

2/IV-80

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ВНИИМ

Выпуск 6 (66)

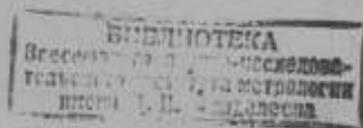
ИЗДАНИЕ ВНИИМ

Ленинград 1949



КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА



ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ВНИИМ

Выпуск 6 (66)

Под редакцией
проф. Н. А. Маренина

1976

ИЗДАНИЕ ВНИИМ

Ленинград 1949

106

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
5708 SOUTH CAMPUS DRIVE
CHICAGO, ILLINOIS 60637

PROFESSOR
STEPHEN J. LASKER
1100 UNIVERSITY AVENUE
CHICAGO, ILLINOIS 60607

DEAR PROFESSOR:

YOUR LETTER

OF APRIL 15, 1964

IS RECEIVED

ОТ РЕДАКТОРА

Настоящий сборник, являющийся продолжением сборника ВНИИМ 1 (56), содержит также работы лабораторий: эталонной электрической, электрических образцовых мер, электрических измерений и магнитной.

В обширной обзорной статье Б. М. Яновского приведены исторические сведения о развитии вопроса об электрических измерениях и единицах и дана сводка работ Главной палаты мер и весов и ВНИИМ по установлению основных эталонов электрических единиц — ома и вольта — за период с 1900 по 1941 гг.

Вопрос о чувствительности электрических измерительных цепей и о простейших методах ее определения по параметрам затронут в работе И. Н. Кроткова, являющейся одной из ряда работ лаборатории образцовых электрических мер, касающихся общего исследования таких цепей.

Упрощение и ускорение поверок электронизмерительных приборов является весьма актуальным вопросом, стоящим в программе работ лаборатории электрических измерений. В статье К. И. Широкова приведено описание и результаты исследования нового шестидекадного образцового потенциометра, разработанного лабораторией электрических измерений для проверки рабочих потенциометров, с значительно меньшей затратой рабочего времени без снижения точности.

Сложному вопросу об источниках питания измерительных схем постоянного тока посвящена статья И. И. Геймана, где приведены результаты исследования разработанного им стабилизатора напряжения, позволяющего во многих случаях, в потенциометрических схемах, применить выпрямленное напряжение переменного тока.

**РАБОТЫ ГЛАВНОЙ ПАЛАТЫ МЕР И ВЕСОВ И ВСЕСОЮЗНОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА ПО УСТАНОВЛЕНИЮ
И ПОДДЕРЖАНИЮ ЭТАЛОНОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ
РАБОТЫ ПО УСТАНОВЛЕНИЮ МЕЖДУНАРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЕДИНИЦ В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД (до 1920 г.)**

1. Возникновение электрических единиц и их эталонов

Вопрос об установлении единообразия измерений и единой системы единиц для всего земного шара поднимается всякий раз, когда появляется потребность в измерениях какой-либо физической величины одновременно в различных странах, связанных между собой общностью научных или экономических интересов.

При научных исследованиях такое единообразие необходимо в тех случаях, когда мы имеем дело с изучением физического состояния какого-либо тела, понимая под ним любые химические соединения, чистые элементы, минералы и, наконец, земной шар и его отдельные части — земную кору, атмосферу, океан и т. д. Примером этого может служить изучение магнитного поля земного шара, которое требует измерений напряженности этого поля по всей поверхности земного шара. Естественно, что для использования этих измерений в целях нахождения той или иной закономерности в распределении магнитного поля необходимо производить измерения в одной и той же системе единиц.

Для определения каких-либо физических свойств — теплоемкости, электропроводности и т. д. — необходимо измерять эти свойства величинами, выраженными в одних и тех же единицах. Для исследования же самих явлений и установления в них закономерностей можно и не иметь определенной системы единиц, а пользоваться любыми, наиболее удобными для данной цели. Так, например, закон Ома можно было установить, измеряя силу тока и напряжение в любых произвольных единицах, и общность закона от этого не только не пострадала бы, но и выиграла. Вот почему после открытия нового явления, на первой стадии его изучения, различные исследователи пользовались и пользуются

своими собственными методами и собственными единицами измерений.

Однако потребность в единстве измерений возникает не только при научных исследованиях, но главным образом в тот момент, когда явление перестает быть предметом чисто научного изыскания и переходит в область практического применения. С этого момента измерения начинают играть роль не только как средство научного познания, но и как мерило экономических расчетов, что возможно лишь при наличии единой системы единиц. Практические потребности являются наиболее важным и решающим фактором в деле создания единообразных измерений.

Этим и объясняется, почему так поздно возник вопрос об установлении единой системы электрических единиц, обязательной для всех стран. Электрические явления стали предметом научного исследования в конце XVIII века, а система электрических единиц возникла лишь во второй половине XIX века. Конец XVIII и первая половина XIX веков ознаменовались крупнейшими открытиями в области электрических и магнитных явлений, изучение которых заняло более полувека, и лишь в конце первой и начале второй половины XIX века началось применение этих явлений в промышленности, в транспорте и в быту.

Особенно бурное развитие технического применения электромагнитных явлений произошло во второй половине XIX века, когда была изобретена динамомашинка, электрическая лампочка, телефон и пр. Все это и потребовало создания единой системы электрических единиц и связанного с этим создания эталонов этих единиц.

Необходимо упомянуть, что система магнитных единиц возникла значительно раньше. Она была предложена еще в 1832 г. Гауссом в связи с его работами по изучению магнитного поля земли. Позднее она была распространена Вебером и на электрические единицы.

Система Гаусса-Вебера, основанная на единицах длины, массы и времени, долгое время существовала как чисто научное предположение и в практике измерений никем не принималась, и лишь спустя тридцать лет, в 1862 г., Британская ассоциация по изучению естественно-производительных сил организовала комиссию по разработке электрической системы единиц и их эталонов, куда вошли крупнейшие представители науки и техники того времени — Максвелл, Кирхгоф, Сименс и другие.

Комиссия после долгих обсуждений остановилась на системе Гаусса, изменив ее лишь в отношении выбора единиц длины и массы. Вместо миллиметра и миллиграмма, предложенных Гауссом, комиссия решила за основные единицы принять сантиметр и грамм, оставив единицу времени (секунда) той же, что и в системе Гаусса. Так возникли системы электрических единиц, которые получили название абсолютной электростатической и абсолютной электромагнитной систем.

Термин „абсолютный“ здесь нужно понимать не в том смысле, в котором его обычно понимают, а как противоположность термину „относительный“. Об этом ясно сказано в постановлении самой комиссии, которая дала следующее определение этому термину: „Слово абсолютный в истинном смысле употребляется как противоположность слову относительный и ни в коей мере не предполагает, что измерения произведены точно или что употребляемые единицы являются совершенными; другими словами, термин „абсолютный“ не предполагает, что измерения или единицы абсолютно точны, а лишь только то, что измерения вместо того, чтобы быть простым сравнением с произвольной величиной того же рода, что и измеряемая, делаются относительно некоторых основных единиц другого рода, принимаемыми за постулаты“.

В период между появлением работы Гаусса и работами комиссии Британской ассоциации электрические измерения в различных странах и в различных лабораториях основывались на произвольных единицах и эталонах, не связанных с единицами длины, массы или какими-либо другими известными единицами.

Так, например, первые эталоны сопротивления относятся к сороковым годам XIX века. В 1838 г. русский физик Ленц предложил за единицу сопротивления считать отрезки медной проволоки, разосланные им разным ученым, а в 1843 г. англичанин Уитстон — медную проволоку в 1 фут длиной и 100 г весом. Но наибольшим успехом пользовалась единица сопротивления русского ученого Якоби, предложенная им в 1848 г. и представлявшая собой медную проволоку длиной 25 футов, весом 345 г и сечением $\frac{9}{16}$ мм². В 1860 г. в Германии и Англии вошла в употребление единица Сименса, представлявшая собой ртутный столб длиной 1 м и поперечным сечением 1 мм².

Ввиду того, что абсолютные единицы были или слишком малы или слишком велики, комиссия Британской ассоциации наряду с абсолютной установила практическую систему, в которой все единицы отличаются от абсолютных множителем 10^n , где n — целое положительное или отрицательное число. Так, за единицу сопротивления комиссия предложила ом, равный 10^9 абсолютной электромагнитной единицы, и в качестве эталона остановилась на проволочной катушке, сопротивление которой было измерено в абсолютных единицах методом Вебера, при помощи равномерно вращающейся катушки. Такая единица получила название ом Британской ассоциации, который оказался равным 0,9866 абсолютного ома.

Для характеристики состояния измерительного дела того времени достаточно указать, что к 1864 г., через три года после начала работ комиссии Британской ассоциации, существовали следующие единицы сопротивления:

1) единица Якоби: медная проволока 25 футов длиной, массой 345 г, сопротивлением 0,628 Ω;

2) абсолютная единица: 10^4 м/сек, определенная Вебером, сопротивлением 0,907 Ω ;

3) единица Сименса: ртутный столб длиной 1 м, сечением 1 мм², сопротивлением 0,944 Ω ;

4) ом Британской ассоциации: ртутный столб длиной 1,04 м, сечением 1 мм², сопротивлением 0,9866 Ω ;

5) единица Дигней (Digne): железная проволока длиной 1 км, диаметром 4 мм, сопротивлением 914 Ω ;

6) единица Бреке (Brequet): проволока сопротивлением 963 Ω ;

7) единица Суисс (Swiss): проволока сопротивлением 10 Ω .

В 1881 г. состоялся в Париже первый конгресс по электричеству и магнетизму, который после длительных обсуждений принял систему абсолютных единиц, разработанную Британской ассоциацией, а также практическую систему.

Одновременно с установлением единиц конгресс создал специальную Международную комиссию для материального осуществления эталонов. Эта комиссия на основании целого ряда абсолютных измерений, произведенных до 1884 г., установила лишь эталон единицы сопротивления — ом. Этот ом получил название „легального ома“ и представлял собой ртутный столб длиной 106 см с площадью поперечного сечения в 1 мм² при температуре 0°C.

За время с 1884 по 1893 гг. был произведен ряд новых исследований по абсолютному определению ома. Расхождения между отдельными измерениями не превышали уже 0,01%, и длина столба ртути, соответствующая 1 Ω , оказалась равной 106,28 см.

В 1892 г. съезд Британской ассоциации в Эдинбурге определил „легальный ом“ как сопротивление ртутного столба длиной в 106,3 см. Чикагский конгресс 1893 г. принял без изменений это определение ома и предложил всем заинтересованным государствам установить единицу сопротивления под названием „международный ом“, который представлял собой столб ртути длиной 106,3 см, массой 14,4521 г при 0°C.

Точно так же Чикагский конгресс предложил за единицу силы тока принять „международный ампер“, представляющий собой силу тока, который при прохождении через серебряный вольтметр откладывает в нем в течение 1 сек. массу серебра, равную 0,001118 г.

В 1908 г. Лондонская конференция по электричеству и магнетизму еще раз подтвердила предложение Чикагского конгресса и рекомендовала в качестве системы электрических единиц, воспроизводящих с достаточным приближением абсолютную систему, основанную на сантиметре, грамме и секунде, принять международный ом, международный ампер, международный вольт и международный ватт, определив их следующим образом:

1) международный ом есть сопротивление, оказываемое неизменяющемуся электрическому току при температуре тающего льда ртутным столбом, имеющим массу 14,4521 г, повсюду одинаковое сечение и длину 106,300 см;

2) международный ампер есть сила неизменяющегося электрического тока, который, проходя через водный раствор азотно-кислого серебра, откладывает 0,00111800 г серебра в секунду;

3) международный вольт есть электрическое напряжение, которое в проводнике, имеющем сопротивление в один международный ом, производит ток силою в один международный ампер;

4) международный ватт есть энергия, расходуемая в одну секунду неизменяющимся электрическим током силою в один международный ампер при электрическом напряжении в один международный вольт.

Единственным отличием этих определений от определений, сделанных Чикагским конгрессом, является добавка двух нулей после запятой в значениях длины ртутного столба и массы откладываемого серебра в вольтметре.

Эти добавки были сделаны не потому, что к этому времени стали более точно известны длина столба ртути, соответствующая одному ому, и электрохимический эквивалент серебра, а для того, чтобы при воспроизведении единиц сопротивления и силы тока можно было пользоваться более точными значениями этих величин. Произвольный характер введения этих нулей и характеризует условность международной системы единиц и отличие ее от абсолютной системы.

