малых электродвижущих сил, состоит из большого сопротивления R (рис. 48), шунтирующего часть каждой из двух последовательно включенных одинаковых декад I и I' ; компенсируемая разность потенциалов присоединяется через гальванометр в точке M — между обеими декадами и в точке N — вне декад. При перемещении шунтирующего сопротивления R общее сопротивление цепи потенциометра не изменяется, так как сопротивление обоих магазинов одинаково, и при неизменной силе рабочего тока I равенность потенциалов между точками M и N будет изменяться.

Обозначим через r сопротивление одной катушки каждой декады, число катушек каждой декады — через n , силу тока в цепи потенциометра вне шунта через I и токи в шунте и в средней части через i и i' .

Сопротивление параллельных ветвей R и nr равно $R' = \frac{R \cdot nr}{R + nr}$ и напряжение на контактах 1 и 2 — $U_x = \frac{R \cdot nr}{R + nr} I$. Тогда ток в средней части $I' = \frac{R}{R + nr} \cdot I$ и ток в шунте $i = \frac{nr}{R + nr} \cdot I$.

При положении рычага 1 на крайнем правом контакте левой декады разность потенциалов между точками M и N равна $u_1 = Inr$, при крайнем же левом положении рычагов магазинов разность потенциалов между M и N равна $u_2 = I'nr$.

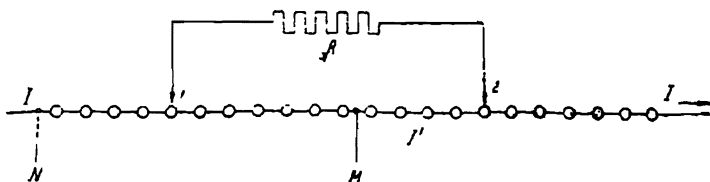


Рис. 48. Декада Франка Уеннера.

Разность между u_1 и u_2 равна $n\Delta u$ или

$$u_1 - u_2 = n\Delta u = Inr \left(1 - \frac{R}{R + nr} \right) = I \frac{nr}{R + nr} \cdot nr = inr,$$

откуда разность потенциалов при перемещении рычагов на один контакт

$$\Delta u = I \frac{nr}{R + nr} r = ir,$$

т. е. равна току в шунте, умноженному на сопротивление одной катушки. При положении рычагов на k -том контакте магазина разность потенциалов между точками M и N равна:

$$\begin{aligned} u &= Ikr + I'(n - k)r = Ikr + \frac{Rr}{R + nr} \cdot I \cdot (n - k) = \\ &= I \frac{Rnr}{R + nr} + I \frac{nr}{R + nr} \cdot kr = I'nr + ikr = u_2 + ikr. \end{aligned}$$

Подбирая соответственным образом сопротивление катушек r и сопротивление шунта R , можно изменять величину компенсирующей разности потенциалов на 1, 10 и т. д. микровольт.

Потенциометр по Уеннеру

В лабораториях фирмы Лидс и Нортруп был разработан потенциометр с применением Уеннеровских декад для отсчета малых долей вольта [6]. Эта конструкция потенциометра выполнялась на два предела измерений: 1) на 1,9111 V с пересоединением на 0,19111 V и 2) на 0,11111 V с пересоединением на 0,011111 V. Сопротивление цепи гальванометра потенциометра на 1,9111 V постоянно и равно 174 Ω , но в случае необходимости общее сопротивление потенциометра может быть уменьшено до 40 Ω , что достигается выключением декады на боль-

Рис. 49. Принципиальная схема потенциометра по Уеннеру.

по нормальным элементам, имеющим электродвижущую силу от 1,01800 до 1,01960 В через каждые 10 $\mu\text{В}$. Как видно из схемы, главную часть сопротивления, служащего для присоединения нормального элемента, составляет часть декады I и декады A , шунтирующей одиннадцатую катушку декады I . Особым переключателем можно после установки рабочего тока потенциометра по нормальному элементу уменьшить его в десять раз. Нормальный ток питающей батареи — 0,022 А. При положении переключателя на $X1$ ток 0,002 А проходит через сопротивление $(r + 9r)$ и 0,02 А идет к точкам P и Q (на рисунке не показаны) потенциометра. Сопротивления обеих параллельных половин потенциометра — вправо и влево от $P - Q$ — между собой равны (каждое по 500 Ω). В правой половине потенциометра ток ответвляется в три шунтирующих сопротивления (по Уеннеру). Сопротивления нижних измерительных и верхних компенсирующих декад между собой равны, почему перемещение связанных механически рычагов не изменяет общего сопротивления потенциометра. Сопротивления подобраны так, что при положении всех рычагов на нуле разности потенциалов между точками $E+$ и Q и $E-$ и Q между собой равны и противоположны по знаку. Разность потенциалов между $E+$ и $E-$ равна, в этом случае, нулю.

Декада *I* состоит из 18 катушек сопротивлением 10 Ω каждая и декада *II* — из 10 катушек по 2 Ω каждая. При токе в декаде *I*, равном 0,01 А, падение напряжения на одну ступень в ней равно $0,01 \cdot 10 = 0,1$ В. Шунтирующие сопротивления декад *III*, *IV* и *V* подобраны так, что в декаде *II* проходит ток, равный 0,005 А и падение напряжения в ней на одну ступень равно $0,005 \cdot 2 = 0,01$ В. Как было указано (см. описание декады Уеннера), падение напряжения на одну ступень декад *III*, *IV* и *V* равно

сопротивлению этой ступени, умноженному на силу тока в соответствующем шунте.

Сопротивление шунтов: $III—1000 \Omega$; $IV—978 \Omega$ и $V—1952 \Omega$. Соответственно декада III состоит из 10 катушек по $0,5 \Omega$, декада IV — из 10 катушек по $0,05 \Omega$ и декада V — из 10 катушек по $0,01 \Omega$. Разности потенциалов, отсчитываемые на них, равны $0,001$, $0,0001$ и $0,00001$ В. Изменение пределов измерений на $0,19111$ В производится упомянутым выше переключателем: при положении его на $\times 0,1$ ток $0,02$ А проходит по сопротивлению r , а ток $0,002$ А — по сопротивлению $9r$ и потенциометр.

При любом положении переключателя общий ток питающей батареи остается неизменным. Установка рабочего тока (по нормальному элементу) производится только при положении переключателя на XI . Для получения постоянной величины сопротивления цепи гальванометра контакты декад I и II соединены с несущими рабочий ток катушками через сопротивления, величина которых соответственным образом подобрана.

Для точной подгонки положения нуля в описываемом потенциометре имеются два одинаковых сопротивления R_3 и R_3' , механически связанные между собой так, что при увеличении одного, второе на ту же величину уменьшается. Благодаря этому, при подгонке нуля сопротивлением R_3 , общее сопротивление левой параллельной ветви потенциометра остается без изменения. Реостат, включенный в ту же часть правой параллельной ветви потенциометра, в которой проходит суммарный ток, служит для окончательной подгонки отношения токов в обеих ветвях.

Этот потенциометр предназначен как для точных измерений величин порядка 1 В, так и для измерения малых величин; в последнем случае отсчет последних знаков может производиться по отклонению подвижной части гальванометра. При измерении малых разностей потенциалов переключатель k переставляется в положение $\times 0,1$ (см. рис. 49). Тогда ток $0,02$ А проходит через сопротивление, а $0,002$ А через сопротивление r и потенциометр. При обоих положениях переключателя k общее сопротивление цепи батареи остается неизменным.

Аналогичный описанному потенциометру прибор на $0,11111$ В предназначен исключительно для измерений электродвижущих сил термопар. Этот прибор также изготавливается фирмой Лидс и Нортруп.

Лабораторный потенциометр фирмы „Кэмбридж-Инструмент К⁰“ для измерения электродвижущих сил термопар

Все описанные потенциометры позволяют производить измерения электродвижущих сил в непрерывном интервале от 0 до верхнего предела.

Изготавливаемый фирмой „Кэмбридж-Инструмент К⁰“ [18] потенциометр имеет упрощенную конструкцию и позволяет производить измерения в пределах от 0 до $30\ mV$, от 30 до $60\ mV$ и от 60 до $90\ mV$. Изменение пределов измерения производится перестановкой штепселей в гнездах, имеющих соответствующие обозначения (рис. 50).

Цепь потенциометра состоит из реостатов R_1 и R_2 , регулирующих ток питающей батареи, неизменяемых сопротивлений R' и R'' , калибро-

ванной проволоки $a-b$, рычажной декады mV , второй калиброванной проволоки $c-d$ и ряда сопротивлений R_s и R_s' , включаемых штепселями. Калиброванная проволока $a-b$ градуирована так, что отсчет по движку равен разности потенциалов между точками N и M , причем падение напряжения 1 V приходится на $100\ \Omega$. Установка рабочего тока потенциометра производится по нормальному элементу, присоединяемому через гальванометр к зажиму M и к движку на проволочном магазине N , причем движок устанавливается на величину, соответствующую электродвижущей силе данного элемента. Двухполюсный переключатель k переключает гальванометр из цепи нормального элемента в цепь измеряемой электродвижущей силы и дает возможность произвести быструю проверку рабочего тока потенциометра, не расстраивая компенсацию измеряемой величины. Компенсация производится при посред-

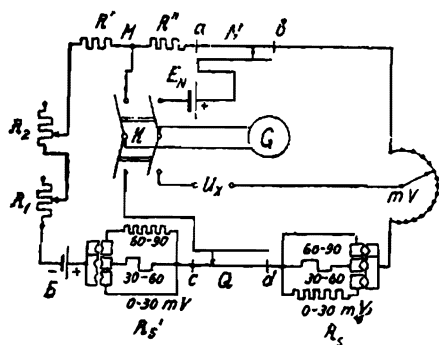


Рис. 50. Схема потенциометра для измерения малых электродвижущих сил (Кэмбридж-Иструмент К⁰).

стве рычажного магазина и калиброванной проволоки ($c-d$), градуированных непосредственно в милливольтх; одно деление на проволоке соответствует $0,005\text{ mV}$, так что отсчет может производиться до $1,0\ \mu\text{V}$. Ряд сопротивлений R_s , включенных между проволочным и рычажным магазинами, служит для расширения предела измерения потенциометра. Перестановкой штепселя вводится в цепь то или иное сопротивление, и предел измерения изменяется от $0-30$ до $30-60$ или $60-90\text{ mV}$. Чтобы при этой перестановке не изменялось об-

щее сопротивление цепи батарей, служит второй ряд сопротивлений R_s' .

Этот потенциометр, безусловно, грубее описанных выше потенциометров, применяемых для измерения электродвижущих сил термопар. Применение калиброванной проволоки не гарантирует точности отсчета, равной точности отсчета на потенциометрах Диссельхорста, Уайта, Уеннера. Однако, вследствие простоты конструкции и удобства работы на нем, этот потенциометр получил известное распространение для лабораторных измерений в заводских лабораториях и в научно-исследовательских институтах.

Новый потенциометр с разветвленной цепью питания

Во всех описанных потенциометрах изменение предела измерения производится либо шунтированием рабочей цепи потенциометра, т. е. изменением рабочего тока (метод Франка), либо изменением величины сопротивления между движками $+u_x$ и $-u_x$.

В описываемой Штейнвером (H. Steinwehr) [121] схеме изменение предела измерения потенциометра производится изменением напряжения, подаваемого на измерительную цепь потенциометра. Как видно из схемы

(рис. 51), напряжение от батареи подается через регулировочный реостат на разветвленную цепь — „контур батареи“. Подаваемое на „контур потенциометра“ напряжение отбирается от концов рычажной декады общим сопротивлением $R = 12 \text{ } \Omega$. Сопротивление собственно потенциометра, т. е. сопротивление R_3 , шунтирующее рычажную декаду R , равно $108 \text{ } \Omega$. Таким образом общее сопротивление цепи, состоящей из двух параллельных ветвей R и R_3 (см. рис. 51), равно

$$R' = \frac{R \cdot R_3}{R + R_3} = \frac{12 \cdot 108}{12 + 108} = 10,8 \text{ } \Omega.$$

При рычаге декады R на одном из крайних положений напряжение на концах сопротивления R_3 равно $10,8 \text{ В}$, где I — ток контура батареи. При $I = 0,01 \text{ А}$ это напряжение равно $0,108 \text{ В}$. При любом из промежуточных положений рычага, на цепь потенциометра подается разность напряжений на сопротивлениях R_1 и R_2 . Чтобы при перемещении рычага на R общее сопротивление цепи батареи оставалось неизменным, имеется второй рычажный магазин R' , сопротивление которого равно сопротивлению параллельных цепей R и R_3 , т. е. $10,8 \text{ } \Omega$; рычаг этого последнего магазина механически связан с рычагом магазина R . При перемещении рычага на магазине R на какой-либо промежуточный контакт, рычаг на магазине R' передвигается на соответствующий контакт, так что сопротивление каждой из параллельных цепей в контуре батареи

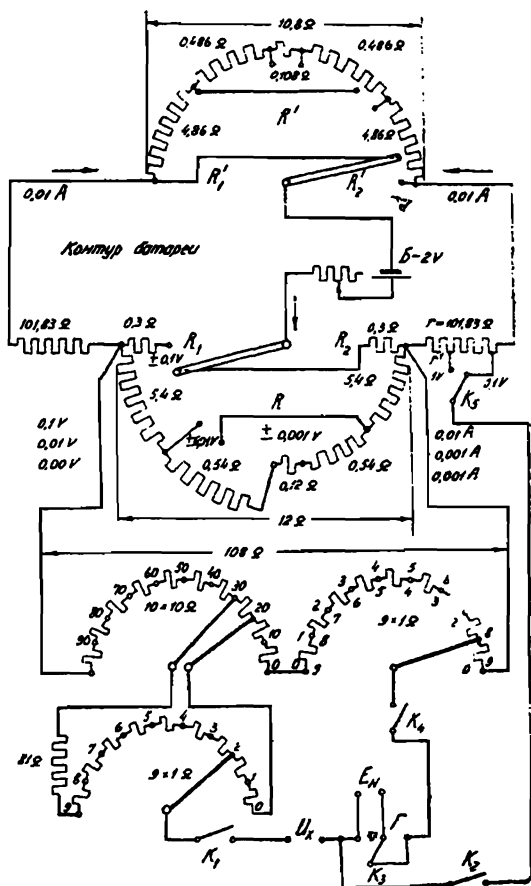


Рис. 51. Схема соединений потенциометра по Штейверу.

остается постоянным. Однако, все сопротивление цепи батареи, при перемещении спаренных рычагов R и R' , не остается постоянным.

Это утверждение становится ясным из подсчета сопротивления треугольника со сторонами R_1 , R_2 и R_3 , где R_1 и R_2 части сопротивления R , остающиеся справа и слева от рычага и R_3 сопротивление, шунтирую-

шее R ; $R_3 = 108 \text{ } \Omega$, а $R_1 + R_2 = 12 \text{ } \Omega$. Для расчета сопротивления этого треугольника произведем его преобразование в звезду. Обозначив сопротивления звезды через r_1 , r_2 и r_3 (рис. 52), имеем:

$$\frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = r_2 + r_3; \quad \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = r_1 + r_3; \quad \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3} = r_1 + r_2.$$

Вычитая из первого уравнения второе и складывая результат с третьим, имеем

$$r_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3};$$

аналогичным образом получаем

$$r_2 = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \text{ и } r_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

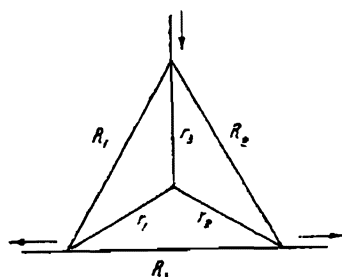


Рис. 52. Схема преобразования треугольника в звезду.

При перемещении рычага величина r_3 изменяется от 0 до максимума и от максимума до 0, а сумма $r_1 + r_2$ всегда остается равной $10,8 \text{ } \Omega$ и компенсируется перемещением рычага R' ; таким образом, чтобы сопротивление цепи батареи при перемещении рычагов R вместе с R' оставалось неизменным, величина r_3 должна быть одна и та же, т. е. необходимо ввести какое-то добавочное сопротивление.

В помещенной ниже таблице даны значения сопротивлений при различных положениях рычагов.

Предел измерения	Напряжение в вольтах	r_2	r_1	R_2	R_1	r_3	Рабочий ток в компенсационной цепи в амперах
I	0,1	0	10,8	—	12	0	0,001
II	0,01	4,86	5,94	5,4	6,6	0,297	0,0001
III	0,001	5,346	5,454	5,94	6,06	0,29997	0,00001

Добавочное сопротивление в цепи батареи (r_3') на крайних контактах равно $0,3 \text{ } \Omega$, на остальных контактах оно равно нулю. Как видно из таблицы, сопротивление цепи батареи изменяется на $0,03 \text{ } \Omega$. Это изменение сопротивления составит менее $0,05\%$ от сопротивления самого потенциометра со стороны батареи и еще меньший процент от всего сопротивления цепи батареи.

Величины R_2 и R_1 для различных пределов измерения, определяется по приведенным выше выражениям по величинам r_1 и r_2 . Последние (фиктивные) сопротивления рассчитываются следующим образом (для предела измерений II):

$$I(r_1' - r_2') = I \cdot 0,1 \cdot (r_1 + r_2).$$

Подставляя величину: $r_1 + r_2 = 10,8 \text{ } \Omega$, и сокращая обе половины уравнения на I , имеем два уравнения

$$r_1' - r_2' = 0,1 \cdot 10,8 \text{ и } r_1' + r_2' = 10,8.$$

Отсюда, складывая оба уравнения, получаем:

$$2r_1' = 11,88 \text{ } \Omega \text{ и } r_1' = 5,94 \text{ } \Omega;$$

$$\text{и } r_2' = 10,8 - 5,94 = 4,86 \text{ } \Omega.$$

Таким же образом для предела измерения III имеем

$$I(r_1'' + r_2'') = I \cdot 0,01 \cdot (r_1 + r_2)$$

и величины r_1'' и r_2'' определяем аналогично предыдущему (см. таблицу).

Как видно из схемы, перемена полярности потенциометра производится перемещением рычага R на соседний контакт.

Измерительная цепь потенциометра состоит из трех декад. Декада I состоит из 10 катушек, сопротивлением $10 \text{ } \Omega$ каждая. Одна из катушек шунтируется сопротивлением $90 \text{ } \Omega$, состоящим из 9 катушек декады III по $1 \text{ } \Omega$ и из добавочного сопротивления $81 \text{ } \Omega$.

Общее сопротивление 9 катушек декады I и одной ее катушки, шунтированной $90 \text{ } \Omega$ равно

$$9 \times 10 + \frac{10 \cdot 90}{10 + 90} = 99 \text{ } \Omega.$$

Ввиду того, что сопротивление декады II, соединенной последовательно с первой, равно $9 \text{ } \Omega$ (9 катушек по $1 \text{ } \Omega$), общее сопротивление компенсационной цепи потенциометра равно $99 + 9 = 108 \text{ } \Omega$. Это сопротивление в 9 раз больше сопротивления магазина R . Поэтому при положении рычага R на крайнем контакте сила тока в цепи потенциометра равна $0,1$ силы тока в цепи батареи.

Рабочий ток цепи батареи устанавливается по нормальному элементу, присоединяемому через гальванометр к концу сопротивления $r = 101,83 \text{ } \Omega$ и к рычагу декады II.

В зависимости от направления тока в компенсационной цепи и от его величины, рабочий ток $0,01 \text{ A}$ может устанавливаться по нормальному элементу, имеющему электродвижущую силу от $1,0182$ до $1,0184 \text{ V}$.

При сопротивлении для установления тока по нормальному элементу, равном $r' = 10,183 \text{ } \Omega$, рабочая сила тока устанавливается равной $0,1 \text{ A}$. В этом случае высший предел измерения потенциометра равен $1,0 \text{ V}$ и остальные пределы измерения равны $0,1 \text{ V}$ и $0,01 \text{ V}$.

Чтобы сопротивления обеих половин цепи батареи были равны, в левую цепь (см. рис. 51) включено также сопротивление $101,83 \text{ } \Omega$. Ввиду того, что равенство токов обеих половин цепи батареи имеет основное значение, сопротивления $101,83 \text{ } \Omega$ должны быть подогнаны с достаточной точностью (порядка $0,01\%$).

Потенциометры по описанной схеме изготавливаются фирмой Вольф (O. Wolf).

Ввиду того, что сопротивление потенциометра со стороны гальванометра невелико и мало изменяется при перемещении рычагов потенциометра, этот потенциометр особенно пригоден для измерения малых напряжений источников, имеющих малое сопротивление.

Необходимо заметить, что конструкция, аналогичная контуру батареи, может быть применена как своеобразный делитель напряжений. Конечно, в этом случае сопротивления R и R' должны быть достаточно велики и между собой равны.

ГЛАВА VI

ПОТЕНЦИОМЕТРЫ С НЕПОЛНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Большая точность измерений, получаемая на потенциометрах, не всегда необходима; кроме того, измерение при посредстве потенциометра занимает известный отрезок времени, в течение которого рабочий ток и измеряемая разность потенциалов должны быть постоянны, вследствие чего применение потенциометров для измерений напряжений, величина которых непостоянна, весьма затруднительно. В этом случае возможно было бы применить обычные стрелочные вольтметры, однако, точность отсчета на них не превышает 0,1% в самом выгодном случае и, кроме того, имеющая место вариация показаний стрелочного прибора, происходящая от трения, влияния внешних магнитных полей и т. п. еще больше понижает точность их измерения. Поэтому, применение стрелочных приборов при требованиях точности измерений даже порядка 0,1% не всегда возможно. Все эти рассуждения указывают на то, что желательно иметь прибор, обладающий точностью, высшей, чем обычный стрелочный прибор, и в то же время позволяющий производить отсчет с достаточной точностью даже при колеблющейся измеряемой разности потенциалов. Применяемые иногда для подобной цели стрелочные приборы с большой точностью отсчета, вследствие большой длины шкалы и точного отсчета 0,1 деления, например лабораторные приборы Вестона, также не исключают погрешностей от вариаций, происходящих, главным образом, от трения, так как подвижная их система относительно тяжела.

Идея отсчета на стрелочном приборе не всей измеряемой величины, а части ее, причем остальная большая часть ее уравнивается на потенциометре, была впервые применена Стансфилдом (Stansfield) [119] в его потенциометре для измерения электродвижущих сил термопар. В дальнейшем эта идея использовалась для получения последних десятичных знаков отсчета в других описанных выше потенциометрах (Диссельхорста, Уайта, Уеннера и пр.), а также применялась в пирометрической установке Гофман и Ротэ (Hoffmann и. Rothe) [74]. Приборы, служащие для измерений разности потенциалов от одного до нескольких десятков вольт, были разработаны в Бюро стандартов (Bureau of Standards) США Бруксом (H. V. Brooks) [10, 11, 12]. Первая модель предназначалась для измерения напряжения при производстве фотометрических измерений; дальнейшие модели имели более широкое применение и предназначались для проверок измерительных приборов (амперметров, вольтметров и ваттметров).

Теория потенциометра с неполной компенсацией

Потенциометры с отклонением, так же как и потенциометры с полной компенсацией, предназначены для измерений: 1) разностей потенциалов, находящихся в пределах непосредственно измеряемой потенциа-

метром величины, 2) разностей потенциалов выше предела измерения потенциометра. Это измерение производится при посредстве делителя напряжения и 3) сил токов при посредстве шунтов.

В потенциометрах с полной компенсацией потенциальные проводы тока не несут, и все три случая при компенсации не представляют никакой разницы.

В потенциометрах с отклонением в потенциальных проводах ток не равен нулю; на зажимах гальванометра имеется разность потенциалов, как и ток в гальванометре, зависящая от сопротивления всей цепи. Разберем все три случая.

Первый случай. Непосредственное измерение разности потенциалов. Рассмотрим схему соединений для этого случая (рис. 53 а). В этой схеме имеется два замкнутых контура: один, содержащий неизвестное напряжение u_x , и другой, содержащий питающую батарею E . Обозначив через i ток гальванометра и через I — ток питающей батареи, имеем:

$$\begin{aligned} i(R_2 + r_1) - Ir_1 - u_x &= 0 \text{ для первого контура и} \\ I(r_1 + r_2 + R) - i \cdot r_1 - E &= 0 \text{ для второго контура,} \end{aligned}$$

где R_2 — сопротивление гальванометра плюс все сопротивления, включенные с ним последовательно (до концов r_1), r_1 и r_2 — сопротивления потенциометра, R — сопротивление регулировочного реостата. Исключая из обоих уравнений величину рабочего тока I , получаем:

$$i = \frac{u_x - \frac{E \cdot r_1}{r_1 + r_2 + R}}{R_2 + \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}}.$$

Рассматривая второй член числителя этого выражения, мы видим, что величина $\frac{E}{(r_1 + r_2 + R)}$ есть не что иное, как рабочий ток компенсационной цепи потенциометра при разомкнутом или компенсированном гальванометре. Тогда

$$\frac{E \cdot r_1}{(r_1 + r_2 + R)}$$

представляет собой напряжение на зажимах r_1 (т. е. отсчет на движках потенциометра в вольтах) при полной компенсации. Второй член знаменателя является общим сопротивлением двух параллельных ветвей, и весь знаменатель представляет собой общее сопротивление в цепи гальванометра при E и u_x замкнутых накоротко. Обозначив это общее сопротивление через R' , можно представить предыдущее выражение в следующем виде:

$$i = \frac{u_x - \frac{E}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1}{R'};$$

откуда

$$iR' + \frac{E}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1 = u_x.$$

Если сопротивление цепи гальванометра R' является постоянным как при установке рабочего тока, так и при компенсировании, из предыдущего выражения видно, что измеряемая разность потенциалов u_x равна сумме: 1) отсчета по движкам магазинов потенциометра, выраженного в вольтах, и 2) величины, пропорциональной току в катушке гальванометра, т. е. отклонению его подвижной части. Если шкала гальванометра градуирована в милливольтах, величина измеряемой разности потенциалов может быть непосредственно отсчитана: большая часть на потенциометре, меньшая часть — на гальванометре.

Второй случай. Измерение разности потенциалов выше предела измерения потенциометра. Схема соединений в этом случае представлена на рис. 53 б. Уравнения трех имеющихся в этом случае контуров с токами: I' , i и I имеют следующий вид:

$$I'R_0 - i \frac{R_0}{n} - u_x = 0;$$

$$i \left(\frac{R_0}{n} + R_2 + r_1 \right) - I' \cdot \frac{R_0}{n} - Ir_1 = 0;$$

$$I(r_1 + r_2 + R) - ir_1 + E_0 = 0.$$

В этих выражениях I' — ток в части делителя $R_0 \frac{n-1}{n}$; R_0 — сопротивление делителя; $\frac{R_0}{n}$ — сопротивление части делителя, к которой присоединен гальванометр; остальные обозначения те же, что и выше.

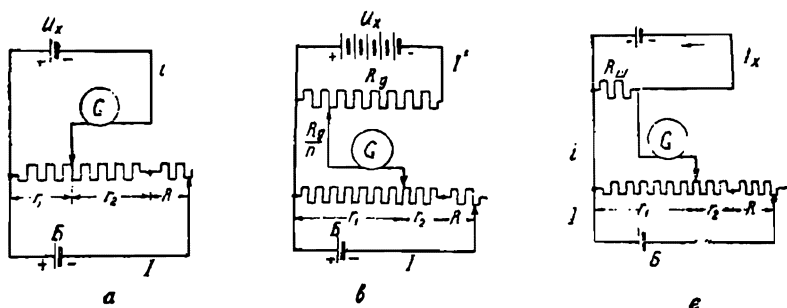


Рис. 53. Принципиальные схемы измерения на потенциометрах с неполной компенсацией.

Исключая из этих выражений токи I и I' , получаем:

$$i = \frac{\frac{u_x}{n} - \frac{E_0 \cdot r_1}{r_1 + r_2 + R}}{\frac{R_0(n-1)}{n^2} + R_2 + \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}} = \frac{\frac{u_x}{n} - \frac{E_0}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1}{\frac{R_0}{n} + R_2 + \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}}.$$

Как и в предыдущей формуле, второй член числителя представляет собой отсчет по движкам потенциометра, а знаменатель — общее сопротивление цепи гальванометра, так как первый член знаменателя не что иное, как сопротивление двух параллельных частей: $\frac{R_0}{n}$ и $R_0 \frac{n-1}{n}$. Ве-

личина измеряемого напряжения u_x , как и в предыдущем случае, отсчитывается по двум приборам: по движкам потенциометра и по показанию гальванометра.

$$u_x = \left(i \cdot R' + \frac{E_6 \cdot r_1}{r_1 + r_2 + R} \right) n.$$

В этом выражении R' , как и ранее, есть суммарное сопротивление цепи, на которую замкнут гальванометр, и в том числе и сопротивление его катушек, при E_6 и u_x , замкнутых накоротко. Множитель n — кратность делителя.

Таким образом и в этом случае при постоянном сопротивлении в цепи гальванометра — часть измеряемой разности потенциалов может быть отсчитана по показанию гальванометра при соответственной его градуировке.

Третий случай. Измерение силы тока, т. е. измерение разности потенциалов на образцовом сопротивлении. Уравнения контуров соответственно схеме рис. 53с следующие:

$$\begin{aligned} i(R_{ш} + R_2 + r_1) - I_r - I_x \cdot R_{ш} &= 0, \\ I(r_1 + r_2 + R) - i \cdot r_1 + E_6 &= 0. \end{aligned}$$

Откуда, исключая рабочий ток потенциометра I , имеем:

$$i = \frac{I_x \cdot R_{ш} - \frac{E_6 \cdot r_1}{r_1 + r_2 + R}}{R_{ш} + R_2 + \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}},$$

где I_x — сила измеряемого тока и $R_{ш}$ — величина образцового сопротивления. Остальные обозначения аналогичны предыдущим. При полной компенсации, когда ток в гальванометре равен нулю, числитель последнего выражения равен нулю, и $I_x \cdot R_{ш} = \frac{E_6 \cdot r_1}{r_1 + r_2 + R} = I r_1$, где I — рабочий ток потенциометра, установленный по нормальному элементу.

Как видно из схемы при неполной компенсации, ток, проходящий в образцовом сопротивлении, не равен измеряемому току, так как часть его ответвляется в цепь гальванометра и может быть найдена по показанию гальванометра при соответственной его градуировке. Обозначив аналогично предыдущему, знаменатель последнего выражения, являющийся общим сопротивлением цепи гальванометра, через R' , имеем:

$$i = \frac{I_x \cdot R_{ш} - I r_1}{R'};$$

откуда $I_x = (i R' + I r_1) \frac{1}{R_{ш}}$.

Из последнего выражения видно, что при постоянном общем сопротивлении цепи гальванометра, в которое входит и величина образцового сопротивления, измеряемая сила тока может быть получена как сумма показаний движков потенциометра и показания гальванометра, деленная на величину сопротивления шунта.

Схема потенциометра Брукса с постоянным сопротивлением цепи гальванометра

При работе на потенциометре приходится изменять величину входящих в его цепь сопротивлений.

1. При установке рабочего тока по нормальному элементу приходится изменять величину сопротивления регулировочного реостата R , так как электродвижущая сила питающего потенциометр аккумулятора не является величиной постоянной, а зависит от времени, протекшего от начала разряда.

2. При компенсировании изменяется величина сопротивлений r_1 и r_2 .

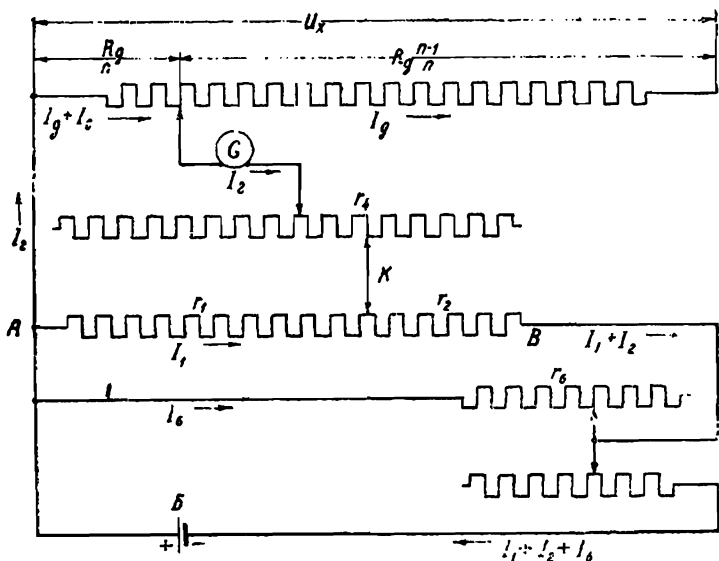


Рис. 54. Принципиальная схема потенциометра Брукса с постоянным сопротивлением цепи гальванометра.

3. При измерении различных напряжений изменяется величина сопротивления части делителя, включенной в цепь гальванометра, а при измерении силы тока изменяется сопротивление шунта.

Кроме требования постоянства сопротивления в цепи гальванометра, должно быть выполнено и другое условие: величина этого постоянного сопротивления должна быть близка к критическому сопротивлению применяемого гальванометра. В противном случае не будет быстроты отсчета, характерной для потенциометра с неполной компенсацией.

Руководствуясь всеми этими соображениями, Брукс в Бюро стандартов (Вашингтон) разработал ряд схем, постепенно их совершенствуя. Ниже мы даем описание схемы его третьей модели, предназначенной для всех трех случаев описанных выше измерений. Принципиальная схема соединений показана на рис. 54 для случая измерения напряжения выше предела измерения потенциометра. Как и в предыдущих схемах, U_x — измеряемое напряжение, приложенное к зажимам делителя напряжения,

сопротивление которого R_0 . Компенсационная цепь потенциометра AB питается от вспомогательной батареи аккумуляторов B . Сила рабочего тока регулируется при помощи реостата r_3 , последовательно включенного с батареей B , и второго реостата r_6 , включаемого параллельно компенсационной цепи потенциометра AB . Эти оба реостата r_3 и r_6 связаны между собой механически так, что при увеличении введенного в цепь батареи сопротивления реостата r_3 шунтирующее цепь AB сопротивление r_6 уменьшается.

Величина ступеней сопротивлений r_3 и r_6 выбрана так, что общее сопротивление их в параллель — при установке рабочего тока потенциометра, остается без изменений. Благодаря этому, величина регулировочного сопротивления, в предыдущих схемах обозначенного $R = \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6}$, остается постоянной. Таким образом результирующее сопротивление потенциометра состоит из переменной величины компенсационного сопротивления r_1 , шунтированного суммой переменного сопротивления r_2 , и постоянного по величине сопротивления регулировочных реостатов R . Это результирующее сопротивление равно нулю при движении k в крайнем левом положении, т. е. на точке A . При перемещении движка вправо сопротивление между точками $K-A$ растет до некоторой точки, находящейся около середины AB , и затем уменьшается до некоторого неравного нулю значения. Значение сопротивления r_1 , соответствующего максимуму всего сопротивления, может быть получено из общего сопротивления R_p :

$$R_p = \frac{r_1 \left(r_2 + \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6} \right)}{r_1 + r_2 + \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6}}.$$

Имея в виду, что $(r_1 + r_2)$ при перемещении движка k остается без изменения, это выражение может быть изображено в виде:

$$R_p = \frac{r_1 \left[(R_k - r_1) + \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6} \right]}{R_k + \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6}},$$

где $R_k = (r_1 + r_2)$.

Дифференцируя это выражение и приравнявая первую производную нулю, находим значение r_1 при максимуме R_p :

$$R_p' = \frac{R_k - r_1 + \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6} - r_1}{R_k + \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6}} = 0,$$

откуда

$$2r_1 = R_k + \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6}$$

и

$$r_1 = \frac{1}{2} \left(R_k + \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6} \right).$$

Определив значение R_p при значении $r_1 = \frac{1}{2} \left(R_k + \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6} \right)$, находим максимальное значение сопротивления цепи гальванометра от движка k до зажима A (см. рис. 54). Для того, чтобы при перемещении движка k величина сопротивления не изменялась, предусмотрен добавочный магазин r_4 , включаемый последовательно с гальванометром. Движок k , перемещающийся по контактам магазина $A-B(r_1+r_2)$, перекрывает также и контакты магазина r_4 . Сопротивление катушек магазина r_4 подсчитано так, что общее сопротивление цепи гальванометра при положении движка k на любом контакте остается без изменения. Добавочное сопротивление равно нулю на контакте, соответствующем значению

$$r_1 = \frac{1}{2} \left(R_k + \frac{r_3 \cdot r_6}{r_3 + r_6} \right).$$

Остающаяся часть цепи гальванометра состоит из части делителя $R_d \cdot \frac{1}{n}$, шунтированной остальной частью делителя — $R_d \cdot \frac{n-1}{n}$, так как сопротивление измеряемого источника в выражение для общего сопротивления R' не входит. Это объясняется тем, что в случае применения делителя напряжения измеряется не электродвижущая сила источника, а разность потенциалов на зажимах делителя.

При непосредственном измерении разности потенциалов, без применения делителя напряжения, зажимы измеряемого источника присоединяются непосредственно к потенциометру вместо части делителя $R_d \cdot \frac{1}{n}$. В этом случае общее сопротивление, на которое замкнут гальванометр, меньше, чем при измерениях с делителем, на величину сопротивления $\frac{R_d}{n}$ шунтированного сопротивления $R_d \cdot \frac{n-1}{n}$, т. е. на сопротивление $R_d \cdot \frac{n-1}{n^2}$. Чтобы общее сопротивление цепи гальванометра, а, следовательно, и его градуировка и в этом случае остались постоянными, в цепь потенциометра должно быть введено добавочное балластное сопротивление, равное $R_d \cdot \frac{n-1}{n^2}$.

При наличии этого добавочного сопротивления потенциометр пригоден и для измерения напряжения на его зажимах.

При измерении силы тока соответственные зажимы потенциометра непосредственно (без делителя) присоединяются к потенциальным зажимам соответственного образцового шунта, сопротивление которого должно быть учтено при подсчете величины упомянутого выше балластного сопротивления. При применении различных нормальных сопротивлений, величина балластного сопротивления должна быть соответственно изменена. При соответственном устройстве балластного сопротивления в виде штепсельного или рычажного магазина, изменение балластного сопротивления при измерениях на различных образцовых сопротивлениях (шунтах) сводится к простой перестановке штепселей или рычагов магазина. Подобный потенциометр требует применения тех образцовых сопротивлений, величина которых обозначена на штепсельных гнездах или на контактах балластного магазина. Ввиду того, что включение балластного сопротивления при измерениях с делителем напряжения не нужно, можно

пересоединять гальванометр двухполюсным переключателем из цепи тока: (шунт) в цепь напряжения (делитель). Величина балластного сопротивления в цепи шунта при этом переключении остается неизменной. Такой переключатель позволяет быстро пересоединять потенциометр с цепи тока на цепь напряжения, что весьма удобно при поверках ваттметров или счетчиков.

Как и в потенциометре с полной компенсацией, в потенциометре с неполной компенсацией должна быть предусмотрена возможность устанавливать рабочий ток по нормальному элементу. В этом случае гальванометр служит нулевым прибором, и величина сопротивления, на которое он замкнут, значения не имеет.

Описание конструкции потенциометра Брукса „модель № 3“, изготовленного фирмой Лидс и Нортруп

Описываемая „модель № 3“ потенциометра Брукса предназначена им для обычных измерений тока и напряжения в лабораторных условиях с достаточной точностью измерений и вместе с тем с малой затратой.

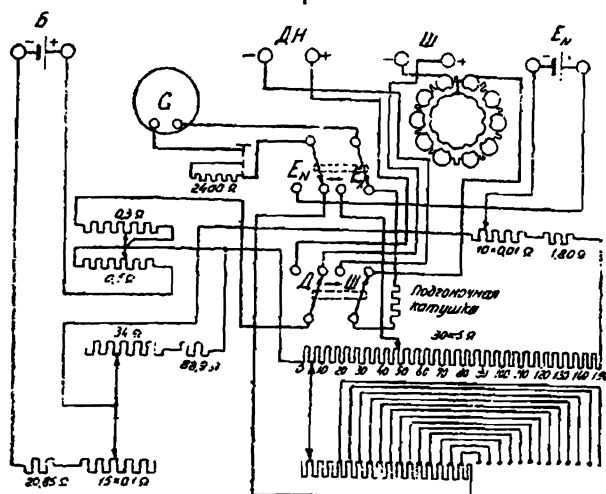


Рис. 55. Схема потенциометра фирмы Лидс и Нортруп по Бруксу „модель № 3“.

времени. На рис. 55 показана подробная схема соединений этого потенциометра. Компенсационная цепь потенциометра состоит из рычажного магазина, соответствующего сопротивлению $AB = r_1 + r_2$ на рис. 54. Этот магазин состоит из 30 катушек, сопротивлением 5 Ω каждая. Последовательно с этим магазином включен небольшой магазин, состоящий из 10 катушек, сопротивлением 0,01 Ω каждая, и катушка постоянного сопротивления 1,80 Ω .

Для установки величины рабочего тока Брукс в этой модели применяет ненасыщенный нормальный элемент Вестона, присоединенный к двум третям рычажного магазина, что составляет 100 Ω , и движку упомянутого выше магазина — $10 \times 0,01 \Omega$, последовательно с которым

включена катушка $1,80 \text{ } \Omega$. Движок в магазине $10 \times 0,01 \text{ } \Omega$ переставляется в зависимости от электродвижущей силы применяемого нормального элемента так, что общее сопротивление компенсационной цепи нормального элемента может изменяться от $101,80 \text{ } \Omega$ до $101,90 \text{ } \Omega$ через $0,01 \text{ } \Omega$. Ввиду того, что изменение электродвижущей силы ненамного нормального элемента обычно из этих пределов не выходит, установка компенсационного сопротивления для данного нормального элемента всегда возможна. Таким образом, рабочий ток потенциометра устанавливается равным $0,01 \text{ А}$ с точностью до $0,01\%$.

Питание потенциометра Брукса производится от одного аккумулятора. Сопротивление последовательно включенного реостата, служащего для регулирования рабочего тока (r_3 в предыдущем выводе), имеет минимальное значение $20,85 \text{ } \Omega$ и может быть увеличено до $22,35 \text{ } \Omega$. Переменная часть этого реостата состоит из 15 катушек, сопротивлением $0,1 \text{ } \Omega$ каждая, шунтирующий же r_3 реостат (r_6 в предыдущем выводе) имеет минимальное сопротивление — $88,9 \text{ } \Omega$, которое 15 последовательно включенными катушками может быть увеличено до максимального значения $123,4 \text{ } \Omega$.

Кроме реостатов r_3 и r_6 , имеется реостат для тонкой регулировки рабочего тока потенциометра с общим сопротивлением $0,5 \text{ } \Omega$. Этот реостат связан механически с реостатом, включающим в цепь гальванометра компенсирующее сопротивление $0,3 \text{ } \Omega$, благодаря чему сопротивление цепи гальванометра не изменяется и при тонкой регулировке рабочего тока. При выбранных сопротивлениях магазина AB ($r_1 + r_2$) и реостатов r_3 и r_6 значение r_1 , соответствующее наибольшему значению R_p , соответствует контакту магазина 85, и в этой точке сопротивление добавочного магазина должно быть равно нулю. Ввиду того, что вправо от контакта 85 добавочные сопротивления равны соответствующим добавочным сопротивлениям влево от этого контакта, число добавочных катушек уменьшено соединением между собой соответственных контактов балластного магазина r_4 : 90 контакт соединен с 80; 95 с 75 и т. д. (см. схему — рис. 55).

Благодаря специальному устройству ключа гальванометра первоначальный нажим ключа включает гальванометр совместно с предохранительным сопротивлением, равным $2400 \text{ } \Omega$. При дальнейшем нажиме ключа сопротивление $2400 \text{ } \Omega$ замыкается накоротко, в гальванометр включается непосредственно в компенсационную цепь.

Общее сопротивление цепи гальванометра в рабочем положении потенциометра, измеряемое между зажимами, обозначенными как „делитель напряжения“, равно $60 \text{ } \Omega$. Ввиду того, что сопротивление $R_0 \frac{n-1}{n^2}$ применяемого с этим потенциометром делителя равно $40 \text{ } \Omega$ (описание делителя помещено ниже), общее сопротивление цепи гальванометра равно $100 \text{ } \Omega$. Чтобы при измерении силы тока сопротивление цепи гальванометра оставалось также равным $100 \text{ } \Omega$, в потенциометре имеется упомянутое ранее балластное сопротивление, выполненное в виде штепсельного магазина. При крайнем правом положении штепселя (см. схему) балластное сопротивление равно $40 \text{ } \Omega$. При перемещении штепселя это сопротивление уменьшается на $0,1, 0,2, 0,5 \dots 40 \text{ } \Omega$ (при крайнем левом положении штепселя). Это устройство позволяет сохранять постоянство

сопротивления цепи гальванометра при применении всех тех шунтов, величины которых обозначены на соответственных штепсельных гнездах. При измерении какой-либо разности потенциалов без делителя, источник присоединяется к зажимам потенциометра, обозначенным — „шунт“, а штепсель балластного сопротивления помещается в первом гнезде; общее сопротивление цепи гальванометра остается равным 100Ω , так как в этом случае сопротивление измеряемого источника в расчет приниматься не должно.

Стрелочный гальванометр встроен в эбонитовую верхнюю доску потенциометра, и его шкала имеет двойной ряд делений: в верхнем ряду средняя точка обозначена цифрой нуль, и вся шкала имеет значущие деления: 7, 8, 9, 0, 1, 2, 3; в нижнем ряду средняя точка обозначена цифрой 5, и шкала имеет значущие деления: 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8. Двойная шкала значительно упрощает отсчет по гальванометру и как бы увеличивает объем шкалы. Верхний ряд цифр применяется при положении рычага магазина AB на контакте, соответствующем цифре, оканчивающейся нулем 20, 30, 40 и т. д., а нижний ряд — при рычаге на контакте с обозначением, оканчивающимся на 5—25, 35 и т. д. Одному большому делению шкалы соответствует некомпенсированная разность потенциалов, равная $0,01 \text{ V}$, при измерениях, производимых без делителя напряжения. Ввиду того, что одно маленькое деление соответствует $0,001 \text{ V}$, отсчет величины разности потенциалов в $1,0 \text{ V}$ может быть произведен с точностью до $0,05\%$ (при точности отсчета до $0,5$ малого деления шкалы). Токовая постоянная шкалы гальванометра $10 \mu\text{A}$ на одно деление. Сопротивление катушки гальванометра — около 10Ω , его критическое сопротивление равно 100Ω , и при замыкании цепи гальванометра стрелка его устанавливается на соответствующем отклонении (не переходя его) через 1,2 сек. Такая быстрая установка стрелки обуславливает малую затрату времени на производство отсчета. В третьей модели потенциометра применялся гальванометр, изготовляемый фирмой Вестон (Weston Electrical Instrument Co).

Кроме гальванометра, на верхней эбонитовой доске потенциометра, имеются: магазин компенсационной цепи потенциометра (AB) (справа внизу), магазин для установки сопротивления нормального элемента и штепсельный магазин (справа сверху). Слева от гальванометра помещены оба реостата: для грубой и тонкой регулировки рабочего тока потенциометра, оба переключателя — один, переключающий гальванометр либо на нормальный элемент, либо на измеряемую разность потенциалов, и второй — на делитель напряжения или на шунт, и кнопка, включающая гальванометр. Все зажимы помещены на задней вертикальной стенке потенциометра. На верхней доске потенциометра помещен маленький уровень, позволяющий установить прибор в горизонтальном положении.

Предел измерения этого прибора без делителя напряжения — $1,5 \text{ V}$, и соответственно контакты магазина AB имеют обозначения от 0 до 150. Этот предел измерений выбран потому, что он наиболее удобен при проверке приборов, шкала которых имеет 150 делений (на $1,5 \text{ V}$, на 15 V и т. д.). При другом числе делений шкалы, например, при числе делений равно 100 (приборы на $1,0 \text{ V}$, 100 V), номинальному показанию прибора будет соответствовать контакт магазина 100, и отсчет будет произведен с достаточной точностью. При измерении малых разностей по-

тециалов порядка 0,1—0,2 V точность отсчета уменьшится, отсчет по гальванометру будет иметь гораздо большее значение в процентном отношении и должен быть произведен с большей тщательностью, например, до 0,1—0,2 малого деления шкалы. Эта точность отсчета вполне возможна при наличии зеркальной шкалы, но, конечно, требует большой затраты времени. Поэтому при выборе шунтов и делителей напряжения рекомендуется подбирать их такой величины, чтобы отсчет по потенциометру был не ниже средней трети контактов магазина (условие, аналогичное требованию, предъявляемому при отсчете на стрелочном приборе).

Специальный делитель напряжения, применяемый с третьей моделью потенциометра Брукса

Применяемый с описанным потенциометром делитель имеет отличную от обычного делителя напряжения конструкцию, которая ясна из схемы

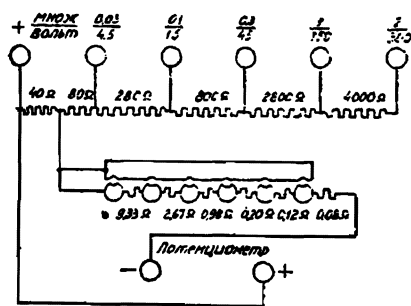


Рис. 56. Схема делителя напряжения к потенциометру „модель № 3“.

рис. 56. Этот делитель имеет пять пределов измерения: 4,5, 15, 45, 150 и 300 V и соответственно его постоянные (т. е. те множители, на которые надо умножить цифровой отсчет по потенциометру): 0,03, 0,1, 0,3, 1,0 и 2,0. Чтобы при всех кратностях делителя сопротивление цепи гальванометра оставалось постоянным, в ответвлении делителя (см. схему — рис. 56) имеется добавочный штепсельный магазин. Отдельные сопротивления этого магазина рассчитаны так, что общее сопротивление параллельных ветвей делителя плюс сопротивление данной ступени

магазина равны постоянной величине — 40 Ω. Сопротивление делителя на 300 V $R_d = 8000 \Omega$, сопротивление части делителя, от которой взято ответвление к потенциометру, $\frac{R_d}{n} = 40 \Omega$, и сопротивление параллельных

частей делителя $\frac{R_d}{n}$ и $R_d \frac{n-1}{n}$ равно $R_d \frac{n-1}{n^2}$. Подставляя значения $R_d = 8000 \Omega$; $n = \frac{4000}{40} = 200$, имеем:

$$R_d \frac{n-1}{n^2} = 8000 \frac{199}{200^2} = 39,8 \Omega,$$

откуда определяется величина добавочного сопротивления: $40 - 39,8 = 0,20 \Omega$. Таким же точно подсчетом, имея ступени делителя: 4000 Ω на 150 V, 1200 Ω на 45 V, 400 Ω на 15 V и 120 Ω на 4,5 V, определяем величину добавочных сопротивлений: 0,4 Ω на 150 V, 1,33 Ω на 45 V, 4,00 Ω на 15 V и 13,33 Ω на 4,5 V. Как видно по схеме, кроме упомянутых сопротивлений штепсельного магазина, имеется дополнительный штепсель, позволяющий выделить крайнее сопротивление

0,08 Ω . Это сделано для того, чтобы иметь возможность расширить предел измерения до 750 В, включив последовательно с делителем сопротивление в 12000 Ω .

Современная конструкция потенциометра по Бруксу, изготавливаемая фирмой Лидс и Нортруп „модель № 7“

Современный потенциометр с неполной компенсацией, изготавливаемый фирмой Лидс и Нортруп, так называемая „модель № 7“, и построенный в основе по принципу потенциометра Брукса, существенно отличается от него конструктивным выполнением (рис. 57). В модели № 3 потенциометра Брукса сопротивление цепи гальванометра оставалось постоянным при перемещении рычагов обоих реостатов, регулирующих рабочий ток и рычага магазина компенсационной цепи. В модели № 7 сопротивления компенсационной цепи и всей цепи рабочего тока потенцио-

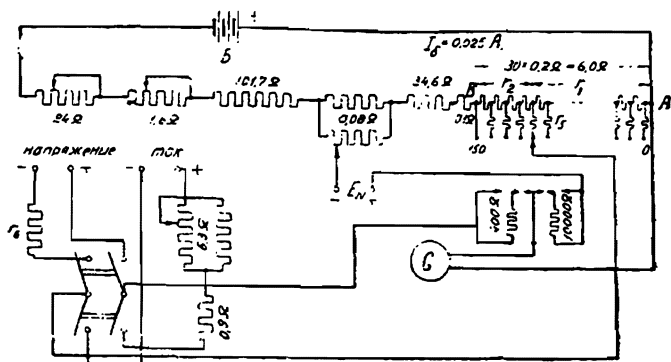


Рис. 57. Принципиальная схема потенциометра фирмы Лидс и Нортруп по Бруксу „модель № 7“.

метра подобраны так, что изменение сопротивления цепи гальванометра при регулировании рабочего тока получается настолько незначительным, что им возможно пренебречь, поэтому реостаты регулировки имеют обычную конструкцию, шунтирующий реостат отсутствует. Балластное сопротивление, компенсирующее изменение сопротивления цепи гальванометра при перемещении движка магазина, аналогично магазину АВ предыдущей схемы, включается между соединением двух соседних катушек и соответствующим контактом. Эта конструкция подобна аналогичной конструкции в потенциометре Уайта.

Потенциометр модель № 7 изготавливается на предел измерения только 150 мВ. Компенсирующий магазин состоит из 30 катушек, сопротивлением 0,2 Ω каждая. Таким образом все сопротивление магазина равно $0,2 \times 30 = 6,0 \Omega$. Остальное сопротивление цепи, питающей батареи состоит: из добавочного сопротивления 34,6 Ω и маленького магазина, сопротивлением 0,08 Ω , служащих, совместно с сопротивлением магазина АВ, для установки рабочего тока потенциометра по нормальному элементу, балластного сопротивления около 101,64 Ω и двух регулировочных реостатов. Эти реостаты, служащие для установки рабочего тока, имеют сопротивления — 24 Ω реостат для грубой регулировки

и 1,6 Ω для тонкой регулировки. Таким образом суммарное сопротивление обоих регулировочных реостатов равно 25,6 Ω , а все сопротивление цепи питающей батареи — 168 Ω при введении обоих регулировочных реостатов; если же оба реостата выведены, сопротивление цепи батареи уменьшится до 142,4 Ω . Ввиду того, что сопротивление компенсирующего магазина меньше половины общего сопротивления цепи батареи, сопротивление параллельных ветвей

$$R_p = \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}$$

имеет максимальное значение при $r_2 = 0$, где значения r_1 и r_2 ясны из развернутой схемы потенциометра (см. рис. 57), а R — суммарное сопротивление цепи батареи без сопротивления магазина AB . (Вывод формул для нахождения максимального значения R_p аналогичен приведенному выше выводу для „модели № 3“.) Поэтому на контакте 150 величина добавочного сопротивления равна нулю.

Ввиду того, что регулировочные реостаты могут при измерении оказаться на любом из крайних своих положений и сопротивление цепи параллельной r_1 (от ∞ до 0) может изменяться от 136,4 до 162 Ω , величина R_p может принимать значения:

$$1) R_{p_{\max}} = \frac{6 \cdot 162}{168} = 5,785 \Omega \text{ и}$$

$$2) R_{p_{\min}} = \frac{6 \cdot 136,4}{142,4} = 5,747 \Omega.$$

Сопротивление цепи гальванометра, таким образом, непостоянно и может изменяться на $\Delta R_p = (5,785 - 5,747) \Omega = 0,038 \Omega$. Эта величина составит $\frac{0,038}{5,766} = 0,66\%$ от среднего значения сопротивления R_p , от общего же сопротивления цепи гальванометра 20 Ω (R_1)¹ эта величина составит лишь $0,19 < 0,2\%$.

Ошибка измерения, которую вызовет это изменение сопротивления цепи гальванометра, может быть подсчитана нижеследующим образом.

Как и в предыдущем потенциометре, измеряемая разность потенциалов определяется суммой отсчетов по рычагам магазина и по отклонению стрелки гальванометра..

$$u_x = \left(\frac{E_0}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1 + iR_1 \right) = Ir_1 + iR_1 = Ir_1 \left(1 + \frac{iR_1}{Ir_1} \right).$$

В этом выражении E_0 , как и ранее, — электродвижущая сила питающей батареи, I — сила тока в цепи батареи при отсутствии тока в гальванометре. Первое слагаемое правой части этого выражения — отсчет по рычагам магазина (величина значительно большая, чем второе слагаемое), не изменяется при изменении сопротивления цепи гальванометра, и относительная погрешность измерения Δu_x может быть представлена в виде:

$$\frac{\Delta u_x}{u_x} = \frac{\Delta iR_1}{Ir_1},$$

где I — постоянная величина. Максимальное значение второго слагаемого iR_1 , обусловленное шкалой гальванометра, не превышает 3 мВ.

¹ См. ниже.

Погрешность измерения этой величины, вследствие неточности установки R_1 , достигает $\pm \frac{0,19}{2} \cong 0,10\%$; считая, что прибор градуирован так, что погрешность равна нулю при среднем значении R_1 . Абсолютное значение этой наибольшей погрешности равно

$$\frac{3 \cdot 0,1}{100 \cdot r_1} = 0,001 \text{ мВ для } r_1 = 6 \text{ }\Omega,$$

откуда

$$\frac{\Delta u_x}{u_x} = \frac{\Delta i R_1}{I r_1} = \frac{0,001}{150},$$

где и числитель и знаменатель выражены в милливольтх. Величина наибольшей относительной погрешности $\frac{\Delta i \cdot R_1}{I r_1}$ остается меньше $0,001\%$ при всех значениях r_1 , так как и числитель и знаменатель этого выражения изменяются почти пропорционально друг другу. При таком значении эта величина погрешности влияния на точность измерения практически не оказывает.

Величина рабочего тока этого потенциометра — $0,025 \text{ А}$ устанавливается по нормальному элементу, электродвижущая сила которого может быть от $1,0170$ до $1,0190 \text{ В}$. При установке рабочего тока гальванометр служит нулевым прибором. Магазин, служащий для установки рабочего тока по величине электродвижущей силы нормального элемента, имеет особую конструкцию и состоит из двух параллельно включенных сопротивлений: одного неизменяемого и другого регулируемого. Общее сопротивление обеих этих параллельных ветвей равно $0,08 \text{ }\Omega$. Эта конструкция позволяет применить реостат малого сопротивления при большой рабочей длине; подгонка же точной величины столь малого сопротивления значительно упрощается при наличии шунтирующего сопротивления. Цепь нормального элемента замыкается особым ключом (кнопкой) предварительно через большое предохраняющее сопротивление, которое лишь при дальнейшем нажатии замыкается накоротко. Это сопротивление служит для предохранения нормального элемента от прохождения по нему тока вредной для него величины.

На изготовляемом фирмой приборе два различных ключа замыкают цепь нормального элемента и цепь измеряемой разности потенциалов, причем они связаны между собой так, что при замыкании ключа u_x ключ нормального элемента при нажатии не замыкает цепи (см. схему — рис. 57); ключ, присоединяющий измеряемую разность потенциалов, имеет предохранительное сопротивление только около $400 \text{ }\Omega$, что вполне достаточно для защиты гальванометра.

Аналогично модели № 3 прибор предусматривает возможность переключения с зажимов напряжения (Volt Box) на зажимы тока (Shunt), производимого при помощи двухполюсного переключателя. Эквивалентное сопротивление цепи гальванометра в потенциометре, самого гальванометра и делителя равно $20 \text{ }\Omega$. Чтобы это сопротивление не изменилось и при положении переключателя U_x на Shunt, имеется добавочный реостат, сопротивлением $6,3 \text{ }\Omega$, способ применения которого будет указан ниже.

Применяемый в этом приборе гальванометр имеет шкалу, аналогичную шкале гальванометра „модель № 3“, причем цена малого деления шкалы равна $5 \cdot 10^{-6}$ А. Ввиду того, что сопротивление цепи гальванометра равно 20Ω , цена деления шкалы в вольтах равна $5 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 0,1 \text{ mV}$.

Прибор предназначен для непосредственного измерения (без делителя разности потенциалов до 153 mV , из которых 150 mV отсчитываются на потенциометре и 3 mV — по гальванометру (милливольтметру), и в этом случае измеряемая разность потенциалов присоединяется к зажимам потенциометра, обозначенным „Shunt“. Если сопротивлением проводов, соединяющих источник измеряемой разности потенциалов с потенциометром, возможно пренебречь, то реостат ($6,3 \Omega$), входящий в цепь зажимов „Shunt“, ставится на положение 0; в этом случае в цепь гальванометра введено все сопротивление реостата $6,3 \Omega$ и потенциометр измеряет напряжение непосредственно на зажимах „Shunt“. Если сопротивлением проводов пренебречь нельзя, т. е. если необходимо измерить разность потенциалов на зажимах самого источника, то необходимо установить реостат так, чтобы все сопротивление вместе с проводами было равно 20Ω (реостат должен быть частично выведен на величину сопротивления потенциальных проводов).

При измерении напряжений свыше 153 mV измеряемое напряжение подается на зажимы специального делителя, предназначенного для потенциометра этой модели. Сопротивление $R_d \cdot \frac{n-1}{n^2}$ этого делителя поддерживается постоянным и равным около $6,53 \Omega$ для всех пределов измерения при посредстве серии сопротивлений, включаемых последовательно с потенциальным проводом, идущим от потенциометра. Общее сопротивление цепи гальванометра остается, как и раньше, равным 20Ω . Пределы измерения с делителем: 1,5; 3; 7,5; 15; 30; 75; 150 и 300 В. Для измерения напряжения свыше 300 В (до 750 В), фирма Лидс и Нортруп изготавливает специальное добавочное сопротивление.

Для измерения сил токов к потенциометру прилагаются шунты на 150 mV на силу тока до 0,75; 1,5; 3,0; 7,5; 15; 30; 75; 150; 300; 750 и 1500 А. Эти шунты, кроме последних трех, комбинированы в общем кожухе и к ним прилагаются специальные потенциальные провода. Сопротивление проводов должно быть точно измерено. При измерении токов концы от шунтов присоединяются к зажимам, обозначенным „Shunt“, и тогда реостат ($6,3 \Omega$) должен быть установлен на сопротивление, соответствующее данному шунту и его потенциальным проводам. При измерении сил токов этими шунтами, имеющими напряжение на зажимах при номинальном токе, равном 150 mV , величина измеряемого тока отсчитывается непосредственно по милливольтам потенциометра и умножается на указанный на шунте множитель. При применении каких-либо других шунтов (например, на 100 mV), величина измеряемого тока должна быть найдена соответственным пересчетом.

Сопротивление цепи гальванометра, устанавливаемое реостатом $6,3 \Omega$, как это уже было указано выше, оказывает непосредственное влияние на точность отсчета по гальванометру. Точность установки этого сопротивления проверяется перестановкой рычагов магазина на одно из соседних положений, причем произведенный в обоих случаях (на потен-

циометре и гальванометре) отсчет должен дать одну и ту же величину.

Правильность этого способа вытекает из следующих соображений. При положении рычага на делении k_1 и при отсчете по гальванометру α_1 делений вправо, $u_x = k_1 + c\alpha_1$ милливольт, где c — цена деления гальванометра в милливольт, равная $0,1 \text{ mV}$. При сопротивлении цепи гальванометра, равном $(20 \pm \Delta r) \Omega$, ток в цепи гальванометра $i = \frac{\Delta u_x}{20 + \Delta r} \text{ mA}$ (если Δu_x выражено в милливольт); Δu_x — та часть измеряемой разности потенциалов, которая отсчитывается по показанию гальванометра, т. е. $\Delta u_x = u_x - I_p \cdot r_1$, где I_p — ток рабочей цепи потенциометра. Но, так как $i = c'\alpha_1$, где α_1 — цена деления гальванометра, выраженная в миллиамперах, то $\alpha_1 = \frac{\Delta u_x}{(20 + \Delta r)c}$.

При постоянной гальванометра, по напряжению, равной $0,1 \text{ mV}$, и при сопротивлении его цепи, равном 20Ω , его токовая постоянная $c' = \frac{0,1}{20} = 0,005 \text{ mA}$. Подставляя это значение в предыдущее выражение, имеем:

$$\alpha_1 = \frac{\Delta u_x}{(20 + \Delta r) \cdot 0,005} = \frac{\Delta u_x}{0,1 + 0,005 \cdot \Delta r}.$$

Ввиду того, что стрелка гальванометра отклоняется вправо от нуля, измеренное напряжение больше, чем отсчет k_1 по декаде AB , в милливольт, и меньше, чем $(k_1 + 3) \text{ mV}$. Переместив рычаг на следующий контакт магазина, мы получим отклонение стрелки гальванометра влево от нуля на какое-то число делений α_2 . Разность между двумя соседними контактами магазина равна 5 mV , $u_x = (k_1 + 5 + 0,1\alpha_2) \text{ mV}$, и отсчет по гальванометру в этом случае аналогичен предыдущему:

$$\alpha_2 = \frac{\Delta u'_x}{0,1 \pm \Delta r \cdot 0,005} = \frac{5 - \Delta u_x}{0,1 + \Delta r \cdot 0,005}; \text{ так как } \Delta u'_x = 5 - \Delta u_x.$$

Разница между полученными в обоих случаях значениями измеряемого напряжения u_x равна

$$(u_x'' - u_x') = k_1 + 5 + 0,1\alpha_2 - (k_1 + 0,1\alpha_1) = 5 - 0,1(\alpha_2 - \alpha_1),$$

откуда, подставляя значения α_1 и α_2 , получаем:

$$(u_x'' - u_x') = 5 - 0,1 \cdot \frac{5 - \Delta u_x + \Delta u_x}{0,1 + \Delta r \cdot 0,005} = \frac{0,025 \cdot \Delta r}{0,1 + \Delta r \cdot 0,005} \text{ mV}.$$

Эта величина превращается в нуль только при $\Delta r = 0$, т. е. при сопротивлении цепи гальванометра, равном 20Ω . Чтобы упростить проверку и избежать необходимости производить подсчет, можно установить величину тока через шунт так, что отклонение стрелки гальванометра в одну сторону будет равно 25 делениям. Тогда, при правильно подобранном сопротивлении цепи гальванометра, отклонение стрелки в другую сторону при положении рычага магазина на соседнем контакте будет также равно 25 делениям.

Погрешности измерений на этом потенциометре, по данным фирмы Лидс и Нортруп, следующие:

1) погрешность отсчета по магазину, непосредственно зависящая от точности подгонки сопротивлений магазина, равна $0,02\%$ измеряемой величины;

2) погрешность отсчета на гальванометре, не превосходя 0,2 деления при небольшом показании, может возрасти до 0,4 деления при отсчете в 25—30 делений;

3) погрешность от неточности подгонки сопротивлений делителя равна $0,04\%$;

4) погрешность от неточности подгонки шунтов — $0,04\%$.

Из изложенного видно, что для уменьшения величины суммарной погрешности измерений весьма желательно уменьшить абсолютную вели-

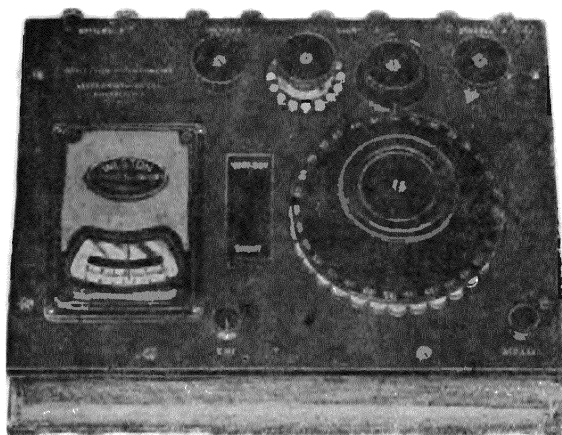


Рис. 58. Внешний вид потенциометра по Бруксу „модель № 7“.

чину отсчета по гальванометру так, чтобы относительная величина этого отсчета по отношению к отсчету по рычагу магазина была мала. Поэтому при выборе шунта и ступени делителя необходимо руководствоваться требованием, чтобы отсчет по магазину получался во-
можно больше. При малом отсчете по рычагу магазина точность измерения уменьшается, и потенциометр с неполной компенсацией теряет свое преимущество перед стре-

лочным прибором, выбранным на соответственный предел измерения.

Этот потенциометр получил большое распространение для проверки измерительных приборов: амперметров, вольтметров и ваттметров, а также в фотометрических лабораториях, где необходимо произвести быстрый

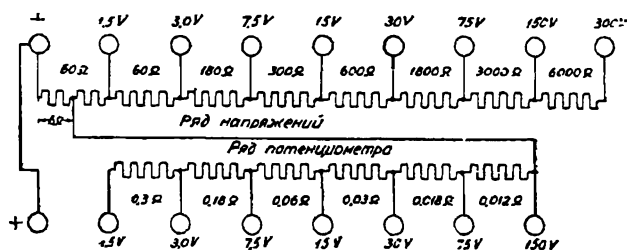


Рис. 59. Схема делителя напряжения к потенциометру мод. № 7.

отсчет напряжения при небольших колебаниях его величины от какого-то среднего значения.

Общий вид потенциометра по Бруксу „модель № 7“ показан на рис. 58.

Делитель напряжения, предназначенный для потенциометра „модель № 7“, отличается от делителя модели № 3. Величины его сопротивлений подобраны по тому же принципу, как и сопротивления делителя,

изображенного на рис. 56, но, так как величина сопротивления потенциометра „модель № 7“ меньше величины сопротивления модели № 3, то сопротивление делителя, присоединяемое к потенциометру, равно только 6Ω .

Рис. 59 поясняет вышесказанное. Значения, указанные между зажимами в ряду потенциометра (нижний ряд), соответствуют сопротивлению, вводимому в цепь потенциометра.

Потенциометр с неполной компенсацией по Карпентеру-Станфильду [119]

Фирма „Кэмбридж-Инструмент К⁰“ изготавливает потенциометры с отклонением, предназначенные специально для измерения электродвижущих сил термопар; схема соединений этого потенциометра показана на рис. 60. Как видно из схемы, в этом потенциометре не соблюдено усло-

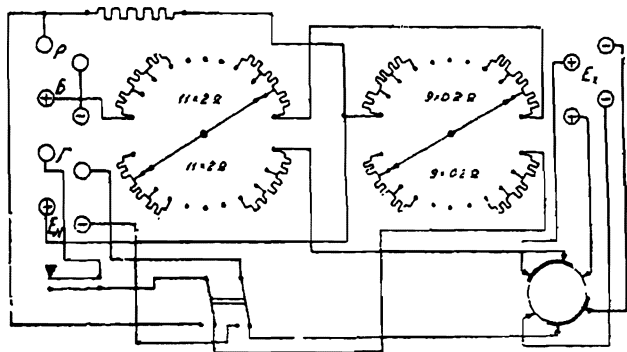


Рис. 60. Схема потенциометра фирмы „Кэмбридж Инструмент К⁰“ по Карпентеру-Станфильду.

вие постоянства сопротивления цепи гальванометра, так как ничем не уничтожается влияние регулировочных реостатов. Однако, величина погрешности измерения, вызываемая изменением сопротивления этих реостатов, не превышает величины той же погрешности в потенциометре „модель № 7“ Лидс и Нортруп, так как сопротивление собственно компенсационной цепи мало по сравнению с общим сопротивлением цепи батарей.

Компенсационная цепь потенциометра состоит из двух рычажных декад: декада I—11 катушек по 2Ω и декада II—9 катушек по $0,2 \Omega$; рабочий ток потенциометра— $0,0025 \text{ A}$ устанавливается по нормальному элементу на постоянном сопротивлении $407,32 \Omega$, т. е. допускается, что электродвижущая сила нормального элемента равна $1,0183 \text{ V}$. Ввиду того, однако, что электродвижущая сила нормального элемента может давать колебания в четвертом знаке после запятой (при изменении температуры), точность установки рабочего тока не превышает $0,01\%$. Для увеличения сопротивления цепи батареи введено добавочное сопротивление около 250Ω . В цепь гальванометра введено балластное сопротивление, величина которого изменяется в зависимости от положения

рычагов магазинов. Весь предел измерения этого потенциометра (считая 0,5 *mV* на гальванометре) равен 60 *mV*. Этот потенциометр применяется со специальным зеркальным гальванометром с сопротивлением катушек 25 Ω . При посредстве специального медного шунта, расположенного внутри гальванометра, достигнута регулировка, при которой отклонению 50 *мм* соответствует напряжение 0,5 *mV*. Специальный переключатель дает возможность быстро переключить гальванометр в цепь нормального элемента; второй переключатель позволяет производить попеременное измерение электродвижущих сил двух термопар. Питание этого потенциометра производится от одного аккумулятора, а регулировка тока — отдельным реостатом, прилагаемым к прибору.

Упрощенный потенциометр с неполной компенсацией Илиовиси

Стремясь сконструировать упрощенный потенциометр с неполной компенсацией и с точностью измерений, не превышающей 0,1%, Илиовиси (Ilievici) [77] произвел анализ погрешностей, возникающих от непостоянства сопротивления цепи гальванометра; сконструированный им потенциометр имеет предел измерения 1,8 V и предназначен для производства быстрых проверок амперметров и вольтметров.

Чтобы уяснить значение упрощений, сделанных Илиовиси, рассмотрим выведенное выше (стр. 73) уравнение тока в гальванометре

$$i = \frac{u_x - \frac{E_6}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1}{R_2 + \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}}.$$

Решая это уравнение относительно u_x , имеем:

$$u_x = \frac{E_6}{r_1 + r_2 + R} r_1 + iR_2 + i \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}.$$

Если гальванометр (милливольтметр) градуирован так, что его показания равны напряжению на его зажимах или на концах какого-то постоянного сопротивления, куда входит и гальванометр, то величина $iR_2 = u_x$ — отсчету по шкале гальванометра. Предыдущее выражение принимает вид:

$$u_x = \frac{E_6}{r_1 + r_2 + R} r_1 + u_x + i \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}.$$

Если величина третьего члена уравнения $i \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}$ такова, что его возможно пренебречь, то выражение для u_x принимает весьма простой вид:

$$u_x = \frac{E_6}{r_1 + r_1 + R} \cdot r_1 + u_x$$

и не зависит от сопротивления цепи гальванометра.

Разберем, каковы должны быть конструктивные данные потенциометра, чтобы можно было пренебречь величиной $i \cdot \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}$.

Найдем величину относительной ошибки ϵ при пренебрежении этим членом:

$$\epsilon = \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R} \cdot \frac{i}{u_x}$$

откуда, подставляя точное значение u_x , имеем:

$$\epsilon = \frac{r_1(r_2 + R) \cdot i}{E_0 \cdot r_1 + i R_2(r_1 + r_2 + R) + i \cdot r_1(r_2 + R)}.$$

Подставляя значение $u_2 = i R_2$ и заменив i — через u_2 / R_2 , имеем:

$$\epsilon = \frac{r_1(r_2 + R) \cdot u_2}{[E_0 \cdot r_1 + u_2 \cdot R_0 + i \cdot r_1(r_2 + R)] R_2}.$$

В этом выражении общее сопротивление цепи батареи $(r_1 + r_2 + R)$ обозначено через R_0 . Отбросив последний член знаменателя, можно написать:

$$\epsilon \leq \frac{r_1(r_2 + R) u_2}{(E_0 r_1 + u_2 \cdot R_0) R_2}.$$

Рассматривая это неравенство, мы видим, что величина относительной погрешности зависит от r_1 и от u_2 и возрастает с увеличением u_2 . Чем больше величина отсчета по гальванометру, тем больше относительная погрешность измерения. С другой стороны, погрешность равна нулю при $r_1 = 0$, т. е. при отсчете только по гальванометру, и при $(r_2 + R) = (R_0 - r_1)$, равном нулю, т. е. при $R_0 = r_1$. Этот последний случай практически неосуществим, так как R_0 всегда будет больше r_1 , но подойти к нему возможно достаточно близко. Между этими двумя предельными значениями r_1 выражение для ϵ имеет максимум для значения

$$r_1 = \frac{R_2 [\sqrt{u_2^2 + u_2 E_0} - u_2]}{E_0}.$$

Это выражение, ввиду малой величины u_2 по сравнению с E_0 , можно написать в упрощенном виде:

$$r_1 = R_0 \sqrt{\frac{u_2}{E_0}}.$$

Подставляя это значение r_1 в выражение для ϵ , получаем максимальное его значение:

$$\epsilon_{\max} \leq \frac{R_0 \cdot u_2}{R_2 [\sqrt{u_2} + \sqrt{u_2 + E_0}]^2}$$

или

$$\epsilon_{\max} \leq \frac{R_0 \cdot u_2}{R_2 (\sqrt{u_2} + \sqrt{E_0})^2}$$

и

$$\epsilon_{\max} \leq \frac{R_0}{R_2} \cdot \frac{u_2}{E_0} \left(1 - 2\sqrt{\frac{u_2}{E_0}}\right).$$

Из последнего выражения видно, что ϵ может быть сделано сколько угодно малым, если уменьшить, с одной стороны, отношение R_0/R_2 , т. е. отношение сопротивления цепи батареи к сопротивлению цепи гальванометра, и, с другой, отношение u_2/E_0 , т. е. отношение напряже-

ния на зажимах гальванометра к напряжению питающего источника. На основании всех этих соображений Илиовиси остановился на следующих конструктивных данных потенциометра: $R_6 = \text{около } 40 \text{ } \Omega$; $R = 300 \text{ } \Omega$; $u_2 = 0,01 \text{ V}$ и $E_6 = \text{около } 2 \text{ V}$.

Подставляя эти значения в выражение для r_1 , имеем при максимальном значении ϵ :

$$r_1 = 40 \sqrt{\frac{0,01}{2}} \cong 2,8 \text{ } \Omega,$$

что соответствует напряжению $0,14 \text{ V}$ так как рабочий ток

$$I_p = \frac{E_6}{R_6} = \frac{2}{40} \text{ A},$$

$$\epsilon_{\max} = \frac{40 \cdot 0,01}{300 \cdot 2} \left(1 - \sqrt{\frac{2}{200}}\right)$$

или

$$\epsilon \leq 0,0006 \text{ V},$$

т. е. в самом невыгодном случае величина систематической погрешности не превышает $0,6\%$ для величины измеряемого напряжения, равной $0,14 \text{ V}$. Для большей величины измеряемого напряжения относительная погрешность измерения будет еще меньше.

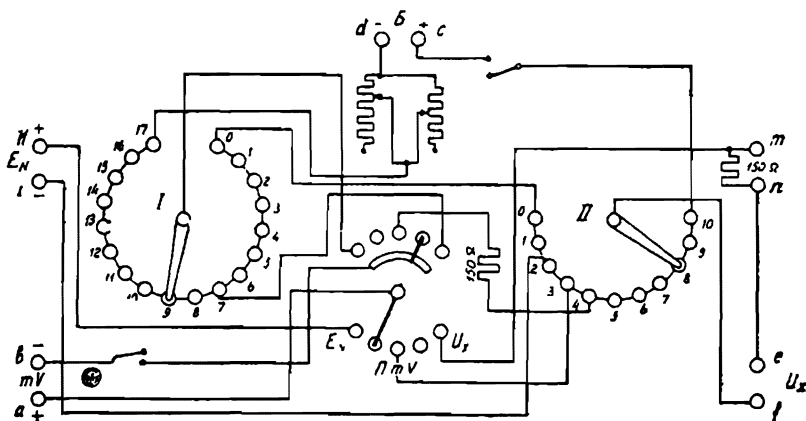


Рис. 61. Схема соединений потенциометра Илиовиси.

Схема соединений этого потенциометра показана на рис. 61. Компенсационная цепь этого потенциометра состоит из двух рычажных деkad: первой (I) из 17 катушек, сопротивлением около $2 \text{ } \Omega$ каждая, и второй (II) из 10 катушек, сопротивление каждой из которых равно $0,1$ сопротивления катушек декады (I). Для установки рабочего тока предусмотрены два включенные параллельно реостата: отдельно для грубой и тонкой регулировки. Как видно из схемы, в потенциометре есть особый переключатель на три направления, позволяющий переключать милливольтметр (гальванометр) либо направо на измеряемую разность потенциалов u_x , либо налево на нормальный элемент E_N , либо на среднее положение mV , предусмотренное для проверки правильности показа-

ний милливольтметра, для чего он присоединяется к контактам 3—4 декады II. Ввиду того, что при правильно установленном рабочем токе (около 0,05 А) разность потенциалов между этими контактами равна 0,01 В, милливольтметр при правильной градуировке должен дать показание 100 делений. Из схемы видно, что, как при проверке шкалы милливольтметра, так и при измерении u_x , последовательно с гальванометром включено добавочное сопротивление 150 Ω , т. е. милливольтметр градуируется при сопротивлении $R_r' + 150$, которое составляет $R_r = 300$, что легко получить предварительным расчетом. При установке рабочего тока по нормальному элементу (левое положение переключателя) милливольтметр, вернее в данном случае гальванометр, служит нулевым прибором и добавочного сопротивления не имеет. Чтобы иметь возможность применять этот потенциометр с делителем напряжения, необходимо подсчитать дополнительную погрешность, которая может появиться от изменения схемы.

Из ранее выведенной формулы мы имеем величину силы тока в гальванометре

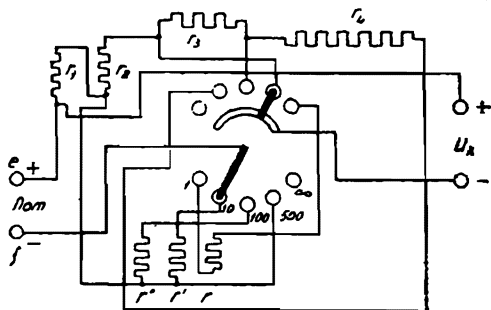


Рис. 62. Схема делителя Илиовиси.

$$i = \frac{\frac{u_x}{n} - \frac{E_0}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1}{R_0 \cdot \frac{n-1}{n^2} + R_2' + \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}},$$

откуда

$$u_x = n \left\{ \frac{E_0}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1 + \left[R_0 \cdot \frac{n-1}{n^2} + \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R} + R_2' \right] i \right\}.$$

Отбрасывая, как и ранее $\frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}$, получаем:

$$u_x = n \left\{ \frac{E_0}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1 + \left(R_0 \cdot \frac{n-1}{n^2} + R_2' \right) i \right\}$$

и, если

$$\left(R_0 \cdot \frac{n-1}{n^2} + R_2' \right) = R_2 = 300 \, \Omega,$$

то величина u_x равняется сумме отсчетов по движкам потенциометра и по миллиамперметру, умноженной на множитель делителя n . При включении потенциометра с делителем, добавочное сопротивление 150 Ω в потенциометре замыкается накоротко, но зато сопротивление делителя при всех положениях его переключателя равно 150 Ω . Верхняя панель делителя с нанесенной схемой соединений показана на рис. 62. Предел измерения потенциометра (1,8 В) с применением делителя расширяется до 18, 180 и 900 В. Этот же потенциометр может быть применен и для измерения сил токов, иначе для измерения разности потенциалов на зажимах образцовых сопротивлений (шунтов). Сопротивление

цепи гальванометра при этом изменяется. Из ранее выведенной формулы имеем величину силы тока в гальванометре:

$$i = \frac{I_x R_{ш} - \frac{E_0}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1}{R_{ш} + R_2 \cdot \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R}}$$

откуда

$$I_x = \left\{ \frac{E_0}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1 + i \left(R_{ш} + R_2 + \frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R} \right) \right\} \cdot \frac{1}{R_{ш}}.$$

Отбрасывая, как и ранее,

$$\frac{r_1(r_2 + R)}{r_1 + r_2 + R},$$

имеем:

$$I_x = \left\{ \frac{E_0}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1 + i(R_2 + R_{ш}) \right\} 1/R_{ш}.$$

Величина сопротивления шунта $R_{ш}$ мала по сравнению с сопротивлением $R_2 = 300 \Omega$, и, отбрасывая эту величину, мы имеем:

$$I_x' = \left(\frac{E_0}{r_1 + r_2 + R} \cdot r_1 + i \cdot R_2 \right) 1/R_{ш}.$$

Это выражение может быть представлено в виде

$$I_x' = \frac{\frac{E_0}{r_1 + r_2 + R} + iR_2 + iR_{ш}}{R_{ш}} - i \frac{R_{ш}}{R_{ш}} = I_x - i = I_x \left(1 - \frac{i}{I_x} \right),$$

т. е. мы делаем в этом случае ошибку, составляющую $\frac{i}{I_x} \cdot 100$, в процентах. Чтобы погрешность измерения не превышала $0,1\%$, необходимо, чтобы $\frac{i}{I_x} \leq 0,001$; откуда $I_x \geq 1000 i$. Величина тока в гальванометре i в самом худшем случае не превысит $\frac{0,01}{300}$ (при показании гальванометра $10 \text{ мА} = 100$ делениям), т. е. $\frac{1}{30\,000} \text{ А}$. На основании предыдущего, величина измеряемого тока должна быть не меньше $\frac{1\,000}{30\,000} = \frac{1}{30} \text{ А}$. Таким образом токи свыше $0,033 \text{ А}$ могут быть измерены на этом потенциометре с точностью не ниже $0,1\%$.