Определив таким образом единицы электрического сопротивления и силы тока, мы тем самым совершенно отказываемся от связи их с основной системой единиц — сантиметром, граммом и секундой — и основываем их на произвольных значениях длины и массы ртутного столба и на произвольном значении электрохимического эквивалента серебра. Но так как эти значения с точностью до четвертого знака, т. е. с точностью 10^{-4} измеряемой величины, получены экспериментально из абсолютных измерений, то численные значения электрических величин, выраженных в международной системе единиц, должны совпадать с такой же точностью с численным значением, выраженным в абсолютной системе, и до тех пор, пока точность абсолютных определений не станет выше 10^{-4} измеренной величины, разницу между абсолютной системой и международной обнаружить нельзя. Этим и объясняется тот факт, что до последнего времени большинство экспериментаторов, пользуясь измерительными приборами, градуированными в международных единицах, считает их показания в системе CGS и никаких недоразумений из-за этого не возникает. Недоразумения могут возникнуть лишь в том случае, когда точность измеряемых величин выше чем 10^{-4} .

Но иногда при определении некоторых электрических величин или констант, кроме электроизмерительных приборов, приходится пользоваться непосредственными измерениями основных величин длины, массы и времени. Так, например, при определении заряда электрона методами Милликена и А. Ф. Иоффе помимо измере-

ния разности потенциалов U между пластинами конденсатора непосредственно измеряются основные величины: масса капельки ртути m , расстояние между пластинами конденсатора l и ускорение силы тяжести, и величина заряда e получается путем вычисления по формуле:

$$e = \frac{mgl}{U}.$$

В этом случае значение заряда получается в системе единиц, отличной и от абсолютной и от международной. Такой же случай имеет место и при определении отношения заряда к массе $\frac{e}{m}$ по методу Дж. Томсона.

В этих случаях международная система электрических единиц может стать неудобной для практики, так как для сохранения ее потребовалось бы вводить в формулы дробные коэффициенты, связывающие абсолютную систему с международной, а такие случаи в физике могут встретиться не только при определении заряда электрона, но и при определении всякой другой физической величины, основанной на электрических измерениях.

Так, расхождения могут встретиться при определении величины энергии, которую можно измерять как электрическими методами, так и методами механическими. Значение ее в первом случае будет получаться в международной системе (международный джоуль), а во втором — в абсолютной системе (абсолютный джоуль), что может вызвать большие неудобства в практике.

Во время Лондонской конференции и в следующие за ней годы точность абсолютных измерений была такова, что практически обнаружить разницу между значениями электрических величин, выраженных в абсолютной и международной системах, не удавалось, и международная система получила всеобщее признание и была узаконена во всех странах.

2. Воспроизведение международных электрических единиц в виде эталонов

Лондонская конференция не только установила систему электрических единиц, но и дала спецификации к изготовлению эталонов, воспроизводящих основные электрические единицы: ом, ампер и вольт.

В качестве эталона ома был принят столб ртути, заполняющий стеклянную трубку, внутренний диаметр которой около 1,2 мм и длина около 1 м. Измерив длину столбика ртути и диаметр трубки, можно вычислить, исходя из определения международного ома, и величину сопротивления ртутного столба. Ниже дается метод такого расчета и способы измерения геометрических размеров. Ввиду практического неудобства в пользовании таким эталоном в качестве копии его были предложены катушки сопро-

тивления из манганиновой проволоки, номинальные значения которых установлены в один ом и определяются путем сравнения с ртутным эталоном.

Эталон силы тока осуществить не представляется возможным, так как нет такого источника тока, который давал бы ток всегда одного и того же значения. Поэтому Лондонская конференция рекомендовала вместо эталона силы тока принять эталон электродвижущей силы, легко воспроизводимый при помощи нормального элемента Вестона, на изготовление которого она дала определенную спецификацию. Определение же электродвижущей силы нормального элемента Конференция постановила производить, исходя из закона Ома, по ртутному ому и серебряному вольтметру, который должен служить для измерения силы тока в международных единицах, согласно его определению.

3. Организация электрического отделения в Главной палате мер и весов

Электрическое отделение Главной палаты мер и весов было открыто 1 февраля 1900 г. Необходимость его открытия диктовалась быстрым развитием практического применения электричества, начавшимся в России в конце XIX века и вызвавшим в связи с этим потребность изучения и испытания измерительных приборов. Помимо этого, открытие электрического отделения обуславливалось особыми обстоятельствами, специально касавшимися электрических счетчиков.

Вот что сказано по этому поводу в отчете заведующего электрическим отделением И. А. Лебедева: „В Австрии уже с 1897 г. введена обязательная поверка электрических счетчиков и установлены требования относительно их устройства. В Германии, которая, главным образом, и снабжает русский рынок электрическими счетчиками, велись подготовительные работы к введению общей периодической поверки счетчиков. Явились поэтому вполне естественные опасения, что не удовлетворяющие германским и австрийским правилам электрические счетчики будут сбывать в Россию, если не будут приняты соответствующие меры. Эти меры должны были заключаться в выработке требований, которые должны предъявляться к счетчикам, выработке, основанной на изучении счетчиков, применяемых в электрической промышленности“.

Открытию электрического отделения предшествовала большая организационная работа, начавшаяся за несколько лет до открытия. На первоначальное оборудование была отпущена сумма в 10000 рублей, из которой часть пошла на заказы электрических весов лорда Кельвина, измерительных приборов, мостика Витстона и других мелких приборов. В Берлине было заказано несколько нормальных сопротивлений, компенсационный прибор

и нормальные элементы Кларка. В 1898 г. проф. Егоров и Блюмбах имели специальную командировку в Германию, Францию и Австрию с целью ознакомления с электрическими лабораториями метрологических учреждений. Кроме того, старшим инспектором Главной палаты мер и весов М. В. Ивановым было изготовлено пять нормальных элементов Кларка.

Электрическое отделение занимало четыре комнаты в третьем этаже на южной стороне главного здания и состояло из лаборатории слабых и лаборатории сильных токов.

Основной задачей лаборатории слабых токов являлось изготовление эталонов электрических единиц и разработка методов электрических измерений. В первой стадии работ эталоном электродвижущей силы (э. д. с.) служили нормальные элементы Латимера Кларка, изготовленные и сравненные с серебряным вольтметром еще за год до открытия лаборатории М. В. Ивановым, а эталоном сопротивления — марганциновые катушки от 0,01 до 100 Ω .

Для определения э. д. с. и сопротивлений служил компенсационный прибор Фейснера.

В лаборатории сильных токов производилась поверка разнообразных электрических приборов, счетчиков, амперметров, вольтметров, ваттметров — постоянного и переменного токов. Для характеристики работ электрического отделения в первые годы его существования не безынтересно привести сведения о количестве поверенных приборов. Было поверено:

- в 1900 г. — 102 счетчика и 51 измерительный прибор;
- в 1901 г. — 276 счетчиков и 65 измерительных приборов;
- в 1902 г. — 799 счетчиков и 107 измерительных приборов.

Быстрый рост числа поверки приборов указывал на действительную потребность в поверке, в особенности счетчиков, но число поверяемых, как указывал заведующий отделением И. А. Лебедев, все же было слишком мало по сравнению со счетчиками, имевшимися в обращении (в то время в Ленинграде их насчитывалось около 10 000).

4. Работы электрического отделения до 1917 г.

Метрологические работы электрического отделения за время со дня его открытия до Октябрьской революции можно разделить на два периода: первый — до Лондонской конференции 1908 г. и второй — после нее.

Первый период являлся более организационным, когда основные усилия были направлены на установление самой методики наблюдений и исследование аппаратуры. Помимо этого, как указывалось выше, инспектором Главной палаты М. В. Ивановым были изготовлены пять нормальных элементов Латимера Кларка, э. д. с. которых была определена по серебряному вольтметру,

изготовленному по правилам, выработанным на международном съезде в Чикаго в 1893 г.

Вольтметр состоял из платиновой чашки диаметром 10 см и высотой 4,5 см, которая служила катодом; анодом являлась серебряная пластинка диаметром 5 см и толщиной 5 мм. В качестве нормальных сопротивлений служили манганиновые катушки в 2 Ω , поверенные в Физико-техническом институте в Германии (PTR).

Результаты этих определений дали значения для э. д. с. E , приведенные в табл. 1.

Таблица 1

E вольт	Отклонение от среднего	E вольт	Отклонение от среднего
1,43315	+ 0,00026	1,43261	- 0,00028
282	- 7	327	+ 38
273	- 16	279	- 10
260	- 26		
284	- 5	324	+ 35
Среднее $E = 1,43289$ V с наибольшим отклонением + 0,00038 V или 0,03%.			

Величина же э. д. с. нормального элемента Латимера Кларка, найденная Кале, составляла 1,43305 V, что очень близко к величине, полученной М. В. Ивановым.

Четыре из этих элементов после изучения их стабильности были выбраны в качестве эталонов э. д. с. и служили ими до 1910 г.

Второй период ознаменовался в жизни электрического отделения открытием третьей лаборатории нормальных элементов (для которой была выделена отдельная комната), а также постановкой работ по изготовлению собственного эталона международного ома.

Лондонская конференция, в которой деятельное участие принимала Главная палата мер и весов в лице ее управляющего проф. Н. Г. Егорова и заведующего электрическим отделением И. А. Лебедева, выработала спецификацию эталонов международного вольта и международного ома. В строгом соответствии с этими постановлениями, в Главной палате мер и весов, по предложению проф. Н. Г. Егорова, сотрудник лаборатории нормальных элементов А. Б. Ферингер в 1910 г. начала изготовление нормальных элементов Вестона, а сотрудники лаборатории слабых токов А. Н. Георгиевский и М. Ф. Маликов приступили к изготовлению ртутных образцов ома.

Весной 1910 г. А. Б. Ферингер изготовила 6 элементов Вестона, а летом того же года она была командирована в Нацио-

нальную физическую лабораторию в Лондоне (НФЛ) для сравнения этих элементов с элементами НФЛ. Сравнения дали расхождения до $6 \cdot 10^{-5}$ V. А. Б. Ферингер изготовила в НФЛ 39 элементов, у которых э. д. с. (вместе с привезенными из России) были определены по серебряному вольтметру. У двадцати семи элементов из тридцати девяти э. д. с. отличалась от международного значения лишь в миллионных долях вольта, а у остальных — на 1—5 сотых тысяч, тогда как у изготовленных в Главной палате мер и весов разница доходила до $8 \cdot 10^{-5}$ V.

Из Англии А. Б. Ферингер привезла 31 элемент, изготовленный ею в НФЛ, и два старых (I_1 и I_2), которые и заменили в качестве эталонов элементы Латимера Кларка.

В 1911 г. А. Б. Ферингер были изготовлены еще 12 элементов, а в 1912 г. — 8 элементов и часть из них была передана в другие поверочные учреждения. К 1 января 1914 г. Главная палата мер и весов располагала уже 42 элементами. С 1912 г. до 1 января 1914 г. (до ухода из палаты А. Б. Ферингер) элементы регулярно через каждые 3—4 месяца сравнивались между собою.

Эти наблюдения возобновились в конце 1914 г. А. Г. Гольдманом, который одновременно начал работу с серебряным вольтметром. После этого наблюдения прекратились до конца гражданской войны и возобновились уже в новых условиях при советской власти в 1920 г.

Если бы э. д. с. нормальных элементов Вестона была строго постоянна во времени, то достаточно было бы иметь один из этих элементов в качестве эталона э. д. с., определив величину его э. д. с. по серебряному вольтметру и ртутному ому. Однако опыт показывает, что все нормальные элементы с течением времени меняют свою величину э. д. с., при этом изменения происходят как в положительном, так и в отрицательном направлениях.

Считая, что изменения имеют случайный характер, при достаточно большом числе элементов можно ожидать, что среднее значение э. д. с. всех элементов будет сохранять постоянное значение. Вот почему в качестве эталона принимается э. д. с. не одного какого-либо элемента, а среднее значение целой группы, получившей наименование группового эталона. Для установления группового эталона э. д. с. одного или нескольких элементов определяется при помощи серебряного вольтметра и ртутного ома и принимается как среднее значение для всей группы, у остальных же элементов э. д. с. определяется из сравнений между собой.

В дальнейшем хранение такой группы заключается в периодических сравнениях элементов друг с другом, которые устанавливают значение э. д. с. каждого элемента относительно среднего значения.

Сущность этого метода заключается в следующем. Положим, что элементы до сравнения имели значение э. д. с. $E_1', E_2', \dots, E_k', \dots, E_n'$ и среднее значение их было E , т. е.

$$E = \frac{\sum_{k=1}^n E_k'}{n}. \quad (1)$$

Если бы эти значения сохранились в момент сравнения, то на компенсационном приборе мы имели бы для любого из них

$$E_k' = R_k i \quad (2)$$

(компенсационные приборы так устроены, что $i = 10^{-4}$ А и поэтому численное значение R_k равно E_k , умноженному на 10^4 А). Если значение э. д. с. изменилось, то при данном R_k компенсация будет нарушена, и гальванометр даст какое-то отклонение α_k , выраженное в единицах э. д. с., и мы будем иметь

$$E_k + \alpha_k = R_k i,$$

где E_k — новое значение э. д. с.