Этот потенциометр изготавливается фирмой „Компания производства счетчиков“ в Париже (Compagnie pour la fabrication des compteurs).

ГЛАВА VII

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ

В последние годы применение потенциометров в промышленности получило очень большое распространение, и количество применяемых технических потенциометров значительно превышает число лабораторных. Это отнюдь не объясняется меньшим применением потенцио-

метров для точных лабораторных измерений, где, конечно, потенциометр остается одним из самых распространенных и точных приборов.

Распространение потенциометров в промышленности объясняется большим развитием промышленного типа потенциометров либо в виде переносных потенциометров с указателем, либо в виде потенциометров автоматических с непрерывной записью отсчета.

Технические потенциометры упрощенного типа применяются в промышленности для следующих измерений: 1) упрощенные поверки измерительных приборов постоянного тока: амперметров, вольтметров, ваттметров, гальванометров; 2) измерения термоэлектродвижущих сил технических термопар; 3) не требующие большой точности измерения разностей потенциалов на зажимах источников, не позволяющих потреблять какой-либо ток, например, определение щелочности или кислотности раствора (определение концентрации водородных ионов — PH).

Эти потенциометры строятся обычно переносного типа. Они могут гарантировать значительно меньшую точность измерения, чем потенциометры лабораторного типа, не требуют установки чувствительных гальванометров, и обращение с ними значительно проще, чем с потенциометрами большой точности.

Технические потенциометры для всех упомянутых видов измерений применяются на электрических станциях для проверок электро-динамических и магнито-электрических приборов, в заводских лабораториях и на производстве для проверки термопар и пр.

Технические потенциометры изготовляют многие фирмы, однако здесь мы опишем только небольшое количество конструкций. Они изготовляются либо как потенциометры с неполной компенсацией, например, „ступенчатый потенциометр по Шмидту“, либо — по схеме, аналогичной схеме Линдек и Ротэ, без применения нормального элемента (например, описанный ниже потенциометр Сименс и Гальске, рабочий ток в котором устанавливается по миллиамперметру), либо, наконец, в виде обычного потенциометра с нулевым отсчетом и с применением нормального элемента, но только для некоторых определенных значений измеряемой величины (например, потенциометр профессора Пономарева — завода „Электроприбор“). Некоторые фирмы („Кембридж-Инструмент К⁰“ и „Вестон“) изготовляют технические потенциометры, в которых питание производится от измеряемого источника. Этот тип потенциометра применяется главным образом для проверки вольтметров.

Специальные технические потенциометры, предназначенные для измерения термоэлектродвижущих сил технических термопар на месте установки, имеют особую схему, корректирующую влияние температуры холодного спая (потенциометры завода „Пирометр“ и Лидс и Нортруп).

Кроме перечисленных видов потенциометров, очень большое применение имеют потенциометры автоматические или с непрерывной записью отсчета, или с управлением режимом работы установки (например, печи). Эти потенциометры имеют специальное назначение и подробное описание их не входит в нашу задачу.

Ступенчатый потенциометр по Шмидту

Фирма Сименс и Гальске изготовляет специальный, так называемый, ступенчатый потенциометр, разработанный Р. Шмидтом (Dr.

R. Schmidt PTR) [116] специально для проверок образцовых приборов. Рабочая цепь этого потенциометра состоит из одного особой конструкции рычажного магазина *I* и неизменяемого сопротивления *R*.

Установка рабочего тока потенциометра производится по нормальному элементу, для присоединения которого имеется специальный добавочный магазин *II*, предусматривающий применение нормальных элементов, имеющих электродвижущую силу от 1,0177 до 1,0189 В (через 0,0003 В).

Схема соединений этого потенциометра ясна из рис. 63. Реостаты для регулирования рабочего тока встроены в потенциометр. Гальванометр, применяемый в этом потенциометре, магнито-электрический на

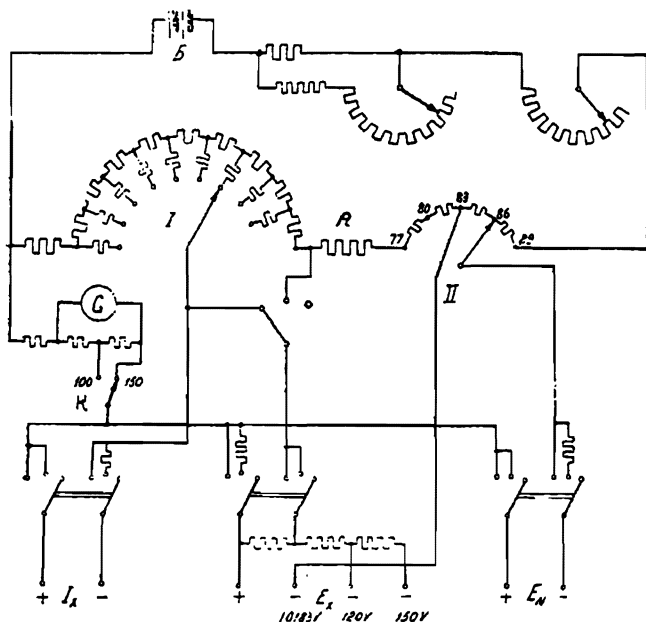


Рис. 63. Схема ступенчатого потенциометра по Шмидту.

растяжках и помещен внутри потенциометра, как и освещающая его зеркало лампа. Отсчет производится на полупрозрачной шкале, длиной 40 мм, имеющей 20 делений (по 10 делений вправо и влево от 0), помещенной на верхней крышке потенциометра. Гальванометр имеет цену деления около 0,06 мА при критическом сопротивлении 2000 Ω, и время успокоения не более 1,7 сек.

Особенностью этого потенциометра является его применение в качестве потенциометра с отклонением при проверке образцовых приборов на точках, обозначенных цифрами. Так, например, для проверки вольтметров, номинальное напряжение которых равно 300 мВ, имеются зажимы (обозначенные на схеме I_x), подав на которые потенциальные концы от прибора и устанавливая рычаг магазина на деление, соответствующее показанию шкалы прибора, можно прочесть погрешность его показаний непосредственно по шкале гальванометра. Контакты ры-

чажной декады имеют цифры, соответствующие делениям шкалы от 10 до 100 и от 15 до 150, у гальванометра же имеется обозначенный „Skala“ (шкала) переключатель k_1 с двумя контактами на 100 и 150, в зависимости от положения которого приходится применять тот или другой ряд цифр рычажной декады I . При рабочем токе, установленном по нормальному элементу, крайний контакт (100 или 150) декады соответствует напряжению 300 mV. Чтобы чувствительность гальванометра при всех положениях рычага I оставалась неизменной, у каждого контакта имеются особые добавочные сопротивления, не равные между собою, благодаря чему замыкающее гальванометр сопротивление при перемещении рычага не изменяется.

Градуировка шкалы гальванометра такова, что одному делению ее соответствует 0,3 или 0,2 mV в зависимости от положения переключателя k_1 на указателе 100 или 150. При номинальном напряжении поверяемого прибора, равном 300 mV, на шкале, имеющей 100 или 150 делений, одному делению шкалы прибора соответствует 3 или 2 mV; таким образом, отсчет поправки в одно деление, прочитанное по шкале гальванометра, равен 0,1 цены деления поверяемого прибора, а вся шкала—10 делений—соответствует поправке в одно деление шкалы.

Для проверки вольтметров на 120 и 150 V в потенциометре имеется делитель напряжения, и выведенные на верхнюю панель потенциометра зажимы для подвода напряжения имеют обозначения: $E_x = 1,0183$, $E_x = 120$ и $E_x = 150$ V. Зажим 101,83 присоединен к неизменяемой части магазина и позволяет при наличии нормального элемента с электродвижущей силой, равной 1,0183 V, устанавливать рабочий ток, не пользуясь зажимами нормального элемента (+ E_N —).

Проверка вольтметра на 120 или на 150 V, имеющего шкалу на 100 или 150 делений, аналогична проверке прибора на 300 mV; если же шкала поверяемого прибора имеет какое-либо другое число делений a , то проверка погрешности его показанием гальванометра также возможна, для чего при переключателе k на положении 100 рычаг магазина I должен быть установлен на положение, соответствующее показанию прибора, умноженному на $a/100$, причем для определения поправки прибора отсчет по гальванометру должен быть также умножен на $1/10 \times a/100$.

Для проверки амперметров и ваттметров изготовляющая потенциометр фирма предлагает также набор образцовых шунтов на: 0,5; 1,0; 1,25; 2,0; 2,5; 5,0; 10,0; 12,5; 20; 25 и 50 A, помещаемых в одном ящике; напряжение на зажимах этих образцовых шунтов при их номинальных токах равно 300 mV. Потенциальные провода от шунтов присоединяются к зажимам I_x . Этот потенциометр достаточно точен и удобен при проверке приборов, соответствующих указанным на потенциометре номинальным напряжениям (токам). Проверка приборов на другие пределы измерения с достаточной точностью невозможна. Изготовляющая прибор фирма предлагает в этом случае производить проверку нулевым методом, устанавливая гальванометр на нуль, изменяя напряжение (или ток), питающее поверяемый прибор. Отсчет поправки прибора прочитывается при этом по самому поверяемому прибору, что, конечно, не гарантирует достаточной точности.

Технический потенциометр фирмы Сименс и Гальске

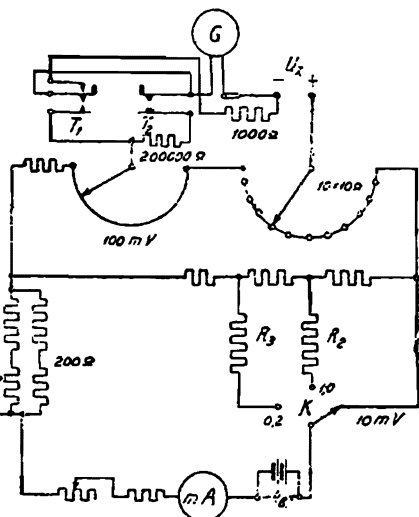
Ввиду того, что при измерениях на производстве не всегда желательно применять нормальный элемент, отзывающийся на изменение температуры и на тряску, Кэсслер и Крёнерт (Ch. Kessler u. Dr. I. Kröpert) [80] разработали технический потенциометр, величина рабочего тока которого устанавливается не по нормальному элементу, а по точному миллиамперметру, и точность измерения потенциометра ограничивается точностью измерений стрелочного миллиамперметра, особенностью которого является то, что для увеличения точности его шкала укорочена и ноль на шкале не обозначен (он выходит за пределы шкалы); стрелка прибора устанавливается корректором при его поверке не на ноль, а на точное значение требуемого тока. Потенциометр с установкой рабочего тока по подобному миллиамперметру изготовляет в настоящее время фирма Сименс и Гальске (Siemens u. Halske). На рис. 64 показана его схема. Компенсационная цепь состоит из рычажной декады, состоящей из 10 катушек, сопротивлением 10Ω каждая, и из калиброванной проволоки, общим сопротивлением 10Ω . Рабочий ток этого потенциометра — 5 mA — устанавливается по миллиамперметру при посредстве встроенных в прибор реостатов. Потенциометр имеет три предела измерения:

от 0 до 22 mV , от 0 до 110 mV и от 0 до 1100 mV , и переключение на различные пределы измерения производится простой перестановкой соответствующего переключателя k , причем шкала декад потенциометра градуирована непосредственно в милливольтх, а положение переключателя k указывает множитель шкалы. Питание этого потенциометра должно производиться от батареи аккумуляторов напряжением 4 V .

Рис. 64. Схема технического потенциометра фирмы Сименс и Гальске.

Миллиамперметр и гальванометр встроены в прибор. Для защиты от повреждения большим током гальванометр зашунтирован сопротивлением 1000Ω и, кроме того, при нажатии на ключ T_2 замыкается через предохранительное сопротивление $20\,000 \Omega$; при нажатии на ключ T_1 шунтирующее и предохранительное сопротивления отключаются. Прибор — переносного типа в металлическом ящике с крышкой.

Благодаря своим пределам измерения этот потенциометр пригоден для проверок милливольтметров и для измерений термоэлектродвижущих сил термопар.



Потенциометр фирмы Шовэн-Арну

Фирма Шовэн-Арну (Chauvin-Arnoux, Paris) [21] изготавливает технический потенциометр специально для проверки измерительных приборов на определенных точках шкалы. У этого потенциометра нет ни рычажных, ни скользящих контактов, он имеет ряд зажимов, соответствующих определенным разностям потенциалов; фирма изготавливает потенциометры для проверки различных, по желанию заказчика, точек шкал проверяемых приборов. Нормальный тип потенциометра Шовэн-Арну имеет обозначение зажимов: $+$, 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 и 0,1 с левой стороны прибора (рис. 65) и $+$, 2; 20; 100; 200 и 300 В с правой.

Питание потенциометра производится через зажимы „ $+$ “ и любой из остальных контактов правой стороны в зависимости от применяемого источника. Установка рабочего тока производится по нормальному эле-

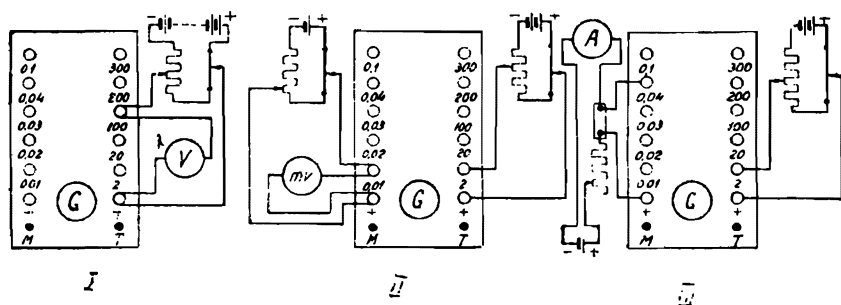


Рис. 65. Схема проверки приборов на потенциометре фирмы Шовэн-Арну.

менту при посредстве стрелочного гальванометра. Нормальный элемент и гальванометр встроены в прибор.

При проверке вольтметра (рис. 65, схема I), питание потенциометра производится через зажимы, к которым присоединяется и проверяемый прибор. Установив рабочий ток по нормальному элементу, можно погрешность прибора определить по отсчету на самом проверяемом приборе, так как действительное значение отсчета соответствует напряжению, указанному на зажиме.

При проверке милливольтметра и амперметра с шунтом проверяемый объект присоединяется к зажиму „ $+$ “ и к соответственному зажиму левой стороны; питающий же источник, как и раньше, присоединяется к зажимам правой стороны (рис. 65, схемы II и III). Поправка проверяемого прибора, как и раньше, определяется по отсчету на приборе. Определение поправок шкалы прибора по самому прибору является недостатком этого потенциометра, и он, безусловно, более применим в тех случаях, когда прибор градуируется, а не проверяется, т. е., когда по точным значениям наносятся точки шкалы, установка же поправки прибора по его отклонению от действительного значения достаточной точности гарантировать не может.

Переносный потенциометр для проверки вольтметров, фирмы „Кэмбридж-Инструмент К⁰“

Этот простой потенциометр переносного типа [18] предназначен для проверки вольтметров; его особенностью является то, что питание производится от того же источника, от которого питается и проверяемый вольтметр, причем для установки рабочего тока пользуются не внешними реостатами (как в потенциометре Шовэн-Арну), а самими же магазинами потенциометра; таким образом сопротивление цепи рабочего тока между зажимами и потенциометра (рис. 66) непостоянно и меняется в зависимости от величины измеряемого напряжения.

Сила рабочего тока устанавливается по нормальному элементу, который присоединен к неизменяемому сопротивлению $R = 203,66 \text{ } \Omega$. Если считать, что проверка производится при температуре, близкой к 20°C , электродвижущую силу нормального элемента можно считать равной $1,0183 \text{ V}$, и тогда сила рабочего тока при равновесии подвижной части гальванометра равна $1,0183 : 203,66 = 0,005 \text{ A}$.

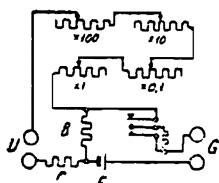


Рис. 66. Схема технического потенциометра фирмы „Кэмбридж-Инструмент К⁰“.

Отсчет величины измеряемого напряжения производится непосредственно по движкам декад потенциометра, которых имеется четыре: 1) декада на сотни вольт, состоящая из 8 катушек, сопротивлением $20000 \text{ } \Omega$ каждая, 2) декада на десятки вольт, состоящая из 10 катушек, сопротивлением $2000 \text{ } \Omega$ каждая, 3) декада на вольты (от 2 до 10), состоящая из 10 катушек, сопротивлением $200 \text{ } \Omega$ каждая и 4) декада на доли вольта, состоящая из 10 катушек, сопротивлением $20 \text{ } \Omega$ каждая.

Наименьший отсчет этого потенциометра равен 2 V ; ввиду того, что сопротивление между зажимами и потенциометра при этом измеряемом напряжении должно быть равно $\frac{2}{0,005} = 400 \text{ } \Omega$, в потенциометре предусмотрено добавочное сопротивление $r = 400 - 203,66 = 196,34 \text{ } \Omega$ (см. схему - рис. 66).

Этот потенциометр может применяться для проверки вольтметров и для измерения напряжения источника, позволяющего потребление тока $0,005 \text{ A}$. Гарантируемая им точность при измерении напряжений порядка сотен вольт равняется $\pm 0,1\%$. Верхний предел измеряемого напряжения — 813 V .

Потенциометр профессора Н. Н. Пономарева для градуировки и проверки приборов

Этот потенциометр [109] предназначен для простой проверки магнито-электрических измерительных приборов, причем отсчет получается непосредственно в десятках делений и десятых долях этих делений. По схеме этот потенциометр сходен с потенциометрами для измерения термоэлектродвижущих сил, например, с потенциометром Гаусрата. Схема (рис. 67) объясняет устройство этого потенциометра. Ток от питающей батареи B , пройдя регулировочный реостат и неизменяемое сопротивление для установки рабочего тока, разветвляется на две ветви.

Сопротивление правой ветви в десять раз меньше сопротивления левой, так что ток в правой ветви в десять раз больше тока в левой.

Вся компенсационная цепь потенциометра состоит из магазина правой ветви *I* и магазина левой ветви *II*. Сопротивление одной катушки магазина *II* равно $4\ \Omega$; это сопротивление в десять раз меньше сопротивления одной катушки магазина *I*, благодаря чему падение напряжения на одной катушке магазина *I* в 100 раз больше напряжения на одной катушке магазина *II*.

Установка рабочего тока потенциометра может производиться на двух сопротивлениях соответственно двум пределам измерения — 45 мВ и 60 мВ . Как было указано в главе V, при такой схеме потенциометра измеряемое напряжение равно разности напряжений на обеих параллельных ветвях. Чтобы иметь возможность получить положительные и отрицательные поправки поверяемого прибора, декада имеет 0

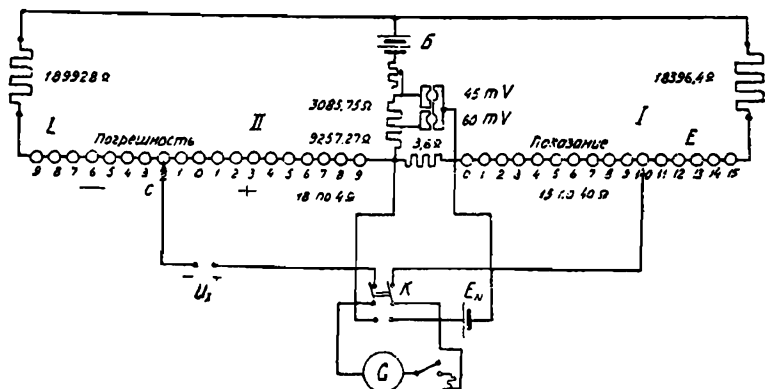


Рис. 67. Схема потенциометра проф. Пономарева.

посередине и, чтобы при положении рычагов обеих половин потенциометра на нуле измеряемая разность потенциалов была равна нулю, в правой ветви имеется постоянное сопротивление, величина которого равна сопротивлению 9 катушек декады *II*, деленной на десять. Благодаря подобному расположению нуля, отсчет по *II* декаде дает положительную и отрицательную погрешность в десятых долях деления шкалы.

Таким образом при проверке прибора на 45 или на 60 мВ , имеющего 150 делений шкалы, можно проверить каждое деление шкалы прибора, обозначенное цифрой, и получить погрешность показаний по *II* декаде в долях деления шкалы. Количество катушек в магазине *II* вправо и влево от нуля, равное девяти, выбрано из расчета наибольшей допустимой погрешности прибора класса 0,5, равной $\pm 0,5\%$ от всей шкалы. При числе делений шкалы, равном 150, эта погрешность соответствует 0,75 деления, и наибольшая погрешность — 0,9 деления, отсчитываемая на потенциометре, дает небольшой запас в обе стороны.

Для удобства отсчета обозначения на контактах декады *I* и декады *II* показаны не в вольтах, а в десятках (декада *I*) и в десятых долях (декада *II*) деления шкалы.

На заводе „Электроприбор“ был выполнен потенциометр и с другими величинами сопротивлений по схеме, вполне сходной с описанной. Для большей плачности компенсирования рычажная декада II заменена проволочным реохордом. Декада I вместо контактов имеет ряд штепсельных гнезд, и положение штепселя в данном гнезде соответствует определенному положению рычага.

Описанный потенциометр пригоден для поверки и градуировки определенных приборов, для которых он сконструирован. Точность отсчета на нем для поверки приборов класса 0,5 совершенно достаточна и равна $0,1^{0'}_0$ на средней части шкалы поверяемого прибора

Техническое компенсационное устройство для поверки приборов фирмы Вестон

Этот потенциометр [104] имеет принципиальное сходство с техническим потенциометром „Кэмбридж-Инструмент К⁰“, и его питание производится от того же источника, что и питание поверяемого объекта (рис. 68).

Установка рабочего тока производится при посредстве гальванометра по нормальному элементу, присоединенному к зажимам неизменяемого сопротивления $101,83 \text{ } \Omega$ через ключ *k*. Таким образом сила рабочего тока этого потенциометра равняется $0,01 \text{ A}$.

Компенсационная цепь потенциометра состоит из упомянутого выше сопротивления $101,83 \text{ } \Omega$, образцового прибора, сопротивлением $28,17 \text{ } \Omega$, и небольшого штепсельного магазина *S* с тремя катушками, сопротивлением 20, 50 и $150 \text{ } \Omega$.

Сопротивление компенсационной цепи при всех трех штепселях, вставленных в гнезда, равно $101,83 + 28,17 = 130 \text{ } \Omega$, и при двух вынутых штепселях — на точках 20 и $50 \text{ } \Omega$ — $200 \text{ } \Omega$. Ввиду того, что рабочий ток *I* равен $0,01 \text{ A}$, на каждые $100 \text{ } \Omega$ сопротивления компенсационной цепи приходится разность потенциалов 1 V , и каждым $200 \text{ } \Omega$ соответствует 2 V . Два вольта являются наименьшим напряжением, которое возможно компенсировать этим потенциометром Вестона.

Для расширения пределов измерения имеется добавочное сопротивление *vw* (рис. 69), изготовленное в виде трехдекадного магазина — $10 \times 100 \text{ } \Omega$; $10 \times 1000 \text{ } \Omega$ и $10 \times 10000 \text{ } \Omega$, включаемое последовательно с описанной компенсационной цепью потенциометра. Магазин градуирован непосредственно в вольтах, и, ввиду того, что напряжение 2 V компенсируется прямо на основной компенсационной цепи, первый контакт первой декады *I* имеет обозначение 2.

Потенциометр имеет вид лабораторного миллиамперметра Вестона (большая модель); штепсельный магазин *S*, неизменяемое сопротивление нормального элемента и ключ гальванометра помещены в самом приборе.

При поверке вольтметра, поверяемый прибор присоединяется параллельно всей цепи потенциометра. Меняя подаваемое напряжение, добиваются равновесия гальванометра, включенного в цепь нормального элемента, передвигая рычаги магазина *vw*. Необходимо заметить, что для предохранения нормального элемента от вредного для него тока, до нажатия ключа гальванометра, необходимо предварительно установить

величину рабочего тока приблизительно по миллиамперметру. Отсчет на трехдекадном магазине должен соответствовать номинальному значению измеряемого напряжения. Если показание миллиамперметра после установки рабочего тока по нормальному элементу не равно 10 мА, необходимо при помощи корректора поставить стрелку на показание 10. При дальнейших измерениях, например, при поверке вольтметра на других точках шкалы, нет необходимости проверять каждый раз рабочий ток по нормальному элементу; достаточно поддерживать постоянный отсчет (равный 10 мА) на образцовом миллиамперметре.

Внутренняя схема соединений потенциометра и присоединение его к питающей цепи показаны на рис. 68, а полная схема при поверке вольтметра — на рис. 69, причем отсчет погрешности производится по самому поверяемому вольтметру.

При поверке амперметра поверяемый прибор включается в цепь последовательно с образцовым шунтом. Питание потенциометра произ-

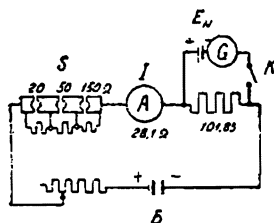


Рис. 68. Принципиальная схема соединений потенциометра фирмы Вестон.

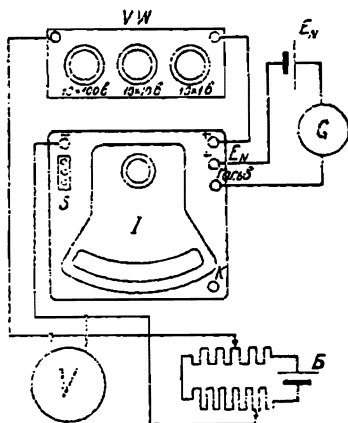


Рис. 69. Поверка вольтметра на потенциометре фирмы Вестон.

водится от потенциальных зажимов шунта, и в этом случае происходит разветвление измеряемого тока I_x на ток в образцовом сопротивлении I_0 и на рабочий ток потенциометра I . Чтобы последний, как и раньше, был равен 0,01 А, имеется специальное корректирующее сопротивление, величина которого различна для каждого образцового сопротивления.

Образцовые сопротивления, применяемые с этим потенциометром, имеют при номинальном токе большую разность потенциалов — 3В. Подсчет величины корректирующего сопротивления производится на основании следующих рассуждений. Сопротивление обеих параллельных ветвей.

$$R = \frac{R_{ш} (130 + s + cw)}{R_{ш} + 130 + s + cw},$$

где s — введенное сопротивление штепсельного магазина, cw — величина корректирующего сопротивления, $R_{ш}$ — величина образцового сопротивления и 130 Ом — сопротивление потенциометра со всеми вставленными

штепселями. Обозначив падение напряжения на зажимах образцового шунта через u , имеем:

$$I_x \cdot \frac{R_w \cdot (130 + s + cw)}{R_w + 130 + s + cw} = u,$$

а рабочий ток потенциометра

$$I = \frac{u}{130 + s + cw} = 0,01 \text{ A},$$

или

$$I = I_x \cdot \frac{R_w \cdot (130 + s + cw)}{(R_w + 130 + s + cw)(130 + s + cw)} = 0,01 \text{ A}.$$

Из последнего выражения можно найти значение $s + cw$, необходимое для того, чтобы рабочий ток был равен 0,01 А —

$$(s + cw) = \frac{I_x R_w - (130 + R_w) 0,01}{0,01} \Omega.$$

Ввиду того, что разность потенциалов на зажимах образцового сопротивления при номинальном токе должна быть равна 3 В, сопротивление его на номинальный ток I находится из выражения:

$$(I_x - I) R_w = 3 \text{ В},$$

откуда для номинального тока 10 А —

$$R_w = \frac{3}{I_x - I} = \frac{3}{10 - 0,01} = \frac{3}{9,99} = \frac{1}{3,33} = 0,3003 \Omega.$$

Подставляя значения I и R_w в выражение для $(s + cw)$, имеем:

$$(s + cw) = \frac{3,003 - 1,303003}{0,01} = 170 \Omega.$$

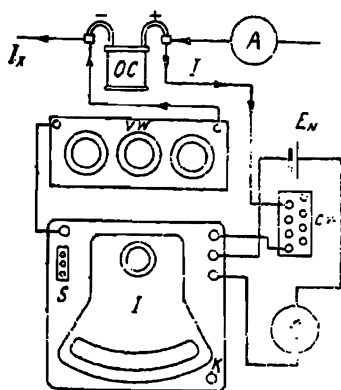


Рис. 70. Проверка амперметра на потенциометре фирмы Вестон.

Эта величина может быть установлена на штепсельном магазине s при $cw = 0$.

Для упрощения подсчета при различных силах измеряемого тока при потенциометре имеются специальные таблицы, дающие подбор добавочных сопротивлений $(s + cw)$ для каждого тока.

Схема соединений при проверке амперметров показана на рис. 70.

Необходимо заметить, что находящийся в схеме добавочный магазин vw в этом случае должен стоять на своем нулевом положении (показание 2 В).

Этот потенциометр достаточно удобен для проверки вольтметров, производство же проверки амперметров менее удобно вследствие необходимости подбирать величины сопротивлений $(s + cw)$, что даже при наличии упомянутых специальных таблиц увеличивает время проверки и усложняет работу.

Технические потенциометры завода „Пирометр“ типов Π_c и Π_m

Потенциометры завода „Пирометр“ обоих упомянутых типов предназначены для измерения термоэлектродвижущих сил технических термопар. Особенностью этих потенциометров является применение одного и того же прибора и в качестве нулевого прибора — гальванометра и как миллиамперметра, служащего для грубой предварительной установки силы рабочего тока потенциометра, для чего в этом случае прибор включается с добавочным сопротивлением и шунтом (рис. 71). Эти потенциометры изготовляются на пределы измерения от 19 до 2881 мВ. Имеющиеся в потенциометре два рычажных реостата (у типа Π_c) или две одинаковые штепсельные декады (у типа Π_m — I и II на рис. 71) позволяют расширять предел измерения потенциометром. Область применения их: измерения электродвижущих сил технических термопар в заводских лабораториях и поверка измерительных приборов.

Применяемый с потенциометром стрелочный гальванометр типа ГПЛП с зеркальным отсчетом, с нулем посередине шкалы, имеет цену одного деления шкалы порядка $6 \cdot 10^{-7}$ А.

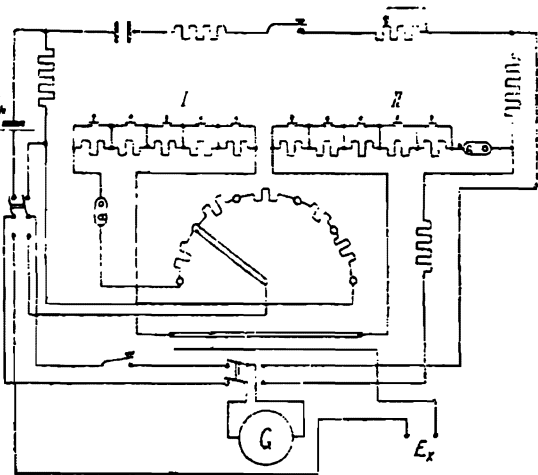


Рис. 71. Схема технического потенциометра завода „Пирометр“.

Пираметр завода „Пирометр“

Так называемый пирамметр, изготавливаемый заводом „Пирометр“, представляет собой портативный заводский потенциометр переносного типа, применяемый для измерения термоэлектродвижущих сил термопар. В основу принципиальной схемы этого потенциометра положена схема Линдек и Ротэ. Компенсация измеряемой разности потенциалов производится не изменением величины компенсационного сопротивления, по которому проходит постоянный по величине рабочий ток, а изменением силы рабочего тока. Компенсируемая электродвижущая сила присоединяется к постоянному сопротивлению. Имеющийся в этом приборе встроенный стрелочный зеркальный гальванометр служит попеременно нулевым гальванометром при компенсации измеряемой термоэлектродвижущей силы термопары и миллиамперметром для измерения силы рабочего тока в момент компенсаций. Чтобы рабочий ток при переключении гальванометра оставался без изменения, имеется переключатель, включающий замещающее гальванометр (миллиамперметр) сопротивление при работе его в качестве нулевого прибора.

Как это видно из схемы соединений пирамметра (рис. 72), в нем имеются три катушки сопротивления, дополняющие друг друга и позволяющие расширить шкалу прибора. Для получения более плавной регулировки тока в контуре пирамметра питание производится при помощи мостика Уитстона и двойного рычажного реостата, благодаря чему удастся достигнуть более точной установки на нуль стрелки нулевого прибора и повысить точность измерения. Ввиду того, что отсчет измеряемой величины производится непосредственно по гальванометру, его шкала градуирована прямо либо в милливольттах, либо в градусах температурной шкалы (по желанию заказчика). Этот потенциометр изготавливается на различные пределы измерения от 0—10 до 0—61 mV.

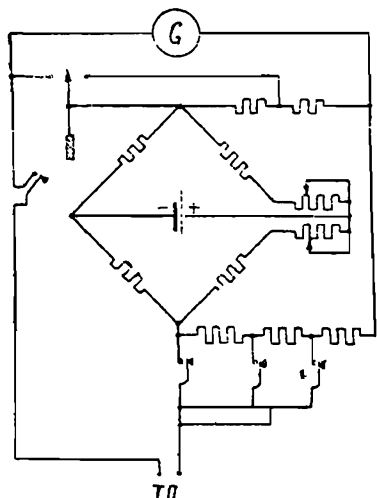


Рис. 72. Схема соединений пирамметра завода „Пирометр“.

Точность отсчета на этом потенциометре ограничивается точностью отсчета на шкале миллиамперметра и, конечно, ниже точности измерения на обычном потенциометре; в лучшем случае она не превышает 0,2%. Преимуществом пирамметра против стрелочного милливольтметра является измерение электродвижущей силы без расхода тока измеряемого источника и без влияния сопротивления соединительных проводов на значение измеряемой величины.

Переносные потенциометры, служащие для измерения термоэлектродвижущих сил термопар на месте установки

Термоэлектродвижущая сила, генерируемая термопарой, зависит от температуры горячего спая и от температуры холодного спая. При измерениях на месте установки температура холодного спая может иметь различные значения, поэтому при определении температуры горячего спая по генерируемой термопарой электродвижущей силе необходимо ввести поправку на температуру холодного спая. Чтобы не производить усложняющего работу подсчета, в предназначенных для подобных измерений потенциометрах предусмотрено особое устройство, позволяющее компенсировать влияние температуры холодного спая. Это компенсирующее устройство в переносных потенциометрах переставляется на данную температуру преимущественно от руки, в самопишущих же и управляющих режимом печи потенциометрах — исключительно автоматически. Ввиду того, что описание регистрирующих потенциометров не входит в нашу задачу, остановимся только на устройстве переносных потенциометров с неавтоматической компенсацией температуры холодного спая.

Несмотря на постоянство температуры горячего спая, генерируемая термопарой электродвижущая сила различна при различных температурах холодного спая, а, следовательно, отсчет по потенциометру не всегда

соответствует действительному значению температуры. Величина электродвижущей силы определяется по положению движка G (рис. 73а) и неподвижной точки D . Если параллельно первому реохорду присоединить второй реохорд (73б), то можно учесть температуру холодного спая перемещением движка D на втором реохорде, шкала которого может быть градуирована непосредственно в градусах. Установив движок D на положении, соответствующем температуре холодного спая при соответствующем подборе сопротивлений, отсчетом по движку G получим непосредственно действительное значение термоэлектродвижущей силы, с учетом температуры холодного спая, а следовательно и температуры горячего спая.

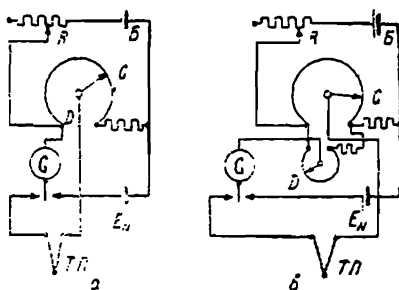


Рис. 73. Схема компенсации температуры холодного спая.

Переносный потенциометр фирмы Лидс и Нортруп К⁰

В переносном потенциометре фирмы Лидс и Нортруп поправки на температуру холодного спая можно вводить лишь в пределах от 0 до 90°C перемещением вручную движка добавочного реохорда.

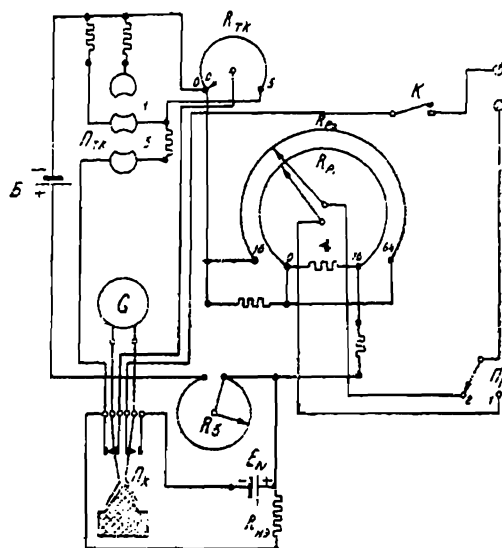


Рис. 74. Схема потенциометра фирмы Лидс и Нортруп с температурной компенсацией.

Схема соединений этого потенциометра показана на рис. 74. Как видно из схемы, благодаря наличию двойного реохорда R_{p1} и R_{p2} потенциометр имеет двойной предел измерения от 0 до 16 mV и от 16 до 64 mV. Рабочий ток в потенциометре устанавливается по нормальному элементу, присоединенному к постоянному сопротивлению. Специальный переключатель Π_K пересоединяет гальванометр из цепи нормального элемента в цепь проверяемой термопары, пересоединение же на два предела измерения производится однополюсным переключателем Π_2 . Штепсельный переключатель $\Pi_{тк}$ служит для изменения пре-

дела поправки (положения штепселя 1—5).

Сухой элемент B , служащий для питания потенциометра, нормальный элемент E , регулировочный реостат R_6 и стрелочный гальванометр G

встроены в потенциометр. Прибор портативен и дает достаточную точность при измерении температуры.

Известным недостатком этого прибора является отсутствие компенсации холодного спая при температурах ниже 0° . Конечно, градуировка поправочного реохорда различна для различных термопар, и подсчитанные для термопары железо-константан поправки не соответствуют поправкам для термопар из других металлов. Поэтому в потенциометре имеется особый указатель, устанавливаемый в соответствующее данной термопаре положение.

Переносный потенциометр завода „Пирометр“

Этот потенциометр [98] строится на интервал от 0 до 70 mV, и точность его отсчета равна $\pm 0,02$ mV. Чтобы эта точность измерения была достижима во всем интервале измерений от 0 до 70 mV, применена мостовая схема (рис. 75) с реохордом R_p от 0 до 11 mV, и расширение предела измерений производится секционированным сопротивлением R_c со ступенями потенциала в 10 mV. Показанная на рис. 75 схема потенциометра поясняет вышесказанное.

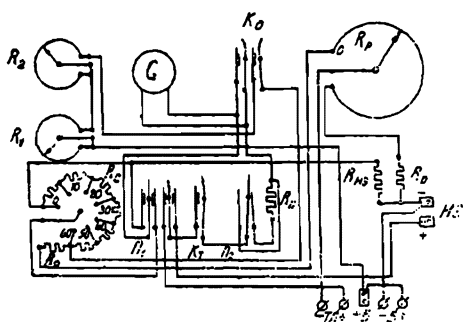


Рис. 75. Схема переносного потенциометра завода „Пирометр“ с компенсацией температуры холодного спая.

Питание потенциометра производится от сухого элемента B через два регулировочных реостата для грубой и тонкой регулировки — R_1 и R_2 . Батарея и реостаты встроены в потенциометр.

Установка силы рабочего тока производится по нормальному элементу, также встроенному в потенциометр, причем величина сопротивления цепи нормального элемента $R_{нз}$ постоянна. В плече реохорда R_p имеется добавочное сопротивление R_D , служащее для подгонки сопротивления плеча, сопротивление же R_0 служит для электрического смещения нуля (как в потенциометре Диссельхорста, Пономарева и др.). Для защиты нормального элемента и гальванометра имеется предохранительное сопротивление $R_{п}$.

Переключатель Π_1 служит для переключения гальванометра из цепи нормального элемента в цепь термопары; переключатель Π_2 выключает предохранительное сопротивление гальванометра. Кроме упомянутых переключателей, в потенциометре имеются две кнопки: k_7 , включающая гальванометр, и k_a — автоматическая кнопка, при закрытой крышке прибора выключающая цепь батареи и вместе с тем замыкающая накоротко гальванометр. Это устройство сделано дополнительно к механическому аррету, чтобы прибор и незаарретированный не был поврежден при переносе, так как будучи замкнут накоротко он хорошо успокоен.

Поправка на температуру холодного спая вводится в этом потенциометре особым способом, заключающимся в том, что вместо перестановки

движка дополнительного реохорда, просто смещается по особой шкале от руки сам индекс по отношению к щетке реохорда R_p , и тогда по индексу прочитывается показание реохорда в момент компенсации уже с введенной поправкой.