Составим теперь разности

$$\left. \begin{aligned} E_1 + \alpha_1 - (E_k + \alpha_k) &= R_1 i - R_k i \\ E_2 + \alpha_2 - (E_k + \alpha_k) &= R_2 i - R_k i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

сложив их почленно и разделив на n , получим:

$$\frac{\sum E_k + \sum \alpha_k}{n} - E_k - \alpha_k = i \frac{\sum R_k}{n} - R_k i.$$

Из уравнений (1) и (2) мы имеем $\frac{i \sum R_k}{n} = E$ и так как по предположению среднее значение э. д. с. не меняется, то $\frac{\sum E_k}{n} = E$. Следовательно,

$$\frac{\sum \alpha_k}{n} - E_k - \alpha_k = -R_k i,$$

или

$$E_k + \alpha_k = R_k i + \frac{\sum \alpha_k}{n}.$$

После подстановки этих значений в одно из уравнений (3) будем иметь:

$$E_e + \alpha_e - R_k i - \frac{\sum \alpha_k}{n} = R_e i - R_k i,$$

откуда

$$E_e = R_e i + \frac{\sum \alpha_k}{n} - \alpha_e,$$

а так как $R_e i = E_e'$, то

$$E_e = E_e' + \frac{\sum \alpha_k}{n} - \alpha_e. \quad (4)$$

Результаты сравнений нормальных элементов на протяжении ряда лет с начала их изготовления представлены в табл. 2, которая показывает, насколько отличается один элемент от другого и насколько они сохраняют величину э. д. с. Расхождения в э. д. с. для различных элементов в первые годы после их изготовления не превосходили $7 \cdot 10^{-5}$ В, а по прошествии 15 лет достигли $18 \cdot 10^{-5}$ В, сами же элементы изменили величину э. д. с. в течение ряда лет в пределах $2 \cdot 10^{-5}$ — $6 \cdot 10^{-5}$ В. При этом изменения у различных элементов происходят по-разному: у одних э. д. с. непрерывно возрастает, у других падает, у третьих колеблется около среднего значения. Однако сравнение элементов между собой не дает возможности установить общее повышение или общее понижение э. д. с. у всех элементов одновременно. Для этого необходимы периодические измерения э. д. с. при помощи серебряного вольтметра и ртутного ома.

Первое определение э. д. с. нормальных элементов Вестона было произведено, как было указано выше, А. Б. Ферингер в 1910 г. в Национальной физической лаборатории. Второе определение было сделано А. Б. Ферингер в 1912 г. в Главной палате мер и весов.

Результаты этих измерений для одного из элементов (№ 7) получились следующие:

1910 г. НФЛ	$E = 1,01826$ В
1912 г. ГПМВ	$E = 1,01830$ В
Среднее	$E = 1,01828$ В

Последняя работа с серебряным вольтметром до революции была произведена в 1915 г. А. Г. Гольдманом, который получил для элемента № 10 величину $E = 1,01830$ В, в то время как из сличения этого элемента с группой элементов э. д. с. получилась равной $1,01828$ В.

Таким образом, осуществление эталона международного вольт в Главной палате мер и весов в короткий срок было произведено с точностью, одинаковой с точностью метрологических учреждений Европы и Америки, и электрические лаборатории Главной палаты мер и весов стали на одном уровне с аналогичными иностранными лабораториями (Национальная физическая лаборатория, Бюро стандартов).

К одной из крупнейших метрологических работ электрического отделения Главной палаты мер и весов в дореволюционный период нужно отнести работу по установлению эталонов международного ома. Как указывалось выше, в Главной палате мер и весов эталонами ома служили образцовые катушки сопротивления,

Таблица 2

Результаты сравнения нормальных элементов Главной палаты мер и весов в период с 1910 по 1925 гг.

Электродвижущая сила в международных вольтах при 20°C										
№ элемента	Октябрь 1910 г.	Июнь 1911 г.	Сентябрь 1912 г.	Август 1913 г.	Октябрь 1914 г.	Ноябрь 1920 г.	Август 1922 г.	Март 1923 г.	Июнь 1924 г.	Июль 1925 г.
3	1,01828	1,01829	1,01828	1,01828	1,01828	1,01827	1,01829	1,01823	1,01823	1,01822
4	28	29	28	28	28	31	33	30	31	30
5	27	29	28	28	28	23	23	19	18	18
7	29	28	28	28	24	23	22	20	19	18
10	27	28	28	28	29	26	29	27	28	28
14	28	28	28	28	28	27	29	23	30	30
16	30	29	30	30	28	31	33	33	31	34
18	29	29	30	30	31	32	33	31	31	31
19	29	29	29	29	31	30	31	27	30	29
20	30	29	29	29	30	30	30	29	31	32
23	29	30	30	29	29	30	29	28	30	31
24	30	30	30	30	30	32	28	32	33	33
26	29	29	30	30	31	26	31	29	27	28
28	35	34	34	35	30	38	38	40	40	40
29	35	35	35	33	36	33	32	36	34	36
30	35	34	34	34	33	34	31	36	33	29
32	27	28	28	28	29	30	—	33	32	33
33	29	28	29	29	29	31	30	33	34	34
38	36	35	36	36	36	—	—	35	32	32
41	30	29	29	29	28	38	29	31	32	32
Среднее 1,01830 V										

поверенные в ФТИ в Германии, и собственных эталонов в первое время существования электрического отделения Главная палата мер и весов не имела. После Лондонской конференции 1908 г., узаконившей единицу сопротивления „международный ом“ и установившей спецификацию по изготовлению эталонов этого ома, Главная палата мер и весов приступила к работе по осуществлению эталона международного ома. Эта работа, продолжавшаяся в течение ряда лет (с 1909 по 1913 гг.) М. Ф. Маликовым и А. Н. Георгиевским и потребовавшая настойчивого и кропотливого труда, была закончена с превосходными результатами и поставила Главную палату мер и весов в первый ряд среди лабораторий Европы и Америки в области электрических измерений.

По определению, международный ом есть сопротивление, оказываемое неизменяющемуся электрическому току при температуре тающего льда ртутным столбом, имеющим массу 14,4521 г, повсюду одинакового сечения, и длину 106,300 см.

По спецификации ртутный столб осуществляется при помощи стеклянной трубки поперечным сечением примерно 1 мм^2 , которая и заполняется ртутью, причем на длину трубки не вводится никаких ограничений. Поэтому изготовленный по этой спецификации эталон ома может иметь величину сопротивления, значительно отличающуюся от единицы. Основной его особенностью является то, что величина сопротивления определяется из геометрических размеров.

Положим, что длина столбика ртути — L , площадь поперечного сечения, которое везде одинаково, — S , тогда сопротивление его R можно выразить как

$$R = \rho \frac{L}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление ртути. Эта формула легко преобразуется в следующие:

$$R = \rho \frac{L^2}{SL} = \rho \frac{L^2}{V} = D\rho \frac{L^2}{M}, \quad (5)$$

где V — объем ртути, M — ее масса и D — плотность. Отсюда

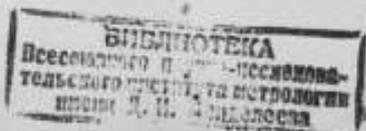
$$D\rho = \frac{RM}{L^2}.$$

Подставляя в правую часть этого выражения $R = 1 \Omega$ и соответствующие ему величины $M = 14452,1 \text{ мг}$ и $L = 1063,0 \text{ мм}$, получим

$$D\rho = 0,01278982 \text{ мг/мм}^2.$$

Следовательно, для любого сечения трубки и любой длины будем иметь

$$R = 0,01278982 \frac{L^2}{M}. \quad (6)$$



Если же сечение неравномерно, то

$$R = \rho \int_0^L \frac{dx}{S_x} = \rho \frac{L}{SL} \int_0^L \frac{dx}{S_x} = \rho \frac{L}{V} \int_0^L \frac{dx}{\sigma} = D \rho \frac{L}{M} \int_0^L \frac{dx}{\sigma}, \quad (7)$$

где $\sigma = \frac{S_x}{S}$, а S_x — площадь поперечного сечения в каком-либо месте трубки на расстоянии x от ее начала.

Переходя от интеграла к сумме и заменяя $D\rho$ его значением, будем иметь

$$R = 0,01278982 \frac{L}{M} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{dx}{\sigma_k}$$

или, заменяя $dx = \frac{L}{n}$, где n — число, на которое разбивается вся длина столбика ртути,

$$R = 0,01278982 \frac{L^2}{M} \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sigma_k}. \quad (8)$$

Эта формула справедлива для случая, когда трубка рассматривается как состоящая из ряда цилиндров различного сечения. Если же ее рассматривать как состоящую из ряда усеченных конусов, что и соответствует действительности, то в формулу необходимо ввести еще множитель γ_m , равный отношению сопротивления R' усеченного конуса к сопротивлению R'' цилиндра, площадь сечения которого равна среднему сечению конуса.

Так как сопротивление усеченного конуса $R' = \frac{\pi l \rho}{r_1 r_2}$, а сопротивление цилиндра, имеющего основание равное среднему сечению конуса,

$$R'' = \frac{3\pi l \rho}{r_1 + r_2 + r_1 r_2},$$

то

$$\gamma_m = \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2}{3r_1 r_2},$$

где l — длина конуса, r_1 и r_2 — радиусы его основания. При этом видно, что всегда $\gamma_m > 1$.

Следовательно, работа по установлению международного ома должна сводиться к следующему:

- 1) изучение канала трубки (калибровка);
- 2) определение длины трубки;
- 3) определение массы ртути.

Стеклянные трубки для ртутных образцов Главной палаты были изготовлены по ее заказу конструктором Бодэном в 1909 г., который выбрал из имевшихся у него шесть 120-сантиметровых из трубок твердого стекла Verr dur и нанес на них 1100 мил-

лиметровых делений. Внешний диаметр их колебался от 5 до 6 мм, а площадь внутреннего поперечного сечения была близка к 1 мм².

Наиболее длительную и кропотливую часть работы представляла калибровка трубок, которая была выполнена авторами с большим мастерством и искусством. Изучение геометрических размеров и определение массы ртути дало возможность установить на основании формулы (8) и величину сопротивления каждой трубки. Результаты этих определений приведены в табл. 3, которая содержит также и результаты сличения сопротивлений шести ртутных образцов между собой. Разность между вычисленным значением по формуле (8) и определенным из сличения дает возможность оценить погрешность воспроизведения эталона.

Для сравнения в табл. 3 даны результаты подобных же определений, произведенных Национальной физической лабораторией в Англии. Как видно из таблицы, погрешность воспроизведения эталона международного ома в Главной палате мер и весов и в Национальной физической лаборатории — одного порядка и составляет около $1,0 \cdot 10^{-5} \Omega$.

Такого же порядка погрешность получилась и из сравнений

Таблица 3

Результаты определений сопротивления ртутных образцов ома

Главная палата мер и весов (1910—1913 гг.)				Национальная физическая лаборатория Англии (1911—1912 гг.)			
№ образца	вычисленное значение	наблюденное значение	разность $\Delta \times 10^5$	№ образца	вычисленное значение	наблюденное значение	разность $\Delta \times 10^5$
1	0,999714	0,999728	+2,4	2	0,999866	0,999860	-0,6
2	1,000023	1,000046	+2,3	6	0,999945	0,999937	-0,8
3	0,999993	0,999994	+0,1	9	0,999567	0,999579	+1,2
4	1,000170	1,000143	-2,7	11	0,999656	0,999670	+1,4
5	0,999872	0,999861	-1,1	27	0,999771	0,999761	-1,0
6	1,000101	1,000091	-1,0	8	0,999763	0,999766	+0,3
				9	0,999838	0,999855	+1,7
				1	0,999861	0,999858	-0,3
				130	0,999673	0,999680	+0,7
Среднее	0,999377	0,999377	$\pm 1,6$	137	0,999480	0,999460	-2,0
				5	0,999165	0,999171	+0,6
				11	0,999879	0,999865	-1,4
				12	0,999845	0,999856	+1,1
				13	0,999676	0,999673	-0,3
				Среднее	0,999713	0,999713	$\pm 1,0$

эталонов ома между различными странами. До 1910 г. международные сравнения ртутных образцов носили случайный характер и лишь с этого года сравнения начали производиться регулярно по плану, предложенному Особой технической комиссией, работавшей в то время в Вашингтоне над измерением э. д. с. нормального элемента Вестона.

Физическая лаборатория Англии разослала две катушки в Германию, Россию, Францию и США для сличения ртутных образцов. Результаты этих сравнений показали, что ртутные образцы ома Главной палаты мер и весов отличаются от ртутных образцов Англии и Америки на $0,5 \cdot 10^{-6} \Omega$, а от германского ома на $23 \cdot 10^{-6} \Omega$. Таким образом, благодаря работам М. Ф. Маликова и А. Н. Георгиевского, Главная палата мер и весов получила собственный эталон ома в области электрических измерений, ничем не уступающий по своей точности эталонам передовых лабораторий Запада и Америки.

Необходимо также отметить работы руководителя электрического отделения Главной палаты И. А. Лебедева, который являлся организатором и вдохновителем всей работы первого периода деятельности этого отделения. После Лондонской конференции ему была поручена работа с серебряным вольтметром, но, к сожалению, смерть его в 1911 г. не дала возможности полностью ее закончить. Ему удалось лишь произвести все подготовительные работы, изготовить три серебряных вольтметра и произвести предварительные опыты.

Продолжение работ с серебряным вольтметром приняла на себя А. Б. Ферингер, а затем, после ее ухода из Главной палаты, — А. Г. Гольдман.

А. Б. Ферингер в 1912 г. произвела при помощи серебряного вольтметра определение э. д. с. нормального элемента, которое получилось как среднее из трех независимых измерений равным $1,01830 \text{ V}$, в то время как сравнение его с групповым эталоном дало величину $1,01828_5 \text{ V}$. Разница в $22 \cdot 10^{-8} \text{ V}$ и представляет ту погрешность, с какой можно было установить эталон вольта, пользуясь серебряным вольтметром.

Последующая работа А. Г. Гольдмана в 1915 г. подтвердила результаты А. Б. Ферингер, расхождения между измерениями при помощи серебряного вольтметра и непосредственными сравнениями с групповым эталоном не превысили $20 \cdot 10^{-6} \text{ V}$.

Таким образом, к началу первой мировой войны Главная палата мер и весов располагала основными эталонами электрических единиц ома и вольта, воспроизведенными собственными силами, с предельной метрологической точностью.

С 1915 г. работы с электрическими эталонами прекратились и возобновились лишь после длительного перерыва в 1920 г.

С этого момента начинается третий период в деятельности электрического отдела, наиболее плодотворный как по масштабам своей работы, так и по значению их на международной арене.

II. РАБОТЫ ПО УСТАНОВЛЕНИЮ И ПОДДЕРЖАНИЮ МЕЖДУНАРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ В ПЕРИОД 1920—1945 гг.

5. Работы по поддержанию международного вольта

В ноябре 1920 г. В. С. Габелем возобновились наблюдения над группой нормальных элементов.

Эти наблюдения показали, что нормальные элементы, изготовленные А. Б. Ферингер в 1910 г., сохранили, по крайней мере, относительные значения с точностью до нескольких десятков микровольт и лишь у некоторых из них разность доходила до ста микровольт (табл. 2).

За эталон э. д. с. было принято среднее значение из 20 элементов $E = 1,01830 \text{ V}$, которое совпало с величиной, установленной Вашингтонской комиссией в 1910 г.

В 1922 г. была организована Эталонная электрическая лаборатория, которая начала регулярные наблюдения над групповым эталоном. Результаты этих наблюдений можно видеть из табл. 2.

Эти наблюдения показали, что если э. д. с. в 1910 г. у всех элементов были очень близки друг к другу по своему значению, то в дальнейшем между ними начали происходить все большие и большие расхождения и к 1925 г. расхождения до $100 \mu\text{V}$ уже обнаруживаются у четырех элементов.

Одновременно с организацией эталонной лаборатории была открыта под руководством А. К. Колосова Лаборатория нормальных элементов, в задачу которой входило изготовление элементов Вестона как для нужд Главной палаты, так и для других поверочных лабораторий и учреждений.

В 1923—1924 гг. был изготовлен 31 элемент, у которых э. д. с. по сравнению с групповым элементом оказалась на $100 \mu\text{V}$ больше.

Все эти элементы быстро разошлись между различными учреждениями, и в 1925 г. была изготовлена новая большая партия.

В течение последующего времени лабораторией было изготовлено с целью изучения большое число элементов, в результате чего в 1927 г. явилась возможность образовать вторую группу из двадцати нормальных элементов. Их среднее значение э. д. с. по сравнению с первой группой оказалось на $80 \mu\text{V}$ больше ($E = 1,01838 \text{ V}$) с крайними отклонениями от среднего значения $12—14 \mu\text{V}$.

С марта 1929 г. эталоном вольта стала служить вторая группа элементов, и к 1932 г. вследствие замены ряда элементов среднее значение э. д. с. изменилось на несколько микровольт и стало равным $1,01838 \text{ V}$.

При этом необходимо подчеркнуть, что величина $1,01838_v$ явилась как результат сравнения с элементами, изготовленными в 1910 г., считавшимися неизменными в течение двадцати лет со дня их установки. Поэтому возникла необходимость в определении их э. д. с. при помощи серебряного вольтметра в ртутного ома. Эти работы были начаты в 1930 г. А. К. Колосовым, который изготовил четыре серебряные вольтметра двух типов.

Первый тип состоял из платиновых чашек в качестве катода, вставленных плотно в медные никелированные подставки, и из серебряных стержней с дисками в качестве анода.

Второй тип состоял из тех же частей, но вместо платиновых чашек применялись цилиндры и в качестве серебряного анода и в качестве платинового катода. Электролитом служил 10% раствор чистой $AgNO_3$, приготовленный особым способом, согласно спецификации Лондонской конференции.

Ток плотностью $0,05 \text{ A/cm}^2$ пропусклся в течение 12 мин. и осадок взвешивался на эталонных весах Немеца и Рупрехта с точностью до $0,02 \text{ мг}$. Время измерялось при помощи хронометра до $0,01 \text{ сек}$.

Для определения э. д. с. какого-либо из нормальных элементов в цепь последовательно с четырьмя вольтметрами включалась манганиновая катушка нормального сопротивления в 2Ω , а параллельно этой катушке — испытуемый нормальный элемент с гальванометром. Сила тока i в цепи вольтметра подбиралась так, чтобы $Ri = E$, где $R = 2 \Omega$, а E — э. д. с. нормального элемента.

По определению Лондонской конференции 1908 г., международный ампер есть сила неизменяющегося тока, который, проходя через водный раствор азотнокислого серебра, отлагает $0,00111800 \text{ г}$ серебра в секунду.

Следовательно,

$$i = \frac{1}{0,00111800} \frac{M}{t} = 894,454 \frac{M}{t},$$

где M — масса отложившегося серебра на аноде и
 t — время прохождения тока.

Определение э. д. с. было произведено у пяти элементов из 49 независимых наблюдений. Среднее значение получилось равным

$$E_1 = 1,018254 \text{ V} \pm 65 \cdot 10^{-6} \text{ V},$$

тогда как среднее значение э. д. с. этих элементов из сличения с первой группой оказалось равным

$$E_2 = 1,018386 \text{ V}.$$

Таким образом, разность между измеренной величиной E_1 и величиной, полученной из сравнения, E_2 составила

$$E_1 - E_2 = -132 \cdot 10^{-6} \text{ V},$$

т. е. в два раза больше погрешностей измерений.

Необходимо отметить, что расхождения между отдельными измерениями э. д. с. при помощи серебряного вольтметра доходили до $3,7 \cdot 10^{-4}$ V, следовательно, точность воспроизведения международного ампера значительно ниже точности воспроизведения международного ома и имеет порядок 10^{-4} измеренной величины.

В связи с результатами этих работ, научно-технический совет ВНИИМ постановил ввести с 1 июня 1934 г. новое значение э. д. с. для второй группы нормальных элементов, приняв ее равной $E = 1,01825$ V вместо $E = 1,01838_6$ V, установленного в 1932 г.

О дальнейшем поведении нормальных элементов можно будет сделать заключение на основании результатов международных сличений, о которых будет сказано ниже.

6. Работы по поддержанию международного ома

Приготовление и изучение ртутных образцов международного ома представляет первую часть работ ВНИИМ по установлению электрических единиц. Вторую не менее важную часть этой работы составляет установление с наивысшей точностью серии рабочих эталонов кратных и дробных частей ома в виде манганиновых катушек.

Эти работы, начатые вслед за изготовлением ртутных образцов в 1913 г., особенно усилились в конце двадцатых годов и закончились в 1931 г. установлением во ВНИИМ полного набора катушек сопротивлений от 0,01 до 100 000 Ω .

Основными копиями международного ома во ВНИИМ служат четыре манганиновые катушки в 1 Ω , из которых две приобретены в 1908 г. у Вольфа и обозначены номерами 4044 и 4046, а две изготовлены ВНИИМ под номерами 6 и 8.

Эти катушки применяются только для сравнения с рабочими эталонами. Катушки первый раз были сравнены со ртутными образцами в 1913 г., второе сравнение было произведено М. Ф. Маликовым в 1928 г. Каждая катушка сопротивления сравнивалась с каждым из шести ртутных образцов три раза.

Среднее значение, полученное из сравнения обеих катушек, и определяет в настоящее время величину международного ома в СССР.

О постоянстве сопротивления этих катушек можно судить из сравнения их между собой в течение ряда лет. Так, например, расхождения между ними за время с 1928 г. по 1932 г. колебались от 35,2 до 37,4 $\mu\Omega$, т. е. в пределах ошибок наблюдений.

Рабочие эталоны в 1 Ω состояли из 8 катушек, изготовленных в разное время, начиная с 1908 г. и кончая 1928 г., двух катушек, изготовленных в 1928 г. лабораторией образцовых мер, и нескольких катушек новой конструкции, разработанной М. Ф. Маликовым.

Эталонные катушки 100, 10, 0,1, 0,01 Ω , а также катушки в 1000, 10000 и 100000 Ω по своей конструкции принадлежат к типу ФТИ.

Для сличения их с эталонными катушками в 1 Ω Эталонной лабораторией были сконструированы и изготовлены в мастерских ВИМС переходные катушки двух типов — „1 \times 10“ и „1:10“.

Переходная катушка типа „1 \times 10“ служит для перехода от 1 к 10, от 10 к 100, от 1 к 0,1 и от 0,1 к 0,01 Ω .

Катушка типа „1:10“ служит для эталонирования сопротивлений в 1000, 10000 и 100000 Ω .

Катушка типа „1 \times 10“ состоит из 10 последовательных секций манганиновой проволоки, имеющих все одинаковые сопротивления, равные меньшему из сравниваемых сопротивлений.

Катушка типа „1:10“ состоит из двух секций манганиновой проволоки, соединенных последовательно, причем одна секция в 10 раз больше другой.

7. Международные сравнения основных единиц

Критериями точности изготовления и установления эталонов служат международные сравнения.

Как указывалось выше, первое международное сравнение было произведено в 1910 г. Ферингер. Следующее сравнение было сделано в 1914 г. Маликовым и Салтыковым, которые взяли с собой четыре нормальных элемента Вестона и определили их в д. с. в Англии, Германии и Франции. Среднее значение как у Ферингера, так и у Маликова получилось равным 1,01830 V.

Далее сравнение было произведено Л. Д. Исаковым в 1922 г. во время посещения им Национальной физической лаборатории в Лондоне, где он получил четыре элемента Вестона и сверил их в физико-техническом институте Германии и в Главной палате мер и весов.

Сравнение дало следующие результаты:

$$\text{в НФЛ... } E_{\text{ср}} = 1,01824 \text{ V}$$

$$\text{в ФТИ... } E_{\text{ср}} = 1,01826_{\text{s}} \text{ V}$$

$$\text{в ГПМВ в 1922 г... } E_{\text{ср}} = 1,01826_{\text{s}} \text{ V}$$

$$\text{„ в 1923 г... } E_{\text{ср}} = 1,01828 \text{ V}$$

Расхождения составили 40 μ V.

В 1926 г. сличение было произведено в Бюро стандартов в Америке (НБС) и Центральной электрической лаборатории (ЦЭЛ) в Париже при поездке проф. М. А. Шателена в США.

В 1927 г. были посланы дипломатической почтой два элемента в ФТИ и в том же году произведены сравнения в ЦЭЛ, НФЛ и ФТИ.

Эти сравнения дали возможность установить расхождения

в значениях эталона международного вольта пяти основных национальных лабораторий — Главной палаты мер и весов, НБС, НФЛ, ЦЭЛ и ФТИ. Сравнения показали, что расхождение между эталонами вольта различных стран достигает $\pm 60 \mu V$, или $0,006\%$, определение же по серебряному вольтметру, как мы видели, не превышает $0,01\%$. Следовательно, эти расхождения лежат в пределах ошибок наблюдений, между тем как относительные определения можно производить в десять раз точнее.

Непосредственное сравнение сопротивления катушек Главной палаты мер и весов с эталоном международного ома было осуществлено в 1929—1930 гг. во всех национальных лабораториях. Сравнение показало, что наибольшее расхождение, доходящее до $59 \mu \Omega$, получается между ГПМВ и ЦЭЛ.

8. Переход от международных единиц к абсолютным

Результаты международных сравнений вольта и ома, предпринятые ГПМВ (ВИМС) и доложенные на сессии Консультативного комитета по электричеству и фотометрии, вызвали большой интерес к этой работе. Работа доказала, что существовавшая тогда система электрических эталонов не обеспечивает единства измерения во всем мире, так как точность измерения значительно выше точности установления эталонов. Поэтому необходимо было пойти либо на создание одного эталона, обязательного для всех стран, либо на создание группы эталонов, осуществляемых каждый в отдельности в различных странах.