Потенциометр для определения содержания водородных ионов фирмы Тинслей

Фирма Тинслей (H. Tinsley & Co) [124] изготавливает упрощенный потенциометр для определения содержания водородных ионов p_H . Компенсационная цепь этого потенциометра очень проста и состоит из одной рычажной декады, имеющей 18 катушек, рассчитанных каждая на разность потенциалов в 0,1 V, и из реохорда на 0,12 V. Реохорд разделен на 120 делений, и, считая, что возможно прочесть 0,1 деления, отсчет

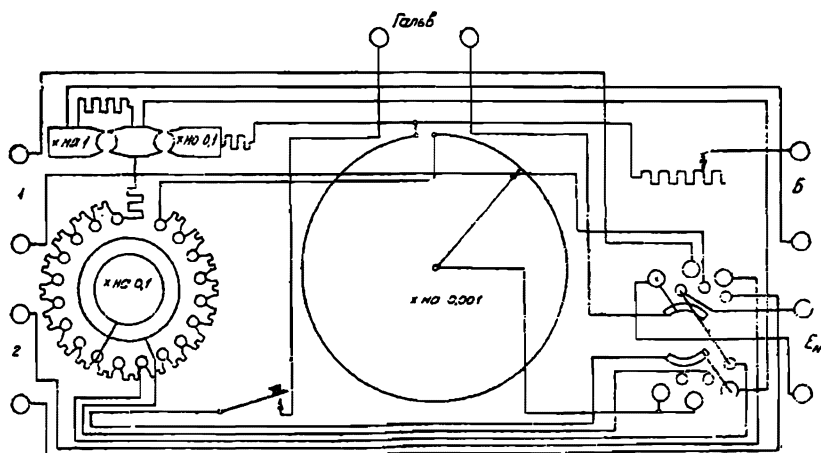


Рис. 76. Схема потенциометра для определения pH фирмы Тинслей.

может быть произведен через каждые 0,0001 V. Верхний предел измерения — $(1,8 + 0,12) = 1,92$ V, и общее сопротивление этого потенциометра равно 40 Ω . В потенциометре имеется штепсельный магазин, позволяющий уменьшать в 10 раз предел его измерения. Реостат регулировки рабочего тока встроен в прибор. Переключатель на три направления позволяет производить быстрое пересоединение на цепь нормального элемента и на любую из двух измеряемых цепей. Схема потенциометра показана на рис. 76.

Прибор этот прост в работе, портативен и вполне приемлем для измерений, не требующих большой точности. Габаритные размеры его $38 \times 23 \times 18$ см.

Докторский потенциометр, изготавливаемый заводом „Эталон“ (модель № 9)

Этот очень упрощенный потенциометр предназначен для измерения электродвижущей силы различных растворов. Компенсационная цепь его образована рычажной декадой I, состоящей из 10 катушек, со-

противлением по 10Ω каждая, и реохордом II, сопротивлением 10Ω . Рабочий ток этого потенциометра, равный $0,01 \text{ A}$, устанавливается по нормальному элементу, присоединенному к крайним зажимам рычажной декады. Для предохранения нормального элемента и гальванометра от прохождения тока нежелательной силы, кнопки k_2 включающие гальванометр, сперва замыкают цепь через большое сопротивление $100\,000 \Omega$ (рис. 77). Реостаты для грубой R_1 и точной R_2 регулировки рабочего тока встроены в прибор. Этот потенциометр пор.

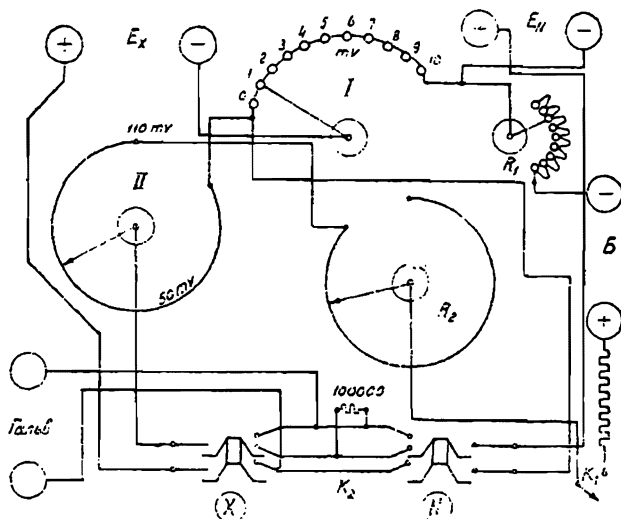


Рис. 77. Докторский потенциометр завода „Эталон“.

тативен, удобен и прост в употреблении и дает достаточную точность для тех измерений, для которых он предназначен.

ГЛАВА VIII

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Выбор гальванометра и определение чувствительности метода измерения

При работе с потенциометрами необходимо выбирать такой гальванометр, постоянные которого гарантируют получение требуемой при измерении точности. Предъявлявшееся прежде требование равенства сопротивлений гальванометра и цепи потенциометра, как показали исследования Брукса (Н. В. Brooks — Бюро стандартов в Вашингтоне), не обязательно. При сопротивлении катушки гальванометра, равном например 100Ω , наибольшая рабочая чувствительность будет при сопротивлении потенциометра плюс сопротивление соединительных проводов, нити подвеса гальванометра и других его неподвижных частей, равном также 100Ω . Однако, если рамку гальванометра перемотать на другое

число витков с тем же коэффициентом заполнения так, чтобы сопротивление катушки было равно либо 20, либо 500 Ω , то уменьшение его чувствительности в обоих случаях не превысит 26%. Поэтому для окончательного выбора гальванометра должно иметь значение не только его сопротивление, но и другие факторы, как-то: его чувствительность к току и напряжению и его критическое сопротивление.

Во всяком измерении, производимом при участии гальванометра, желательно, чтобы он был замкнут на свое критическое сопротивление; величина же сопротивления, на которое замкнут гальванометр в обычном потенциометре большого и малого сопротивления изменяется при перемещении рычагов декад. Величина этой вариации может быть определена из следующих простых соображений:

Обозначим (рис. 78): R — общее сопротивление цепи питающей батареи, R' — действительное сопротивление потенциометра в цепи гальванометра, r_1 — сопротивление части рабочей цепи между контактами гальванометра, r_2 — сопротивление, шунтирующее r_1 . Имеем:

$$R = r_1 + r_2; \quad r_2 = R - r_1.$$

$$R' = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{R \cdot r_1 - r_1^2}{R}; \quad \frac{dR'}{dr_1} = \frac{R - 2r_1}{R}.$$

R' имеет максимум при $\frac{R - 2r_1}{R} = 0$, т. е. тогда, когда

$$R = 2r_1 \text{ и } R'_{\max} = \frac{R}{4}.$$

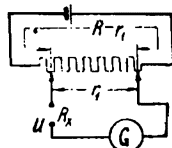


Рис. 78. Схема для определения чувствительности гальванометра.

Отсюда видно, что обычный потенциометр большого сопротивления (Вольф, Рапс, Карпантье и др.), имеющий полное сопротивление 20000 Ω , включает в цепь гальванометра переменное сопротивление, равное от 0 до 5000 Ω .

Потенциометры малого сопротивления (Лидс и Нортруп, О'Брайан и др.), имеющие сопротивление порядка 100—150 Ω , имеют переменное сопротивление только порядка от 0 до 25 или до 40 Ω .

Таким образом, если в одном из крайних положений рычагов гальванометр оказывается замкнутым на свое критическое положение, то в другом крайнем положении он будет либо недостаточно демпфирован, либо переуспокоен. Чтобы оба эти состояния не слишком влияли на производство измерения, сопротивление цепи гальванометра, в которое входят и сопротивления измеряемого объекта и всей проводки, не должно быть очень мало.¹ Однако увеличение этого сопротивления ограничивается требованием чувствительности гальванометра.

Всякий гальванометр фактически является прибором, чувствительным к силе тока, так как момент вращения, действующий на подвижную часть, создается проходящим по его катушке током.

Чтобы определить, удовлетворяет ли данный гальванометр предъявляемому к нему требованию чувствительности для данного потенциометра, необходимо подсчитать, будет-ли ток, возникающий в под-

¹ Все эти рассуждения не относятся к потенциометрам с постоянным сопротивлением цепи гальванометра.

вижной части гальванометра вследствие расстройтва компенсации на один последний знак отсчета, больше его чувствительности. Величина этого тока зависит от величины сопротивления всей цепи гальванометра. Это сопротивление состоит из переменной части сопротивления цепи потенциометра между точками присоединения концов измеряемой цепи R' , т. е. между рычагами $+x$ и $-x$ (рис. 78), из сопротивления цепи гальванометра r' (кроме самого гальванометра) и, наконец, из сопротивления гальванометра r . При полной компенсации сила тока в цепи гальванометра равна нулю и, следовательно, подвижная система отклонения не дает. При расстройстве компенсации — ииаче при изменении напряжения на величину δu , по цепи гальванометра пройдет ток, силу

$$\delta i = \frac{\delta u}{(R' + r' + r)}.$$

Если пропорционально этому току отклонение подвижной системы равно $\delta \alpha$, то отношение $\delta \alpha / \delta u$ определяет величину чувствительности всего устройства к напряжению.

Сила рабочего тока потенциометра I всегда равна частному от деления напряжения питающей батареи на все сопротивление цепи батареи потенциометра:

$$I = \frac{E_0}{R}.$$

Эта сила тока остается постоянной при перемещениях всех рычагов декад между точками $+x$ и $-x$. Величина δu , соответствующая перемещению рычага последней декады на один контакт или перемещению движка реохорда на одно деление, равна $\delta u = I r_0$, где r_0 — сопротивление одной катушки данной декады или соответственной части калиброванной проволоки реохорда. При расстройстве компенсации на величину δu величина тока в цепи гальванометра $\delta i = \delta u / \Sigma R$. Чтобы чувствительность гальванометра гарантировала отсчет последнего знака на потенциометре, величина тока δi должна дать такое отклонение подвижной части гальванометра, какое желательно получить при расстройстве компенсации на напряжение, соответствующее наименьшему гарантированному отсчету по потенциометру.

Все приведенные рассуждения касались чувствительности гальванометра по току. Иногда необходимо оценивать пригодность гальванометра с точки зрения его чувствительности к напряжению, что нетрудно сделать, так как каждый микроамперметр при известном его сопротивлении может рассматриваться как микровольтметр, и постоянная по напряжению равна его постоянной по току, умноженной на сопротивление его подвижной части.

Подсчет чувствительности компенсационного устройства различен в зависимости от конструкции потенциометра и от измеряемого объекта.

Для большего уяснения вопроса подсчитаем чувствительность потенциометра при измерении электродвижущей силы термопары на потенциометре постоянного сопротивления цепи гальванометра.

Предположим, что измеряется электродвижущая сила термопары железо-константан на потенциометре Уайта. Сопротивление потенциометра Уайта постоянно и равно 40 Ω . Сопротивление термопары железо-константан приблизительно равно 5 Ω . Пусть компенсация произ-

водится при посредстве гальванометра, сопротивление которого равно 12Ω . Термопара железо-константан развивает термоэлектродвижущую силу около $50 \mu V$ на разность температур обоих спаев в один градус (при нормальной температуре). Общее сопротивление цепи гальванометра $\Sigma R = (40 + 5 + 12) = 57 \Omega$. При этих условиях, если потенциометр был уравновешен на электродвижущую силу термопары при некоторой разности температур горячего и холодного спаев в $t^\circ C$, то, при изменении этой разности температур на 1° в цепи гальванометра ток $\Delta i_0 = 50/57 = 0,88 \mu A$.

Если применен гальванометр фирмы Лидс, Нортруп и К^о № 2285в, тип HS, имеющий чувствительность около 60 делений на $1 \mu A$, то разности температур в 1° соответствует отклонение подвижной системы гальванометра на 53 деления (миллиметра) шкалы. Критическое сопротивление этого гальванометра по указанию изготовляющей его фирмы — 40Ω . Как видно из произведенного подсчета, сопротивление, на которое замкнут гальванометр, больше его критического сопротивления, и прибор не вполне работает в области затухающих колебаний.

Произведя аналогичный подсчет для измерения термоэлектродвижущей силы той же термопары с тем же гальванометром, но на потенциометре Диссельхорста, постоянное сопротивление которого равно 14Ω , имеем: $\Sigma R = (14 + 5 + 12) = 31 \Omega$ и $\Delta i_0 = 50/31 = 1,61 \mu A$. Число делений шкалы гальванометра, приходящееся на разность температур 1° , получается равным 97. Ввиду того, что в этом случае сопротивление цепи гальванометра меньше критического его сопротивления, прибор является несколько „переуспокоенным“, а так как значительно удобнее, производить измерения с гальванометром „недоуспокоенным“, чем с прибором „переуспокоенным“, то выбранный гальванометр более пригоден для потенциометра Уайта, чем для потенциометра Диссельхорста, несмотря на большую его чувствительность в последнем случае.

Рассмотрим пригодность гальванометра с точки зрения величины отклонения, приходящегося на одно деление последнего магазина. В потенциометре Уайта, изготовляемом фирмой Лидс и Нортруп, последний магазин имеет падение напряжения, приходящееся на одну катушку, равное $1 \mu V$. Вольтовая постоянная выбранного гальванометра — $0,2 \mu V$ на одно деление шкалы. Таким образом при расстройстве компенсации, соответствующем одному контакту последнего магазина, отклонение подвижной системы гальванометра равно 5 делениям шкалы (помещенной на расстоянии $1 м$ от зеркала). Производя тоже рассуждение для потенциометра Диссельхорста, получаем, что выбранный гальванометр дает достаточную чувствительность при рабочем токе потенциометра $0,01 A$, т. е. при цене последнего деления в $1 \mu V$, и недостаточную чувствительность при цене деления в $0,1 \mu V$, т. е. при рабочем токе, равном $0,001 A$.

При выборе гальванометра для потенциометра большого сопротивления предпочтительнее остановиться на гальванометре, имеющем критическое сопротивление, меньшее наибольшей величины замыкающего гальванометр сопротивления.

Чувствительность измерения силы тока при посредстве потенциометра большого (порядка 20000Ω) и малого сопротивления (порядка 100Ω) зависит от сопротивления потенциометра и самого гальванометра, так как величина сопротивления образцовой катушки относительно очень

мала. При определении же чувствительности измерения напряжения выше предела измерения потенциометра, величина сопротивления делителя напряжения относительно велика и должна быть принята во внимание.

Для получения большей точности измерения необходимо выбирать такую величину образцового сопротивления и такой множитель делителя, чтобы получить возможно большее значение отсчета. В этом случае процент погрешности измерения будет меньше, чем при малом отсчете, и возможно получить достаточную точность измерения даже при гальванометре меньшей чувствительности.

О выборе типа потенциометра для точных измерений

При выборе типа потенциометра для точных измерений большое значение имеет его сопротивление. Потенциометр является прибором, сравнивающим напряжения (разность потенциалов). Гальванометр же, являющийся безусловно наиболее удовлетворительным индикатором нуля в обычном потенциометре и указателем отклонения в потенциометре отклонения, представляет собой прибор, показывающий величину проходящего по нему тока. Для каждого случая неравновесия в цепи гальванометра результирующее отклонение подвижной системы гальванометра пропорционально проходящему в ней току и, следовательно, обратно пропорционально сопротивлению цепи гальванометра. Таким образом более высокое сопротивление потенциометра уменьшает чувствительность измерения. Это утверждение остается в силе и в том случае, если характеристики гальванометра правильно выбраны для применения с потенциометром большого сопротивления. Для одной и той же разности потенциалов рабочий ток потенциометра обратно пропорционален величине его сопротивления. Например, если потенциометр на наибольшую измеряемую разность потенциалов 1,5 В имеет сопротивление 75 Ω , то сила рабочего тока будет равна 0,02 А. При сопротивлении потенциометра, равном 15000 Ω , рабочий ток потенциометра равен только 0,0001 А. Если на обоих потенциометрах измеряется одна и та же разность потенциалов, то токи утечки через изоляцию могут быть в обоих случаях одинаковы. Однако ввиду разности величин токов потенциометров ток утечки в потенциометре большого сопротивления дает погрешность измерения в 200 раз большую, чем тот же ток утечки в потенциометре малого сопротивления ($\frac{15000}{75} = 200$). Это является известным недостатком потенциометров с большим сопротивлением, которые должны быть поэтому лучше предохранены от возникновения токов утечки, чем потенциометры малого сопротивления. С другой стороны, малая сила рабочего тока в потенциометре большого сопротивления обуславливает большее постоянство напряжения питающей батареи, а следовательно и большее постоянство рабочего тока потенциометра. Поэтому в потенциометрах малого сопротивления необходима более частая проверка рабочего тока по нормальному элементу, чем в потенциометрах большого сопротивления.

Если выбирать потенциометр с точки зрения измеряемого объекта, то при измерении силы тока, т. е. при измерении разности потенциа-

лов на образцовом сопротивлении, величина которого мала, более пригоден обычный потенциометр малого сопротивления (порядка 100Ω), так как изменение замыкающего гальванометр сопротивления представляет собой относительно меньшую величину. При измерениях же больших сопротивлений, т. е. разностей потенциалов на образцовых катушках большого сопротивления и больших напряжений через делитель, потенциометр большого сопротивления является более приемлемым. Величина падения напряжения на контактах потенциометров малого сопротивления, ввиду большей силы рабочего тока, имеет большую величину, чем в потенциометрах большого сопротивления, и поверхность контактов должна в них чаще промываться спиртом и протираться сухой тряпкой.

Работа с потенциометрами и уход за ними

При работе с потенциометрами необходимо иметь в виду следующие указания.

1. Все вспомогательные приборы, служащие для измерений напряжения, тока и сопротивления, как-то: делитель напряжения, образцовые сопротивления на различные пределы тока — должны соответствовать данному типу потенциометра (большого или малого сопротивления). Сопротивление делителя напряжения для потенциометра большого сопротивления обычно выбирается порядка $500—1000 \Omega$ на 1 V , для потенциометров же малого сопротивления оно должно быть настолько мало, насколько это возможно при допустимом выделении тепла на его катушках сопротивлений. Обычно это сопротивление выбирается от 30 до 50Ω на 1 V . Для измерения тока, катушки сопротивления должны быть выбраны так, чтобы отсчет по потенциометру получался достаточно большим.

2. Гальванометр должен быть такой чувствительности, чтобы при самом малом отсчете на потенциометре, подвижная часть его давала достаточное отклонение. Величина критического сопротивления его должна быть близка к величине общего сопротивления цепи гальванометра. При потенциометре большого сопротивления должен быть выбран гальванометр большого сопротивления — порядка $500—1000 \Omega$. Гальванометр, применяемый с потенциометром малого сопротивления (порядка 100Ω), должен также иметь сопротивление порядка 100Ω . Для потенциометров специального назначения, применяемых для измерений малых электродвижущих сил (термоэлектродвижущие силы термоэлементов), например, Диссельхорста, Уайта, Уеннера и др., сопротивление которых очень мало, применяются специальные гальванометры, имеющие малое сопротивление катушки и малую величину критического сопротивления.

3. При установке рабочего тока потенциометра первоначальное пробное замыкание ключа гальванометра должно быть произведено через большое предохранительное сопротивление в цепи гальванометра, при отсутствии которого возможно повреждение нормального элемента вследствие отдачи слишком большой силы тока. Если все же при первоначальной компенсации нормальный элемент дал большой ток (порядка $10—20 \mu\text{A}$), то перед дальнейшими измерениями нормальный элемент должен „отдохнуть“, так как восстановление электродвижущей силы он производит через полчаса — час. То же соображение должно

быть и при компенсировании измеряемой разности потенциалов для предохранения гальванометра. Если в самом потенциометре не имеется предохранительного сопротивления, гальванометр должен быть включен через большое добавочное сопротивление отдельно от потенциометра.

4. При производстве точных измерений на потенциометрах иногда наблюдаются затруднения в работе, происходящие от возникающих токов утечки через изоляцию от цепи потенциометра в землю. Это явление наблюдается в особенности в сырую погоду.

Для предотвращения этой утечки может быть устроена, так называемая, защитная цепь.

Все приборы, соединенные с потенциометром, как и сам потенциометр, помещаются на эбонитовых подставках, в свою очередь помещенных на металлических пластинах. Все эти пластины соединяются между собой и присоединяются к зажиму $+$ х потенциометра при помощи тонкой голой медной проволоки. Таким образом, те точки цепи металлических пластин, в которых возможна утечка тока через поверхность приборов, присоединяются к точке, потенциал которой равен высшему потенциалу цепи гальванометра. Круковский (86) рекомендует для лучшего предохранения от возникновения утечки подкладывать под металлические пластины еще один ряд изоляторов. Кроме этого, при заметной влажности воздуха контакты обтирают тряпкой, смоченной спиртом. Некоторые авторы предлагают после промывки спиртом слегка смазывать пластины чистым бескислотным вазелином (желтым), что предохраняет их от окисления кислородом воздуха и не препятствует получению хорошего контакта, так как вазелин выжимается под щеткой.

5. Питающая батарея должна быть выбрана соответствующего напряжения и нужной емкости. Так, например, для потенциометра Рапса (изготовляемого фирмой Сименс и Гальске) напряжение батареи должно быть около 4 V, тогда как для потенциометра Лидс и Нортруп напряжение батареи должно быть взято около 2 V. Емкость батареи должна быть от 20 до 40 А-час. Зарядка должна производиться достаточно часто, так как при большом разряде батареи режим работы будет неустойчив.

Некоторые замечания о точности измерений на потенциометрах постоянного тока и о способах уменьшения погрешности измерений

Точность измерения на потенциометрах зависит от постоянства рабочего тока и постоянства величины или отношения сопротивлений, входящих в цепь потенциометра, так как входящая в выражение для измеряемой величины электродвижущая сила нормального элемента определяется со столь большой точностью и настолько неизменна при данной температуре, что может считаться величиной, не имеющей погрешности. Рабочие сопротивления магазинов обычно подгоняются с точностью до 0,01%, а в некоторых случаях даже до 0,005%.¹ Эта погрешность не оказывает значительного влияния на точность измерения при измерениях достаточно больших величин, при изме-

¹ В точных потенциометрах подгонка декад на большие вольты производится с точностью не ниже 0,005%.

рении же малых величин, даже при хорошо подогнанных сопротивлениях, точность может значительно уменьшиться вследствие, так называемого, нулевого сопротивления потенциометра. Нулевым сопротивлением потенциометра называется сопротивление между щетками, к которым непосредственно присоединяется измеряемое напряжение U_x или E_x (через гальванометр) при разомкнутой цепи питающей батареи и при всех рычагах декад, находящихся на нуле. Для уменьшения этого нулевого сопротивления в некоторых типах потенциометров (потенциометр Вольфа-Эпплей, потенциометр О'Брайана „Дженерал Электрик К⁰“) (см. главу IV) предусмотрены специальные соединительные провода большого сечения, исключающие влияние первых контактов декад (см. рис. 23 и 32).

Однако эти провода только уменьшают, а не уничтожают нулевое сопротивление потенциометра. Для полного уничтожения этого нулевого сопротивления Галл (D. C. Gall) [48] предложил добавочное устройство, показанное на рис. 79.

Потенциометр имеет аналогично потенциометру фирмы Тинслея (см. главу IV), рычажную декаду I, состоящую из 18 катушек; две его катушки шунтируются декадой II, имеющей 100 катушек, причем сопротивление этих ста катушек равно сопротивлению двух катушек декады I. Рабочая цепь этого потенциометра заканчивается небольшим постоянным сопротивлением R , падение напряжения на котором равно $1/1800$ падения на остальной рабочей цепи потенциометра. Основная рабочая цепь потенциометра шунтируется большим постоянным сопротивлением R' , включенным последовательно с декадой III, имеющей 102 катушки. Это устройство сходно с устройством нуля в потенциометре Диссельхорста и Уэннера и позволяет с желаемой точностью уменьшить значение нулевого сопротивления и даже добиться полного его уничтожения, выравнивая точность измерения по всей шкале потенциометра, подгонкой сопротивления R' и устройством уравнильного провода.

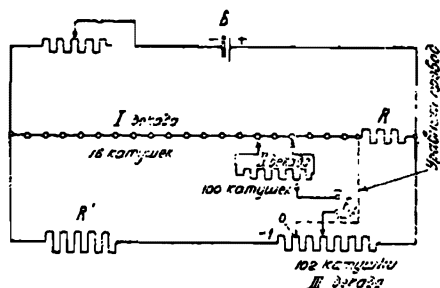


Рис. 79. Схема потенциометра постоянного тока с уничтоженным нулевым сопротивлением.

При требованиях большой точности измерения желательно производить измерения близких между собой величин на одинаковых отсчетах по движениям потенциометра. Так, например, при отсчете величин около 0,1 V точность измерения будет выше при измерении таких величин, при которых отсчеты будут равны 10125 и 10128, чем величин с отсчетами 10002 и 9999.

При сравнениях нормальных элементов, величины которых разнятся на микровольты, отсчеты на потенциометре Вольфа будут около 1,01830, и точность измерения достигает безусловно 1 μ V.

ПОТЕНЦИОМЕТРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ГЛАВА IX

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Краткий исторический обзор

Большая точность измерения, получаемая при применении потенциометров постоянного тока, побудила многих экспериментаторов к попыткам производить измерения компенсационным способом также и на переменном токе.

Первоначально использовали те же потенциометры постоянного тока, производя балансировку неизвестного переменного тока или напряжения с измеряемым на потенциометре постоянным путем ввода некоторых промежуточных приборов. Свинбурн (J. Swinburn) [123] в своих первых схемах в 1894 г. применял чувствительный квадрантный электрометр или специально сконструированный электродинамический прибор. В первом случае на одну пару квадрантов (накрест) и на бисквит подавалось напряжение переменного тока, а на вторую пару квадрантов и также на бисквит подавалась разность потенциалов, измеряемая потенциометром постоянного тока (схема соединений показана на рис. 80); тогда при отсутствии отклонения бисквита квадрат разности потенциалов на потенциометре постоянного тока равен средней квадратичной измеряемой разности потенциалов на переменном токе. Применение электродинамометра аналогично применению квадрантного электрометра. Точность этого способа измерения зависит главным образом от точности промежуточного прибора, который должен быть специальной конструкции, и ввиду малой чувствительности квадрантного электрометра на малых напряжениях точность этого способа при измерении малых величин сильно уменьшается.

Второй способ измерения переменных токов на потенциометре постоянного тока был предложен Орлихом (E. Orlich PTR) в 1904 г. [102] и применялся для проверки амперметров на переменном токе. Переменный и постоянный ток попеременно пропускались через платиновую трубку p (рис. 81); проходящий ток I нагревал трубку до белого каления, и ее температура измерялась при посредстве оптического пирометра m . При равенстве температур, получаемых от накала переменным и постоянным током, сила постоянного тока равна действующему значению переменного тока. Схема соединений рис. 81 поясняет способ Орлиха. В описании этого способа измерения Орлих гарантирует точность измерения порядка десятых долей процента.

Дальнейшим развитием метода Орлиха было применение предложенного Моллем (Dr. Moil) [99] термоконвертора для одновременного сравнения двух токов — постоянного и переменного, проходящих по двум одинаковым шунтам, к потенциальным зажимам которых присоединяются одинаковые термокреды, включенные навстречу друг к другу через гальванометр.

Эти три описанные схемы в сущности еще не представляют собой потенциометра переменного тока и не позволяют производить ряд разнообразных измерений, как это возможно на постоянном токе.

Первое практическое применение компенсационного метода на переменном токе было произведено А. Франке (A. Franke) [42] в 1891 г. для измерений постоянных телефонных приборов на звуковых частотах (от 150 до 1200 Hz). Для этой цели А. Франке сконструировал двойной генератор на общей оси и с общим возбуждением. Статор одного из генераторов перемещался вдоль оси, благодаря чему выводился из магнитного поля, и та-

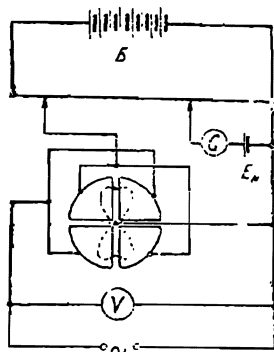


Рис. 80. Схема Свинбурна в применении с электрометром.

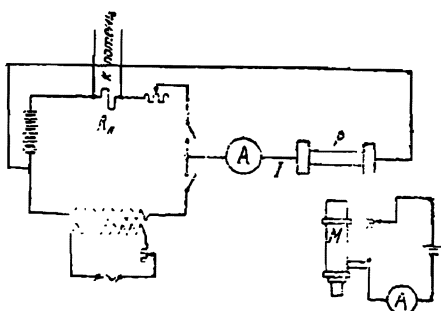


Рис. 81. Схема Орлиха.

ким образом могла изменяться амплитуда напряжения переменного тока одного из генераторов. Второй статор мог поворачиваться относительно другого статора, чем создавался желаемый угол сдвига фаз напряжений обоих генераторов. Величина обоих перемещений отсчитывалась при посредстве особых приспособлений. Более подробное описание генератора Франке помещено в главе XII на стр. 125.

Особенностью компенсации на переменном токе является необходимость компенсировать не только вектор напряжения по величине, но также и необходимость добиться полного совпадения фаз вектора измеряемой величины и компенсирующего ее вектора напряжения на потенциометре. Дальнейшей особенностью компенсации на переменном токе является то, что при этом не возможно произвести непосредственное сравнение измеряемой величины с установленным эталоном электродвижущей силы (нормальным элементом) и необходимо пользоваться каким-либо промежуточным прибором или устройством, аналогичным электродинамометру и электрометру в способе Свинбурна, термокреду Молля и т. п. Применение этих промежуточных приборов, конечно, значительно понижает точность измерения на потенциометрах

переменного тока. Однако, несмотря на эти затруднения и недостатки, применение компенсационного метода на переменном токе получило в настоящее время большое распространение, и трудно представить себе, какую-либо солидную электронизмерительную лабораторию без потенциометра переменного тока.

ГЛАВА X

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О КОМПЕНСАЦИОННОМ МЕТОДЕ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Основной принцип метода

Основной принцип компенсационного метода переменного тока тот же, что и на постоянном токе; однако, большое количество особенностей измерений на переменном токе заставляет вводить ряд дополнений в конструкцию потенциометров переменного тока. Кроме упомянутой выше разности фаз измеряемой и компенсирующей величин при измерениях приходится принимать во внимание также и частоту обоих переменных напряжений и форму кривой напряжения питающих их источников. Эти две дополнительные переменные величины оказывают непосредственное влияние на конструкцию потенциометра переменного тока и на способ его применения и требования точности, которые возможно к нему предъявлять.

Совершенно ясно, что электродвижущая сила питающего потенциометр рабочего тока должна иметь ту же частоту, что и измеряемое напряжение, поэтому питание обеих цепей потенциометра и измеряемого объекта должно производиться от двух генераторов, связанных между собой механически (сидящих на одном валу и приводимых во вращение одним мотором), или от одного генератора с электрическим разделением цепей при посредстве трансформатора.

Форма кривой тока обеих цепей имеет различное влияние на измерения на потенциометрах переменного тока, в зависимости от вида применяемого детектора (нулевого прибора). Если детектор не является прибором, настроенным на определенную частоту, и отвечает на колебания всех частот в данном интервале (например обычный телефон), полное равновесие возможно лишь при совершенном совпадении формы кривой обеих сравниваемых переменных напряжений; в том же случае, когда применяемый детектор реагирует только на колебания определенной частоты, как например вибрационный гальванометр, настроенный телефон, — равновесие колеблющейся системы детектора укажет лишь на компенсацию величин и углов тех составляющих сравниваемых напряжений, частота которых соответствует частоте настройки нулевого прибора, настроенного обычно на основную частоту и не учитывающего влияния гармоник.

Последнее является одной из причин меньшей точности измерения на потенциометрах переменного тока, чем на потенциометрах постоянного тока. При питании обеих цепей даже от одного источника весьма трудно иметь одну форму кривой измеряемого напряжения и тока потенциометра, иначе напряжения на зажимах компенсационного сопроти-

вления, так как обе цепи обычно имеют различные параметры, различно влияющие на форму кривой тока.

Вторым источником меньшей точности измерений на потенциометрах переменного тока является упомянутая выше необходимость применять промежуточный прибор, по большей части электродинамометр, служащий вторичным эталоном для установления величины рабочего тока потенциометра. Этот прибор градуируется на постоянном токе по нормальному элементу и образцовому сопротивлению, и точность отсчета на потенциометре непосредственно зависит от постоянства поправки прибора на постоянном и переменном токе и от возможности произвести точный отсчет показания прибора.

Третьим источником могущих возникнуть ошибок измерения на потенциометре переменного тока являются внешние магнитные поля, имеющие ту же частоту, что и ток рабочей цепи потенциометра. Эти поля могут индуцировать дополнительные электродвижущие силы, различные в разных частях измерительных цепей, благодаря чему может быть искажен результат измерений.

Наконец, четвертым источником ошибок измерения могут быть емкостные токи и токи утечки, возникающие в цепи потенциометра и в цепи измеряемого объекта и искажающие результат измерения.

Все эти могущие возникнуть дополнительные погрешности заставляют относиться очень осторожно к конструкции частей, входящих в состав потенциометра переменного тока, тщательно выбирать источник питания цепи потенциометра и принимать особые предосторожности при сборке схемы измерения.

Погрешность измерения от несинусоидальной электродвижущей силы

Чтобы иметь возможность судить о погрешностях измерения потенциометра переменного тока, получающихся при несинусоидальных кривых и при нулевом приборе, настраиваемом на основную частоту рассмотрим компенсацию в этом случае. При равновесии подвижной системы гальванометра уравновешенными являются только основные синусоиды измеряемого переменного напряжения и напряжения на компенсационной цепи потенциометра. Эффективное значение несинусоидального напряжения измеряемого источника может быть представлено в виде:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2 + \dots},$$

где U_1 , U_2 , $U_3 \dots$ — эффективные значения первой, второй, третьей и т. д. гармоник.

Точно так же может быть выражено и эффективное значение несинусоидального напряжения на компенсационной цепи потенциометра:

$$U' = \sqrt{U_1'^2 + U_2'^2 + U_3'^2 + \dots} = U_1' \sqrt{1 + \left(\frac{U_2'}{U_1'}\right)^2 + \left(\frac{U_3'}{U_1'}\right)^2 + \dots},$$

При компенсации, $U_1 = U_1'$ и соответственно

$$U = U' \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2 + \dots}{1 + \left(\frac{U_2'}{U_1'}\right)^2 + \left(\frac{U_3'}{U_1'}\right)^2 + \dots}}$$

Ввиду малой величины эффективных значений высших гармоник по сравнению с первой, возможно произвести приближенное деление и извлечение корня. Вместо предыдущего выражения получаем:

$$\begin{aligned} U &\cong U' \left\{ 1 + \frac{1}{2U'^2} (U_2'^2 - U_2'^2 + U_3'^2 - U_3'^2 + \dots) \right\} = \\ &= U' \left\{ 1 + \frac{\Sigma (U_n'^2) - \Sigma (U_n'^2)}{2U'^2} \right\}. \end{aligned}$$

Это выражение показывает, что отсчет по потенциометру правилен в двух случаях: 1) когда высшие гармоники отсутствуют и обе кривые синусоидальны и 2) когда обе кривые совершенно одинаковы, т. е. имеют одинаковые гармоники по величине и по фазе:

$$\Sigma (U_n'^2) = \Sigma (U_n'^2).$$

Погрешность измерения U в процентах может быть выражена:

$$\Delta\% = \left[\frac{\Sigma (U_n'^2) - \Sigma (U_n'^2)}{2U'^2} \right] \cdot 100 = 50 \cdot \frac{\Sigma (U_n'^2) - \Sigma (U_n'^2)}{U'^2}.$$

Практически одна из кривых бывает более близка к синусоидальной — обычно кривая тока потенциометра, а другая — имеет высшие гармоники.

Определим процент третьей гармоники, вызывающей погрешность измерения $0,1\%$ (предполагая, что остальные гармоники отсутствуют):

$$U_3' = \sqrt{0,02 \cdot 0,1 \cdot U'^2} = 0,045 \cdot U'.$$

Таким образом, третья гармоника при допустимой погрешности измерения, равной $0,1\%$, может достигать $4,5\%$ основной гармоники.

Аналогично предыдущему находим, что при допустимой погрешности измерения, равной $0,1\%$, третья гармоника может составить $14,1\%$ первой.

Из всего изложенного следует, что при достаточной синусоидальности тока потенциометра и при практической синусоидальности измеряемого напряжения, т. е. при наличии третьей гармоники в размере не более $4,5\%$ от основной, погрешность измерения на потенциометре, зависящая от несинусоидальности сравниваемых напряжений, не превышает $0,1\%$.

Однако эта погрешность может достигнуть очень больших значений при производстве таких измерений, в которых примеси высших гармоник в кривой измеряемого напряжения очень велики, например, при снятии кривой намагничивания железа при больших его насыщениях, когда содержание третьей гармоники может достичь 30% , и погрешность измерения может значительно возрасти.

СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Все современные конструкции потенциометров переменного тока могут быть разбиты на два резко друг от друга отличающихся типа: 1) потенциометры с непосредственным отсчетом измеряемой разности потенциалов, называемые иногда потенциометрами с отсчетом в полярных координатах и 2) потенциометры с отсчетом взаимно-перпендикулярных составляющих измеряемой разности потенциалов, так называемые комплексные потенциометры или потенциометры с отсчетом в прямоугольных координатах.

Различие между этими двумя типами состоит в способе получения компенсации угла сдвига фаз между рабочим током потенциометра (вернее, между напряжением на концах компенсационного сопротивления потенциометра) и между измеряемым напряжением.

В потенциометрах первого вида при компенсации сдвига фаз поворачивается каким-либо способом вектор рабочего тока потенциометра на угол, величина которого может быть отсчитана непосредственно по шкале. Ввиду того, что компенсационная цепь потенциометра выполняется с возможной степенью точности безреактивной (или, во всяком случае, с неизменной постоянной времени), вектор напряжения на компенсационном сопротивлении поворачивается на тот же угол, что и рабочий ток потенциометра. При измерении нескольких сдвинутых одно относительно другого напряжений, углы поворота рабочего тока потенциометра позволяют установить относительное смещение во времени векторов измеряемых величин. Сдвиг вектора рабочего тока потенциометра производится одним из следующих способов:

1. Применением сдвоенного генератора, одна из обмоток статора которого может поворачиваться на отсчитываемый каким-либо способом угол (машина Франке). Один из этих генераторов (тот, якорь которого поворачивается) питает цепь потенциометра, второй — цепь измеряемого объекта. Отсчет сдвига фаз производится по углу поворота статора генератора.

2. Применением специального фазорегулятора, служащего для питания цепи потенциометра. Обмотки статора фазорегулятора питаются от источника, не меняющего сдвиг фаз, питание же потенциометра производится от обмоток ротора фазорегулятора. Угол сдвига фаз определяется по положению ротора фазорегулятора.

3. Созданием искусственной схемы с применением реактивных и активных сопротивлений и специальных автотрансформаторов. Угол сдвига определяется по положению движков активных сопротивлений.

Питание обмоток статора фазорегулятора производится либо от однофазного источника с расщеплением на двухфазный ток (потенциометр Драйсдела), либо от трехфазного источника (потенциометр Круковского). Рабочая цепь этих потенциометров конструктивно аналогична рабочей цепи потенциометров постоянного тока, но конструкция катушек магазинов такова, что реактивное сопротивление катушек чрезвычайно мало и может не приниматься во внимание. Отсчет величины измеряемого вектора производится непосредственно по положению рычагов магазинов.

В потенциометрах второго вида сдвиг фаз достигается не поворотом вектора тока потенциометра, положение которого не изменяется во все время измерений, а различной комбинацией двух находящихся под углом составляющих компенсационного напряжения. Рабочая цепь этих потенциометров состоит обычно из, так называемых, активной и реактивной части, и отсчет активной и реактивной составляющих измеряемой величины производится раздельно по безреактивной и реактивной частям цепи потенциометра. Таким образом компенсирующее напряжение потенциометров этого вида составляется из двух величин и определяется подсчетом.

На рис. 82 показана векторная диаграмма комплексного потенциометра. Векторы E_1 и E_2 соответствуют активной и реактивной составляющим и могут занимать положения: вектор E_1 вправо или влево от нуля по оси x и вектор E_2 вверх или вниз по оси y . Относительное их

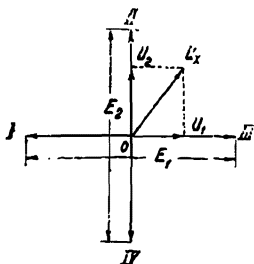


Рис. 82. Векторная диаграмма комплексного потенциометра.

расположение дает возможность уравновесить измеряемый вектор при положении его в любом квадранте. Величина компенсирующего вектора $E_p = U_x = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$, величина же угла сдвига фаз относительно принятого за начальный вектора I—III определяется из: $\tan \alpha = \frac{E_2}{E_1}$, где α — угол между вектором E_p (U_x) и вектором (0—1).

По способу получения сдвинутых один относительно другого векторов E_1 и E_2 потенциометры второго вида могут быть разделены на три основных подгруппы.

В потенциометрах первой подгруппы вектор E_1 получается на безреактивном сопротивлении (например, на проволочном реохорде), в то время, как E_2 отбирается от зажимов вторичной обмотки безжелезного трансформатора.

В потенциометрах второй подгруппы как E_1 , так и E_2 отбираются на двух безреактивных сопротивлениях, по которым проходят токи, сдвинутые один относительно другого на 90° .

В потенциометрах третьей группы оба вектора как E_1 так и E_2 получаются на вторичных обмотках трансформаторов (с железом или без железа), первичные обмотки которых питаются сдвинутыми на 90° один относительно другого токами; вторичные обмотки этих трансформаторов между собой связаны электрически.

ГЛАВА XII

ПОТЕНЦИОМЕТРЫ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ОТСЧЕТОМ (ПОТЕНЦИОМЕТРЫ С ОТСЧЕТОМ В ПОЛЯРНЫХ КООРДИНАТАХ)

Потенциометры этого вида изготавливаются для измерений на технических и на звуковых частотах. В большинстве конструкций имеется возможность применять потенциометр как обычный потенциометр постоянного тока с обычной точностью измерения этого прибора, и тогда установка рабочего тока производится на постоянном токе по нормальному элементу. Промежуточным прибором, указывающим вели-

чину и постоянство силы рабочего переменного тока потенциометра, служит обычно электродинамический прибор — миллиамперметр или вольтметр.

Потенциометр переменного тока с двойным генератором Франке

Несколько особо от обычных современных конструкций потенциометров стоит упомянутый выше двойной генератор Франке, являющийся фактически полным комплектом: потенциометр плюс питающие генераторы.

При измерениях методом Франке невозможно произвести установку силы тока по нормальному элементу; этот метод позволяет производить только сравнение измеряемых величин между собой, не позволяя связаться с основным эталоном электродвижущей силы. Несмотря на этот

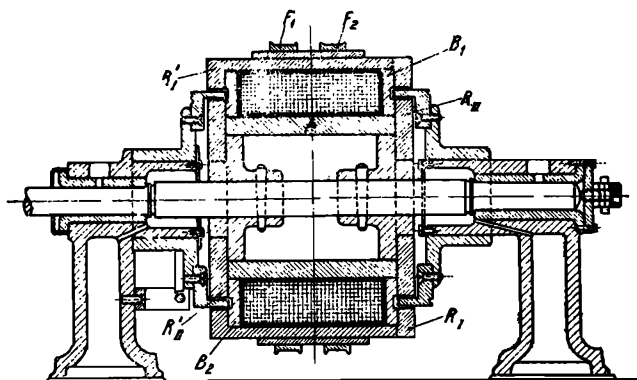


Рис. 83. Машина Франке.

недостаток, удобство применения метода Франке для измерений на звуковых частотах обеспечило ему большое распространение на измерениях с телефонными приборами.

Двойной генератор Франке, обычно называемый машиной Франке, [42] является примером наиболее старого применения компенсационного метода на переменном токе и представляет собой весьма интересную конструкцию, позволяющую изменять амплитуду и фазовый угол питающего измерительную цепь напряжения.

На приводимом во вращение от мотора стальном валу укреплен при посредстве чугуновых втулок цилиндр A из мягкого железа, на обоих концах которого насажены в горячем состоянии бронзовые кольца B_1 и B_2 (рис. 83). На лобовых поверхностях образованного таким образом барабана укреплены особого вида кольца из мягкого железа $R_I—R_I'$ и $R_{II}—R_{II}'$. Наружная поверхность колец R_{II} и R_{II}' и внутренняя поверхность колец R_I и R_I' имеют по 24 зубца синусоидального очертания (рис. 84), и каждый зубец внутренней окружности может быть расположен точно против зубца внешней.

Пространство между бронзовыми кольцами заполнено обмоткой, концы которой выведены к кольцам F_1 и F_2 , помещенным на внешнем

цилиндре из мягкого железа; посредством скользящих по кольцам щеток производится питание обмотки от источника постоянного тока. Эта обмотка создает магнитное поле в обоих цилиндрах (внешнем и внутреннем) и в обоих лобовых фигурных кольцах, причем так, что, если во внутреннем цилиндре поле направлено вправо, то во внешнем оно будет направлено влево, следовательно в обоих междужелезных пространствах магнитный поток направлен в противоположных направлениях.

Магнитное поле в этом пространстве вдоль окружности непостоянно. Величину его можно себе представить как бы состоящей из какой-то постоянной части, неизменяемой при постоянстве тока возбуждения, и из переменной части, обусловленной изменением длины пути магнитных линий в воздухе при передвижении от зубцов к впадинам. В этих междужелезных пространствах помещаются две якорные обмотки, шаг

которых соответствует шагу зубцов. Обмотки укреплены в шиферных кольцах, имеющих для этой цели специальные прорезы; при вращении оси, кольца (и вместе с ними обмотки), укрепленные на помещенных на подшипниках втулках, остаются неподвижными. Якорная обмотка при вращении оси пересекается магнитными линиями поля и в ней индуцируется электродвижущая сила. Постоянная составляющая магнитного поля индуцирует в идущих по образующей цилиндрической поверхности элементах обмотки электродвижущие силы противоположных направлений, взаимно уничтожающиеся; изменяющаяся же периодически (по окружности)

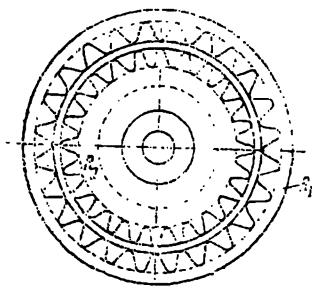


Рис. 84. Зубчатые диски машины Франке.

составляющая магнитного поля индуцирует в нечетных стержнях обмотки электродвижущую силу, опережающую на $\frac{1}{2}$ периода электродвижущую силу, индуцированную в четных стержнях. Четные и нечетные стержни направлены навстречу, и электродвижущие силы разного направления в них суммируются. Частота индуцированной в обмотке электродвижущей силы равна числу оборотов машин в секунду, умноженному на число зубцов: $f = n \cdot 24 \text{ Hz}$. Левый якорь укреплен так, что может поворачиваться в поле по отношению к правому якорю, для чего предусмотрена зубчатка с микрометрическим винтом, позволяющим отсчитать величину угла поворота. При повороте левого якоря на $\frac{1}{48}$ окружности, угол сдвига электродвижущих сил обоих якорей равен половине периода, и, таким образом, можно изменять относительный сдвиг фаз обоих генераторов.

Изменение амплитуды на машине Франке производится при посредстве второй якорной обмотки (правой на рис. 83). Кольцо, на котором находится эта обмотка, может перемещаться вдоль оси агрегата так, что обмотка якоря либо полностью находится в магнитном поле, либо частично из него выдвигается. В крайнем своем положении обмотка лежит вне поля, и индуцированная электродвижущая сила равна нулю. Перемещение кольца с обмоткой производится при посредстве микрометрического винта, и нанесенные деления дают величину амплитуды в процентах.

При помощи этого двойного генератора Франке определял относительное значение двух сравниваемых величин и величину угла между ними.

Машина Франке применяется и в настоящее время для различных измерений на звуковых частотах. Современная ее конструкция в выполнении фирмы Сименс и Гальске имеет вертикальную ось. Число полюсов современной конструкции увеличено до 40, благодаря чему возможно получать частоты до 2000 Hz.

Потенциометр Драйсдэла для постоянного и переменного токов

Потенциометр Драйсдэла (Drysdale) [32], выполняемый фирмой Тинслей (Tinsley) в Лондоне, применим для измерений на постоянном и на

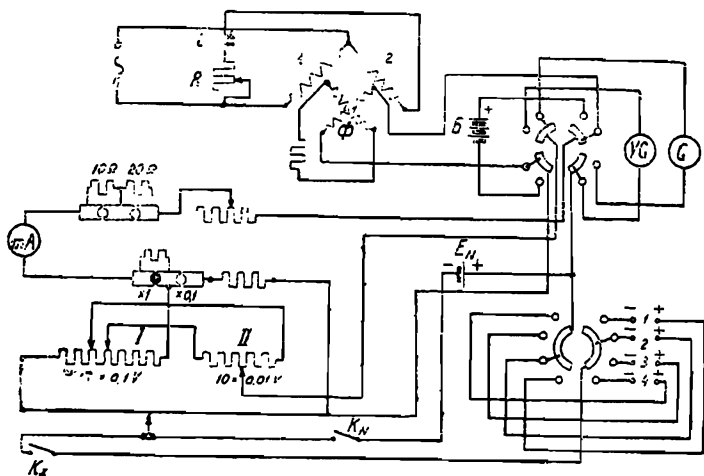


Рис. 85. Схема потенциометра Драйсдэла.

переменном токе. Упрощенная схема его соединений показана на рис. 85. Он представляет собой обычный потенциометр постоянного тока малого сопротивления; для создания сдвига вектора рабочего тока потенциометра питание потенциометра на переменном токе производится через встроенный в потенциометр фазорегулятор. Компенсационная цепь потенциометра образована рычажной декадой I, состоящей из 19 катушек, сопротивлением 2Ω каждая, и калиброванной проволокой в виде линейного реохорда, общим сопротивлением $0,23 \Omega$. Декада I имеет двоярный рычаг, щетки которого перекрывают два (через один) контакта. Эти щетки соединены с декадой II, состоящей из 10 катушек, сопротивлением $0,4 \Omega$ каждая. Таким образом общее сопротивление декады II равно $0,4 \times 10 = 4 \Omega$, и ввиду того, что эта декада включена параллельно двум катушкам декады I, сопротивление которых равно $2 \times 2 = 4 \Omega$, ток, идущий по ней, составляет половину рабочего тока I, равного 50 mA. Падение напряжения на одной катушке декады I $U_1 = I \cdot r_1 = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ V}$; соответственно падение напряжения на одной катушке декады II $U_2 = 0,5 \cdot I \cdot r_2 = 0,5 \cdot 0,05 \cdot 0,4 = 0,01 \text{ V}$; раз-

ность потенциалов на концах проволоки реохорда равна $0,05 \cdot 0,23 = 0,0115$ В. Линейки реохорда разделены на 115 частей и, следовательно, 10 делениям реохорда соответствует 0,001 В, а одному последнему делению — 0,0001 В. Таким образом полный отсчет по потенциометру равен: $17, \times 0,1 + 10 \times 0,01 + 0,0115 = 1,815$ В. Катушки магазинов изготовлены из манганиновой проволоки и намотаны бифилярно. Ввиду того, что при более высоких частотах катушки будут все же иметь некоторую реактивность, они изготовлены так, что все имеют одинаковые постоянные времена, благодаря чему сдвиг фаз между током и напряжением неизменен при всех положениях рычагов.

При питании потенциометра постоянным током установка силы рабочего тока производится по нормальному элементу.

Как уже указано, рабочий ток равен 0,05 А, и этому току должно соответствовать показание электродинамического миллиамперметра (Вестона), включенного в цепь потенциометра; если при установленном по нормальному элементу рабочем токе 50 мА прибор показывает какое-нибудь другое значение, необходимо при помощи корректора установить стрелку прибора на деление 50. Миллиамперметр имеет деления только по части шкалы соответственно около 50 мА, а именно от 45 до 55 деления, и нуля не имеет, так как для увеличения длины деления нуль смещен влево. При переключении на питание переменным током показание миллиамперметра должно остаться равным 50 мА.

Для регулировки рабочего тока на постоянном и на переменном токе, имеется штепсельный магазин с двумя сопротивлениями и реостат для тонкой регулировки. Переключение потенциометра с постоянного тока на переменный производится простым поворотом переключателя, причем этот же переключатель включает на постоянном токе магнито-электрический гальванометр, а на переменном токе — вибрационный.

Питание на постоянном токе производится от 4 или 6-вольтовой аккумуляторной батареи, емкостью не менее 40 Аh; питание же статора фазорегулятора, имеющего двухфазную обмотку, производится от однофазного тока с расщеплением фаз при посредстве включенных в одну ветвь конденсатора переменной емкости и переменного активного сопротивления. Для создания кругового вращающегося поля подаваемые на статор напряжения должны быть сдвинуты друг относительно друга точно на 90° (во времени) и равны между собой; при сдвиге же токов в первичных обмотках на угол, не равный 90° , и при неравенстве их амплитуд создается не круговое поле, а эллиптическое. Это легко обнаруживается при повороте ротора фазорегулятора; при круговом поле показание миллиамперметра при всех положениях ротора остается постоянным, при поле же эллиптическом показания миллиамперметра при различных положениях ротора различны. Можно установить направления осей эллипса, производя отсчеты по миллиамперметру (конечно, в том случае, если разность полуосей эллипса не выходит за предел показаний миллиамперметра). Для устранения этой эллиптичности необходимо изменять емкость и активное сопротивление расщепляющего устройства до тех пор, пока показание прибора не останется постоянным при всех положениях ротора. Это расщепление фаз очень сильно реагирует на изменение частоты, и при работе с потенциометром на различных частотах необходимо каждый раз перед началом измерений на данной частоте

производить проверку кругового поля. Совершенно ясно, что во все время измерения частота должна оставаться постоянной.

Самой сложной частью этого потенциометра является фазорегулятор (Ф на рис. 85), расположенный в правом нижнем углу потенциометра. Статор фазорегулятора собран из листов трансформаторной стали (толщиной 0,35 мм) и имеет двухполюсную обмотку, расположенную в полузакрытых канавках.

Для получения однородного магнитного поля по всей окружности (в междужелезном пространстве) число проводов каждой из двух фаз, помещенных в канавках, изменяется по окружности по закону синуса, оси же обмоток смещены на $\frac{1}{4}$ окружности.

Ротор фазорегулятора изготовлен также из листовой стали и имеет 36 полузакрытых канавок (в более старой модели — 40). На роторе расположены также две взаимноперпендикулярные обмотки: одна замыкается на потенциометр, вторая — на балансную обмотку, активное сопротивление и индуктивность которой равны активному сопротивлению и индуктивности потенциометра вместе с миллиамперметром. Благодаря этой конструкции реакция ротора постоянна при всех его положениях. Расположение обмоток ротора в канавках следует тому же закону, что и расположение обмоток статора.

Ось фазорегулятора вертикальна и может вращаться в двух подшипниках точно concentрично с внутренней поверхностью статора. Благодаря этому, а также благодаря очень точному выполнению поверхностей — внутренней статора и внешней ротора — зазор остается постоянным по всей окружности. На верхнем конце оси укреплено червячное колесо, находящееся в зацеплении с червяком, укрепленным на верхней крышке фазорегулятора. Этот червяк служит для плавного поворота ротора.

Ввиду того, что ротор фазорегулятора не имеет колец и присоединение подвижных обмоток к неподвижным сопротивлениям потенциометра и компенсирующей обмотки производится гибкими спиральными проводами, ротор имеет ограничитель угла поворота, позволяющий ему поворачиваться на угол, немного больший 360° .

Все описанные особенности фазорегулятора обуславливают большую точность его работы, и при точном, равном 90° , расщеплении фаз, поворот вектора напряжения на зажимах ротора следует механическому углу поворота с точностью до $\pm 0^\circ, 1$.

Напряжение на зажимах первичных обмоток фазорегулятора должно быть равно около 100 В.

При правильной подгонке 90° сдвига на каждую частоту, фазорегулятор может быть применен для измерений на частотах от 25 до 1000 и до 2000 Hz при параллельном соединении обеих половин первичных обмоток. Отсчет угла поворота фазорегулятора производится по соединенному с осью указателю, перемещающемуся по шкале, на которой нанесены деления: в I и IV квадрантах обычные деления на градусы, во II и III — деления, соответствующие синусам данного угла.

Кроме основного указателя, служащего для проверки кругового поля на оси ротора, имеется второй указатель, укрепляемый в любом положении и снабженный четырьмя взаимно-перпендикулярными стрелками, обозначенными: одна — „Index“, другая — „cosinus“ и две — „sinus“.

При производстве измерений ряда электрических величин один из векторов может быть принят за начальный, и для удобства отсчета при компенсации этого вектора, указатель (четырёхстрелочный) устанавливается на оси так, чтобы стрелка „Index“ стояла на нуле. При компенсации остальных векторов сдвиг стрелки „Index“ относительно нуля покажет угол сдвига второго, третьего и т. д. векторов относительно первого, а стрелки „cosinus“ и „sinus“ дадут значения косинуса и синуса данного угла. Таким образом при измерении, например, полного сопротивления можно установить „Index“ на нуль при компенсации напряжения на образцовом сопротивлении, и тогда стрелка „cosinus“ укажет значение коэффициента мощности измеряемой цепи при компенсации напряжения на исследуемом сопротивлении.

Установленный в потенциометре образцовый электродинамический миллиамперметр фирмы Вестон экранированного типа (*mA* на рис. 85) имеет шкалу с увеличенной длиной деления. Проверка его происходит только на точке 50 *mA*, для чего прибор имеет корректор для установки на 50 *mA*. Сопротивление миллиамперметра около 70 Ω .

Кроме описанных магазинов, миллиамперметра, реостатов и фазорегулятора на верхней панели потенциометра имеются:

1. Девять пар зажимов для присоединения: нормального элемента, аккумуляторной батареи, ротора фазорегулятора, двух гальванометров и четырех измеряемых ветвей.

2. Два ключа гальванометра — один в цепи нормального элемента K_N и один в цепи измеряемого напряжения K_X .

3. Вышеупомянутый 8-полюсный переключатель K_1 на два направления для переключения с постоянного тока на переменный.

4. Переключатель на четыре направления k_2 , позволяющий присоединить потенциальные концы любой из измеряемых цепей.

5. Штепсельный переключатель k_3 , служащий для изменения предела измерений потенциометра. При положении штепселя в гнезде *I* компенсационная цепь потенциометра непосредственно включена последовательно с миллиамперметром, при положении же штепселя в гнезде *0,1* компенсационная цепь зашунтирована сопротивлением, равным $1/9$ ее сопротивления, а для того чтобы общее сопротивление осталось неизменным, включено добавочное сопротивление, равное $9/10$ сопротивления компенсационной цепи (см. потенциометр Р. Франке — глава I).

Расщепляющее фазу устройство состоит из рычажного магазина, имеющего 3 ступени — единицы, десятки и сотни омов, общим сопротивлением 1111 — на наибольшую силу тока 0,3 А, и штепсельного слюдяного конденсатора, общей емкостью — 11,11 μF (ступенями через 0,01 μF). При расщеплении в пределах частот от 40 до 1000 Hz конденсатор и магазин включаются последовательно, при очень малых частотах 25—35 Hz конденсатор и магазин могут быть включены в параллельные ветви.

Установка 90° сдвига при всех частотах должна быть достигнута с возможной степенью точности, так как в противном случае могут возникнуть ошибки измерения, как это ясно из приводимой ниже краткой теории фазорегулятора.

Ротор фазорегулятора, как это ясно из самого его назначения, должен поворачивать вектор тока потенциометра при всех своих поло-

жениях на угол, строго пропорциональный механическому углу поворота. Чтобы это условие было соблюдено, статор должен создавать точно круговое поле, что возможно лишь при равенстве амплитуд и при точной квадратуре фаз тока статора. Если кривая питающего статор тока синусоидальна, возможно написать для мгновенного значения тока первой фазы: $i_1 = \sqrt{2} \cdot I \cos \omega t$ и для индуцируемого им в катушке ротора параллельной данной катушке статора (пространственно) мгновенного значения электродвижущей силы, $e_1 = \sqrt{2} \cdot E \sin \omega t$, где амплитуда электродвижущей силы $E \cdot \sqrt{2}$ пропорциональна действующему значению тока I . Если амплитуда тока второй фазы статора не равна амплитуде первой, и угол сдвига между токами i_1 и i_2 отличается от 90° на угол δ , можно написать: $i_2 = \sqrt{2} \cdot I(1+a) \sin(\omega t - \delta)$, где: a — некоторая малая положительная или отрицательная величина и δ — малый положительный или отрицательный угол. Этот ток индуцирует тогда в той же катушке ротора электродвижущую силу: $e_2 = \sqrt{2} \cdot E(1+a) \cos(\omega t - \delta)$, если она повернута из своего предыдущего положения на 90° и расположилась параллельно обмотке второй фазы, и в этом случае первая фаза электродвижущей силы в катушке ротора не индуцирует. При любом промежуточном положении катушки ротора на нее действуют две обмотки статора. Если пространственный угол поворота катушки от положения, принятого за начальное, равен θ , то индуцированные в катушке ротора электродвижущие силы $e_1' = e_1 \cos \theta$ и $e_2' = e_2 \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) = e_2 \sin \theta$, и полная электродвижущая сила: $e_1 =$

$$= e_1' + e_2' = e_1 \cos \theta + e_2 \sin \theta = \sqrt{2} E \{ \cos \theta \sin \omega t + (1+a) \sin \theta \cos(\omega t - \delta) \}.$$

Ввиду малости угла δ выражение

$$\cos(\omega t - \delta) = \cos \omega t \cos \delta + \sin \omega t \sin \delta$$

может быть представлено в виде:

$$\cos(\omega t - \delta) = \cos \omega t + \delta \sin \omega t.$$

Подставляя полученное выражение в предыдущую формулу и отбрасывая член, содержащий произведение $a \cdot \delta$, имеем:

$$e = \sqrt{2} E \{ (\cos \theta + \delta \sin \theta) \sin \omega t + (1+a) \sin \theta \cos \omega t \} = \\ = \sqrt{2} \{ E_1' \sin \omega t + E_2' \cos \omega t \}.$$

Положительная величина амплитуды электродвижущей силы e равна корню квадратному из суммы квадратов обоих сдвинутых на угол 90° значений амплитуд электродвижущих сил, т. е.:

$$E_m' = \sqrt{2} E \sqrt{(\cos \theta + \delta \sin \theta)^2 + (1+a)^2 \sin^2 \theta}$$

и действующее ее значение

$$E' = E \sqrt{(\cos \theta + \delta \sin \theta)^2 + (1+a)^2 \sin^2 \theta}.$$

Это выражение имеет постоянное значение при всех углах поворота ротора только при a и δ , равных нулю, т. е. при равенстве амплитуд

токов и при угле сдвига между ними, равном 90° . Так как, кроме того, можно написать:

$$e' = E_m \sin(\omega t - \psi),$$

где

$$\psi = \arctg \frac{E_1'}{E_2'} = \arctg \frac{(1+a) \sin \theta}{\cos \theta + 2 \sin \theta},$$

то при a и δ , равных нулю, $\tg \psi = \tg \theta$, т. е. угол поворота вектора тока потенциометра равен механическому углу поворота фазорегулятора.

Очевидно, что при требованиях большой точности измерения необходимо тщательно следить за правильностью расщепления фаз и равенством амплитуд, что может быть всегда проверено постоянством показания миллиамперметра при повороте ротора фазорегулятора.

При точной установке кругового поля, достаточно чистых синусоидах тока потенциометра и измеряемого напряжения, точность измерения потенциометра Драйсдэла на переменном токе равна точности отсчета по миллиамперметру Вестона. Если считать, что постоянство поправок миллиамперметра на постоянном и переменном токе лежит в пределах $\pm 0,1\%$ и что установка на 50-е деление может быть произведена с точностью до 0,05 А, т. е. также до $\pm 0,1\%$, то точность отсчета потенциометра на переменном токе будет около 0,2%.

Потенциометр Круковского

Основным недостатком потенциометра Драйсдэла является зависимость расщепления фаз от частоты.

В потенциометре Круковского фазорегулятор имеет трехфазную обмотку и питание его производится от трехфазного источника [35].

Особенностью потенциометра Круковского является также то, что прибором, служащим для контроля постоянства рабочего тока, является здесь вольтметр, присоединенный к тем же точкам потенциометра, к которым присоединяется питающий его источник. Таким образом поддерживается постоянным, строго говоря, не рабочий ток потенциометра, а напряжение на его зажимах. По указаниям самого Круковского, предпочтительнее производить измерение рабочего тока, что, однако, в этом потенциометре затруднительно, так как рабочий ток мал. Потенциометр Круковского является потенциометром большого сопротивления и сконструировать образцовый миллиамперметр переменного тока на такую малую силу тока (10 мА) очень трудно. Фазорегулятор и контрольный вольтметр в самый потенциометр не встроены и могут быть установлены на желаемом от него расстоянии. Отнесение фазорегулятора имеет некоторое преимущество, так как уменьшает возможность влияния полей рассеяния фазорегулятора на собственно измерительную цепь.

Потенциометр Круковского выполнен фирмой Вольф, и схема включения его промежуточных магазинов аналогична обычной схеме потенциометра Вольфа. Рабочая цепь этого потенциометра состоит из одной декады, состоящей из 14 катушек, сопротивлением 100 Ω каждая, двумя двойными декадами, обычной конструкции Вольфа, состоящими из 9 катушек по 10 Ω , 9 катушек по 1 Ω и одним реохордом, сопротивлением около 1,1 Ω . Общее сопротивление рабочей цепи потенциометра 1500,1 Ω . Имеющееся добавочное сопротивление 13500 Ω позволяет увеличить все сопротивление потенциометра до 15000,1 Ω . Вклю-

[illegible]

Добавочное сопротивление цепи гальванометра R_g , встроенное в потенциометр, имеет ступени сопротивления: 100000 Ω , 5000 Ω , 300 Ω и 0. Измеряемое напряжение присоединяется, с одной стороны, к рычагу магазина $14 \times 100 \Omega$, а с другой, через переключатель и гальванометр — к движку реохорда. Источник, питающий потенциометр присоединяется к зажимам, расположенным справа, именно: к первому и третьему или к первому и четвертому. Первый и второй зажимы и третий и четвертый между собой соединены накоротко. К свободным зажимам (например, ко второму и четвертому) присоединяется контрольный вольтметр. Этот вольтметр теплового типа на 15 В, с сопротивлением около 50 Ω . Подаваемое на зажимы потенциометра напряжение устанавливается по вольтметру точно 15 В, следовательно рабочий ток потенциометра $I = \frac{15}{1500} = 0,01$ А при заставленном штепселе и $I = \frac{15}{15000} = 0,001$ А при введенном добавочном сопротивлении.

Питание потенциометра производится либо от аккумуляторной батареи, либо от вторичной обмотки фазорегулятора Φ через изолирующий трансформатор T . Для пересоединения цепи потенциометра с постоянного тока на переменный имеется (отдельный от потенциометра) переключатель на два направления k_1 , связанный механически со вторым переключателем на два направления k_2 , включающим либо измеряемое напряжение переменного тока U_x , либо нормальный элемент E_N через магнитоэлектрический гальванометр, и тогда вибрационный гальванометр остается в компенсационной цепи.

Проверка правильности показания контрольного вольтметра производится по нормальному элементу. Если при точно установленном по нормальному элементу рабочем токе $I = 0,01$ А показание вольтметра не равно 15 В, стрелка прибора должна быть установлена на деление 15 В включением (или выключением) специального переменного добавочного сопротивления вольтметра.

Выполнение катушек сопротивления произведено очень тщательно: они все изготовлены из манганина и намотаны бифилярно на металлических покрытых изолирующим слоем трубках. Добавочное сопротивление потенциометра состоит из трех катушек, намотанных по Шаперону на фарфоровые цилиндры.

При установленном рабочем токе 0,01 А полный отсчет по потенциометру равен 15,01 В и может быть произведен через каждые 0,0001 В; при рабочем же токе 0,001 А предел измерения потенциометра равен 1,501 В и наименьший отсчет по реохорду составляет 0,00001 В; в этом случае для обеспечения достаточной точности отсчета должен быть применен гальванометр большой чувствительности.

Фазорегулятор, применяемый с потенциометром Круковского изготовлен фирмой Сименс-Шуккерт и представляет собой индукционный мотор трехфазного тока с заторможенным ротором. От обычного мотора он отличается отсутствием контактных колец; вывод концов обмотки ротора производится гибкими проводами через пустотелый вал.

Питание фазорегулятора производится со стороны ротора, а одна из обмоток статора присоединяется через изолирующий трансформатор T к потенциометру. Ротор фазорегулятора поворачивается при помощи укрепленной на валу рукоятки, и угол поворота отсчитывается по положению указателя на неподвижной шкале. Для точного отсчета угла есть специальное устройство, позволяющее произвести отсчет угла с точностью до $0,01^\circ$ и состоящее из рычага, помещенного на выступающем конце вала фазорегулятора. При посредстве специального винта этот рычаг может быть жестко сцеплен с валом. К рычагу около его конца прикреплена спиральная пружина, другим своим концом присоединенная к неподвижному угольнику и прижимающая рычаг к винту микрометра, укрепленного на другом неподвижном угольнике. Винт микрометра при посредстве карданной передачи соединен со штангой управления, маховичок которой расположен возле потенциометра. Это сделано, чтобы иметь возможность точно устанавливать угол при компенсации. Расстояние точки касания микрометра на рычаге от центра вала фазорегулятора установлено так, что один полный поворот микрометрического винта соответствует повороту ротора на 0,5 электрических градуса. Ввиду того, что одному обороту микрометра соответствует

50 делений окружности, возможно произвести отсчет угла поворота ротора с точностью до 0,01 электрического градуса. При компенсации производится первоначальная установка угла грубо, при помощи рукоятки, причем рычаг на валу не закреплен. Затем рычаг укрепляется на валу винтом, и точная компенсация угла производится поворотом маховичка карданной передачи. Благодаря тому, что рычаг сильной спиральной пружиной всегда прижат к микрометричному винту, исключается возможность мертвого хода.

Преимущество этого фазорегулятора по сравнению с фазорегулятором Драйсдела то, что изменение частоты не влияет на круговое поле, создаваемое ротором. Однако, если вектора фазных напряжений питающих фазорегулятор генератора не точно сдвинуты между собой на 120° , то поле в междужелезном пространстве не будет точно круговым, и угол поворота ротора (в электрических градусах) не будет точно равен углу поворота вектора напряжения статора. Поэтому Круковский рекомендует производить измерения, питая фазорегулятор от специального генератора, ничем, кроме него, не нагруженного, звезда напряжения которого может считаться практически симметричной.

Для избежания возникновения токов утечки потенциометр присоединяется к фазорегулятору не непосредственно, а через изолирующий трансформатор T . Этот трансформатор состоит из обычного трансформаторного сердечника из листовой трансформаторной стали и из двух катушек, намотанных на различные картонные обоймы. Внутренний диаметр вторичной катушки настолько велик, что сердечник свободно через нее проходит, нигде ее не касаясь. Катушка смонтирована на двух фарфоровых изоляторах, и концы ее обмотки также выведены к зажимам на особом фарфоровом изоляторе. Это устройство обеспечивает очень хорошую изоляцию вторичной обмотки от всей первичной цепи.

Для улучшения кривой тока потенциометра имеется дроссельная катушка D_1 (безжелезная), состоящая из 13 положенных друг на друга последовательно-включенных катушек дискообразной формы. Число витков каждой катушки — 170, намотанных из медной проволоки диаметром 3,0 мм. Сопротивление катушки — около 3 Ω , индуктивность $L = 0,6$ Н.

На схеме (рис. 86) потенциометр показан в упрощенном виде. Как видно из схемы, питание измеряемого объекта (в данном случае амперметра) производится от генератора, сидящего на одном валу с генератором, питающим потенциометр. Для улучшения кривой измеряемого тока* в цепи генератора также включена дроссельная катушка D_2 . Показанные на схеме два частотомера f служат для более грубого и более точного отсчета частот.

Служащий нулевым прибором на переменном токе вибрационный гальванометр типа Шеринг и Шмидт (Schering u. Schmidt) (VG на рис. 86) является прибором электромагнитного типа и имеет возбуждение постоянным током, величина которого может изменяться двукратным реостатом P (при настройке). Лампа осветителя гальванометра присоединена к тому же источнику питания, что и возбуждение гальванометра, и при выключении этого последнего также выключается.

При измерениях разностей потенциала не ниже 0,5 В, точность измерений при помощи всего этого устройства, согласно анализа, произ-

веденного Круковским, достигает 0,1% при практически синусоидальной электродвижущей силе генераторов. Точность измерения углов: 1) около 20' при измерении малых углов, порядка 100', 2) около 0,5—1,0% при измерении углов порядка 90°.

Потенциометр Шарпа и Кроуфорда

Простой потенциометр в полярных координатах был разработан Шарпом и Кроуфордом (Sharp and Crawford) [115] в 1910 г. В этом потенциометре поворот вектора рабочего тока производится не при помощи фазорегулятора, а при помощи особой схемы, от которой отбирается питающее потенциометр напряжение.

Сущность этого устройства ясна из следующего. Если какое-либо активное сопротивление включено между первой и второй фазами трехфазной цепи, то фаза вектора напряжения между зажимами третьей фазы, с одной стороны, и скользящим по активному сопротивлению движком, с другой, изменяется при перемещении этого движка от фазы первой к фазе второй в пределах 60°, величина же этого вектора изменяется от какого-то максимального значения U до значения $\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U$, и имеет это наименьшее значение при среднем положении движка. Подавать непосредственно на потенциометр напряжение, изменяющееся при изменении угла сдвига, конечно, не является возможным. Поэтому Шарп и Кроуфорд применили остроумную комбинацию двух механически между собой связанных автотрансформаторов, благодаря которым вектор питающего потенциометр напряжения остается постоянным по величине при изменении угла сдвига. Вследствие того, что вектор напряжения между третьей фазой и скользящим между первой и второй фазами движком изменяется только в пределах 60°, вектор тока потенциометра также изменяется только в пределах 60° первого квадранта и при переключении питающих концов также в пределах 60° третьего квадранта. Последнее обстоятельство является недостатком этой схемы, так как не всегда возможно скомпенсировать измеряемую разность потенциалов в пределах этого угла. Однако при некоторых специальных измерениях, например, при снятии магнитных характеристик образца трансформаторной стали, когда изменение угла сдвига фаз между первичным током и напряжением на измерительной катушке образца находится в пределах 60°, применение этого потенциометра вполне приемлемо. Питание измеряемой цепи и цепи потенциометра должно производиться от двоярного генератора, статор одного из которых поворотный, что необходимо для первоначальной грубой установки угла сдвига.

Потенциометр завода „Электроаппарат“

Этот потенциометр [81] предназначен, главным образом, для измерений при исследованиях образцов трансформаторной стали, — снятия магнитных характеристик и кривых потерь. Для сдвига фаз вектора рабочего тока потенциометра применена особая схема фазорегулятора без вращающихся частей. Принципиальная схема соединений потенциометра вместе с фазорегулятором показана на рис. 87. Фазорегулятор состоит из двух одинаковых сопротивлений $z/2$ и $z/2$, к концам которых при-

соединены последовательно включенные: конденсатор C и переменное активное сопротивление (магазин) R_3 . Точная безреактивность этих сопротивлений $z/2$ и $z/2$ не имеет значения, так как они собственно являются частями делителя напряжения и важна лишь их идентичность.

Питание потенциометра производится от средней точки между сопротивлениями $z/2$ и $z/2$ и между конденсатором C и декадой R_3 .

При изменении сопротивления введенной части магазина R_3 изменяется угол сдвига напряжения, подаваемого на потенциометр, по отношению к питающему фазорегулятор напряжению. Изменение угла сдвига, как это следует из дальнейшего, зависит от величин активного сопротивления R_3 и емкости C (см. диаграмму — рис. 88). На основании законов Кирхгофа для переменного тока, напряжение U_2 , подаваемое на потенциометр, определяется из: ¹

$$\bar{U}_2 = \bar{I}R_3 - \frac{\bar{U}_1}{2} \text{ или: } \bar{U}_2 = \frac{\bar{U}_1}{2} + jI \frac{1}{\omega C},$$

где I — ток в цепи C и R_3 (током потенциометра пренебрегаем).

Подставляя значение тока $I = \frac{U_1}{R_3 - j \frac{1}{\omega C}}$, имеем:

$$U_2 = \frac{U_1}{2} \frac{\left(R_3 + j \frac{1}{\omega C}\right)}{\left(R_3 - j \frac{1}{\omega C}\right)} \text{ или } U_2 = \frac{U_1}{2} \cdot e^{2j \arctg 1/R_3 \omega C}$$

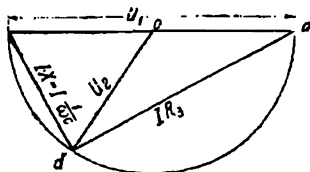


Рис. 88. Векторная диаграмма фазорегулятора потенциометра завода „Электроаппарат“.

Из последнего выражения видно, что получаемое на потенциометре напряжение U_2 постоянно по величине, равно половине напряжения питающего источника и изменяется по фазе в зависимости от параметров цепи R_3 и C .

Как видно из приведенной схемы, питание намагничивающей обмотки испытуемого образца и фазорегулятора, производится не-

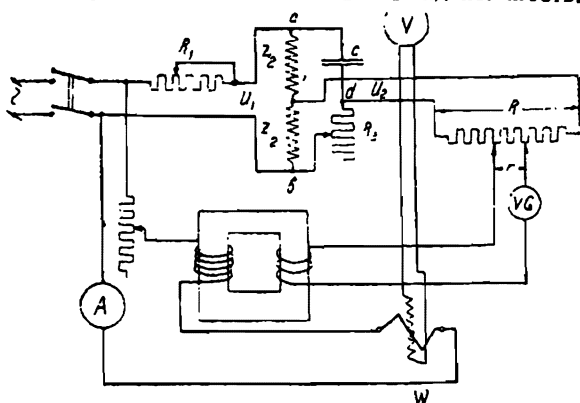


Рис. 87. Принципиальная схема потенциометра завода „Электроаппарат“.

¹ Все эти рассуждения правильны лишь в том случае, если сопротивления $1/\omega C$ и R_3 малы по сравнению с сопротивлением потенциометра.

посредственно от одного и того же источника, что возможно, так как электрическое разделение цепей производится в самом измеряемом объекте. К движкам потенциометра присоединяются концы измерительной катушки образца. Отсчет угла сдвига производится по показанию имеющегося в цепи ваттметра W , токовая обмотка которого включается последовательно с намагничивающей катушкой образца, вольтовая же обмотка присоединяется к фазорегулятору параллельно потенциометру и вольтметру. Таким образом отсчет ваттметра при известной величине намагничивающего тока и напряжения на потенциометре пропорционален косинусу угла сдвига между намагничивающим током и напряжением на зажимах потенциометра. Если сопротивление катушек потенциометра возможно считать безреактивным или если все катушки имеют одну и ту же постоянную времени, то отклонения стрелки ваттметра пропорциональны косинусу угла сдвига между намагничивающим током и электродвижущей силой, индуцированной в измерительной катушке. С другой стороны, так как напряжение на потенциометре при всех положениях его вектора остается постоянным, показания ваттметра пропорциональны активной составляющей намагничивающего образца тока. Таким образом показание ваттметра может быть прочтено в амперах намагничивающего тока, и ваттметр является как бы амперметром активной составляющей намагничивающего тока.

Для большей ясности произведем вывод условий равновесия. В момент компенсации имеем следующие соотношения:

$$U_x \cdot \varepsilon^{j\varphi_x} = U_2 \cdot \frac{r}{R} \cdot \varepsilon^{j\varphi_2}.$$

где U_x — искомое напряжение (в данном случае электродвижущая сила измерительной катушки), R — активное сопротивление всего потенциометра (между зажимами вольтметра), r — компенсационное сопротивление потенциометра и φ_x и φ_2 — углы сдвига векторов U_x и U_2 относительно какого-то начального положения. Из этого выражения имеем:

$$U_x = U_2 \cdot \frac{r}{R}; \text{ и } \varphi_x = \varphi_2$$

и, так как $(\varphi_2 - \varphi_1) = (\varphi_x - \varphi_1)$, где φ_1 — угол сдвига намагничивающего тока и тока потенциометра,

$$\varphi_x - \varphi_1 = \arccos \frac{P}{U_2 \cdot I'},$$

где P — отсчет по ваттметру и I' — намагничивающий ток образца. Последнее выражение может быть представлено и в таком виде:

$$I' \cdot \cos(\varphi_x - \varphi_1) = \frac{P}{U_2}.$$

Отсюда следует, что, так как напряжение U_2 постоянно, то показание пропорционально активной составляющей намагничивающего тока.

Таким образом, искомое напряжение U_x , искомый сдвиг фаз и активная составляющая намагничивающего тока получаются из отсчетов по потенциометру, измерительным приборам и по параметрам потенциометра.

Собственно потенциометр состоит из четырех рычажных декад и одного реохорда. Сопротивления декад — $9 \times 1000 \Omega$; $9 \times 100 \Omega$; $9 \times 10 \Omega$ и $9 \times 1 \Omega$, сопротивление реохорда — 1Ω ; таким образом общее сопротивление компенсационной цепи потенциометра составляет:

$$9 \times 1000 + 9 \times 100 + 9 \times 10 + 9 \times 1 + 1 = 10000 \Omega.$$

Рычажные декады — двойные (типа магазинов Вольфа), так что при перемещении рычагов общее сопротивление потенциометра не изменяется. Потенциометр рассчитан на питание от сети напряжения до 220 V. В потенциометр встроены переключатель на четыре направления, позволяющий производить попеременное испытание четырех образцов на данном намагничивающем токе. При массовом испытании образцов этот переключатель позволяет значительно ускорить работу.

Ввиду того, что фазорегулятор служит только для создания требуемого сдвига, отсчет угла по нему не производится, и он не выполнен в виде отдельного аппарата, а представляет собой только собранную из отдельных частей схему. Сопротивления $z_{1/2} + z_{2/2}$ представляют собой реостат Рустрата, сопротивлением 20Ω с выведенной средней точкой. Сопротивление, регулирующее фазу — R_3 — состоит из двух реостатов: для грубой и тонкой регулировки, сопротивлением 800Ω и 250Ω . Емкость C выполнена в виде 40 соединенных параллельно слюдяных конденсаторов, емкостью $1 \mu F$ каждый.

Для регулировки питающего фазорегулятор напряжения служит реостат R_1 , сопротивлением $6,5 \Omega$. Нулевым прибором в этом потенциометре служит вибрационный гальванометр электро-магнитного типа. Отсчет напряжения U_2 и намагничивающего тока образца I' производится по техническим приборам — вольтметру и двум амперметрам на 5 и на 1 A, применяемых в зависимости от величины намагничивающего тока. Отсчет фазового угла производится по техническому электродинамическому ваттметру на напряжение 60 V и на токи 1,25; 2,5 и 5,0 A. Для регулировки тока, питающего обмотку образца, применены три реостата Рустрата, сопротивлением 250, 10 и $2,5 \Omega$.

Описанное компенсационное устройство не является, конечно, потенциометром для точных лабораторных измерений, однако, оно значительно ускоряет производство измерений и гарантирует точность, достаточную при испытании образцов трансформаторной стали.

Демонстрационный потенциометр переменного тока Кенэлли

В 1911 г. профессор Кенэлли (Kenelly) [79] в Гарварде (США) сконструировал очень оригинальный потенциометр специально с целью демонстрации студентам законов переменного тока. Собственно потенциометр состоит из тонкого манганинового квадратного листа (рис. 89), ко всем четырем сторонам которого припаян ряд параллельных медных проволок. Проволоки, находящиеся на одной стороне листа, соединены между собой медной полосой. Питание этого потенциометра производится от двух находящихся в квадратуре фаз небольшого двухфазного генератора (через два трансформатора), причем каждая фаза присоединена к двум диаметрально противоположным рядам проволок через середину медных полос. Благодаря подобному питанию листа, в нем как

бы проходят два различных взаимно-перпендикулярных гармонически изменяющихся тока. Напряжение между любыми двумя точками поверхности листа пропорционально расстоянию между ними (сопротивление листа должно быть однородно по всей его поверхности), и его фазовый угол зависит от угла наклона соединяющей эти точки линии. Если один контакт укрепить точно в центре листа O и к нему присоединить один полюс измеряемого объекта, то второй можно перемещать по поверхности до тех пор, пока не будет достигнута компенсация. Положительные вектора и его величину в известном масштабе дает прямая линия между нулевым и вторым контактами на листе.