Консультативный комитет пошел по второму пути и в 1936 г. постановил, чтобы каждая национальная лаборатория представила группу нормальных элементов в количестве не менее двенадцати в Международное бюро мер и весов и по две катушки сопротивления в 1Ω для образования международной группы эталонов электрического сопротивления и э. д. с.

Доставленные элементы и катушки были сличены в 1934—1936 гг. в Международном бюро мер и весов. Из этих сличений Консультативный комитет вывел среднее значение международного ома и международного вольта; отклонения от этих средних показаны в табл. 4 и 5. Крайние расхождения оказались $80,7 \times 10^{-6} \Omega$ и $89 \times 10^{-6} V$.

На 4-й сессии Консультативного комитета в 1935 г. представитель Франции внес предложение принять в качестве международных ома и вольта среднее значение из всех значений международных ома и вольта, определенных пятью национальными лабораториями, которые и были приняты. В соответствии с этим решением, Советский Союз перешел на новые международные единицы с 1 января 1936 г. Дальнейшие результаты международных сравнений до 1939 г. можно видеть из тех же таблиц.

Резюмируя все сказанное относительно точности измерения электрических единиц, можно утверждать, что в то время, как

точность поддержания единицы ома составляет $\pm 2 \mu\Omega$, вольты $\pm 10 \mu V$ и ампера $\pm 10 \mu A$, точность воспроизведения международной единицы ома $\pm 20 \mu\Omega$ и точность воспроизведения вольты и ампера $\pm 30 \cdot 10^{-6}$. Как следует из табл. 4 и 5, международная точность ома $\pm 80 \cdot 10^{-6} \Omega$ и вольты $\pm 90 \cdot 10^{-6} V$.

Таблица 4

Отклонения от среднего значения международного ома, установленного в 1935 г.

Страна	Лаборатория	Отклонения по данным сравнения в микроомах			
		ноябрь 1935 г.	март 1935 г.	декабрь 1936 г.	февраль 1939 г.
СССР	ВНИИМ	+ 9,5	+10,6 ¹ 0,0	+ 0,4	+ 0,8
США	НБС	- 6,4	- 5,5	- 4,7	- 3,2
Англия	НФЛ	- 5,2	- 4,6	- 4,9	- 5,5
Франция	ЦЭЛ	+ 7,0	+69,5 ¹ 0,0	+ 0,9	+ 2,7
Япония	ЕТЛ	- 8,2	-11,2	-10,0	-14,4
Германия	ФТИ	+10,6	+ 9,8	+ 6,6	+ 9,1

Таблица 5

Отклонения от среднего значения международного вольты, установленного в 1935 г.

Страна	Лаборатория	Отклонения по данным сравнения в микровольтах		
		декабрь 1934 г.	январь 1937 г.	февраль 1939 г.
СССР	ВНИИМ	+13,0 ²	- 6,5	- 23,1
Англия	НФЛ	+ 5,0	+7,6	+ 6,5
США	НБС	-12	-9,5	-11,2
Франция	ЦЭЛ	-76,0 ¹	- 0,7	+18,6
Япония	ЕТЛ	- 2	+0,7	+ 1
Германия	ФТИ	- 4	-7,8	- 5,5

¹ ВНИИМ и ЦЭЛ изменили свои эталоны ома в 1935 г. в соответствии с международными.

² ВНИИМ и ЦЭЛ изменили свои эталоны вольты в 1935 г. в соответствии с международными.

В стремлении повысить точность электрических измерений, Международный комитет по электричеству с первых же шагов своей деятельности, еще в 1928 г. вынес предложение о переходе от системы международных электрических единиц к абсолютной системе практических единиц. Это предложение было принято 8 июня 1929 г. Международным комитетом мер и весов.

В 1933 г. восьмая Генеральная конференция мер и весов приняла принципиальное постановление о переходе от международных к абсолютным единицам и наметила ряд мероприятий, которые сводились в основном к установлению зависимости между теми и другими. Эта работа была предложена шести национальным лабораториям: СССР, Англии, Америки, Японии, Франции и Германии.

Переход был намечен на 1 января 1940 г., и к этому времени национальные лаборатории должны были представить результаты своих определений, с тем чтобы найти более точное отношение абсолютных единиц к международным. Однако представленные результаты не оправдали надежд на более точную величину этого отношения, чем оно было известно до того времени, и Консультативный комитет, собравшись в июне 1939 г., постановил временно принять соотношение с точностью до 10^{-4} .

Если в отношении установления международных единиц ВНИИМ проделал громадную работу и вышел на одно из первых мест среди других национальных метрологических лабораторий, то в отношении абсолютных определений ему не удалось до 1938 г. поставить какие-либо работы. Между тем, эти работы имеют еще более сложный характер и требуют большего опыта в их осуществлении: достаточно сказать, что в НФЛ эти работы ведутся непрерывно в течение более 50 лет, а в НБС начиная с 1911 г., при этом каждая из лабораторий, работая по своему методу, не меняет его, а лишь совершенствует.

В соответствии с предложением Консультативного комитета, во ВНИИМ работы по установлению соотношения между абсолютными и международными единицами начались с 1938 г. и в первой своей стадии должны были закончиться в 1941—42 гг.; война отодвинула их окончание на несколько лет и в настоящее время они уже закончены. Эти работы свелись к измерению силы тока в абсолютных единицах, установлению абсолютной единицы самоиндукции (генри) и абсолютному определению ома. Результаты их будут изложены в статье, которая должна появиться в следующем сборнике трудов ВНИИМ.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

1. Общие соображения

Способ представления измерительной цепи в виде четырехполюсника не является новым [1, 2, 3, 4], однако зависимости, которые приводятся в результате подобного рода анализа (четырёхполюсников), содержат: входное сопротивление Z_{zw} по отношению к зажимам регулируемого сопротивления W , взаимное сопротивление Z_{wy} плеч, регулируемого элемента W и индикатора y , ток I_w , протекающий по плечу регулируемого элемента.

Способ вычисления всех этих величин в статьях не оговаривается. Поэтому существующие формулы не могут быть непосредственно использованы, так как здесь предварительно требуется произвести ряд кропотливых вычислений или воспользоваться экспериментальными данными. В данной статье предполагается на основании некоторых общих рассуждений привести простые расчетные формулы, определяющие один из основных параметров измерительной схемы — чувствительность ее вблизи состояния равновесия $(S)_0$. Будем вычислять чувствительность схемы к относительному изменению полного сопротивления регулируемого плеча $\left(\frac{\Delta Z_w}{Z_w}\right)$ четырехполюсника, представляющего данную схему.

В тех случаях, когда определяется изменение тока в индикаторе схемы, при вариации сопротивления регулируемого плеча

$$\frac{di_y}{dZ_w} Z_w,$$

где $i_y = I_y e^{j\psi_i}$, $Z_w = |Z_w| e^{j\varphi}$, назовем чувствительностью схемы по току $(S_i)_0$.

Аналогично, для напряжения

$$\frac{dU_y}{dZ_w} Z_w = (S_u)_0,$$

где $U_y = U_y e^{j\psi_u}$ — чувствительность схемы по напряжению.

При этом имеет значение, как собрано регулируемое плечо четырехполюсника, т. е. зависимость между регулируемым параметром W и полным сопротивлением Z_w .

№ п/п	Схема	Регулируе- мый эле- мент	Чувствительность схемы $(S_{cx})_w$ по отношению к регулируемому элементу
1		R_1	$(S_{cx})_0$
2		R_1	$\frac{R_0}{R_0 + R_1} (S_{cx})_0$
3		R_1	$\frac{R_0}{R_0 + R_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_0'}{R_1} \cdot \frac{R_0'}{R_0}} (S_{cx})_0$
4		X_1	$(S_{cx})_0$
5		R_1	$(S_{cx})_0 \cos^2 \varphi_x$
6		X_1	$(S_{cx})_0 \sin^2 \varphi_x$
7		R_1	$(S_{cx})_0 \cos^2 \varphi_x$
8		X_1	$(S_{cx})_0 \sin^2 \varphi_x$
9		R_0 X_1 R_x	$\frac{2}{3} \frac{R_0}{R_1} (S_{cx})_0 \sin^2 \varphi_x$ $(S_{cx})_0 \sin^2 \varphi_x$ $(S_{cx})_0 \cos^2 \varphi_x$

Рис. 1

Поэтому будем различать:

а) простые (однородные) плечи: $Z_w = W$,

б) сложные (неоднородные) плечи: $Z_w = f(W)$.

В случае однородного плеча

$$(\dot{S}_i)_0 = \frac{dI_y}{dZ_w} Z_w = \frac{dI}{dW} W.$$

В случае неоднородного плеча, если вычисляется чувствительность схемы по отношению к регулируемому элементу W , надо найти

$$(\dot{S}_i)_{0w} = \frac{dI_y}{dW} W = (\dot{S}_i)_0 \frac{dZ_w}{dW} \frac{W}{Z_w} = (\dot{S}_i)_0 K, \quad (1)$$

Отсюда видим, что, применяя сложную схему включения плеча Z_w и достигая большой плавности в регулировке, одновременно теряем в чувствительности

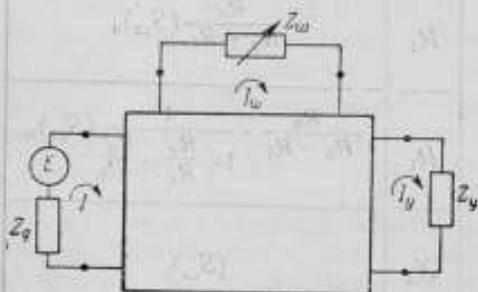


Рис. 2

к данному элементу W . В качестве примера (рис. 1) приводятся различные мостовые схемы с постепенным усложнением регулируемого плеча. На примере можно видеть, что чувствительность большинства схем переменного тока, обладающих неоднородными плечами, меньше аналогичных устройств постоянного тока.

Исключение составляют схемы для измерения емкостей.

Можно показать, что чувствительность схем переменного тока, балансировка которых производится изменением активных R и реактивных X сопротивлений, пропорциональна K_1 и квадрату



Рис. 3

тригонометрической функции угла сдвига фаз φ_x между током и напряжением в измеряемом плече:

$$[(S_i)_{0R}] = K_1 (S_i)_0 \cos^2 \varphi_x, \quad [(S_i)_{0X}] = K_1 (S_i)_0 \sin^2 \varphi_x.$$

На основании отмеченного приходим к заключению, что чувствительность схем переменного тока, предназначенных для измерения остаточных явлений (остаточные индуктивности, емкости), меньше, чем устройств, рассчитанных на нормальный диапазон сопротивлений.

Для большей общности дальнейших заключений будем рассматривать измерительную цепь, составленную из некоторого числа линейных элементов, считая регулируемое плечо однородным ($K=1$). При отступлении от этого условия в каждом отдельном частном случае численное значение K легко может быть подсчитано на основании формулы (1).

2. Теоретические соображения

Измерительную схему всегда можно заменить шестиполосником (рис. 2). Однако для упрощения расчетов чувствительности схемы будем рассматривать следующие четырехполосники.

В первом случае представим измерительную схему в виде пассивного четырехполосника, получающего питание от источника э. д. с. E и нагруженного регулируемым сопротивлением Z_w (рис. 3). Тогда легко привести выражения для тока i_w .

Данный четырехполосник характеризуется коэффициентами (комплексные величины), образующими общую матрицу

$$[A] = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix}$$

которую мы будем называть в дальнейшем матрицей A .

На основании общеизвестных положений можно написать:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= A_{11}\dot{U}_w + A_{12}i_w \\ i &= A_{21}\dot{U}_w + A_{22}i_w \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

или в матричной форме:

$$\begin{vmatrix} \dot{U} \\ i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \dot{U}_w \\ i_w \end{vmatrix}$$

где определитель

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1.$$

Принимая во внимание, что

$$\dot{U}_w = i_w Z_w,$$

$$\dot{E} = \dot{U} + i Z_g,$$

исключая i_w из уравнения (2), найдем:

$$i_w = \frac{E}{A_{12} + A_{11}Z_w + A_{21}Z_w Z_g + A_{22}Z_g} \quad (3)$$

Последнее перепишем:

$$i_w = \frac{1}{(A_{11} + A_{21}Z_g)} \cdot \frac{E}{\left[Z_w + \frac{A_{12} + A_{22}Z_g}{A_{11} + A_{21}Z_g} \right]}$$

или

$$i_w = \frac{1}{(A_{11} + A_{21}Z_g)} \cdot \frac{E}{[Z_w + Z_{gw}^g]} = \frac{E}{Z_{gx}} \quad (3a)$$

здесь $Z_{gw}^g = \frac{A_{12} + A_{22}Z_g}{A_{11} + A_{21}Z_g}$ имеет смысл входного сопротивления четырехполюсника со стороны регулируемого плеча (Z_w), считая, что оставшиеся зажимы включены на сопротивления Z_g . При этом

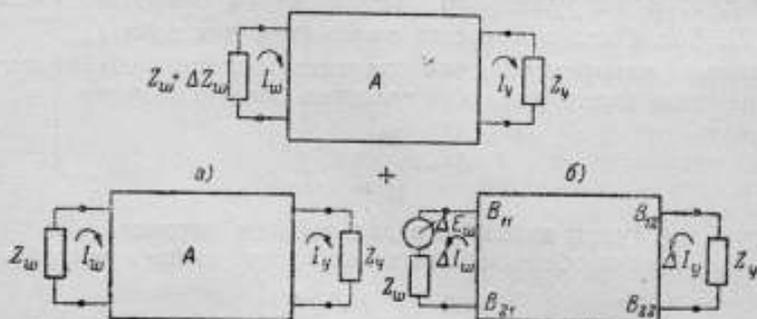


Рис. 4

передача энергии происходит в обратном направлении. Z_{gw} — взаимное сопротивление ветвей генератора и регулируемого элемента.

Представим теперь заданную схему в виде второго четырехполюсника, включая к его зажимам регулируемое сопротивление Z_w и с противоположной стороны сопротивление индикатора Z_y . Следует обратить внимание, что получившийся четырехполюсник (рис. 4) будет активным. Имея в виду ранее поставленную задачу, нам следует найти изменение тока в индикаторе, вызванное относительной разбалансировкой $\left(\frac{\Delta Z_w}{Z_w}\right)$ регулируемого плеча.

Полученный сейчас четырехполюсник заменяется двумя новыми (рис. 4, а и 4, б). Токи, протекающие в плечах регулируемого

элемента (I_w) и индикатора (I_y), находят, применяя метод наложения; тогда

$$\begin{aligned} i'_w &= i_w - \Delta i_w; \\ i'_y &= i_y - \Delta i_y. \end{aligned}$$

Здесь обозначены i'_w , i'_y — токи, протекающие в соответствующих плечах при условии, что схема сбалансирована ($\Delta Z_w = 0$). При этом появление тока Δi_y приписывают некоторой фиктивной э. д. с. $\Delta \dot{E}_w$, включаемой последовательно с регулируемым сопротивлением (рис. 4, б).

Для нахождения тока Δi_y рассмотрим отдельно пассивный четырехполосник, изображенный на рис. 4, б. Тогда на основании общих положений (2)

$$\Delta i'_y = \frac{\Delta \dot{E}_w}{B_{12} + B_{11}Z_y + B_{22}Z_w + B_{21}Z_yZ_w}. \quad (4)$$

Коэффициенты данного четырехполосника образуют матрицу

$$\|B\| = \begin{vmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{vmatrix}$$

которую в дальнейшем будем называть матрицей B .

Здесь аналогично:

$$B_{11}B_{22} - B_{12}B_{21} = 1.$$

На основании принципа компенсации, для э. д. с. $\Delta \dot{E}_w$ можно написать

$$\Delta \dot{E}_w = i'_w \Delta Z_w = (i_w - \Delta i_w) \Delta Z_w.$$

Тогда

$$\Delta i'_y = \frac{i'_w \Delta Z_w}{B_{12} + B_{11}Z_y + B_{22}Z_w + B_{21}Z_yZ_w} \quad (4a)$$

или после преобразования

$$\Delta i'_y = \frac{i'_w \Delta Z_w}{(B_{21}Z_y + B_{22})(Z_w + Z'_{wy})}.$$

На основании свойств линейности схемы можно также написать:

$$\Delta i'_y = \frac{i'_w \Delta Z_w}{(B_{21}Z_y + B_{22})(Z_w + Z'_{wy})} = \frac{i'_w \Delta Z_w}{Z_{wy}}. \quad (46)$$

Здесь, подобно тому как это было сделано ранее, обозначено:
 $Z_{ww}^y = \frac{B_{11}Z_y + B_{12}}{B_{21}Z_y + B_{22}}$ — входное сопротивление четырехполюсника со стороны зажимов ww при замыкании противоположной стороны на сопротивление Z_y ;
 Z_{wy} — взаимное сопротивление плеч регулируемого (Z_w) элемента и индикатора (Z_y).

Чувствительность по току $(S_i)_0$ измерительной цепи при относительном изменении сопротивления регулируемого плеча $\left(\frac{\Delta Z_w}{Z_w}\right)$ найдем как

$$(\dot{S}_i)_0 = \lim_{\Delta Z_w \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta \dot{I}_y}{\Delta Z_w} \right) Z_w = \frac{d\dot{I}_y}{dZ_w} Z_w.$$

Аналогично, чувствительность по напряжению

$$(\dot{S}_u)_0 = \lim_{\Delta Z_w \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U_y}{\Delta Z_w} \right) Z_w = \frac{dU_y}{dZ_w} Z_w.$$

Отсюда, принимая во внимание формулы (3) и (4),

$$\left. \begin{aligned} (\dot{S}_i)_0 &= \dot{E} \left[\frac{Z_w}{A_{12} + A_{11}Z_w + A_{21}Z_w Z_g + A_{22}Z_g} \cdot \frac{1}{[B_{12} + B_{11}Z_y + \right.} \\ &\quad \left. + B_{21}Z_w Z_y + B_{22}Z_w] \right] \\ (\dot{S}_u)_0 &= \dot{E} \left[\frac{Z_y}{A_{12} + A_{11}Z_w + A_{21}Z_w Z_g + A_{22}Z_g} \cdot \frac{Z_y}{[B_{12} + B_{11}Z_y + \right.} \\ &\quad \left. + B_{21}Z_w Z_y + B_{22}Z_w] \right] \end{aligned} \right\} (5)$$

или в другой форме; принимая во внимание, что: $Z_{ww}^y = Z_{ww}^g$

$$\left. \begin{aligned} (\dot{S}_i)_0 &= \dot{E} \frac{1}{(A_{11} + A_{21}Z_g)(B_{22} + B_{21}Z_y)} \cdot \frac{Z_w}{(Z_w + Z_{ww}^y)^2} = \\ &= \dot{E} \frac{Z_w}{Z_g Z_{wy}} \\ (\dot{S}_u)_0 &= \dot{E} \frac{1}{(A_{11} + A_{21}Z_g)(B_{22} + B_{21}Z_y)} \cdot \frac{Z_w Z_y}{(Z_w + Z_{ww}^y)^2} = \\ &= \dot{E} \frac{Z_w Z_y}{Z_g Z_w} \end{aligned} \right\} (5a)$$

В ряде случаев (5) чувствительность схемы удобно выразить через напряжение U на зажимах источника питания или силу неразветвленного тока I .

Тогда в соответствии с обозначениями рис. 3 будет справедливо:

$$\dot{U} = \dot{i} Z_{gg}^w,$$

где $Z_{gg}^w = \frac{A_{11}Z_w + A_{12}}{A_{21}Z_w + A_{22}}$ обозначено входное сопротивление четырехполюсника со стороны зажимов gg , считая, что на остальные концы включено сопротивление Z_w .

Решая уравнение (2) относительно \dot{i}_w , получим:

$$\dot{i}_w = \dot{i} \frac{(1 + Z_{gg}^w)}{A_{12} + A_{22} + (A_{11} + A_{21})Z_w} = \frac{\dot{i}}{A_{21}Z_w + A_{22}};$$

$$\dot{i}_w = \frac{\dot{U}}{Z_{gg}^w} \frac{(1 + Z_{gg}^w)}{[A_{12} + A_{22} + (A_{11} + A_{21})Z_w]} = \frac{\dot{U}}{A_{11}Z_w + A_{12}}.$$

Отсюда на основании (46):

$$\left. \begin{aligned} (\dot{S}_i)_0 &= \frac{\dot{i}}{(A_{21}Z_w + A_{22})} \cdot \frac{1}{(B_{21}Z_y + B_{22})} \cdot \frac{Z_w}{(Z_w + Z_{ww}^y)} \\ (\dot{S}_i)_0 &= \frac{\dot{U}}{(A_{11}Z_w + A_{12})} \cdot \frac{1}{(B_{21}Z_y + B_{22})} \cdot \frac{Z_w}{(Z_w + Z_{ww}^y)} \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

Если необходимо решать уравнение (2) в другой форме, например:

$$\begin{vmatrix} \dot{i} \\ \dot{i}_w \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \dot{U} \\ \dot{U}_w \end{vmatrix}$$

то для перехода к новым коэффициентам (Y) можно воспользоваться общеизвестными формулами.

Отсюда видно, что чувствительность измерительной цепи существенно зависит от сопротивления плеч четырехполюсников, включающих источник питания Z_g , индикатор Z_y , регулируемый элемент Z_w . Как будет показано в специальной работе, для любой измерительной цепи существует определенное соотношение между сопротивлениями отдельных плеч, которое может обеспечить наибольшее значение чувствительности.

Вычисление чувствительности для различных измерительных цепей не представляет особых затруднений, при условии, что сопротивления Z_g и Z_y остаются линейными.

В качестве примера рассмотрим схемы, которые обычно применяются на постоянном токе для измерения сопротивлений; регулируемое плечо четырехполюсника может тогда считаться однородным.

3. Примеры расчета чувствительности измерительных схем

Как известно, нашли себе распространение следующие две схемы включения приборов (омметры), называемые в дальнейшем: схемой последовательного включения (рис. 5, а) и схемой параллельного включения (рис. 5, б).

Эти простейшие схемы также могут быть представлены в виде четырехполюсников (рис. 6, № 1 и 2).

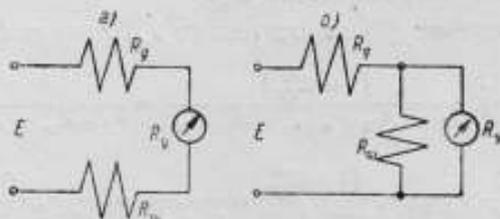


Рис. 5

В результате общеизвестных преобразований найдем коэффициенты, составляющие матрицы $\|A\|$ и $\|B\|$.

Для последовательного соединения:

$$\|A\| = \begin{vmatrix} 1 & R_y \\ 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad \|B\| = \begin{vmatrix} 1 & R_g \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Для параллельного соединения:

$$\|A\| = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_y} & 1 \end{vmatrix}; \quad \|B\| = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_g} & 1 \end{vmatrix}$$

Применяя формулы (2) и (5), можно сразу же написать выражение для тока в плече регулируемого элемента и чувствительности схемы:

	Последовательное включение	Параллельное включение
I_w	$\frac{E}{R_w + R_g + R_y}$	$\frac{E}{R_g + R_w \left(1 + \frac{R_g}{R_y}\right)}$
S_i	$E \frac{R_w}{(R_w + R_g + R_y)^2}$	$E \frac{R_g R_y R_w}{[R_w (R_g + R_y) + R_g R_y]^2}$
S_w	$E \frac{R_w R_y}{(R_w + R_g + R_y)^2}$	$E \frac{R_g R_y^2 R_w}{[R_w (R_g + R_y) + R_g R_y]^2}$

Легко можно убедиться, что для приведенных схем будет справедливым:

$$R_{ww}^y = R_{ww}^g = R_g + R_y \quad (\text{последовательное включение});$$

$$R_{ww}^y = R_{ww}^g = \frac{R_g R_y}{R_g + R_y} \quad (\text{параллельное включение}).$$

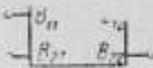
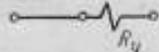
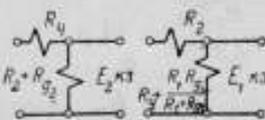
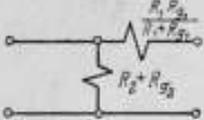
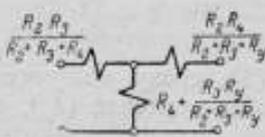
Название схемы			№ по пор.
Одного прибора	Последоват. соедине- ние		1
	Параллельн. соедине- ние		
Дифференциальная	Последоват. соедине- ние		3
	Параллельн. соедине- ние		
Комплекса- ционная (не уравнове- шенная)			5
Мостовая не уравновешен- ная			6

Рис. 6

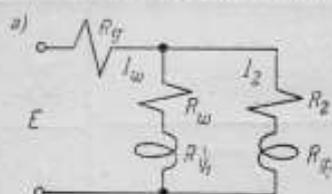
4. Дифференциальные схемы

Часто применяются два вида дифференциальных схем, которые мы будем называть, в соответствии со способом включения обмоток гальванометра: 1) последовательной (рис. 7, а) и 2) параллельной (рис. 7, б).