Описанный потенциометр непригоден, конечно, для точных измерений, но при изучении законов переменного тока он дает очень наглядную картину расположения векторов и их величин.

Потенциометры для измерений на радиочастотах

Все описанные потенциометры предназначены, главным образом, для применения на технических и отчасти на звуковых частотах. Для применения компенсационного метода для измерений на высоких частотах

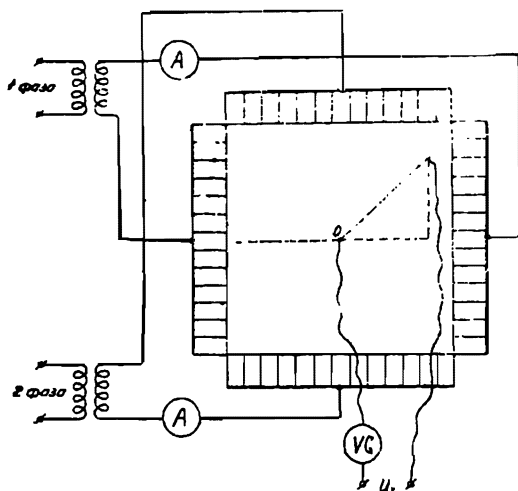


Рис. 89. Схема демонстрационного потенциометра Кензэлли.

Б. С. и Ф. Д. Смит (B. S. and F. D. Smith) [117] разработали специальный потенциометр, по принципу действия сходный с потенциометром Дрейсдэла. Фазорегулятор этого потенциометра представляет собой две взаимно-перпендикулярные цилиндрические катушки, по конструкции сходные с катушками Гельмгольца. При питании этих катушек токами, находящимися в квадратуре, в центре создается однородное вращающееся магнитное поле. Такое питание может производиться от лампового генератора высокой частоты с расщеплением фаз при посредстве активного сопротивления и емкости, аналогично расщеплению фаз, применяемому в потенциометре Дрейсдэла.

Вторичная катушка этого потенциометра смонтирована на вертикальной оси, и фаза индуктированной в ней электродвижущей силы изменяется как в обычном фазорегуляторе, пропорционально углу поворота. Изменение величины компенсирующего вектора производится поворотом катушки вокруг горизонтальной оси, благодаря чему плоскость катушки может находиться под различным углом к направлению линий сил магнитного поля, и индуктированная во вторичной катушке электродвижущая сила может изменяться от своего максимального значения, при вертикальном положении плоскости катушки, до нуля при ее горизонтальном положении. Таким образом при повороте катушки вокруг горизон-

тальной оси и вращении ее вокруг вертикальной, может быть скомпенсирована всякая разность потенциалов, величина которой лежит в пределах измерения данного потенциометра и которая получается от того же источника, от которого питается потенциометр.

Отсчет угла сдвига производится непосредственно по циферблату вертикальной оси, а величины вектора — по микрометру, поворачивающему катушку на горизонтальной оси. Противодействующее усилие создается пружиной, укрепленной на горизонтальной оси вращения. Шкала, указывающая величину вектора, приблизительно равномерна. Для установки точного значения вектора индуктированной электродвижущей силы к зажимам вторичной катушки присоединяется радиочастотный ламповый вольтметр Мулэна. Изменяя напряжение питающего источника и параметры расщепляющего устройства, добиваются, чтобы электродвижущая сила катушки при всех углах поворота ее вокруг вертикальной оси была равна 1,5 V, причем плоскость катушки при этом должна быть вертикальна. Нулевым прибором в этом потенциометре, как и во всех радиоизмерениях, служит телефон с соответствующей гетеродинной усилительной схемой.

Другой сходный с описанным потенциометр для высоких частот был разработан К. Лионом (K. Lion) [97] в Дармштадте в 1928 г. Этот потенциометр имеет также две неподвижные прямоугольные катушки, укрепленные под прямым углом и питаемые расщепленным током. Вторичных катушек две; они вращаются около горизонтальной оси и одна из них может поворачиваться относительно другой. Угол сдвига фаз между электродвижущими силами, индуктированными в обеих катушках, равен углу между их плоскостями. При производстве измерений одна из катушек питает измеряемый объект, а другая дает рабочий ток потенциометра. Этот потенциометр может работать в больших пределах высоких частот. Ввиду малой мощности, служащей для питания измеряемого объекта, этот потенциометр применим, главным образом, для испытаний электронных ламп и усилителей.

Ламповый потенциометр Уэнта

Очень интересная схема потенциометра, применяемого для измерений на частотах до 10 000 Hz, разработана в исследовательской лаборатории американской телефонной компании Уэнтом (E. S. Wente) [129] в 1921 г. Подробная схема соединений этого потенциометра показана на рис. 90. Здесь L_1 , L_2 , L_3 — три электронных трехэлектродные лампы. Вторичная обмотка трансформатора T_1 присоединяется к последовательно включенным: конденсатору переменной емкости C и к изменяемому активному сопротивлению R_c ; напряжения от зажимов активного сопротивления и от конденсатора подаются на сетки ламп L_1 (емкость) и L_2 (активное сопротивление). Катоды этих ламп присоединяются через общую батарею потенциала сетки к средней точке O , аноды же через конденсаторы C_1 и C_2 присоединены к двум одинаковым трансформаторам T_2 и T_3 , вторичные обмотки которых замкнуты на два одинаковых активных сопротивления R_1 и R_2 . При посредстве скользящих контактов K_1 и K_2 часть сопротивления R_1 , как и часть сопротивления R_2 (последовательно) присоединяется к сетке и катоду третьей лампы L_3 ; с другой

стороны, анод и катод этой лампы присоединяются к первичной обмотке трансформатора T_4 ; вторичная обмотка которого приключается к компенсационному сопротивлению потенциометра. Питание этой схемы может производиться от соответствующего лампового генератора.

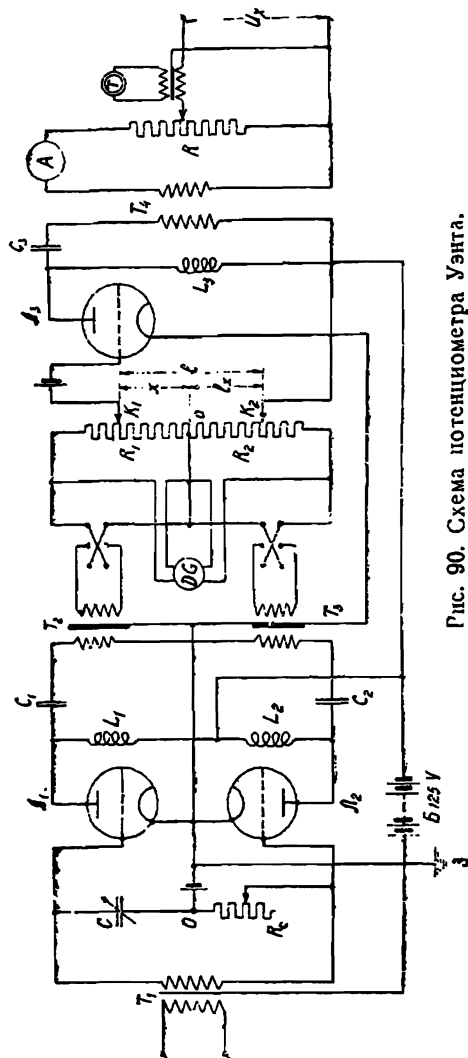


Рис. 90. Схема потенциометра Уэнга.

Подаваемое от генератора на активное сопротивление и емкость напряжение, при полных сопротивлениях R_c и $1/\omega C$ достаточно малых по сравнению с сопротивлением лампы со стороны сетки, т. е., при малом нагрузочном токе, расщепляется на два взаимно перпендикулярных напряжения. При равенстве сопротивлений R_c и $1/\omega C$, полной идентичности трансформаторов T_2 и T_3 и при одинаковых полных сопротивлениях ламп со стороны выхода — токи в сопротивлениях R_1 и R_2 будут также сдвинуты один относительно другого на 90° . Правильным подбором C и R_c эти токи могут быть также сделаны и равными по величине.

Для упрощения этой подгонки применен специальный дифференциальный гальванометр переменного тока. Два связанных между собой скользящих контакта K_1 и K_2 перемещаются по сопротивлениям R_1 и R_2 . Эти контакты расположены так, что при одном крайнем их положении сетка лампы L_3 присоединена только к зажимам сопротивления R_1 и в другом крайнем положении — только к зажимам сопротивления R_2 .

Ввиду того, что токи, а, следовательно, и напряжения на зажимах сопротивлений R_1 и R_2 сдвинуты на 90° , вектор напряжения на контактах K_1-K_2 может поворачиваться на 90° ; при применении переключателей направления тока сдвиг может быть получен в пределах полной окружности. Соответственно этот же сдвиг будет получаться и во вторичной обмотке трансформатора T_4 и на сопротивлении потенциометра R . Для постоянства вектора тока потенциометра сопротивления R_1 и R_2 должны быть подобраны так, чтобы напряжение, подаваемое

мое на сетку лампы $\mathcal{L}_3$, было постоянно при всех положениях движков K_1 и K_2 . Если $\frac{x}{l}$ — отношение части сопротивления R_1 между точками o и k ко всему сопротивлению R_1 и $\frac{1-x}{l}$ — отношение части сопротивления R_2 между точками o и K_2 ко всему сопротивлению R_2 , то сопротивление между точками o и K_1 должно быть:

$$R \cdot \cos\left(\frac{x}{l} \cdot \frac{\pi}{2}\right),$$

и сопротивление между точками k_2 и a должно быть:

$$R \cdot \sin\left(\frac{x}{l} \cdot \frac{\pi}{2}\right).$$

Тогда мгновенное значение напряжения между точками K_1 и K_2 будет:

$$\begin{aligned} u &= \sqrt{2} \cdot IR \cos\left(\frac{x}{l} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \sin \omega t + \sqrt{2} \cdot IR \sin\left(\frac{x}{l} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cos pt = \\ &= \sqrt{2} IR \sin\left(pt + \frac{x}{l} \cdot \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned}$$

В этом выражении $\sqrt{2} \cdot I \sin pt$ и $\sqrt{2} I \cdot \cos pt$ — мгновенные значения токов в сопротивлениях R_1 и R_2 . При соблюдении этих условий изменение сдвига фаз тока потенциометра не повлечет за собой изменения его величины.

Для получения точности отсчета угла до $0^\circ,1$ сопротивления R_1 и R_2 должны быть разделены на 900 катушек, присоединенных к 901 контакту. Это устройство, конечно, практически невыполнимо и такую точность отсчета можно получить, только применяя двойные щетки, включаемые аналогично общеизвестной схеме Томсона — Варлея. Разница этого включения щеток от обычного способа Томсона — Варлея та, что щетки перекрывают две соседние пластины (как в потенциометре Рапса); шунтирующее сопротивление велико по сравнению с сопротивлением катушки магазина R_1 (или R_2).

Все части описанного потенциометра монтированы в одном ящике, и управление всеми переменными величинами находится на верхней панели. Дифференциальный гальванометр, помещенный внутри прибора, имеет лучевой отсчет непосредственно на панели прибора, так что установка равенства токов в R_1 и R_2 достаточно удобна.

Указателем компенсации в этом потенциометре служит, как обычно при звуковых и высоких частотах, телефон, а на технических частотах — вибрационный гальванометр. Для контроля тока компенсационной цепи потенциометра, в цепи вторичной обмотки трансформатора T_4 предусмотрен амперметр (не монтированный в потенциометре).

Описанный потенциометр предназначен, главным образом, для измерений на звуковых или радио-частотах. Для возможности компенсации измеряемый объект должен питаться от того же источника, что и трансформатор потенциометра T_4 .

ПОТЕНЦИОМЕТРЫ С ОТСЧЕТОМ ВЗАИМНОПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИЛИ КОМПЛЕКСНЫЕ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ

Комплексные потенциометры, как и потенциометры в полярных координатах, изготавливаются для измерений на технических и звуковых частотах. Для связи производимых измерений с установленной единицей электродвижущей силы в большинстве комплексных потенциометров производится градуировка промежуточного образцового прибора и лишь в некоторых потенциометрах (Голл, Кэмпбелл) возможна установка рабочего тока потенциометра по нормальному элементу при питании активной его части постоянным током. В потенциометрах этого вида промежуточным образцовым прибором (вторичным эталоном), также как и в потенциометрах в полярных координатах, обычно служит электродинамический прибор или магнитоэлектрический прибор с термостатом.

Комплексный потенциометр Ларсена

Для измерений на телефонных аппаратах в кабелях Ларсен (Absalon Larsen) [89—90] разработал компенсационный метод, в котором компенсирующее напряжение составляется из двух сдвинутых на 90° напряжений. При компенсации величина обоих векторов напряжений изменяется до тех пор, пока не получится полной компенсации измеряемого напряжения, обнаруживаемой отсутствием звука в телефоне. Показанная на рис. 91 схема объясняет вышесказанное. CB —

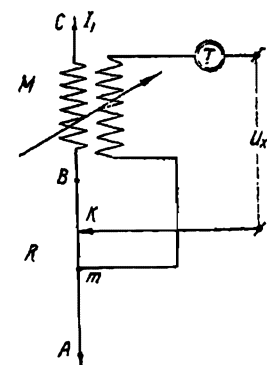


Рис. 91. Схема потенциометра Ларсена

первичная катушка переменной взаимной индукции M включена последовательно с проволочным реохордом AB , и вся цепь CA питается от какого-либо источника переменного тока, электрически не связанного с цепью измеряемого объекта; в случае наличия только одного источника, питание должно производиться через изолирующий трансформатор; при питании же от различных генераторов обе цепи должны иметь одинаковую частоту.

Пусть по калиброванной проволоке реохорда проходит ток, мгновенное значение которого $i = \sqrt{2} \cdot I \sin \omega t$, тогда мгновенное значение напряжения между неподвижной точкой m и подвижным контактом k , если сопротивление отрезка проволоки $k-m=r$,

$$e_1 = ri = \sqrt{2} \cdot r \cdot I \sin \omega t.$$

Вторая составляющая компенсирующего напряжения получается от вторичной катушки вариометра CB :

$$e_2 = M \frac{di}{dt} = M \omega \sqrt{2} \cos \omega t.$$

Взаимное расположение катушек переменного, отчего величина M также имеет возможность изменяться от $-M$ через 0 до $+M$. Напряжение

на зажимах U_x должно быть уравновешено во всякий момент геометрической суммой обеих составляющих e_1 и e_2 , т. е.:

$$u_x = e_1 + e_2 = I \cdot \sqrt{2} (r \sin \omega t + M \omega \cos \omega t).$$

Полагая, что $u_x = U_x \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, и переходя к действующим значениям, получаем:

$$U_x = I \sqrt{r^2 + (M \omega)^2} \quad \text{и} \quad \tan \varphi = \frac{M \omega}{r}.$$

Применявшийся Ларсеном вариометр принадлежит к разработанному Кэмпбеллом (Albert Campbell) типу. Он состоит из двух подвижных катушек, вращающихся в промежутке между четырьмя неподвижными катушками. При изменении взаимного расположения подвижных и неподвижных катушек изменяется величина коэффициента взаимной индукции M , а, следовательно, и величина индуктированной электродвижущей силы.

Величина тока первичной катушки при этом остается постоянной.

При вращении подвижных катушек в одну и другую от нуля сторону, индуктированная в подвижных катушках электродвижущая сила будет получать отрицательные и положительные значения. Подобный вариометр имеет не прямолинейную характеристику и должен иметь градуировочную кривую.

Для получения положительных и отрицательных значений активной составляющей компенсирующего напряжения, с вторичной катушкой вариометра соединена средняя точка проволочного реохорда, и движок может перемещаться в одну и в другую от нее сторону.

Ввиду того, что в выражение для компенсируемой разности потенциалов входит величина $\omega = 2 \pi f$, где f — частота переменного тока, необходимо поддерживать частоту постоянной во все время измерения и определять ее с достаточной точностью.

Потенциометр Ларсена, выполненный Кенэлли и Филандером

Кенэлли и Филандер (Kenelly a. Velandier) [79] разработали потенциометр по схеме Ларсена с видоизмененной конструкцией вариометра, имеющей характеристику, более близкую к прямолинейной. Этот потенциометр предназначен, главным образом, для работы на частоте, при которой $\omega = 2 \pi f = 10\,000$. При рабочем токе потенциометра, равном 100 мА, предел измерений его $(5,05 + j \cdot 3,85) \text{ В}$.

Потенциометр Кэмпбелла-Ларсена

В простой системе потенциометра Ларсена составляющие измеряемой величины $E_1 = rI$ и $E_2 = \omega MI$ получаются из отсчетов на потенциометре величин r и M , в величину же $\omega = 2 \pi f$ входит значение частоты f , которая должна быть измерена с достаточной точностью. Кроме того, величина E_2 определяется как произведение $M \omega f$, а не получается непосредственным отсчетом на потенциометре.

Кэмпбелл [20] видоизменил схему потенциометра Ларсена так, чтобы получить отсчет составляющей E_2 непосредственно по показанию варио-

метра. Устройство, при помощи которого получено указанное упрощение, показано на рис. 92. Питаящий потенциометр ток I' разделяется между обеими параллельными ветвями петлевого шунта R и S в точках F и K при посредстве движков, при перемещении которых изменяется относительная величина сопротивлений параллельных ветвей петли R и S . От движка K ток идет далее в первичную неподвижную обмотку катушки взаимной индукции M , поворотом вторичной обмотки которой можно получать величину коэффициента взаимоиндукции, плавно изменяющуюся от небольшой отрицательной величины до большой положительной. Составляющая E_1 получается из непосредственного отсчета на сопротивлении r ; это сопротивление имеет обычную конструкцию сопротивления потенциометра с соответствующими контактами и переключателями и входит в плечо R петлевого шунта RS . В это же плечо входит описанный ниже (рис. 92) своеобразный амперметр A , служащий для измерения силы рабочего тока I .

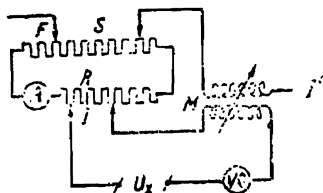


Рис. 92. Потенциометр Кэмпбелла.

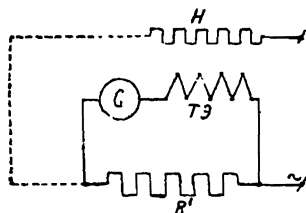


Рис. 93. Схема установки силы рабочего тока потенциометра Кэмпбелла.

Обозначим через I ток в ветви R и через U_x результирующее напряжение, компенсирующее измеряемое напряжение. Постоянную величину $(R + S)$ обозначим через $2a$. Тогда:

$$U_x = rI + j\omega \cdot I',$$

причем ток

$$I' = I \frac{R + S}{S}$$

(I' — ток в первичной обмотке вариометра).

При постоянном для данной частоты отношении $\frac{S}{R}$, подобранном так, что $S/(R + S) = \omega/b$, где b — постоянная для установки потенциометра на данную частоту, имеем:

$$U_x = (r + jbM) I. \quad (2)$$

Если частота, при которой производится измерение, известна, необходимо установить движки K и F так, чтобы $S = 2a\omega/b$. Магазин S может быть непосредственно градуирован в частоте для установки положения движков соответственно f или величине $\omega = 2\pi f$. Необходимо заметить, что применение петлевого шунта RS (называемого часто петлей Кэмпбелла) позволяет устанавливать величину S прямо-пропорционально частоте измерения, что, конечно, упрощает отсчет. Постоянная b выбирается так, чтобы отсчет по вариометру получался в тех же единицах, что и отсчет по безреактивному сопротивлению.

Установка тока потенциометра по нормальному элементу производится при посредстве специального устройства — амперметра, изображенного на рис. 93, при помощи которого сила тока поддерживается постоянной и во все время измерений. Устройство это состоит из: подогревательной проволоки H , включенной последовательно с термоэлементом $T\Theta$ и с магнитоэлектрическим гальванометром G ; гальванометр и термоэлемент зашунтированы небольшим активным сопротивлением R' . При прохождении постоянного тока по цепи нагревателя H , в термопаре возникает электродвижущая сила E ; величина сопротивления R' подбирается так, чтобы падение напряжения на нем уравновешивало термоэлектродвижущую силу E , и тогда отклонение подвижной части гальванометра будет равно нулю.

При переключении подогревателя H из цепи постоянного тока в цепь переменного тока, подогрев термопары $T\Theta$ производится переменным током, и величина его устанавливается так, чтобы гальванометр G и в этом случае отклонения не дал. Необходимо заметить, что для того чтобы сила вспомогательного (градуировочного) постоянного тока при пересоединении подогревателя осталась неизменной, в цепь постоянного тока вводится сопротивление, величина которого равна сопротивлению H . При установке переменного тока описанным способом, действующее значение тока I равно значению постоянного тока $I_{осм}$, величина которого может быть всегда определена по нормальному элементу. При достаточном постоянстве источника переменного тока, можно получить точность установки рабочего тока I до $0,1\%$. Величина рабочего тока потенциометра Кэмпбелла устанавливается равной 10 мА .

Конструктивное выполнение этого потенциометра производится фирмой „Кэмбридж Инструмент“. Вся установка состоит из ящика с активными сопротивлениями и из отдельного образцового вариометра. В состав ветви R петлевого шунта входят две декады (на падение напряжения $17 \times 0,1\text{ В}$ и $10 \times 0,01\text{ В}$) и неиндуктивная калиброванная проволока, градуированная в милливольтх. Вторая параллельная цепь шунта S состоит из трех декад и одного реохорда, градуированных непосредственно в единицах частоты. Специальный переключатель автоматически переключает обе составляющие компенсирующего напряжения, и положение его указывает, в каком квадранте находится вектор измеряемого напряжения. В этом же ящике помещен и описанный выше амперметр с сопротивлением R' и переключателем с постоянного тока на переменный. Магнитоэлектрический гальванометр смонтирован в самом приборе. В качестве нулевого прибора на переменном токе служит телефон, присоединяемый к зажимам на панели прибора.

Применяемая в приборе образцовая переменная взаимоиנדукция (вариометр) разработана Кэмпбеллом для точных измерений индуктивностей и емкостей и имеет шкалу до 260° , близкую к прямолинейной градуировке.

Схема соединений вариометра Кэмпбелла ясна из рис. 94а, а принцип его конструкции — из рис. 94б. На каркасе c помещены две неподвижные первичные катушки и две неподвижные вторичные, подвижная же вторичная катушка m может поворачиваться при помощи указателя p вокруг вертикальной оси O , благодаря чему величина взаимоиנדукции M изменяется от небольшой отрицательной величины до большой положи-

тельной. Маленькая вспомогательная катушка, плоскость которой перпендикулярна плоскости катушки ms , механически соединена с последней и вращается вместе с ней. Как это видно из схемы, обе первичные катушки соединены между собой последовательно (между точками G и H) и между ними реохорд с движком k . Неподвижные вторичные катушки присоединены к двум магазинам индуктивности L_1 и L_2 . Первый магазин L_1 дает значения 100, 200, ... 1000 mH и второй магазин L_2 — 1000, 2000, ... 10000 mH ; секции этих катушек вводятся и выводятся посредством движков и соединяются между собой так, что то или иное число секций всегда включено последовательно. Начало магазина индуктивностей L_2 присоединено к внешнему зажиму B , а движок магазина L_1 через зажимы CD и E присоединяется к катушке d , служащей для установки нуля и последовательно присоединенной к подвижной

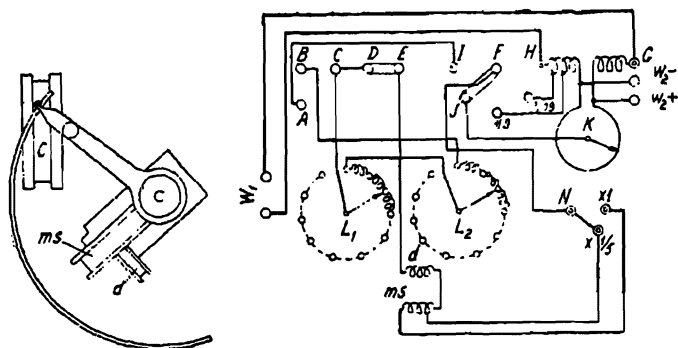


Рис. 94. Схема соединений вариометра Кэмпбелла.

вторичной катушке ms . Переключатель N служит для изменения множителя шкалы ($\times 1$) и ($\times 1/3$). При применении вариометра с потенциометром, переключатель F ставится в свое левое положение, и питание первичной обмотки вариометра производится через зажимы W_1 .

Рабочий ток этого потенциометра устанавливается на 10 mA , и тогда пределы измерения: на активной части потенциометра — от 0 до 1,81 V , наибольший отсчет по вариометру — 1,11 V , а полный предел измерения — 2,1 V . Этот прибор градуирован для частот от 25 до 1000 Hz , но может быть применен и для частот, достигающих 2000 Hz , однако в этом случае шунт S (рис. 92) не может быть установлен на частоту, и отсчет должен производиться так же, как в потенциометре Ларсена.

Потенциометр Кэмпбелла — Ларсена может служить и потенциометром постоянного тока. В этом случае вариометр не включается, и отсчет берется только по магазинам сопротивлений.

Компенсационная схема Дегинья, служащая для измерения малых углов на технических частотах

Для измерения малых углов на технических частотах Дегинья (C. Deguisne) [24] применил схему, аналогичную схеме Ларсена, заменив вариометр специальным устройством вариометра (Phasenschlitten).

Вариометр обычной конструкции сильно реагирует на влияние внешних магнитных полей той же частоты, что и частота, на которой производятся измерения. Это может повести к совершенному искажению результата измерений малых углов сдвига. Вариометр Дегинья имеет специальную конструкцию, сводящую до минимума влияние внешних полей, и представляет собой собственно безжелезный трансформатор, состоящий из двух намотанных в разном направлении катушек, которые могут вдвигаться во внутреннее пространство двух других катушек, намотанных также в противоположном направлении. Каждая пара этих намотанных навстречу катушек соединена между собой последовательно и, таким образом, при выдвигании одной пары катушек из другой изменяется магнитная связь между ними, а следовательно при прохождении в первичной катушке тока, изменяется и величина индуктированной во

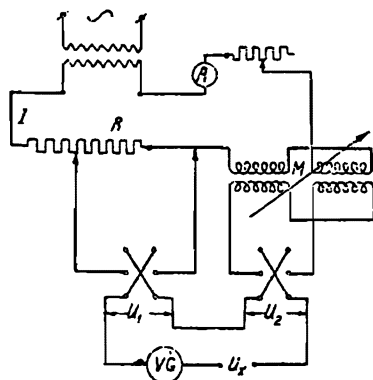


Рис. 95. Компенсационная схема Дегинья.

вторичных катушках электродвижущей силы. Первичная обмотка состоит из двух соленоидов, каждый по 300 витков, намотанных на стеклянных трубках диаметром 2 см и длиной около 15 см. При вторичной обмотке, состоящей также из двух соленоидов по 1200 витков, намотанных на стеклянной трубке диаметром 1 см и той же длины, что и первичные соленоиды, коэффициент взаимной индукции между ними M может принимать значения от 0 до 0,0008 Н. Если частота питающего первичную обмотку тока $f = 50$ Hz, то индуктированная во вторичной обмотке электродвижущая сила $E = \omega MI = 2\pi f MI = 314 M \cdot I$, где I ток первичной обмотки. Величина ωM , изменяющаяся в зависимости от взаимного расположения катушек, может при этой частоте принимать значения от 0 до 0,25 Ω . Первичные катушки намотаны из проволоки $\varnothing 0,5$ мм и тогда активное их сопротивление равняется около 5 Ω и индуктивность — 0,0009 Н. Компенсационная схема Дегинья изображена на рис. 95, откуда видно, что для того, чтобы иметь возможность производить измерения во всех четырех квадрантах, предусмотрены два двухполюсных переключателя, переключающих напряжения U_1 и U_2 , получаемые на активном сопротивлении R и на обеих вторичных катушках вариометра M . Как указано выше, схема эта специально предназначена для измерения малых углов сдвига. Дегинья производил на ней сравнение сопротивлений катушек сопротивления и шунтов на переменном токе. Активная составляющая измеряемого напряжения уравнивалась напряжением на движках магазина и реохорда, а реактивная составляющая отсчитывалась по шкале на соленоидах. При шкале вариометра, непосредственно градуированной в величине ωM , для частоты переменного тока $f = 50$ Hz из отсчетов непосредственно получался тангенс угла сдвига между током I в активном сопротивлении потенциометра и измеряемым напряжением. При измерении сопротивлений шунтов производился отсчет напряжения и угла сдвига попеременно на образцовом

и на измеряемом сопротивлении, и по определенным каждый раз тангенсам находился действительный сдвиг, создаваемый поверяемой катушкой, иначе говоря, — реактивная составляющая ее сопротивления. Если $\tan \alpha_1 = \frac{\omega M_1}{R_1}$, где M_1 и R_1 — значения, полученные для уравновешивания напряжения на образцовой катушке, а $\tan \alpha_2 = \frac{\omega M_2}{R_2}$, где R_2 и M_2 — значения, полученные для компенсации напряжения на катушке поверяемой, то угол сдвига напряжения на зажимах поверяемой катушки по отношению к напряжению на зажимах образцовой определяется из

$$\tan \delta = \frac{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2}{1 - \tan \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2},$$

и если угол между током, проходящим по образцовому сопротивлению, и напряжением на его зажимах известен, возможно определить и величину реактивного сопротивления поверяемого шунта. Величина его активного сопротивления определяется по величине образцового сопротивления.

При описанной выше конструкции вариометра Дегинья и при величине активного сопротивления компенсационной цепи потенциометра около 12 Ω , можно измерять углы сдвига до 1°.

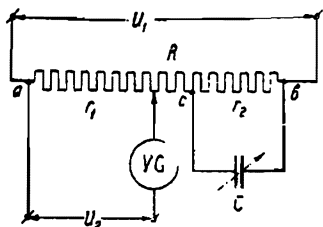


Рис. 96. Компенсационная схема Шеринг-Альберти.

Компенсационная схема Шеринг-Альберти для проверки измерительных трансформаторов

Для компенсации и вместе с тем для точного измерения малых углов сдвига между векторами сравниваемых напряжений, Шеринг и Альберти (Schering u. Albery) [84] и [112] применили вместо вариометра, как в схеме Ларсена, конденсатор переменной емкости, включенный параллельно с активным сопротивлением. Принципиальная схема включения показана на рис. 96. При равновесии подвижной части гальванометра напряжение на зажимах измеряемого источника равно напряжению на сопротивлении r_1 и величина измеряемого напряжения определяется из уравнения:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{r_1}{R},$$

так как, по условиям самой конструкции компенсационной схемы, разность фаз мала, и полное сопротивление z мало отличается от активного сопротивления R .

Для нахождения угла сдвига надо произвести несколько более сложные выкладки. Измеряемое напряжение при компенсации находится в фазе с падением напряжения на активном сопротивлении r_1 , т. е. с током, проходящим по этому сопротивлению, угол же сдвига между напряжением на зажимах всего потенциометра и током находится по его параметрам. Полное сопротивление компенсационной цепи равно

$z = (R - r_2) + j y_k$, где y_k проводимость параллельной ветви r_2 и C . Со своей стороны, эта проводимость определяется из:

$$y_k = \frac{1}{r_2} + j\omega C = \frac{1 + j\omega C r_2}{r_2},$$

откуда полное сопротивление части cb

$$z_k = \frac{1}{y_k} = \frac{r_2}{1 + j\omega C r_2}.$$

Освобождаясь от мнимости в знаменателе, имеем:

$$z_k = \frac{r_2 - j\omega C r_2^2}{1 + \omega^2 C^2 r_2^2}.$$

Подставляя это значение $j y_k$ в выражение для z , имеем:

$$z = \frac{R + (R - r_2)\omega^2 C^2 r_2^2}{1 + \omega^2 C^2 r_2^2} - j \frac{\omega C r_2^2}{1 + \omega^2 C^2 r_2^2} = r + jx,$$

где r и x — активное и реактивное сопротивление между точками ab , откуда угол сдвига δ между током в потенциометре (в частности и в сопротивлении r_1) и напряжением на его зажимах определяется из:

$$\tan \delta = \frac{x}{r} = \frac{\omega \cdot C \cdot r_2^2}{R + (R - r_2) \omega^2 \cdot C^2 \cdot r_2^2}.$$

При указанном на схеме способе включения конденсатора возможна компенсация угла сдвига только одного знака и именно только в том случае, когда измеряемый вектор опережает вектор напряжения потенциометра, и переключение тока в цепи потенциометра, как это делается в схемах с взаимной индукцией, изменить знак угла не может. Для компенсации угла противоположного знака конденсатор включается не между точками bc , а между точками ac ; определяемый угол сдвига в этом случае будет равен углу между напряжением на зажимах активного сопротивления ab и напряжением на зажимах всего потенциометра. Вывод аналогичен предыдущему.

В схемах подобного рода для точности измерения угла имеет большое значение безреактивность сопротивлений $(R - r_2)$ и r_2 , поэтому в приборах Шеринг-Альберти все сопротивления выполнены очень тщательно, с безреактивной намоткой (Шаперон).

Ввиду того что весь прибор Шеринг-Альберти имеет специальное назначение только для проверки измерительных трансформаторов и не является собственно универсальным потенциометром, на конструкции прибора мы здесь останавливаться не будем, тем более, что описание этого прибора для проверки трансформаторов тока и трансформаторов напряжения появлялось неоднократно на русском языке [84].

Видоизменение схемы Ларсена для измерения малых напряжений на звуковых частотах (схема Паже)

При измерениях очень малых напряжений на описанных выше потенциометрах очень трудно получить достаточную точность измерения. Причиной этого является недостаточная чувствительность и возможность возникновения паразитных токов, оказывающих в процент-

ном отношении очень большое влияние на погрешность полученного результата. Для получения более точных результатов измерения Паже (A. Pagés) [105] применил в лаборатории „Общества исследований телефонной и телеграфной связи“ (Франция) измерительную схему с ламповыми усилителями со стороны измерительной схемы и измеряемого объекта, причем усилительная лампа со стороны измерительной схемы применена для того, чтобы избежать влияния паразитных токов на усилитель.

Описываемое устройство состоит в следующем: оба напряжения, измеряемое и компенсирующее — на потенциометре, поданы на сетки двух трехэлектродных электронных ламп, аноды которых соединены между собой через первичную обмотку маленького трансформатора, вторичная обмотка которого замкнута на телефон. Если работать на прямолинейной части характеристики лампы, токи анода пропорциональны

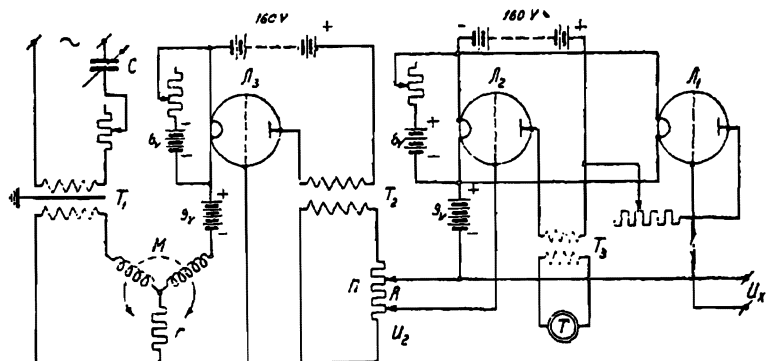


Рис. 97. Схема потенциометра Паже по Ларсену.

напряжению на сетке, и лампа в данном случае является генератором с точно определенным внутренним сопротивлением и с постоянным коэффициентом усиления.

При схеме соединений, показанной на рис. 97, телефон будет молчать при равенстве амплитуд анодных токов и при сдвиге фаз, равном точно 180° . Вторичная обмотка питающего трансформатора T_1 замкнута на активное сопротивление r и на первичную катушку вариометра. Получаемое на активном сопротивлении и вторичной катушке вариометра напряжение подается на сетку третьей добавочной лампы, анодный ток которой через трансформатор T_2 питает собственно потенциометр Π .

Напряжение U_2 на движках этого потенциометра, подаваемое на сетку второй лампы, пропорционально току потенциометра и активному сопротивлению R , заключенному между его движками. Если трансформатор T_2 имеет постоянный коэффициент трансформации при различных первичных токах (что практически может быть выполнено), вторичный ток трансформатора равен первичному, умноженному на коэффициент трансформации K ; первичный же ток трансформатора, являющийся анодным током I' третьей лампы, в свою очередь, пропорционален напряжению на ее сетке U_{j1} . Если R_1 и μ — параметры лампы, и z —

полное сопротивление потенциометра, приведенное к первичной цепи трансформатора T_2 , ток анода третьей лампы

$$I' = \frac{\mu \cdot U_1}{R_1 + z},$$

где R_1 — внутреннее сопротивление третьей лампы и U_1 — напряжение, поданное на сетку.

С другой стороны, напряжение U_1 , получаемое от r и M , может быть представлено в виде:

$$U_1 = (r + j M \omega) I,$$

где I — ток в сопротивлении r и первичной катушке вариометра M .

Таким образом окончательное выражение для компенсирующего напряжения получается в виде:

$$U_x = U_2 = RK \frac{\mu}{R_1 + z} \cdot (r + j \omega M) I = (Ar + j \omega M) R,$$

где через A обозначен тот множитель выражения, который не изменяется при двойном уравнивании потенциометром Π и r и M . Величина A — постоянна при постоянной частоте измерения.

Описанная схема применима для сравнения двух напряжений по величине и по фазе. Действительно, при последовательной компенсации двух напряжений U_x и U_x' имеем:

$$\frac{U_x}{U_x'} = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{\sqrt{A^2 r^2 + M_1^2 \omega^2}}{\sqrt{A^2 r'^2 + M_2^2 \omega^2}},$$

где R_1 , R_2 , M_1 и M_2 — отсчеты при компенсации. Угол сдвига фаз между измеряемыми векторами определяется из

$$\delta = \arctan \frac{M_1 \omega}{r} - \arctan \frac{M_2 \omega}{r'} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Ввиду применения этой схемы для измерений на звуковых (телефонных) частотах, при которых очень часто бывает необходимо произвести исследование данного объекта при различных частотах, для удобства отсчета величина r в зависимости от частоты устанавливается равной:

$$r = \frac{\omega}{a},$$

где a — постоянная величина. В этом случае отсчет угла

$$\varphi_x = \arctan \frac{\omega M}{r} = \arctan \frac{\omega M a}{\omega} = \arctan a M,$$

т. е. от частоты не зависит.

По указанию автора схемы точность измерения на ней при сравнении величин от 0,001 до 1 В при тщательно выбранной аппаратуре является вполне удовлетворительной.

Комплексный потенциометр Эрланга

Все вышеописанные комплексные потенциометры принадлежат к первой группе комплексных потенциометров. Потенциометр Эрланга (Er-lang) [35] принадлежит ко второй группе комплексных потенциометров

и предназначен для измерения на звуковых частотах при исследовании телефонных приборов.

Рабочая цепь этого потенциометра состоит из двух параллельных ветвей, и проходящие по ним токи сдвинуты на некоторый фазовый угол. Каждая из этих параллельных ветвей имеет калиброванную проволоку (рис. 98) (R_1 и R_2), сопротивлением 50Ω каждая. Эта проволока и является измерительной частью прибора. Она разделена на миллиметры, причем нуль помещен посередине длины проволоки. Последовательно с одной из параллельных проволок (с обеих ее концов) присоединены две образцовые катушки индуктивности, каждая индуктивностью $0,01 \text{ Н}$ и сопротивлением 3Ω ; во второй параллельной цепи, также последовательно с проволокой, включены два одинаковые активные сопротивления, величина которых равна активному сопротивлению катушек. При питании этой схемы переменным током, токи, проходящие по обеим параллельным ветвям, сдвинуты один относительно другого на угол α ,

следовательно на тот же угол сдвинуты и падения напряжения вдоль обеих проволок. Этот угол α при постоянной в известных пределах частоты индуктивности катушек L пропорционален частоте переменного тока f .

Тангенс угла сдвига может быть выражен следующей формулой:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L}{R + r},$$

где L — индуктивность катушек (обеих), выраженная в генри, R — сопротивление проволоки, r — активное сопротивление обеих катушек (в омах) и $\omega = 2\pi f$ — круговая частота (f — выражено в герцах).

Соответственным подбором величины активных и реактивных сопротивлений в потенциометре Эрланга $\frac{R+r}{L}$ сделано равным 2800 , и $\omega = \frac{R+r}{L} \cdot \operatorname{tg} \alpha = 2800 \operatorname{tg} \alpha$.

Измерение таким образом производится в косоугольных координатах.

Компенсирование измеряемого напряжения производится попеременным перемещением движков k_1 и k_2 на обеих калиброванных проволоках. Питание потенциометра может производиться от любого генератора звуковой частоты с достаточно чистой синусоидой.

При питании потенциометра и измеряемого объекта от одного и того же источника, потенциометр питается от вторичной катушки безжелезного трансформатора.

Для проверки величины угла сдвига фаз токов в обеих проволоках при неизвестной частоте, или, с другой стороны, для определения частоты, при которой производится измерение, Эрланг применял тот же безжелезный трансформатор, который служит при измерениях изолирующим потенциометр трансформатором. Питание потенциометра производилось тогда не через изолирующий трансформатор, а непосредственно

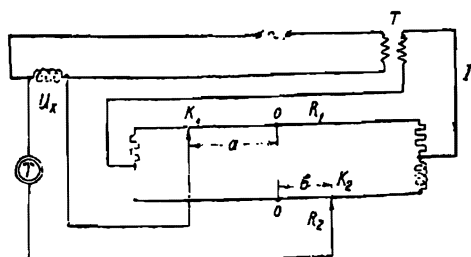


Рис. 98. Схема потенциометра Эрланга.

от генератора, причем вторичная обмотка трансформатора включалась последовательно с потенциометром, а первичная обмотка присоединялась непосредственно к движкам потенциометра. Напряжение на зажимах подведенной к движкам первичной обмотки сдвинуто, как во всяком безжелезном трансформаторе или вариометре при разомкнутой вторичной обмотке (в данном случае она называется первичной), на угол, равный 90° , относительно тока первичной, а следовательно и полного тока потенциометра. Уравновесив напряжение на первичной обмотке трансформатора и получив два отсчета a и b на обоих реохордах, имеем:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{2 \left(\frac{b}{a} - 1 \right)},$$

откуда может быть определена круговая частота

$$\omega = 2800 \operatorname{tg} \alpha.$$

(Вывод этой формулы за недостатком места здесь не приведен). Как видно из схемы (рис. 98), нулевым прибором служит телефон

Потенциометр Педерсена

Более совершенная схема комплексного потенциометра с двумя параллельными ветвями, токи в которых сдвинуты между собой на некоторый угол, разработана Педерсеном (Р. О. Pedersen) [106]. В этом потенциометре две параллельных ветви состоят: одна из активного сопротивления и емкости, другая из активного и индуктивного сопротивлений (рис. 99). Если в такой цепи оба активных сопротивления равны между собой и, кроме того, величина их в омах равна квадратному корню из индуктивности в генри деленной на емкость в фарадах, т. е.

$$R_1 = R_2 = R = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

то токи в них сдвинуты на 90° .

Производя подсчет полного сопротивления каждой из параллельных ветвей и полного сопротивления всей цепи потенциометра, можно получить выражение обоих токов в параллельных ветвях I_1 и I_2 в зависимости от общего тока I (L выражено через R и C из предыдущей формулы):

$$I_1 = \frac{1 - j\omega CR}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \cdot I$$

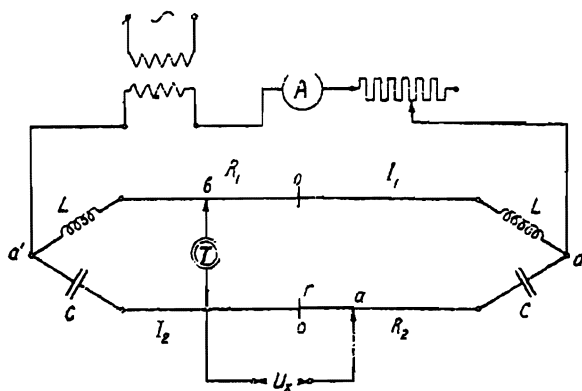


Рис. 99. Схема потенциометра Педерсена.

$$I_2 = \omega CR \cdot \frac{\omega CR + j}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \cdot I_1;$$

откуда, подставляя значение I_1 , имеем: $I_2 = j \omega CR I_1$.

Это выражение показывает, что ток I_2 в ветви, содержащей емкость, опережает на 90° ток I_1 в ветви, содержащей индуктивность. Таким образом, отсчет по одному из активных сопротивлений дает одну составляющую уравновешиваемого напряжения, а отсчет по другому — вторую составляющую, перпендикулярную первой (отсчет дается в прямоугольных координатах).

Выполненный по описанной схеме потенциометр давал бы компенсационное напряжение только в одном квадранте. Чтобы иметь возможность компенсировать напряжение, вектора которых могут находиться в любом квадранте, Педерсен усовершенствовал свою схему, применив вместо одного два конденсатора и вместо одной катушки индуктивности — две (рис. 99). Активные сопротивления (реохорды) включаются между катушками в первой ветви и между конденсаторами во второй, причем средняя точка реохорда первой ветви и средняя точка реохорда второй — имеют напряжение, равное нулю, так как составляющие их напряжения равны между собой и противоположны по знаку. Это ясно из следующего простого вывода. Напряжение между точками o — a (см. рис. 99) в первой ветви равно:

$$U_1 = I_1 \left(\frac{R}{2} + j \omega L_1 \right).$$

Соответственно напряжение между точками O и a' во второй ветви равно:

$$U_2 = I_2 \left(\frac{R}{2} - \frac{1}{j \omega C_1} \right),$$

где L_1 и C_1 — индуктивность и емкость половины цепи и по сравнению с первоначальной схемой $L_1 = \frac{L}{2}$ генри и $C_1 = 2C$ фарад, активное же сопротивление, как и в первой схеме, равно $\sqrt{\frac{L}{C}}$ или $2\sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$. Подставляя в предыдущие выражения значения L_1 и I_2 , имеем:

1) напряжение (o — a) индуктивной цепи:

$$U_1 = I_1 \left(\frac{R}{2} + j \omega \frac{R^2 C_1}{2} \right) = I_1 \cdot \frac{R}{2} (1 + j \omega RC_1)$$

2) напряжение (o — a') емкостной цепи:

$$U_2 = I_1 \cdot j \omega CR (R - j \frac{1}{\omega C_1}) = I_1 j \frac{\omega C_1 R}{2 \omega C_1} (R \omega C_1 - j) = I_1 \frac{R}{2} (1 + j \omega RC_1),$$

т. е. $U_1 = U_2$.

Чтобы электрические точки нуля совпадали с нулями шкалы реохорда, в практическом выполнении своего потенциометра Педерсен устанавливает на концах калиброванной проволоки четыре небольших активных сопротивления; изменяя величины этих сопротивлений, можно

отрегулировать положение нуля шкалы и точно установить соотношения

$$R_1 = R_2 = R = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Компенсация достигается перемещением движков на обоих реохордах. Нулевым прибором служит телефон, при молчании которого

$$U_x = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \quad \text{и} \quad \tan U_x I_1 = \frac{U_2}{U_1},$$

где U_2 и U_1 — отсчеты в вольтах, прочтенные по движкам реохордов.

При подборе параметров потенциометра для данной частоты так, чтобы $\omega = \frac{1}{CR}$, т. е. чтобы $I_2 = j\omega CR I_1 = jI'$, отсчет по движкам потенциометра может быть произведен непосредственно в омах, и

$$U_x = I' \sqrt{r_1^2 + r_2^2} \quad \text{и} \quad \tan U_x I' = \frac{r_2}{r_1},$$

где I' — действующее значение I_1 и I_2 и r_1 и r_2 — отсчеты по движкам реохордов в омах.

Приведем для примера значения постоянных потенциометра Педерсена для случая измерений на частоте

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{5000}{2\pi} \cong 795,4 \text{ Hz.}$$

$$L = 0,02 \text{ H } (L_1 = 0,01 \text{ H}); \quad C = 2 \cdot 10^{-6} \text{ F } (C_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ F})$$

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,02}{2 \cdot 10^{-6}}} = 100 \text{ }\Omega.$$

При $\omega = 5000$, значение $\omega CR = 1$.

Потенциометр Педерсена предназначен для измерений на телефонных частотах. Точность измерения на нем зависит от точности подгонки величин R_1 , R_2 , L и C , от точности установки нуля и, кроме того, так как в отсчет потенциометра непосредственно входит частота переменного тока, точность отсчета зависит и от точной установки частоты. Необходимо заметить, что положение точки нуля также очень сильно зависит от частоты, так как при увеличении частоты ток I_1 уменьшается (из-за увеличения индуктивного сопротивления ωL), а I_2 увеличивается (из-за уменьшения емкостного сопротивления $1/\omega C$). Эта особенность является большим недостатком данного потенциометра.

Комплексный потенциометр Гейгера

Описанные выше комплексные потенциометры второго вида предназначались исключительно для работы на звуковых частотах. Потенциометр Гейгера (Geuger) [50] предназначен для работ на технических и на звуковых частотах в пределах от 12,5 до 1200 Hz.

Принцип измерения на этом потенциометре состоит в следующем: оба служащие для компенсации U_x напряжения U_1 и U_2 отбираются от двух контактов, скользящих по двум калиброванным проволокам реохордов, на которые подаются два сдвинутых на 90° напряжения E_1 и E_2 . Средние точки реохордов соединены между собой, причем припой со-

тивным сопротивлением. Последовательно с проволокой II—IV включен безреактивный штепсельный магазин R_p .

Потенциометр имеет на своей верхней панели три пары зажимов, предназначенных для питания цепи потенциометра и для присоединения гальванометра и измеряемого объекта. Как видно из схемы, специальный переключатель дает возможность переменять местами зажимы, присоединяемые к гальванометру. Это сделано для того, чтобы избежать искажения результатов измерения вредными внешними полями той же частоты, как и частота, на которой производится измерение.

При выводе выражений для напряжений на измерительных проволоках E_1 и E_2 обозначим параметры цепи следующим образом:

L и R — индуктивность и активное сопротивление первичной катушки включенного трансформатора T_a или T_b .

L_s и R_s — суммарная индуктивность и активное сопротивление вторичной цепи при соответственно включенном T_a или T_b .

L_0 и R_0 — эквивалентная индуктивность и эквивалентное активное сопротивление включенного в цепь трансформатора.

M — коэффициент взаимной индукции между катушками трансформатора T_a или T_b .

U — напряжение на зажимах 1—2 потенциометра.

I_1 и I_2 — первичный и вторичный токи.

Допустим при выводе, что питающий потенциометр ток синусоидален, и круговая частота его $\omega = 2\pi f$. Расположение векторов тока и напряжения показано на рис. 101.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2}}{\omega M}; \quad \angle(I_1 I_2) = 90^\circ + \alpha; \quad \tan \alpha = \frac{\omega L_s}{R_s},$$

Падение напряжения на всей измерительной проволоке реохорда I—III, обозначенное через E_1 , в фазе с первичным током I_1 получается из:

$$E_1 = I_1 \cdot \frac{r_1 R_1}{r_1 + R_1},$$

где r_1 — сопротивление измерительной проволоки I—III. Падение напряжения на всей проволоке реохорда II—IV, обозначенное через E_2 , в фазе с вторичным током I_2 получается из:

$$E_2 = I_2 \cdot \frac{r_2 R_2}{r_2 + R_2}$$

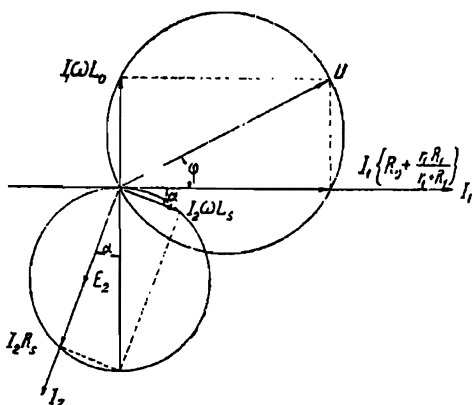


Рис. 101. Векторная диаграмма потенциометра Гейгера.

и также

$$E_2 = I_1 \frac{\omega M}{\sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2}} \cdot \frac{r_2 \cdot R_2}{r_2 + R_2},$$

где r_2 — сопротивление измерительной проволоки ($II-IV$). Угол между E_1 и E_2 равен углу между I_1 и I_2 , т. е.

$$\angle E_1 E_2 = 90 + \alpha; \quad \tan \alpha = \frac{\omega L_s}{R_s}.$$

Угол α является тем углом, на который отличается от 90° угол между E_1 и E_2 , т. е. в данном случае углом, являющимся причиной погрешности измерений на потенциометре.

В своем потенциометре Гейгер соответствующим подбором параметров вторичной цепи добился величины угла α , не превышающей $5'$. В этом случае величина $(\omega L_s)^2$ мала по сравнению с R_s^2 , и выражение для E_2 может быть представлено в упрощенном виде:

$$E_2 = I_1 \cdot \frac{\omega M}{R_s} \cdot \frac{r_2 \cdot R_2}{(r_2 + R_2)}.$$

Для первичной цепи могут быть составлены следующие уравнения:

$$U = I_1 \cdot \sqrt{\left(R_0 + \frac{r_1 R_1}{r_1 + R_1}\right)^2 + (\omega L_0)^2},$$

где R_0 — эквивалентное активное сопротивление всей цепи, L_0 — эквивалентная индуктивность,

U — напряжение на зажимах 1—2:

$$\tan UI_1 = \frac{\omega L_0}{R_0 + \frac{r_1 R_1}{r_1 + R_1}},$$

причем эквивалентное активное сопротивление:

$$R_0 = R + \frac{(\omega M)^2}{R_s^2 + (\omega L_s)^2} R_s = R + \frac{I_2^2}{I_1^2} R_s;$$

и эквивалентное индуктивное сопротивление:

$$L_0 = L - \frac{(\omega M)^2}{R^2 + (\omega L_s)^2} L_s = L - \frac{I_2^2}{I_1^2} L_s.$$

При соответствующем подборе размеров воздушных трансформаторов и вторичных сопротивлений, вторые члены последних двух уравнений малы по сравнению с первыми и могут быть отброшены, поэтому и можно допустить, что:

$$R_0 = R \quad \text{и} \quad L_0 = L.$$

Так как, кроме того, величина $\frac{r_1 R_1}{r_1 + R_1}$ мала по сравнению с величиной R , то выражение для U может быть представлено в виде:

$$U = I_1 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \text{и} \quad \tan UI = \frac{\omega L}{R}.$$

Сопротивления r_1 , r_2 , R_1 и R_2 неизменяемы.

Для того, чтобы $\frac{\omega M}{R}$ и $\frac{\omega L_s}{R_s}$ при всех частотах измерения оставались без изменения, сопротивление R_z должно быть соответственным образом изменено.

Для избежания влияния полей рассеяния на обмотки безжелезных трансформаторов, эти трансформаторы имеют конструкцию, сходную с вариометром Дегинья. Обмотки трансформаторов намотаны астатиически: первичная и вторичная обмотки каждого трансформатора состоят из двух намотанных в противоположном направлении катушек, помещенных близко одна к другой, причем обе вторичные соединены между собой так, что индуцированные первичным током электродвижущие силы складываются, влияние же внешних полей, вследствие соответствующего направления намотки, взаимно уничтожается.

Чтобы избежать возникновения емкостных токов между первичной и вторичной обмотками трансформатора, между катушками помещены тонкие металлические прокладки, экранирующие вторичную обмотку. Этот экран соединен с первой измерительной проволокой (I—III).

Потенциометр Гейгера может быть применен и как потенциометр постоянного тока, при этом по вторичной обмотке трансформатора ток не проходит, и отсчет производится только по измерительной проволоке реохорда (ось I—III).

Конструктивные данные описываемой модели потенциометра Гейгера следующие.

Измерительные проволоки реохордов изготовлены из крупина, диаметром 0,28 мм, длиной около 40 см, с сопротивлением каждой проволоки около 5 Ω . Штепсельный магазин R_v состоит из двенадцати безреактивно (по Вагнеру) намотанных катушек, сопротивлением 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 5,0; 10,0; 15,0 и 20,0 Ω .

При всех вставленных штепселях, т. е. при всех замкнутых накоротко катушках магазина R_v , вторичное сопротивление $R_s = 5 \Omega$.

Нижним пределом частоты измерения является частота 12,5 Hz, и при работе на этой частоте R_v устанавливается равным нулю. При работе на более высоких частотах, величина R_v устанавливается согласно следующему подсчету.

При любой частоте падение напряжения на всей первой проволоке реохорда I—III— E_1 должно быть равно падению напряжения E_2 , на всей второй проволоке и, кроме того, должно быть равно некоторой постоянной величине. Подставляя значения E_1 и E_2 , из предыдущих формул имеем:

$$E_1 = E_2 = I_1 \cdot \frac{\omega M}{R_s} \cdot \frac{r_2 \cdot R_2}{r_2 + R_2} = I_1 \cdot \frac{r_1 R_1}{r_1 + R_1}$$

и

$$\tan \alpha = \tan E_1 E_2 = \frac{\omega L_s}{R_s}$$

Величина шунтирующего сопротивления R_1 , подбирается так, что $\frac{r_1 R_1}{r_1 + R_1}$ получается равным 0,08 Ω . Ввиду того, что предельная величина угла погрешности α установлена равной 5', $\tan \alpha \leq 0,0015$.

В случае измерения на частоте 12,5 Hz, имеем:

$$\frac{2 \pi \cdot 12,5 M}{5} \cdot \frac{r_2 \cdot R_2}{r_2 + R_2} = \frac{r_1 \cdot R_1}{r_1 + R_1} = 0,08 \, \Omega$$

и

$$\tan \alpha = \frac{2 \pi \cdot 12,5 L_s}{5} = 0,0015.$$

Для измерения на какой-либо другой частоте f опять должны иметь:

$$\frac{2 \pi f M}{5 + R_v} \cdot \frac{r_2 \cdot R_2}{r_2 + R_2} = \frac{r_1 \cdot R_1}{r_1 + R_1} = 0,08 \, \Omega$$

и

$$\tan \alpha = \frac{2 \pi f \cdot L_s}{5 + R_v} = 0,0015.$$

Для соблюдения этого постоянства должно быть выполнено требование, чтобы

$$\frac{f}{5 + R_v} = \frac{12,5}{5}, \text{ откуда } R_v = \frac{f - 12,5}{2,5} \, \Omega$$

Этот подсчет произведен для трансформатора T_2 , предназначенного для работы на меньших частотах, верхний предел которых на этом трансформаторе получается из условия $f = 2,5 (5 + R_v)$. Подставляя наибольшее значение $R_v = 55,5 \, \Omega$, имеем:

$$f_{\max} = 2,5 (5 + 55,5) = 151,25 \, \text{Hz}$$

Соответственно нижний предел частоты измерения на трансформаторе T_2 — 125 Hz и верхний предел — 1512,5 Hz.

Ввиду того, что активное сопротивление вторичной катушки трансформатора T_2 меньше активного сопротивления вторичной катушки трансформатора T_1 , последовательно с вторичной катушкой трансформатора T_2 включено добавочное сопротивление r , величина которого подобрана так, что активное сопротивление вторичной цепи (при R_v неизменном) остается постоянным.

Величина компенсирующих напряжений E_1 и E_2 зависит от величины тока, питающего первичную обмотку трансформатора:

$$E_1 = E_2 = I_1 \cdot \frac{r_1 \cdot R_1}{r_1 + R_1} = I_1 \cdot 0,08 \, \text{V}.$$

При токе I_1 , равном 0,5 A, $E_1 = E_2 = 0,5 \cdot 0,08 = 0,04 \, \text{V}$.

Каждому сантиметру длины проволоки реохорда соответствует падению напряжения $\frac{0,04}{40} = 0,001 \, \text{V}$ и каждой полуоси соответствует 0,02 V.

По указаниям конструктора потенциометра подгонка сопротивлений выполнена с точностью до 0,05%, и индуктивностей — с точностью до 0,1%. Ввиду того что установка рабочего тока производится по образцовому амперметру, точность измерения напряжения потенциометром зависит от точности измерения рабочего тока; при хорошо подобранном пределе измерения на образцовом приборе точность может

достигать 0,5—1,0%. Точность измерения углов — от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2} \delta'_{10}$ (в зависимости от величины отсчета по шкалам).

Потенциометр Гейгера выполнен фирмой Гартманн и Браун (Hartmann u. Braun) в виде небольшого деревянного ящика без крышки. Реохорды с движками, штепселя магазина, переключатели и зажимы расположены на верхней панели потенциометра. Внешний вид его показан на рис. 102.

Точно по схеме описанного потенциометра Гейгер применял потенциометр, реохорды которого расположены под прямым углом друг к другу [56]. Потенциометр подобной конструкции очень наглядно демонстрирует положение обоих компенсирующих векторов и вектора измеряемого и в этом отношении аналогичен потенциометру Кеннэлли.

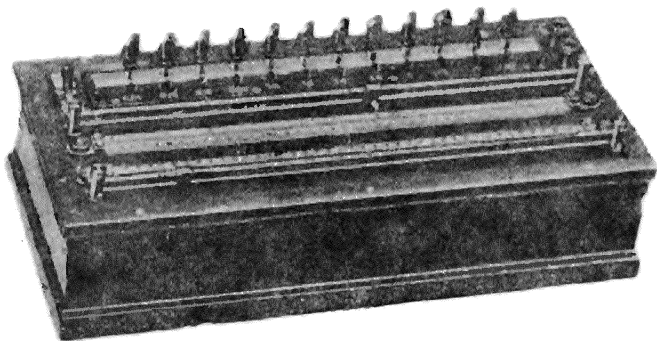


Рис. 102. Внешний вид потенциометра Гейгера.

Комплексный потенциометр Голла

Комплексный потенциометр Голла (D. S. Gall) [46] является потенциометром второго вида и представляет собой комбинацию двух совершенно одинаковых потенциометров, питаемых двумя сдвинутыми на 90° рабочими токами, амплитуды которых равны. Скользящие контакты обоих потенциометров соединены между собой последовательно, и компенсирующее напряжение U получается из

$$U = U_1 + jU_2,$$

где: U_1 и U_2 — отсчеты на обоих потенциометрах. Благодаря применению переключателей направления тока в гальванометрической цепи одного и другого потенциометра, можно менять направление любой из взаимно-перпендикулярных составляющих и получать U в любом квадранте. Схема соединений потенциометра Голла показана на рис. 103.

Питание обоих потенциометров принципиально возможно производить от двухфазного генератора, однако Голл, очевидно, вследствие трудности получения двухфазного генератора с точно 90° -градусным углом сдвига фаз, предпочел применить расщепляющее устройство, аналогичное по схеме расщепляющему устройству потенциометра Драйсдэла, с той лишь разницей, что примененный в потенциометре Драйсдэла конденсатор заменен катушкой взаимной индукции, как это видно из

схемы (рис. 103). Первичная обмотка этой взаимной индукции M_1 последовательно с активным сопротивлением R присоединена к тем же зажимам, к которым присоединяется изолирующий трансформатор T_1 потенциометра I (фаза); вторичная обмотка катушки взаимной индукции последовательно с тем же активным сопротивлением присоединяется также через изолирующий трансформатор T_2 ко второму потенциометру II („квadrатура“). Проходящий по активному сопротивлению и первичной катушке взаимной индукции ток сдвинут на некоторый (острый) угол относительно приложенного напряжения. Этот сдвиг определяется

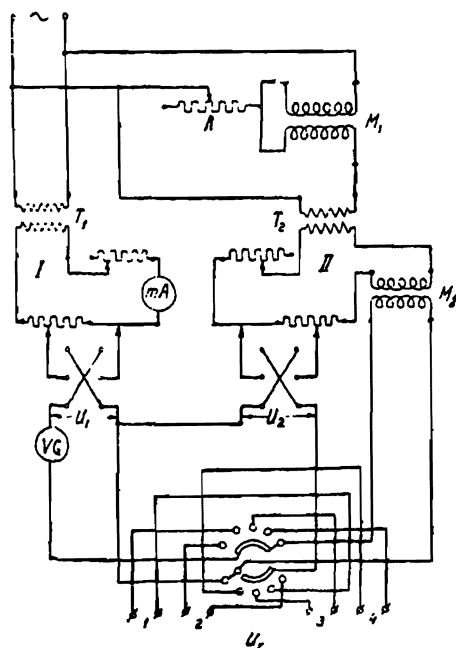


Рис. 103. Схема точного потенциометра Голла.

параметрами цепи: индуктивностью первичной катушки взаимной индукции, активным сопротивлением всей цепи и круговой частотой. В свою очередь, напряжение, подаваемое на квадратурный потенциометр, сдвинуто относительно тока в активном сопротивлении на острый угол, величина которого зависит от выбранного коэффициента взаимной индуктивности сопротивления и частоты измерения. При соответствующем выборе параметров обеих цепей, сумма этих углов равна 90° при некоторой определенной частоте. Для сохранения перпендикулярности векторов U_1 и U_2 и при других частотах, величина активного сопротивления в цепи катушки может меняться в известных пределах. Точная установка сдвига 90° производится следующим способом: первичная обмотка небольшой катушки взаим-

индукции M_2 включена последовательно в цепь одного потенциометра — II (квadrатурного), вторичная же обмотка этой катушки присоединяется через вибрационный гальванометр к движкам второго потенциометра — I (фазного). Установив рабочий ток первого потенциометра при непосредственном питании его постоянным током по нормальному элементу при посредстве магнито-электрического гальванометра, переключают питание потенциометров на переменный ток желаемой частоты и уравнивают индуктированную во вторичной обмотке катушки взаимной индукции электродвижущую силу с напряжением на движках другого потенциометра. При правильно выбранной величине взаимной индукции, отсчет, соответствующий 1 V по квадратурному потенциометру, может быть установлен в точности равным отсчету 1 V на фазном потенциометре. Это условие практически выполнено таким образом, что при питании первичной катушки взаимной индукции при частоте 50 Hz нормальным рабочим током потенциометра, электродвижу-

щая сила, индукированная во вторичной ее катушке, равна 0,5 V, и таким образом для получения точного соответствия отсчетов на первом и на втором потенциометрах движки фазного потенциометра должны быть установлены на отсчет, соответствующий 0,5 V, и равновесие гальванометра должно быть получено изменением сдвига фаз, подаваемых на потенциометры напряжений, как сказано выше, изменением величины активного сопротивления в цепи расщепителя фаз. Точно так же, ввиду того что электродвижущая сила, индукированная в цепи вторичной катушки взаимной индукции при частотах 60, 70, 80 и т. д. герц равна соответственно 0,6, 0,7, 0,8 и т. д. вольт, движки первого потенциометра при проверке квадратуры на этих частотах устанавливаются на отсчет 0,6, 0,7, 0,8 и т. д. вольт. При точно достигнутом равновесии вибрационного гальванометра установка 90-градусного сдвига достигается с наибольшей возможной точностью (в пределах десятых долей минуты).

Прибором, служащим для обнаружения постоянства рабочего тока потенциометра, служит включенный в цепь первого потенциометра электродинамический миллиамперметр с зеркальным отсчетом и с крутильной головкой. Если рабочий ток установлен по нормальному элементу при питании первого потенциометра постоянным током, равновесие подвижной части миллиамперметра производится поворотом крутильной головки (в этом случае подвижная система сбалансирована и находится на нуле). Благодаря этому устройству подвижная часть миллиамперметра всегда находится в своем нулевом положении. При переключении потенциометра на питание переменным током, сила рабочего тока регулируется до тех пор, пока подвижная часть миллиамперметра не окажется снова в равновесии. Вследствие того, что подвижная часть прибора всегда находится в своем нулевом положении, условия его работы всегда одни и те же. Градуировать прибор не требуется, так как установка указателя прибора в нулевом положении при номинальном рабочем токе производится поворотом крутильной головки, отсчет по которой не имеет значения.

Внешний вид этого миллиамперметра показан на рис. 104.

Прибор должен быть установлен так, чтобы зайчик от его зеркала был перед глазами измерителя во время работы на потенциометре.

Нулевым прибором в этом потенциометре может служить вибрационный гальванометр любого типа (электро-магнитного и магнито-электрического).

Оба потенциометра помещены в одном деревянном ящике, и каждый из них состоит из одного рычажного магазина, образованного

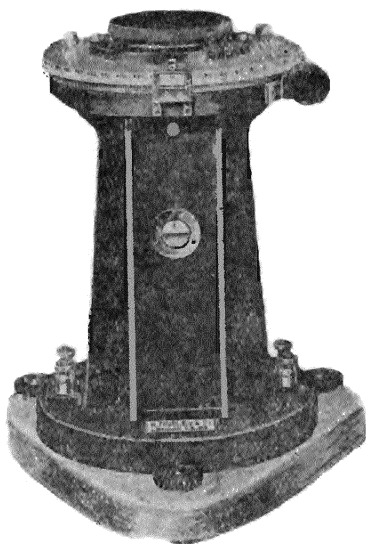


Рис. 104. Электродинамометр Голла.

18 катушками, сопротивлением по 2Ω каждая, и реохорда, сопротивлением около $2,2 \Omega$, укрепленного на диске. Наименьшее деление реохорда при рабочем токе, равном 50 mA , соответствует $0,001 \text{ V}$.

Для предохранения от запыления контактов магазинов и избирательного переключателя, средняя часть потенциометра в одной из моделей покрыта стеклянной крышкой. Реостаты для регулировки рабочего тока встроены в потенциометр, кроме того имеются два штепсельных переключателя предела измерения ($XI, 0$ и XO, I), аналогичные устройству Франке (на схеме — рис. 103 — это устройство не показано). Чтобы иметь возможность произвести проверку квадратуры в большом диапазоне частот, к потенциометру прилагаются две катушки взаимной индукции: одна на $31,82 \text{ mH}$ (до 180 Hz) и другая на $3,182 \text{ mH}$ на частоты выше 180 Hz . Этот потенциометр при питании от двухфазного генератора может работать на больших пределах частоты, причем в этом случае установка квадратуры фактически почти не зависит от частоты.

Ввиду большой точности установки квадратуры токов (до $0,01—0,2 \text{ мин.}$), этот потенциометр позволяет производить измерения небольших углов с достаточной точностью, конечно, при условии, что все катушки компенсационной цепи выполнены также с достаточной точностью либо безреактивными, либо имеющими строго одинаковую постоянную времени.

Потенциометр Голла изготавливается фирмой Тинслей (Tinsley Co.).

Упрощенный комплексный потенциометр Голла переносного типа

Кроме описанного точного стационарного потенциометра, Голл разработал упрощенный переносный потенциометр [47], принципиально ему совершенно аналогичный. Вся вспомогательная аппаратура (вибрационный гальванометр, контрольный вольтметр) встроена в прибор, и весь потенциометр смонтирован в деревянном ящике с крышкой. Потенциометр питается от однофазного источника напряжением $94—115 \text{ V}$, через изолирующий трансформатор, в котором, кроме первичной обмотки, имеются три вторичных; две из них предназначены для питания обоих потенциометров, а третья обмотка — для питания осветителя гальванометра. Расщепление фаз производится конденсаторами C , включенными в одной фазе, и активным R и индуктивным L сопротивлениями в другой.

Схема соединений этого потенциометра показана на рис. 105. Рабочая цепь каждого потенциометра состоит из одного реохорда с нулем посередине; средние точки реохордов соединены между собой. Положение движка показывает величину одной из составляющих компенсирующего вектора, аналогично движкам потенциометра Гейгера. Стрелка контрольного вольтметра, расположенная в центре панели потенциометра, перед началом измерений должна быть установлена на красной черте, соответствующей данной частоте.

Полный отсчет по движкам реохордов без делителя соответствует $0,015 \text{ V}$. Для проверки вольтметров в потенциометр встроены делители напряжения на $1,5, 15$ и 150 V , и для измерения токов до 15 A встроены шунты. Для токов больше 15 A шунты приложены отдельно (вложены в крышку прибора). Потенциометр предназначен для частот

Этот потенциометр пригоден только для технических измерений на частотах в указанных пределах.

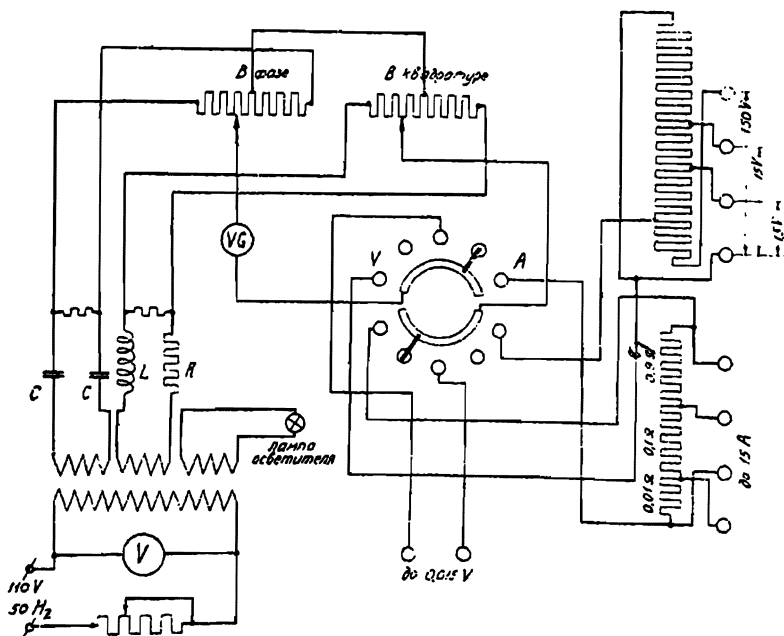


Рис. 105. Схема упрощенного потенциометра Голла.

При применении описанных выше комплексных потенциометров для измерения малых напряжений на технических и звуковых частотах, очень часто бывает трудно избежать вредного влияния на точность измерения возникающих емкостных выравнивающих токов. Появление этих токов объясняется тем, что находящиеся иногда на весьма различных потенциалах относительно земли цепи потенциометра и измеряемого объекта связаны между собой электрически через потенциальные провода. Чтобы иметь совершенно не связанные между собой электрически цепи потенциометра и измеряемого объекта, Гейгер сконструировал потенциометр [54] для частот от 500 до 5000 Hz, в котором оба комплексных вектора получаются на зажимах двух не связанных с первичной цепью потенциометра вторичных катушек вариометров. Первичные катушки этих вариометров питаются от соответствующего однофазного источника с расщеплением фаз при помощи активного сопротивления

и емкости, включенных последовательно с одной катушкой, и индуктивности, включенной последовательно с другой. Таким образом в первичных обмотках этих двух вариометров проходят сдвинутые между собой на 90° токи. При положении плоскостей вторичных катушек параллельно плоскостям первичных, индуцированная в них электродвижущая сила имеет наибольшее значение; при плоскостях же вторичных катушек, перпендикулярных первичным, индуцированные в них электродвижущие силы равны нулю, но при всех положениях вторичных катушек вектора их электродвижущих сил сдвинуты между собой на 90° .

При компенсировании изменяется положение вторичных катушек по отношению к первичным, и отсчет комплексных составляющих берется по шкалам вариометров. Каждый вектор при повороте катушки в обе стороны от нуля принимает положительные и отрицательные значения. Если через первичную обмотку проходит ток I , коэффициент взаимной индукции вариометра (при параллельном положении катушек) равен M . Индуцированная во вторичной обмотке электродвижущая сила $E = I\omega M$, где ω — круговая частота тока. Шкалы вариометра градуированы в миллигенри.

Предел измерения этого потенциометра может быть расширен изменением силы питающего первичную обмотку тока.

При питании первичной обмотки током $1,2$ А, при M , равном $\pm 1,6 \cdot 10^{-3}$ Н, и при частоте 500 Гц, величина индуцированной во вторичной катушке (при угле 60°) электродвижущей силы $E = IM\omega = 1,2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 500 = 5,02$ В. При частоте 5000 Гц применяются катушки вариометра с меньшим числом витков. Коэффициент взаимной индукции в этом случае $M = \pm 1,6 \cdot 10^{-4}$ Н, и наибольшая индуцированная электродвижущая сила остается та же.

Схема соединений этого потенциометра показана на рис. 106. Как видно из схемы, подвижными катушками являются первичные. Нулевым прибором могут служить вибрационный гальванометр или телефон (на схеме не показан).

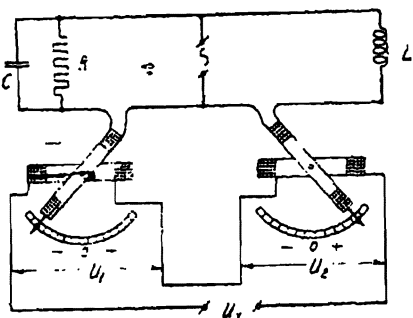


Рис. 106. Схема потенциометра Гейгера с применением двух вариометров.

Комплексный потенциометр Гейгера для напряжений порядка 100 В

Для повышения предела измерения потенциометра, схема соединений которого основана на только-что изложенном принципе, Гейгер разработал второй потенциометр [55], в котором безжелезные трансформаторы (вариометры) были заменены вариометрами с железом, конструкция которых аналогична конструкции ферродинамических приборов.

Схема соединений этого потенциометра аналогична схеме рис. 106, с той лишь разницей, что в этом потенциометре неподвижной обмоткой является первичная обмотка.

Ввиду присутствия в этих вариометрах железа, магнитные потоки сдвинуты на некоторые углы по отношению к создающим их первичным токам, что может повести к отклонению от 90° угла между индуцированными электродвижущими силами. Для избежания возникновения этой погрешности оба вариометра должны иметь одинаковые углы между намагничивающим током и потоком, что достигается совершенной идентичностью их конструкции. Потенциометр имеет четыре предела измерения, обусловливаемых различным числом витков вторичной обмотки.

В конструкции вариометра на наибольший предел измерения 120 V имеются еще три предела измерения: 40, 12 и 4 V, и на крышке вариометра имеется особая шкала для каждого предела измерения.

По указаниям конструктора потенциометра точность измерения на нем около 10^{-3} .

Автоматический комплексный потенциометр Мартина Вальда

(Martin Wald) [126]

Если в двух электродинамических приборах выполнить подвижную обмотку практически лишенной направляющей силы и включить приборы как показано на схеме (рис. 107), то подвижные катушки установятся самостоятельно так, что в соединяющей обе вторичных катушки цепи, содержащей дроссельную катушку, тока не будет. При соответствующей градуировке шкал приборов с нулем посередине стрелки приборов покажут величину отклонений, пропорциональную комплексным составляющим компенсирующего напряжения. В этом случае величина и положение вектора измеряемого напряжения, как и во всяком другом комплексном потенциометре, определяется из:

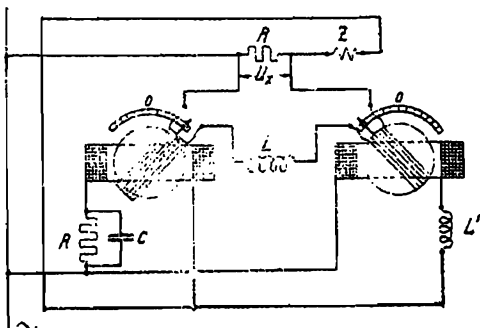


Рис. 107. Схема автоматического потенциометра Мартина Вальда.

$$U_x = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \text{ и } \operatorname{tg} U_x E_1 = \frac{E_2}{E_1}$$

при шкалах приборов, градуированных в вольтах, и

$$U_x = I \omega \sqrt{M_1^2 + M_2^2} \text{ и } \operatorname{tg} U_x E_1 = \frac{M_2}{M_1}$$

при шкалах, градуированных в генри.

Для получения достаточной чувствительности приборов измеряемое напряжение должно быть не менее 1,0 V, а при тяжелой подвижной части—даже 10 V. Это требование сильно уменьшает область применения автоматического потенциометра даже для технических измерений на переменном токе, так как обычно требуется измерять меньшие напряжения, порядка 0,01—0,1 V.

Автоматический потенциометр с зависящим от сдвига фаз нулевым мотором

Чтобы иметь возможность компенсировать автоматическим способом малые разности потенциалов на переменном токе, Гейгер [59] разработал интересную схему с применением двух индукционных счетчиков (рис. 108). Компенсирующие U_x падения напряжения U_1 и U_2 , сдвинутые между собой на 90° , отбираются от средних точек o_1 и o_2 — двух реохордов, и величина U_1 и U_2 изменяется в зависимости от положения подвижных контактов k_1 и k_2 , соединенных между собою через ламповый усилитель УЛ. Как видно из схемы, эти реохорды включены так,

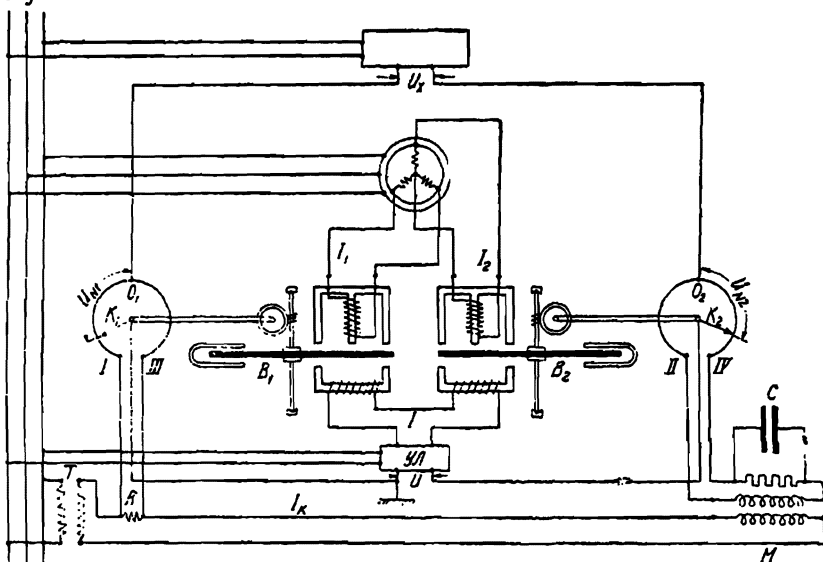


Рис. 108. Схема автоматического потенциометра Гейгера.

что токи в них сдвинуты между собой на 90° , вследствие чего падения напряжения на них U_1 и U_2 также сдвинуты на 90° , и при перемещении движков k_1 и k_2 получается изменяемая по величине и по фазе компенсирующее напряжение $U_k = \sqrt{U_{k_1}^2 + U_{k_2}^2}$. Ввиду того, что четыре половины двух реохордов I, II, III и IV представляют собой прямоугольную координатную систему, вектор U_k может быть получен в любом квадранте без применения переключателей направления тока. Ориентировка осей этой системы координат определяется фазой тока I_n (см. схему), получаемого от вторичной обмотки изолирующего трансформатора T . Подвижные контакты реохордов приводятся в движение от сильно тормозимых дисков B_1 и B_2 двух индукционных счетчиков, при посредстве червячной передачи. Обмотки напряжения этих счетчиков питаются от трехфазного фазорегулятора Φ так, что проходящие по ним токи I_1 и I_2 сдвинуты один относительно другого на 90° . Токковые обмотки счетчиков включены последовательно и через ламповый усилитель соединяются с заземленной точкой нулевой ветви компенсационной

цепи; ток в этих токовых обмотках пропорционален поданному на усилитель напряжению U .

При еще недостигнутой компенсации на зажимах усилителя имеется напряжение U' , образованное геометрической разностью измеряемого напряжения $U_x = \sqrt{U_{x1}^2 + U_{x2}^2}$ и компенсирующего $U_k = \sqrt{U_{k1}^2 + U_{k2}^2}$, т. е. $U' = U_x - U_k$. При наличии этого напряжения U' в последовательных обмотках счетчиков будет проходить ток I , и диски их будут вращаться; причем, ввиду того что напряжения на параллельных обмотках счетчиков сдвинуты между собой на 90° , скорость вращения одного диска будет пропорциональна активной составляющей разности ($\bar{U}_x - \bar{U}_k$), а скорость вращения другого—пропорциональна реактивной составляющей разности ($\bar{U}_x - \bar{U}_k$). Диски счетчиков остановятся, когда $U=0$, т. е. когда компенсация будет достигнута. Необходимо заметить, что чем ближе к моменту компенсации, тем медленнее вращаются диски счетчиков. Некоторая длительность процесса компенсации является известным недостатком этой схемы, так как быстрая компенсация быстро изменяющихся величин часто бывает необходима при техническом применении автоматического потенциометра.