Считая каждую из этих схем уравновешенной, т. е. подвиж-

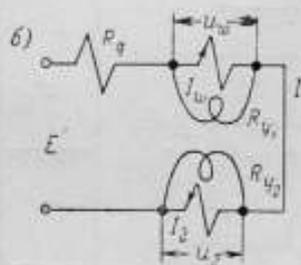
ную систему гальванометра находящейся в равновесии, нет необходимости вводить в рассмотрение коэффициент взаимной индуктивности между обмотками. Последовательная и параллельная схемы могут быть представлены в виде четырехполюсника (рис. 6, № 3 и 4), а тогда коэффициенты матриц $\|A\|$ и $\|B\|$ будут следующие.

Последовательное включение обмоток:



$$\|A\| = \begin{vmatrix} 1 & \frac{R_{y1}}{R_2 + R_{y2}} \\ \frac{1}{R_2 + R_{y2}} & 1 + \frac{R_{y1}}{R_2 + R_{y2}} \end{vmatrix}$$

$$\|B'\| = \begin{vmatrix} 1 & \frac{R_g(R_2 + R_{y2})}{R_g + R_{y2} + R_2} \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$



$$\|B''\| = \begin{vmatrix} 1 + \frac{R_{y1}}{R_g} & R_{y1} + R_2 \left(1 + \frac{R_{y1}}{R_g}\right) \\ \frac{1}{R_g} & 1 + \frac{R_2}{R_g} \end{vmatrix}$$

Параллельное включение обмоток:

$$\|A\| = \begin{vmatrix} 1 + \frac{R_2}{R_2 + R_{y2}} & \frac{R_2 R_{y2}}{R_2 + R_{y2}} \\ \frac{1}{R_{y1}} & 1 \end{vmatrix}$$

$$\|B'\| = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_g + \frac{R_2 R_{y2}}{R_2 + R_{y2}}} & 1 \end{vmatrix}$$

$$\|B''\| = \begin{vmatrix} 1 + \frac{R_g}{R_2} & R_g \\ \frac{R_g + R_2 + R_{y1}}{R_2 R_{y1}} & 1 + \frac{R_g}{R_{y1}} \end{vmatrix}$$

Рис. 7

Воспользовавшись формулой (3), сразу получим выражение тока, протекающего в регулируемом элементе (I_w), считая

$$R_{y1} = R_{y2} = R_y; \quad R_2 = R_w$$

	Последовательная схема включения обмоток	Параллельная схема включения обмоток
I_w	$\frac{E}{\Delta}$	$\frac{E}{\Delta}$
Δ	$R_w + R_y + 2R_g$	$R_w \left(2 + \frac{R_g}{R_y}\right) + R_g$

Изменение сопротивления (ΔR_w) вызывает перераспределение токов в обеих обмотках гальванометра ($\Delta I_y'$ и $\Delta I_y''$), поэтому, вычисляя ток ΔI_y , рассмотрим два четырехполюсника (т. е. две матрицы $\|B'\|$, $\|B''\|$). По методу наложения результат будет равен:

$$\Delta I_y = \Delta I_y' + \Delta I_y'' \quad (6)$$

Пользуясь коэффициентами матриц $\|B'\|$ и $\|B''\|$, сразу получим, подставляя их значения в формулу (4):

	Последовательная схема включения обмоток	Параллельная схема включения обмоток
$\Delta I_y'$	$\Delta E_w \frac{R_g + R_w + R_y}{\Delta_1}$	$\Delta E_w \frac{R_w(R_g + R_y) + R_g R_y}{\Delta_1}$
$\Delta I_y''$	$\Delta E_w \frac{R_g}{\Delta_1}$	$\Delta E_w \frac{R_w R_y}{\Delta_1}$
Δ_1	$(R_w + R_y) [R_w + R_y + 2R_g]$	$(R_w + R_g) [R_w(R_g + 2R_y) + R_g R_y]$

Расчеты по методу наложения для обеих схем дадут:

$$\Delta I_y = \frac{I_w' \Delta R_w}{R_w + R_y},$$

отсюда

$$(S_i)_0 = I_w \frac{R_w}{R_w + R_y}; \quad (S_u)_0 = I_w \frac{R_w R_y}{R_w + R_y}.$$

После подстановки соответствующих величин получим:

	Последовательная схема включения обмоток	Параллельная схема включения обмоток
$(S_i)_0$	$E \frac{R_w}{R_w + R_y} \frac{1}{\Delta}$	—
$(S_u)_0$	—	$E \frac{R_w R_y}{R_w + R_y} \frac{1}{\Delta}$
Δ	$R_w + R_y + 2R_g$	$R_w \left(2 + \frac{R_g}{R_y}\right) + R_g$

Вычисление чувствительности схемы дифференциального гальванометра, при пользовании классическими способами расчета, требует большего труда (5).

5. Компенсационная схема

Как видно из рис. 8, схема получает питание от двух источников с э. д. с. E_1 и E_2 . Вычислим токи в различных участках, применяя метод наложения. Предположим при этом, что схема подключена сперва к одному источнику с э. д. с. E_1 (E_2 — коротко замкнут), затем к другому E_2 (E_1 — коротко замкнут).

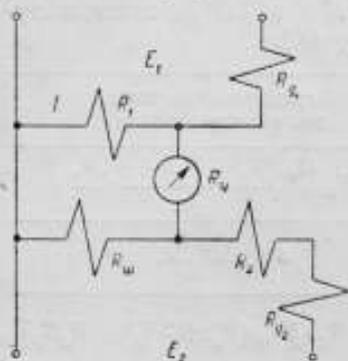


Рис. 8

Обозначим одним и двумя значками токи на участках схемы под влиянием этих э. д. с.:

$$I_w', I_y' \dots \text{э. д. с. } E_1$$

$$I_w'', I_y'' \dots \text{э. д. с. } E_2$$

Тогда

$$I_w = I_w' + I_w''$$

$$I_y = I_y' - I_y''$$

Изменение сопротивления ΔR_w вызовет, согласно выражению (4), ток ΔI_y в цепи индикатора

$$\Delta I_y = \Delta I_y'' - \Delta I_y' = \frac{(I_w'' - I_w') \Delta R_w}{B_{12} + B_{11}R_y + B_{22}R_w + B_{21}R_yR_w}$$

Здесь B_{11} , B_{12} , B_{21} , B_{22} коэффициенты четырехполюсника, изображенного на рис. 6, № 5, образующие следующую матрицу:

$$\|B\| = \begin{vmatrix} 1 & \frac{R_1 R_{g1}}{R_1 + R_{g1}} \\ \frac{1}{R_2 + R_{g2}} & 1 + \frac{R_1 R_{g1}}{R_1 + R_{g1}} \cdot \frac{1}{R_2 + R_{g2}} \end{vmatrix}$$

Тогда на основании уравнения (5) чувствительность сбалансированной схемы будет:

$$(S)_0 = \lim_{\Delta R_w \rightarrow 0} \frac{(I_w'' - I_w')}{\Delta R_w} \frac{R_w}{[B_{12} + B_{11}R_y + B_{22}R_w + B_{21}R_yR_w]} \quad (7)$$

Однако легко показать, что

$$\lim_{\Delta R_w \rightarrow 0} (I_w'' - I_w') = I_w''$$

а поэтому нет необходимости при вычислении чувствительности исследовать четырехполюсник, получающий питание от э. д. с. E_1 . Действительно, в соответствии с рис. 3, на основании уравнения (3)

$$I_w' = \frac{E_1}{A_{12}' + A_{11}'R_w + A_{13}'R_wR_g + A_{22}'R_g}$$

$$I_w'' = \frac{E_2}{A_{12}'' + A_{11}''R_w + A_{13}''R_wR_g + A_{22}''R_g}$$

где

$$\|A'\| = \begin{vmatrix} 1 + \frac{R_y}{R_2 + R_{g2}} & R_y \\ \frac{1}{R_y + R_{g2}} & 1 \end{vmatrix}$$

$$\|A''\| = \begin{vmatrix} 1 + \frac{R_2}{R_y + R} & R_2 \\ \frac{1}{R + R_y} & 1 \end{vmatrix}$$

где

$$R = \frac{R_1 R_{g1}}{R_1 + R_{g1}}$$

Как известно, для момента равновесия компенсационной схемы справедливо:

$$E_1 \frac{R_1}{R_1 + R_{g1}} = E_2 \frac{R_w}{R_w + R_2 + R_{g2}}, \quad (8)$$

поэтому

$$I_w'' - I_w' = E_2 \left\{ \frac{1}{R_w + (R_2 + R_{g2}) \left(1 + \frac{R_w}{R + R_y}\right)} - \frac{R_w}{(R_w + R_2 + R_{g2}) \left[R_y + (R_w + R_{g2}) \left(1 + \frac{R_y}{R_2 + R_{g2}}\right) \right]} \right\}$$

Однако при равновесии схемы ($\Delta R_w = 0$) сила тока, протекающая по обмоткам индикатора, равна нулю, т. е. цепи обоих источников э. д. с. действуют независимо, следовательно, при расчетах надо положить $R_y = \infty$.

Отсюда

$$\lim_{\Delta R_w \rightarrow 0} (I_w'' - I_w') = I_w'' = \frac{E_2}{R_w + R_2 + R_{g2}},$$

что соответствует следующей матрице:

$$\|A\| = \begin{vmatrix} 1 & R_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Воспользовавшись уравнением (7), напомним зависимость для чувствительности компенсационной схемы:

$$\left. \begin{aligned} (S_i)_0 &= E_2 \frac{R_w (R_2 + R_{g2})}{(R_w + R_2 + R_{g2})^2} \left[\frac{1}{R_y + \frac{R_1 R_{g1}}{R_1 + R_{g1}} + \frac{R_w (R_2 + R_{g2})}{R_w + R_2 + R_{g2}}} \right] \\ (S_u)_0 &= E_2 \frac{R_w (R_2 + R_{g2})}{(R_w + R_2 + R_{g2})^2} \left[\frac{R_y}{R_y + \frac{R_1 R_{g1}}{R_1 + R_{g1}} + \frac{R_w (R_2 + R_{g2})}{R_w + R_2 + R_{g2}}} \right] \end{aligned} \right\} (7a)$$

6. Мостовая схема

Одним из наиболее распространенных и изученных соединений является мостовая схема, при этом большинство расчетов связано с рядом кропотливых преобразований.

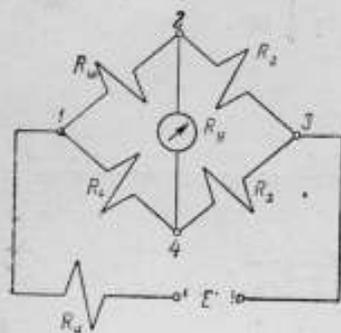


Рис. 9

Покажем, насколько легко получить выражения чувствительности уравновешенной схемы, применив формулы (3) и (5). В соответствии с обозначениями рис. 9, воспользовавшись элементами четырехполюсников, приведенными на рис. 6 № 6, можно было бы написать сразу значения I_w [формула (3)] и S_{ex} [формула (5)] для не уравновешенной схемы.

Однако, если принять во внимание, что при равновесии моста величина тока I_w не зависит от сопротивления индикатора (R_y) и цепь последнего можно считать разорванной ($R_y = \infty$), то матрица $\|A\|$ будет иметь вид:

$$\|A\| = \left\| \begin{array}{cc} 1 & R_2 \\ \frac{1}{R_3 + R_4} & 1 + \frac{R_2}{R_3 + R_4} \end{array} \right\|$$

Аналогично можно допустить, что ток ΔJ_y при постоянстве э. д. с. заметно не изменяется, при условии $R_g = 0$. Тогда

$$\|B\| = \left\| \begin{array}{cc} 1 & \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \\ \frac{1}{R_2} & 1 + \frac{1}{R_2} \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)} \end{array} \right\|$$

отсюда получим сразу:

$$I_w = \frac{E}{R_w \left(1 + \frac{R_g}{R_3 + R_4} \right) + R_g \left(1 + \frac{R_2}{(R_3 + R_4)} \right) + R_2}$$

$$(S_1)_0 = \frac{E}{\left[R_w \left(1 + \frac{R_g}{R_3 + R_4} \right) + R_g \left(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_4} \right) + R_2 \right]} \times \\ \times \frac{R_w}{\left[R_w + R_y + \frac{R_w}{R_2} \left(R_y + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right]}$$

или после преобразований:

$$(S_1)_0 = E \frac{R_w R_3}{b (R_w + R_2) + R_w R_2 (R_1 + R_4) + R_g (R_w d + R_2 c + b)} = \\ = E \frac{\frac{R_w}{R_2}}{\left[1 + \frac{R_w}{R_2} + \frac{R_g}{R_w} \left(1 + \frac{R_w}{R_4} \right) \frac{R_w}{R_2} \right]} \frac{1}{\left[R_w \left(1 + \frac{R_4}{R_w} \right) + R_y \left(1 + \frac{R_w}{R_2} \right) \right]}; \\ (S_n)_0 = E \frac{R_w R_3 R_y}{b (R_w + R_2) + R_w R_2 (R_1 + R_4) + R_g (R_w d + R_2 c + b)} = \\ = E \frac{\frac{R_w}{R_2}}{\left[1 + \frac{R_w}{R_2} + \frac{R_g}{R_w} \left(1 + \frac{R_w}{R_4} \right) \frac{R_w}{R_2} \right]} \frac{1}{\left[1 + \frac{R_w}{R_2} + \frac{R_w}{R_y} \left(1 + \frac{R_4}{R_w} \right) \right]},$$

где обозначено:

$$b = R_y (R_3 + R_4) + R_3 R_4, \\ c = R_y + R_w + R_4, \\ d = R_y + R_3.$$

Рассматривая коэффициенты, составляющие матрицы $\|A\|$ и $\|B\|$, можно видеть, что для всех приведенных схем определители

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1, \\ B_{11}B_{22} - B_{12}B_{21} = 1.$$

Также легко заметить, что A_{11} , A_{22} , B_{11} , B_{22} не имеют размерности. Кроме того,

$$\left| \frac{A_{12}}{B_{12}} \right| \text{ — сопротивление; } \quad \left| \frac{A_{21}}{B_{21}} \right| \text{ — проводимость;}$$

Все это вполне согласуется с положениями из теории пассивных четырехполюсников.