Автоматический потенциометр с двумя ферродинамическими приборами

Кроме описанного автоматического потенциометра с индукционными счетчиками, Гейгер разработал потенциометр с двумя ферродинамическими приборами, имеющими каждый одну неподвижную обмотку возбуждения и две подвижных обмотки. Питание неподвижных обмоток приборов S' и S'' производится от вторичных обмоток двух отдельных трансформаторов T' и T'' (рис. 109). Ввиду того, что в одной из этих цепей включена индуктивность L , а в другой—емкость C параллельно с активным сопротивлением R , токи в них I_1' и I_1'' сдвинуты между собой на 90° , поэтому и потоки Φ' и Φ'' , создаваемые этими токами, также сдвинуты между собой на 90° (см. диаграмму—рис. 110). Для

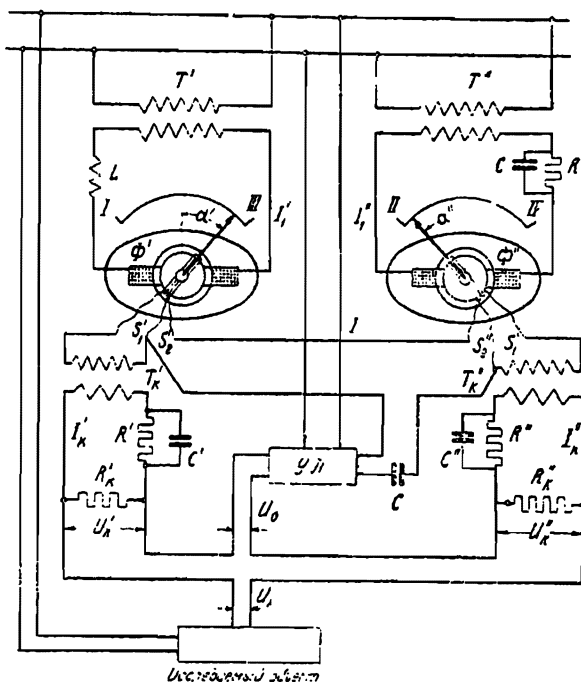


Рис. 109. Схема автоматического потенциометра по Гейгеру с двумя ферродинамическими приборами.

компенсации измеряемого напряжения U_x служат падения напряжения U_k' и U_k'' на неизменяемых активных сопротивлениях R_k' и R_k'' . Токи I_k' и I_k'' , проходящие по этим сопротивлениям, создаются напряжениями на вторичных зажимах трансформаторов T_k' и T_k'' , первичные обмотки которых присоединены к подвижным катушкам приборов S_1' и S_1'' . Индуцированные в этих катушках электродвижущие силы сдвинуты одна относительно другой на 90° , так как потоки, их индуцирующие, сдвинуты также на 90° один относительно другого.

Ввиду того, что внутри подвижных катушек расположен барабан из ферромагнитного материала, а полюсным наконечникам придана соответствующая форма, поле в воздушном зазоре можно считать в пределах угла поворота катушки равномерным и перпендикулярным к образующей катушки.

Вследствие этого индуцированные в подвижных катушках электродвижущие силы пропорциональны углу их поворота, а следовательно и U_k' и U_k'' , т. е. $U_k' = \text{пост. } \alpha'$; и $U_k'' = \text{пост. } \alpha''$, где α' и α'' — углы поворота катушек.

Чтобы токи в катушках S_1' и S_1'' не создавали с потоками Φ' и Φ'' вращающих моментов, угол между токами и потоками должен быть равен 90° . Это достигается включением параллельно с $R'(R'')$ во вторичную цепь трансформатора небольшого конденсатора $C'(C'')$.

При компенсации измеряемое напряжение U_x уравнивается двумя сдвинутыми между собою на 90° напряжениями U_k' и U_k'' .

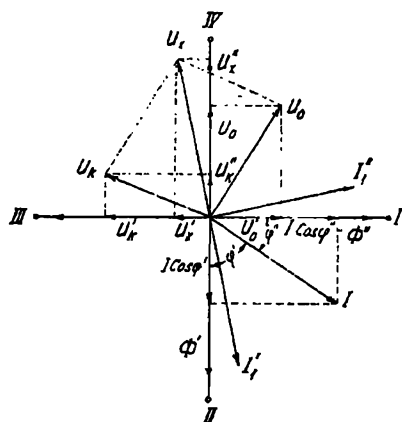


Рис. 110. Векторная диаграмма автоматического потенциометра Гейгера по схеме рис. 109.

$$U_x = \sqrt{U_k'^2 + U_k''^2} = \sqrt{(I_k' \cdot R_k')^2 + (I_k'' \cdot R_k'')^2}.$$

Установка подвижной системы в требуемое положение производится автоматически, благодаря наличию двух других подвижных катушек S_2' и S_2'' . Пока измеряемое напряжение U_x не уравновешено, на ламповый усилитель УЛ подается напряжение U_0 , являющееся геометрической разностью двух напряжений U_x и U_k , где $U_x = \sqrt{U_k'^2 + U_k''^2}$ (см. рис. 110).

Ток от усилителя I подается на вторые обмотки обеих подвижных катушек S_2' и S_2'' . Если ток от усилителя I сдвинут относительно напряжения U_0 на угол, равный 90° , то активная составляющая его будет в фазе с одним из потоков Φ' , а реактивная — другим потоком Φ'' или, если угол между Φ' и I обозначить через φ' , а угол между Φ'' и I через φ , то вращающий момент на катушке $S_2' - D' = \text{const } \Phi' \cdot I \cdot \cos \varphi'$, а на катушке $S_2'' - D'' = \text{const } \Phi'' \cdot I \cos \varphi''$.

Как видно из диаграммы, вращающий момент D' пропорционален активной составляющей U_0 , а D'' его реактивной составляющей. Равно-

ясне подвижной системы возможно, когда $D' = D'' = 0$, что осуществляется только в одном положении, соответствующем $U_0 = 0$. В этом случае $U_k' = U_x'$ и $U_k'' = U_x''$.

Ввиду того, что величины U_k' и U_k'' пропорциональны углам поворота α' и α'' , при известной градуировке отсчеты активной и реактивной составляющих производятся непосредственно по шкалам приборов.

По указаниям автора установка подвижных частей приборов производится достаточно быстро, не более 0,5 сек. Для уничтожения качаний подвижных частей в период уравнивания в приборах применено сильное магнитное торможение.

ГЛАВА XIV

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О РАБОТЕ С ПОТЕНЦИОМЕТРАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И СРАВНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ИЗ ОПИСАННЫХ ТИПОВ

Потенциометры переменного тока не являются приборами столь высокой точности измерений, как потенциометры постоянного тока. Подсобное оборудование, необходимое при потенциометрах переменного тока, значительно дороже и сложнее, чем подсобное оборудование, необходимое при потенциометрах постоянного тока, так как если на постоянном токе для питания потенциометра и измеряемого объекта возможно ограничиться двумя аккумуляторными батареями, то в потенциометрах переменного тока для получения достаточной точности измерения необходимо иметь отдельный агрегат, электромотор которого приводится в действие либо от отдельной батареи, либо от ртутного выпрямителя. Первый способ питания, дающий большую стабильность режима, а, следовательно, и большую точность измерения, является предпочтительным.

Все эти рассуждения относятся, главным образом, к потенциометрам, предназначенным для работы на технических и на небольших звуковых частотах (до 1000 Hz), в которых мощности, необходимые для питания потенциометра, а, главным образом, для питания измеряемого объекта, относительно велики. В потенциометрах, предназначенных для измерений на высоких частотах, потребная мощность относительно мала, и возможно питать потенциометр и цепь измеряемого объекта от одного лампового генератора.

При всех измерениях на всех типах потенциометров, кроме потенциометров с электрически изолированной компенсационной цепью, — например, оба последних (не автоматических) потенциометра Гейгера, потенциометр Мартина Вальда, — цепь, питающая потенциометр, должна быть изолирована от цепи, питающей измеряемый объект. Это достигается либо применением сведенных генераторов, либо питанием потенциометра через изолирующий трансформатор. Если это условие не будет выполнено, обе цепи, кроме имеющего место соединения между собой потенциальными проводами, будут иметь еще общие точки и в питающей цепи, что повлечет за собой не только искажение результатов измерения, но и может быть причиной порчи потенциометра, как это часто бывает в потенциометре Гейгера с двумя проволоками (Hartmann и Braun) при питании его без изолирующего трансформатора.

В потенциометрах, применяющих индукционные фазорегуляторы (например, потенциометры Драйсдэла, Круковского), эти фазорегуляторы уже являются изолирующими трансформаторами, и другого изолирующего трансформатора можно не применять. Токи, питающие потенциометр и измеряемый объект, должны быть одной частоты, и при питании обеих цепей от различных генераторов последние должны находиться на одном валу и приводиться во вращение от одного мотора.

Ввиду того, что одним из источников ошибок измерения может быть возникновение электродвижущих сил, индуктированных в различных контурах цепи магнитными полями, частота которых равна частоте измерения, вся проводка к потенциометру и к измеряемому объекту должна быть произведена свитым шнуром и, кроме того, потенциометр должен быть установлен по возможности вдали от проводов, несущих сильные токи той же частоты, что и частота генератора потенциометра.

Причиной беспокойного режима работы на потенциометре иногда могут являться паразитные токи, протекающие между цепями обоих генераторов. В этом случае желательно не ограничиваться фазорегулятором как изолирующим трансформатором, а ввести в цепь экранированный изолирующий трансформатор, как это сделано в схеме Круковского.

Главным фактором при выборе вида нулевого прибора является частота измерения. Для потенциометров, работающих на технических частотах, нулевым прибором является вибрационный гальванометр с настройкой на частоту в требуемых пределах; для работы же на частотах, порядка 300, 500 Hz, можно применять вибрационный гальванометр и телефон. Хотя оба нулевых прибора могут дать одинаковую точность измерения, так как чувствительность их в этих пределах более или менее одинакова, однако, по мнению автора, вибрационный гальванометр и в этих пределах частоты является более приемлемым, так как при не точно синусоидальной форме кривой токов сравниваемых величин легче работать с прибором, остро настраиваемым на основную частоту, что значительно в большей степени свойственно вибрационному гальванометру, чем телефону с настройкой. Кроме того, отсчет всегда удобнее производить на глаз, а не на слух, так как могущие быть в лаборатории шумы могут сильно мешать работе с телефоном.

В некоторых видах измерения, например, величин емкостей, индуктивностей и т. п., необходимо не только поддерживать частоту измерения постоянной во все время исследования, но и точно знать ее величину. Поэтому при точных измерениях на потенциометрах переменного тока необходимо иметь возможность измерять частоту с достаточной степенью точности, для чего может служить эталонный метод измерения частоты, являющийся стробоскопическим методом с образцовым камертоном и синхронным мотором. Точность измерения частоты этим способом—порядка $0,01\%$ —более чем достаточна для измерений на потенциометрах.

Из всех описанных типов потенциометров переменного тока только четыре конструкции являются, собственно, потенциометрами, предназначенными для точных измерений. Это потенциометры, позволяющие производить установку рабочего тока по нормальному элементу, т. е. позволяющие связать измерения на переменном токе с основной единицей электродвижущей силы. Это потенциометры следующие: Драйсдэла, Кру-

ковского, Ларсена-Кэмпбелла и Голла. Первые два являются потенциометрами в полярных координатах, два последние — в прямоугольных.

Сравнивая потенциометры Драйсдэла и Круковского, необходимо заметить, что первый является потенциометром малого сопротивления, а второй — потенциометром большого сопротивления, и рабочий ток потенциометра Драйсдэла значительно больше рабочего тока потенциометра Круковского (50 мА и 1 мА). Поэтому в потенциометре Драйсдэла оказалось возможным применить в виде промежуточного прибора электродинамический миллиамперметр, а не вольтметр, как в потенциометре Круковского. Это дает некоторое преимущество в смысле точности измерения потенциометру Драйсдэла, так как установка рабочего тока непосредственно по миллиамперметру точнее, чем по вольтметру, где сказывается влияние на точность установки тока сопротивления контактов и соединительных проводов.

С другой стороны, потенциометр Круковского имеет безусловное преимущество в смысле независимости от частоты, так как применение трехфазного фазорегулятора исключает применение расщепляющего устройства, сильно зависящего от частоты.

Схемы потенциометров Круковского и Драйсдэла равноценны, — в одной применены замещающие декады Вольфа, в другой — обычная схема Томсона-Варлея.

Необходимо заметить, что потенциометр Драйсдэла (в исполнении фирмы Тинслей) несколько более громоздок, чем потенциометр Круковского (в исполнении фирмы Отто Вольфа) за счет того, что все переключатели установлены на самом приборе; зато это безусловно очень удобно для работающего на потенциометре.

С другой стороны, помещение фазорегулятора в том же ящике, в котором находится и компенсационная цепь, как это сделано в потенциометре Драйсдэла, может являться причиной влияния вредных для точности измерения небольших полей рассеяния. Это учтено Круковским, поместившим фазорегулятор отдельно от компенсационной цепи.

Сравнивая между собой два комплексных потенциометра: Ларсена-Кэмпбелла и Голла, можем считать потенциометр Ларсена-Кэмпбелла потенциометром большого сопротивления, а потенциометр Голла потенциометром малого сопротивления (рабочий ток первого потенциометра равен 10 мА, второго — 50 мА). Однако, несмотря на малый рабочий ток своего потенциометра, Кэмпбэлл применил для промежуточного прибора устройство, измеряющее ток, а не напряжение, так как его термопара с подогревающей проволокой и магнито-электрическим прибором измеряет проходящий по подогревателю рабочий ток. Устройство Кэмпбелла имеет значительно меньшее сопротивление, чем электродинамические миллиамперметры.

Оба комплексных потенциометра зависят от частоты, и при требованиях большой точности измерения необходимо очень точно удерживать частоту, установленную в начале измерения.

Что касается области применения этих потенциометров, то потенциометр Кэмпбелла получил распространение главным образом в области измерений на звуковых частотах, а потенциометр Круковского применим только на технических частотах. Оба потенциометра фирмы Тинслей, потенциометр Драйсдэла и потенциометр Голла, получили распростране-

ние на технических (50 Hz) и на небольших звуковых частотах (порядка 200—300 Hz). Потенциометр Голла весьма удобен для измерения малых углов сдвига, при измерении которых потенциометр Дрейсдэла дает очень большую процентную погрешность.

Большое распространение получил потенциометр Гейгера с двумя реохордами (первый из описанных потенциометров Гейгера). Этот потенциометр, имея очень малый предел измерения, позволяет производить измерения малых напряжений в большом диапазоне частот (от 12,5 до 1250 Hz). Конечно, в этом пределе частот невозможно ограничиться одним нулевым прибором, и обычно применяются два вибрационных гальванометра на разные частоты или гальванометр на меньшие частоты и настраиваемый телефон на большие.

ГЛАВА XV

ПРИМЕНЕНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Как указывалось выше, потенциометр переменного тока не может гарантировать точности измерений, равной точности измерений на потенциометрах постоянного тока. Точность измерения на этих последних при правильном подборе всех частей измерительной цепи, может считаться равной 0,01—0,02%. Точность же измерения на потенциометре переменного тока, ограниченная величиной погрешности промежуточного прибора, не может считаться выше 0,2%. Поэтому и область применения потенциометров переменного тока иная, нежели область применения потенциометров постоянного тока.

На основании изложенного очевидно, что применение потенциометров переменного тока для проверки измерительных приборов высоких классов точности, а именно амперметров и вольтметров класса 0,2, не может дать достаточной точности. Проверка этих приборов по образцовому прибору, поверенному на потенциометре постоянного тока, более приемлема. Все измерения на потенциометрах переменного тока, как и измерения на потенциометрах постоянного тока, сводятся к измерениям: 1) напряжения 2) тока и 3) сопротивлений. Первые два измерения отличаются от аналогичных измерений на постоянном токе необходимостью компенсировать не только их величину, но и фазовый сдвиг. При измерениях сопротивлений по сравнению напряжения на них с напряжением на безреактивных образцовых катушках по обычной формуле, получается величина полного сопротивления

$$z = \frac{U_x}{U_{oc}} \cdot R_{oc},$$

где U_x — измеренное потенциометром напряжение на измеряемом сопротивлении, U_{oc} — напряжение на образцовом сопротивлении и R_{oc} — величина образцового сопротивления (активного). Кроме величин U_x и U_{oc} по потенциометру получается отсчет угла между ними. При величине угла φ значения активной и реактивной составляющих z пользуются из $r = z \cos \varphi$ и $x = z \sin \varphi$. При применении комплексного потенцио-

метра отсчет получается на обеих осях и может быть представлен в виде $U_x = a + jb$, где a и b — отсчеты по осям X и Y . Если оси потенциометра установлены так, что отсчет U_{oc} получается только на оси X , т. е. $U_{oc} = a' + j \cdot 0$, то величины a и b дают величину активной и реактивной составляющих полного сопротивления в известном масштабе.

Применение потенциометров переменного тока для проверки приборов класса 0,2 достаточной точности гарантировать не может. Проверку приборов (амперметров и вольтметров) класса 0,5 и 1,0 вполне возможно производить на переменном токе при посредстве потенциометров, конечно, при соблюдении предосторожностей, указанных в главе XIV. Особенное значение приобретает потенциометр при измерении малых величин разностей потенциалов или малых токов, а также при измерении электродвижущих сил источников, потреблять ток которых не представляется возможным. Применение потенциометра переменного тока для исследования вариометров, где желательно измерение вторичного напряжения без наличия тока во вторичной катушке, весьма рационально. Большую область применения получили потенциометры переменного тока при исследовании измерительных приборов, в особенности приборов индукционного типа, при исследовании которых представляет большой интерес снятие векторных диаграмм токов и потоков (прибора или счетчика). Снятие магнитных характеристик трансформаторной и динамной стали возможно не только на специальных для того предназначенных потенциометрах, например, потенциометрах завода „Электроаппарат“, но и на потенциометрах любого типа.

Проверка ваттметров на потенциометрах переменного тока не может гарантировать сколько-нибудь значительной точности, так как в виду того, что в выражение для мощности $P = UI \cos \varphi$ входит величина угла φ , точность измерения мощности P ограничивается точностью измерения угла φ . Точность измерения угла на потенциометре в полярных координатах не может считаться выше 0,2—0°,4, что при малом значении угла φ может составить в процентном отношении достаточно большую погрешность. При проверке ваттметра на потенциометре в прямоугольных координатах (комплексном потенциометре) точность может быть несколько увеличена, если оси потенциометра ориентированы так, что ось активных отсчетов совпадает с отсчетом напряжения $U_x = a_1 + j \cdot 0$; в этом случае активная составляющая отсчета разности потенциалов на образцовой катушке

$$I = [a_2 + jb] \cdot \frac{1}{R_{oc}} = \frac{a_2}{R_{oc}} \text{ даст как раз отсчет } I \cos \varphi.$$

$$\text{Величина } P = \frac{a_1 a_2}{R_{oc}}$$

при отсчете U_x без делителя и

$$P = \frac{a_1 a_2}{R_{oc}} \cdot n,$$

при измерении с делителем (n — множитель делителя). В обоих случаях отсчеты a_1 и a_2 должны быть выражены в вольтах.

Объем книги не позволяет остановиться на всех вариантах измерений, которые можно производить при помощи потенциометров переменного тока. В настоящее время этот прибор в промышленных лабораториях, и в лабораториях научно-исследовательских институтов, получил настолько большое распространение, что вопросу о производимых на нем измерениях, желательно посвятить особую книгу.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. M. Allamet. Potentiomètre. J. Carpentier. „L'Électricien — Revue Internationale de l'Électricité et de ses Applications“. Janvier 1901, T. XXI N. 523, p. 1.
2. Allochio. Vaccini et Co., каталог стр. 41.
3. Инж. А. А. Андреев. Самопишущие и автоматические регулирующие потенциометры. „Точная Индустрия“, № 4, апрель 1935, стр. 3.
4. N. F. Astbury. A Simple Method for Measurements of Residual Inductance on Potentiometer and Fourterminal Resistance Coils. „Journal of Scientific Instruments“. July 1931, vol. VIII, № 7, p. 221.
5. W. Beeitz. Der Universalkompensator. „Wiedemann Annalen“ („Annalen der Physik“, 1878, S. 1).
6. Leo Behr. The Wenner Potentiometer. „The Review of Scientific Instruments, March, 1932, N. 3, p. 109.
7. Bobier and O'Bryan. A Precision Potentiometer of Improved Design. „General Electric Review, March, 1932 N. 3, p. 185.
8. Perry Borden and M. F. Behar. Potentiometers. „Instruments — the magazine of measurement and control“. Vol. 7 October 1934, N. 10, p. 205.
9. H. B. Brooks. A new potentiometer for the measurement of electromotive force and current. „Bulletin of the Bureau of Standards“, vol. 2, 1906, N. 2, p. 225.
10. H. B. Brooks. A Deflection Potentiometer for Voltmeter Testing. „Bulletin of the Bureau of Standards“, vol. 4, 1908, N. 79.
11. H. B. Brooks. Deflection Potentiometers for Current and Voltage Measurements. Reprint N. 172 from. „Bulletin of the Bureau of Standards“, vol. 8, N. 2, 1911, p. 395.
12. H. B. Brooks. Outline of Design of Deflection Potentiometers with Notes on the Design of Moving Coil Galvanometers. „Scientific Papers of the Bureau of Standards“, 1911, N. 173.
13. H. B. Brooks and A. W. Spinks. A multirange Potentiometer and its application to the measurement of small Temperature Differences. „Bureau of Standards Journal of Research“, December 1932, p. 781.
14. H. B. Brooks. Les potentiometres, Congres International d'Électricité. Paris, 1932, 2-me Section, Rapport N. 14.
15. H. B. Brooks. The Standard-cell comparator, a specialized potentiometer. „Bureau of Standards Journal of Research“, vol. 99, 1933, N. 1, p. 211.
16. Th. Brugger. Ueber einen Kompensationsapparat mit Kurbel. „Physikalische Zeitschrift“, 1. Jahrgang N. 14, 1900, p. 167.
17. Burgess and Le Chatelier. „High Temperature Measurements“, 1912, p. 146.
18. Cambridge. A Thermocouple potentiometer and other instruments „The Electrician“, August 10, 1917, p. 743.
19. Albert Campbell. A multiple-dial potentiometer, „The Electrical Review“. Vol. 55, December 30, 1904, p. 1065.
20. Albert Campbell. A new Alternating Current Potentiometer of Larsen Type. „The Proceedings of the Physical Society“, vol. 41, 1928, December 15, N. 226, p. 94.
21. Chauvin Arnoux. Каталог — Appareils de Contrôle.
22. Latimer Clark. On a Standard Voltaic Battery. „Philosophical Transactions“, 1874, Vol. 164, p. 1.
23. Crompton's potentiometer method of obtaining accurate electrical measurements. „The Electrician“ May 12 1893, p. 32.

24. C. Deguise. Die Kompensationsmethode bei Wechselstrommessungen. „Archiv für Elektrotechnik“, Band V, 1917, Heft 10, S. 303.
25. H. Diesselhorst. Ueber einen Kompensationsapparat mit kleinem Widerstand. „Zeitschrift f. Instrumentenkunde“, Heft 6, 1906, S. 173 u. 297.
26. H. Diesselhorst. Thermokraftfreier Kompensationsapparat mit fünf Dekaden und konstantem kleinen Widerstand. „Zeitschrift für Instrumentenkunde“, Heft 1, 1908, S. 1.
27. H. Diesselhorst. Kompensationswiderstand für das Kadmium-Normalelement. „Zeitschrift für Instrumentenkunde“. Heft 2, 1908, S. 38.
28. C. V. Drysdale. The measuring of phase differences. „Electrician“ (London), vol 57 August 1906. p. 726, p. 783.
29. C. V. Drysdale. The use of the Potentiometer on Alternate Current. „Philosophical Magazine“, vol. 17, 1929, p. 402.
30. C. V. Drysdale. The Alternate Current Potentiometer as a Standard Instrument. „Electrician“, May 7, 1915.
31. C. V. Drysdale and S. Butterworth. The distribution of the Magnetic field and return current round a submarine cable carrying alternating current. „Philosophical Transactions of the Royal Society“, vol. 224, 1924, p. 95, p. 141.
32. C. V. Drysdale. Alternating-current potentiometers and their applications. „The Journal of the Institution of Electrical Engineers“, vol. 68, 1930, p. 339.
33. Du Bois Reimond. Beschreibung einiger Vorrichtungen und Versuchsweisen zu elektro-physiologischen Zwecken. „Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften zu Berlin“. 1862, p. 107.
34. A. Ebeling. Frank's Alternator for Measuring Currents of Telephonic Frequency. „The Electrician“, October 1913, p. 28.
35. A. K. Erlang. New Alternating-Current compensation Apparatus for Telephonic Measurements. „Journal of the Institute of Electrical Engineers“. Vol. 51, 1913, p. 794.
36. Marion Eppley and William Q. Gray. An improved Feussner Type Potentiometer. „Review of scientific Instruments“, 1931, April, p. 243.
37. K. Feussner. Ein Kompensationsapparat für Spannungsmessung. „Zeitschrift für Instrumentenkunde“, Heft 4, 1890. S. 113.
38. K. Feussner. Neuer Kompensationsapparat. „Elektrotechnische Zeitschrift“, Heft 8, 1911, SS. 187, 215.
39. W. C. Fisher. „The Potentiometer and its Adjuncts“. D. van Nostrand Co. New-York.
40. I. A. Fleming. On the Use of Daniell's Cell as a Standard of Electromotive Force. „Philosophical Magazine“, vol. 20, 1885, p. 126.
41. I. A. Fleming. „Handbook for the Electrical Laboratory and Testing Room“. Vol. 1, 1901, p. 137, p. 429.
42. Ad. Franke. Die elektrischen Vorgänge in Fernsprechleitungen und Apparaten. „Elektrotechnische Zeitschrift“, Heft 34, 1891. S. 453
43. Rudolf Franke. Ein Kompensator für Spannungs und Strommessungen. „Elektrotechnische Zeitschrift“, Heft 22, 1897, S. 318.
44. Rudolf Franke. Ueber Neuerungen an Kompensationsapparaten. „Elektrotechnische Zeitschrift“, Heft 24, 1903. S. 978.
45. D. C. Gall. Direct and alternating Current. Potentiometer Measurements. Izdat. Chapman & Hall, 1938.
46. D. C. Gall. A new Alternating Current Potentiometer. „The Electrician“, April 1923, p. 360.
47. D. C. Gall. Portable Alternating Current Potentiometer, „Katalog H. Tinsley & Co. List N. 61, May 1931, N. 211.
48. D. C. Gall. A recent Improvement in precision potentiometers, „Journal of Scientific Instruments“, September 1935, vol. XII, N. 9, p. 284.
49. Eric Gerard. „Mésures électriques“. Editeur Gauthier-Villars, 1901.
50. W. Geyger. Ein einfacher Wechselstrom-Kompensator. „Elektrotechnische Zeitschrift“, Heft 49, 1924, S. 1348.
51. W. Geyger. Wechselstromkompensationsmessungen mit Lufttransformatoren. „Archiv für Elektrotechnik“. B. XIV, 1925. S. 560.
52. W. Geyger. Ueber die Verwendung sekundär belasteten Lufttransformatoren bei Wechselstrommessungen, „Archiv für Elektrotechnik“, Band XV, 1926, S. 174.

53. W. Geyger. Messungen an eisengeschlossenen electrodynamischen Wechselstrom-Leistungsmessern nach der Kompensationsmethode. „Archiv für Elektrotechnik“, Heft 2, 1929, S. 119.
54. W. Geyger. Ein komplexer Wechselstromkompensator für Mittlere Frequenzen. „Zeitschrift für Hochfrequenztechnik“, Heft 6, 1929, S. 223.
55. W. Geyger. Ein komplexer Kompensator für höhere Spannungen. „Archiv für Elektrotechnik“, B. XXIII, 1930, S. 447.
56. W. Geyger. Wechselstrom-Kompensatoren mit Zusammengesetzter Vergleichsspannung (komplexe Kompensatoren). „Archiv für technisches Messen“, N. 7, Januar, 1932, 1—94.
57. W. Geyger. Wechselstrom-Kompensatoren Fehlerquellen und ihre Vermeidung. „Archiv für technisches Messen“, N. 11, Mai 1932—1—941.
58. W. Geyger. Wechselstrom-Kompensatoren mit einfacher Vergleichsspannung (Phasenschieber-Kompensatoren). „Archiv für technisches Messen“ N. 14, August, 1932, 1—94.
59. W. Geyger. Wechselstrom-Kompensatoren mit selbsttätiger Abgleichung. „Archiv für technisches Messen“, N. 55, Januar 1936 Blatt t-13, t-14, 1 94—5.
60. W. Geyger. Gleichstrom-Kompensatoren mit selbsttätiger Abgleichung. Schleifdraht Verfahren „Archiv für technisches Messen“. N. 57 März 1936, I, 932 Blatt t. 38—39—40.
61. W. Geyger. Gleichstrom-Kompensatoren mit selbsttätigen Abgleichung Strommesserverfahren. „Archiv für technisches Messen“, N. 59, May 1936, I, 932—2, t-70.
62. W. Geyger. Ein neuer komplexer Wechselstromkompensator. „Archiv für Elektrotechnik“, Band XXX 1936, Heft 12, S. 806.
63. W. Geyger. Wechselstrom-Kompensatoren mit selbsttätiger Abgleichung durch Doppelspul-Dynamometer. „Archiv für Technisches Messen“ N. 61, Juli 1936, 1-94—6 Blatt T-99.
64. Doppel-Kompensograph für Wechselstrom mit einem gemeinsamen Röhren-Verstärker. „Archiv für Technisches Messen“ N. 67, Januar 1937, I, 94—7, Blatt T-13.
65. W. Geyger. Wechselstrom-Kompensatoren mit selbsttätiger Abgleichung durch Doppel-Elektrodynamometer. „Archiv für Technisches Messen“ N. 87, September 1938, I, 94—14.
66. M. Gosselin, Sur les potentiomètres industriels. „Bulletin de la Société internationale des Electriciens“. t. XV, Année 1938, p. 246.
67. Handbuch der Physik B. 16. „Apparate und Messmethoden für Elektrizität und Magnetismus“. Geyger und Scheel, Verlag Julius Springer, 1927, p. 397.
68. I. A. Harker. A Direct-reading Potentiometer for Thermoelectric Work, „Philosophical Magazine“, vol. 6, 1904, p. 41.
69. Hartmann und Braun. Katalog N. 11, 1910, S. 41. Потенциометр бпырепа.
70. Hartmann und Braun. Firmenn Mitteilungen. Technischer Kompensator zum Prüfen von Leistungsmessern nach Dr. R. Schmidt, P. T. R. „Archiv für technisches Messen“, N. 11, Mai 1932, 1-9311.
71. Hartmann und Braun. Firmen Mitteilungen. Präzisions-Kompensator für Gleichstrom. „Archiv für technisches Messen“, N. 50, August 1935, I, 931, F. 16.
72. H. Hausrath. Die Messung kleiner Temperaturdifferenzen mit Thermoelementen und ein Kompensationsapparat mit konstantem kleinem Kompensationswiderstand bei konstantbleibendem Hilfsstrom. „Annalen der Physik“, B. 17, 1905, S. 735.
73. H. Hausrath. Induktions-Variometer und Widerstandskombinationen. „Zeitschrift für Instrumentenkunde“, Heft 10, 1907, S. 302.
74. Hoffmann und Rothe. Ueber das Registriergalvanometer von Siemens und Halske und eine damit gefundene Anomalie im flüssigen Schwefel. „Archiv für Elektrotechnik“, XXV, September 1905, S. 273.
75. Howell. Voltmeter with Clark Standard Cell. „Electrical World, New York, t. 10, 1887, p. 339, t. 11, 1888, p. 81.
76. Jaeger. „Elektrische Messtechnik“. Dritte Auflage, Verlag I. Barth Leipzig.
77. Ilievici. Potentiomètre à déviation et à lecture directe transportable, „Bulletin de la Société française des Electriciens“, T. II, 4-me série, N. 13, Mars 1922, p. 117.

78. P. Kapitza and C. I. Milner. A Modified potentiometer for measuring very small resistances. „Journal of Scientific Instruments“, vol. XIV, 1937, N. 5, p. 165.
79. A. E. Kenelly and Edy Velandier. A rectangular component two-dimensional alternating current potentiometer. „Journal of the Franklin Institute“, vol. 188, July 1919, N. 1, p. 1.
80. Ch. Kessler and Dr. Krönert. Die potentiometrischen Messverfahren zur genauer Bestimmung von Thermospannungen. „Siemens Zeitschrift“, Band 11, 1931, N. 8/9, S. 384.
81. Инж. А. А. Коссовский. Новый компенсатор переменного тока. „Вестник Электропромышленности“, январь 1936, стр. 16.
82. Josef Krönert. Kompensations-Apparate für Gleichspannung. „Archiv für technisches Messen“. N. 11, Mai 1932, I-931.
83. Dr. Josef Krönert. „Messbrücken und Kompensatoren“. Verlag R. Oldenburg, München, 1935.
84. В. И. Кротова. Прибор Шеринг-Альберти в лаборатории переменного тока. „Временник Главной Палаты мер и весов“. Вып. 3/15, 1929, стр. 202.
85. W. Krukowski. „Der Wechselstromkompensator“. Verlag Julius Springer, 1920.
86. W. Krukowski. Die Genauigkeit der Gleichstromkompensationsmessungen und die Mitteln zu ihrer Steigerung. „Annales de l'Académie des Sciences à Varsovie, T. 1, 1935, p. 123.
87. W. Krukowski. Genauigkeit bei Gleichstrom-Kompensationsmessungen. „Archiv für technisches Messen“. N. 52, September 1935, I, 021, t. 117.
88. E. Kühnel. Technische Kompensations-Einrichtung zur Kontrolle von Strom Spannungs und Leistungsmessern, „Elektro-Journal“, Mai 1927, S. 75.
89. A. Larsen. Der komplexe Kompensator — ein Apparat zur Messung von Wechselstromen durch Kompensations. „Elektrotechnische Zeitschrift“, 1910, S. 1039.
90. A. Larsen. An Apparatus for the Measurement of Alternating Currents by the Compensation Method. „Electrician“, vol. 66, 1911, p. 736.
91. Laws. „Electrical Engineering Tests“. Mac. Graw Hill. Book Co. 1917.
92. Leeds and Northrup Co. „Bulletin“, N. 763, 1923. The Brooks model 7, Deflection Potentiometer.
93. Leeds and Northrup Co. „Bulletin“ N. 755, 1926, Type K Potentiometer.
94. Leeds and Northrup Co. „Bulletin“, N. 726, 1927. „White potentiometer“.
95. R. A. Lehfeldt. A. Potentiometer for Thermocouple measurements. „Philosophical Magazine“, V. 5, 1903, p. 668.
96. A. Lindeck und R. Rothe. Ueber die Prüfung von Thermoelementen für die Messung hoher Temperaturen „Zeitschrift für Instrumentenkunde“. Heft 10. 1900, a 290.
97. K. Lion. Ein Wechselstromkompensator mit grossen Frequenzumfang. „Elektrische Nachrichten-Technik“, 135, Heft 7, 1928, S. 276.
98. Инж. Лушников. Переносный потенциометр. „Точная Индустрия“, № 12, декабрь 1935, стр. 20.
99. WJH Moil. „The Thermo-Junction Method of Measuring alternating Current. „Journal of Scientific Instruments“, 1925—6, vol. 3, p. 209.
100. Ф. Н. Николаев. Теория погрешностей потенциометров. Сборник Трудов ВИМС „Электрические измерения“, 1936, стр. 5.
101. Б. Ф. Обольсин. Добавочный аппарат для градуировки-ваттметров на потенциометре постоянного тока. „Электричество“, № 12, 1927, стр. 462.
102. E. Orlich. Ueber eine optische Methode der Strommessung. „Zeitschrift f. Instrumentenkunde“, N. 3, 1904, S. 65.
103. А. А. Павлова. Методы поверки и испытаний потенциометров, применяемые в лаборатории постоянного тока ВИМС. Сборник Трудов ВИМС „Электрические измерения“, 1936, стр. 58.
104. C. Paulus. Die technische Kompensationseinrichtung der European Weston-Electrical-Instrument Co. Berlin, „Elektrotechnik und Maschinenbau“, Heft 48, 1907, S. 940.
105. A. Pagés. Perfectionnements aux méthodes potentiométriques utilisées en courant alternatif. „Revue Générale de l'Electricité, Vol. 19 1926, p. 381.

106. P. O. Pedersen. A new Alternating Current Potentiometer for Measurements on Telephonic Circuit. „The Electrician“, November V LXXXIII, 1919, p. 523.
107. H. Pellat. Difference de Potentiel des couches électriques qui recouvrent deux métaux en contact. „Annales de Chimie et de Physique“, V série 1881, p. 5, t. XXIV.
108. Poggendorf. Methode zur quantitativen Bestimmung der elektromotorischen Kraft unconstanter galvanischer Ketten. „Annalen der Physik“ (Poggendorf Annalen), T. LIV, 1841.
109. Н. Н. Пономарев. Потенциометры для градуировки и проверки приборов. „Информационно-технический бюллетень завода „Электроприбор“, № 1, октябрь 1935, стр. 42.
110. A. Raps. Ueber einen neuen Kompensations-Apparat der Firma Siemens und Halske. „Zeitschrift für Instrumentenkunde“, Heft 6, 1895, S. 215.
111. Rayleigh and Mrs H. Sidgwick. On the Electrochemical Equivalent of Silver and on the Absolute Electromotive Force of Clark Cells. „Philosophical Transactions“, 1884, p. 411.
112. M. Schering and E. Alberti. Eine einfache Methode zur Prüfung von Stromwandlern. „Archiv für Elektrotechnik“, B. II, 1913, S. 263.
113. H. Schröder. Wechselspannungs-Normalgenerator als Wechselstrom-Kompensator. „Archiv für technisches Messen“. N. 1, November 1934, I, 94—4. T. 154.
114. Alfred Schwarz. Verschiedene Laboratoriums und Demonstrationsinstrumente. „Elektrotechnische Zeitschrift“, H. 7, 1911, S. 162.
115. Sharp and Crowford. A simple form of polar alternating current, potentiometer. „Transactions of the American Institute of Electrical Engineers“, vol. 29 1910, p. 1517.
116. Siemens - Schuckert Firmenmitteilungen. Stufenkompensator nach Dr. R. Schmidt PTR zur Bestimmung der Korrekturen von Präzisions-Instrumenten, „Archiv für technisches Messen“, N. 47, 1935, I, 931, N. 9.
117. B. S. and F. D. Smith. An Instrument for the Production of Small High Frequency Alternating Electromotive Forces. „The Proceedings of the Physical Society“ 41, 1928, December 15 th. N. 226, p. 18.
118. T. Spooner. Some Application of the Alternating Current Potentiometer. „Journal of the Optical Society of America“, Vol. 12, 1926, p. 217.
119. Alfred Stansfeld. On some Improvements in the Roberts-Austen Recording Pyrometer with Notes on Thermo-Electric Pyrometry. „Philosophical Magazine“ (London) Fifth Series N. 278, July 1898, p. 66.
120. J. Melville Stein. Design of Potentiometers. „Transactions of the American Institute of Electrical Engineers“, vol. 50, December 1931, p. 1302.
121. P. Steinwehr. Zwei neue elektrische Messapparate: ein Kompensator und ein Spannungsteiler. „Zeitschrift für Instrumentenkunde“, April 1940. Heft 4, s. 116.
122. W. S. Stuart. A thermoionic Valve Potentiometer for Audio Frequencies. „The Journal of the Institution of Electrical Engineers“, vol. 63, 1930, p. 769.
123. James Swinbourne. A Potentiometer for Alternative Currents. „Philosophical Magazine“ (London) 1894, N. 224, p. 201.
124. Tinsley C. Karasor. Ionisationspotentiometer, September 1923, List, N. 22.
125. Eugène Vigneron. „Cours des Mesures électriques“, Paris. Librairie de l'Enseignement technique, Leon Eyrolles. 1922.
126. Martin Wald. Ein Wechselstromkompensator mit directem Zeigerausschlag. „Elektrotechnische Zeitschrift“, H. 46, 1930, S 1583.
127. Fr. Wenner. Note on Potentiometer Design. „Physical Review“, t. 31, 1910, p. 94.
128. Fr. Wenner and Ern. Weibel. The testing of potentiometers. „Scientific Papers of the Bureau of Standards“, N. 223, 1914, p. 1.
129. E. C. Wentz. A Vacuum-Tube Alternating-Current Potentiometer „Journal of the American Institute of Electrical Engineers“, vol. 40. 1921. n. 900.

131. W. P. White. Potentiometer Installation Especially for high Temperature and Thermoelectric Work. „The Physical Review“, Vol. XXV, 1907, p. 334.
132. W. P. White. Einige neue Doppelkompensatoren, „Zeitschrift für Instrumentenkunde“, 1914, S.S. 71, 107, 142.
133. Otto Wolff. Eine neue Ausführungsform des Feussuerschen Kompensations Apparates. „Zeitschrift für Instrumentenkunde“, Heft 8, 1901 S. 227.
134. А. А. Чечулин. Применение электронных ламп для повышения точности измерений на переменном токе. Сборник трудов ВИМСа „Электрические и магнитные измерения“, 1934, стр. 66.
135. W. Zschage. Ueber moderne gebrauchsfertige Kompensationsmesseinrichtungen für Gleichstrom, „Die Messtechnik“, Januar 1936. Heft 1, S. 4.
-

Отв. редактор *Н. А. Маренин.*

Техн. оформление *И. В. Дворников.*

Корректор *Н. П. Сарбаева.*

М 26230. Сдано в производство 26/VII 1900 г. Подписано к печати 15/X 1940 г.
Печ л. 11¹/₂. Бум. л. 5³/₄. Уч.-взд. л. 14¹/₂. Формат бум. 60×90/16. Тираж 2000 экз.
Заказ № 5680.

1-я тип. Машгиза НКТП. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.