В заключение следует отметить следующее:

1. Представление заданной измерительной схемы в виде указанных выше четырехполюсников не требует производства каких-либо расчетов. Это преобразование заключается в простом перечислении заданной схемы. Последующие вычисления коэффициентов

тов матриц, $\|A\|$ и $\|B\|$ весьма элементарны и сводятся к простым преобразованиям. Для ускорения и упрощения расчетов можно пользоваться общеизвестными таблицами коэффициентов матриц. Отсюда после весьма ограниченного числа преобразований могут быть получены: чувствительность схемы и различные сопротивления между зажимами четырехполюсника. Аналогичные вычисления, производимые при помощи классических методов, требуют большего количества времени.

2. Выражение чувствительности схемы в зависимости от коэффициентов в общей форме дает возможность, пользуясь хорошо разработанной теорией четырехполюсников, легко определять смысл полученных решений. Особенно удобно применять данную форму записи при определении наивыгоднейших (в отношении чувствительности) соотношений между элементами схемы. Пользуясь предложенным способом, не представляет очень большого труда показать, что для всех измерительных схем существует определенное соотношение между элементами, при выполнении которых чувствительность достигает максимума. Однако это послужит содержанием отдельной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. М. Поливанов, „Электричество“, № 7, 1947.
2. К. М. Поливанов, „Электричество“, № 2, 1946.
3. М. И. Левин, „Электричество“, № 7, 1947.
4. М. И. Левин, „Электричество“, № 2, 1946.
5. И. Н. Кротков, Труды ВНИИМ, „Применение дифференциального гальванометра для измерения температурного коэффициента“, 1939.

НОВЫЙ ШЕСТИДЕКАДНЫЙ ПОТЕНЦИОМЕТР

Одним из наиболее точных методов измерений на постоянном токе является метод компенсации, нашедший себе широкое распространение в поверочном деле и вообще при разного рода лабораторных измерениях. Чаще всего компенсационный метод осуществляется с помощью потенциометров, представляющих готовый набор сопротивлений, приспособленный для удобного сравнения измеряемого напряжения или э. д. с. с известной э. д. с. нормального элемента. Хотя сам по себе потенциометр не является носителем единиц измерения, а лишь компарирующим прибором, — тем не менее его погрешности влияют на результат измерения и поэтому должны учитываться при точных потенциометрических измерениях.

Определение погрешностей производится путем поверки, которой периодически должны подвергаться все потенциометры. При значительном числе возможных показаний потенциометров и разнообразии их схем и конструкций процесс поверки представляет довольно сложную операцию, требующую большой затраты труда и времени. Поэтому целесообразные упрощения процесса поверки и повышение ее точности без увеличения затраты времени могут принести большую пользу.

Описанию конструкций и схем известных потенциометров посвящен ряд уже опубликованных работ (наиболее полно литература о потенциометрах приведена в работе В. И. Кротовой [1]), поэтому устройство употребительных потенциометров будет предполагаться известным и описание их будет опущено. Вопрос о точности потенциометрических измерений и о причинах возникающих погрешностей подробно разобран в работе В. Круковского [2], а способы поверки потенциометров освещены в работах Ф. Веннера и Е. Вейбеля [3] и А. А. Павловой [4, 5]. Требуемая точность определения поправок при поверке потенциометров рассмотрена применительно к некоторым типам потенциометров в статье Ф. Н. Николаева [6]. Здесь будут изложены некоторые обобщающие соображения о поверке потенциометров и рассмо-

трены некоторые приемы, упрощающие их поверку, а также описан вновь разработанный потенциометр, позволяющий уменьшить число изменений схемы при поверке потенциометров и упростить определение его собственных поправок.

1. Сущность поверки потенциометров

Обобщенная схема потенциометра изображена на рис. 1. Собственно потенциометр состоит из сопротивления, часть которого,

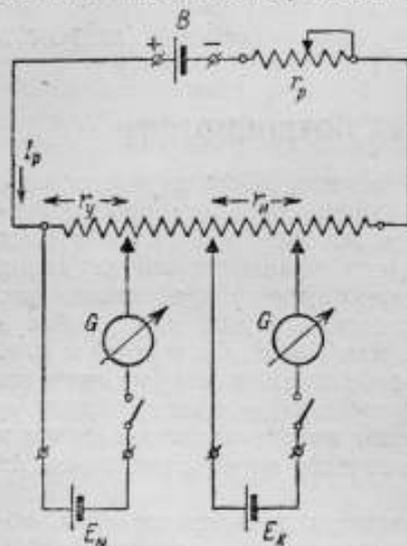


Рис. 1. Принципиальная схема сравнения э. д. с. компенсационным методом.

часть которого, обозначенная r_y , в дальнейшем будет называться установочным сопротивлением, так как она служит для установки рабочего тока I_p , называемого иногда измерительным, а также потенциометрическим током. Установка рабочего тока производится путем компенсации э. д. с. нормального элемента Вестона E_N при помощи гальванометра G . Питание рабочим током осуществляется от аккумулятора B , а для его регулировки служит регулировочное сопротивление r_p . Другая часть r_n сопротивления потенциометра, называемая в дальнейшем измерительным сопротивлением, служит для компенсации измеряемого напряжения E_X , для чего обычно используется тот же гальванометр G , включаемый поочередно в обе цепи при помощи переключателя, не показанного на схеме. Через N и X обозначены зажимы для присоединения известной измеряемой э. д. с. После двукратной компенсации э. д. с. E_N и E_X , если рабочий ток I_p не изменился, можно заключить, что

$$\frac{E_X}{E_N} = \frac{r_n}{r_y}, \quad (1)$$

или

$$E_X = E_N \frac{r_n}{r_y}, \quad (2)$$

т. е. измеряемая э. д. с. пропорциональна э. д. с. нормального элемента и отношению измерительного и установочного сопротивлений.

Если исключить из рассмотрения определение з. д. с. нормального элемента, которое производится отдельно, то проверка потенциометра должна позволить сделать заключение о правильности отношений r_n/r_y и, с другой стороны, о независимости тока I_p от положений контактов. Таким образом, не обязательно, чтобы r_n и r_y были выражены в омах, важно лишь, чтобы они были выражены в одних и тех же единицах. Проверка отношения r_n/r_y и $I_p = \text{const}$ может производиться отдельно.

С общей точки зрения проверку потенциометров можно производить двумя методами:

1) проверкой отдельных катушек сопротивления с последующим вычислением отношения различных их комбинаций (метод проверки по элементам);

2) измерением падения напряжения на зажимах $\pm N$ и $\pm X$ при одном и том же токе I_p и при различных возможных показаниях потенциометра (метод сличения с образцовым потенциометром).

В первом случае число элементов, требующих проверки, равно числу катушек сопротивления плюс единица (нулевое сопротивление). Отдельно должно быть проверено постоянство рабочего тока, вернее его независимость от показаний потенциометра.

Во втором случае вместо проверки всех возможных показаний, которых в случае пятидекадного потенциометра очень много ($1,1 \dots 2,1 \cdot 10^5$), можно ограничиться проверкой всех возможных показаний каждой декады по отдельности, при всех остальных рычагах на нуле. В этом случае число подлежащих проверке точек равно сумме возможных положений отдельных переключателей, т. е. числу катушек. Погрешность нулевого показания и независимость рабочего тока от положения рычагов также подлежат проверке, и таким образом число измерений в обоих случаях одинаково.

Разница заключается в том, что в случае проверки по элементам возможно применять методы, исключаящие погрешности вспомогательных элементов схемы, и таким образом получить более точные результаты, чем сличением с образцовым потенциометром, погрешности которого могут быть недостаточно достоверно известны и, кроме того, могут изменяться; с другой стороны, первый метод проверки требует значительно больше времени на измерения и последующие вычисления, в то время как второй проще и дает более наглядные результаты. Возможности усовершенствования метода проверки потенциометров следует искать, таким образом, в направлении создания такого образцового потенциометра, который позволил бы упростить манипуляции при проверке и вместе с тем допускал бы легкую и точную проверку его самого.

К сказанному следует добавить, что проверять по элементам

можно лишь потенциометры с открытыми рядами контактов, снабженных потенциальными винтами или штепсельными гнездами, вторым же методом возможно поверять потенциометры как с открытыми контактами, так и с закрытыми, т. е. все типы приборов.

2. Схемы поверки потенциометров

Некоторые авторы [4, 5] рекомендуют производить поверку потенциометров, сравнивая их сопротивление с образцовыми катушками и выражая их таким образом в омах, тогда как другие [3, 2] считают достаточным производить поверку потенциометра „в его собственных пределах“, т. е. сравнивая его элементы между собой. Определение их значений в омах они считают полезным лишь тогда, когда потенциометр является объектом изучения с точки зрения изменений абсолютных значений сопротивления его катушек, происходящих с течением времени. В тех случаях, когда это не является существенным и потенциометр используется для измерений э.д.с., напряжений и других электрических величин, интересно знать лишь отношение измерительного и установочного сопротивлений, и поэтому целесообразнее сравнивать их непосредственно, чтобы не вводить в результаты поверки погрешностей промежуточных сравнений.

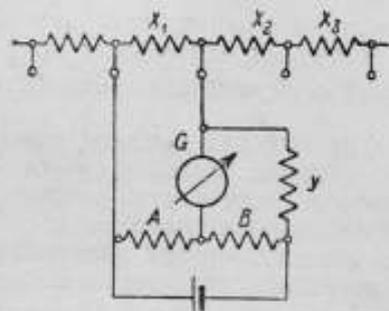


Рис. 2. Сравнение катушек потенциометра в схеме моста Витстона (методом замещения).

Сравнение катушек потенциометра может, конечно, производиться разнообразными методами, пригодными для точного измерения сопротивлений; применительно к конкретным типам потенциометров выработались, однако, некоторые специфические приемы, которые будут ниже вкратце рассмотрены.

Выбор метода сравнения катушек зависит прежде всего от величины их сопротивления. В случае многоомных катушек может быть применен простой мост Витстона (рис. 2), в одно из плеч которого поочередно включаются сравниваемые катушки X_1 , X_2 , X_3 , остальные же три плеча A , B , Y моста могут не быть известны по абсолютной величине, достаточно знать лишь изменения отношения A/B . По этой же причине несущественно знание сопротивления соединительных проводников, важно лишь, чтобы оно не изменялось при переходе от одной сравниваемой катушки к другой.

Если требуется более точное сравнение с учетом влияния соединительных проводников и контактов, может быть применена схема рис. 3, на которой F , C , D , E означают сопротивления потенциометра, подлежащие сравнению, A и B — катушки с изве-

стным отношением. После двух уравниваний моста с перестановкой катушек A и B по схеме рис. 3, a производят еще два уравнивания по схеме рис. 3, b и вычисляют отношение C к D по изменениям отношений A к B .

Может быть также применена схема рис. 4. Здесь X_1 — одна из ряда катушек потенциометра, подлежащая измерению, A и B — сопротивления с известным отношением, S — катушка, примерно равная по величине X_1 , L — проводник малого сопротивления. Уравнивая мост один раз по схеме по рис. 4, a и другой раз по схеме по рис. 4, b , можно определить значение X_1 по формуле:

$$X_1 = (S - L)(1 + r),$$

где r — приращение отношения A/B . Получив ряд таких равенств для различных катушек потенциометра, можно вычислить их отношения, поскольку $(S - L)$ во всех равенствах одно и то же.

Видоизменение схемы рис. 4 изображено на рис. 5. Здесь также требуется два уравнивания, как показано на рис. 5, a и 5, b . Измеряемое сопротивление

$$X = (S - L) \left(1 + \frac{r}{2}\right).$$

Сравнение малоомных катушек может быть произведено по схеме моста Томсона (рис. 6). Производя два уравнивания при показанных на рис. 6, a и 6, b изменениях в схеме, можно определить сопротивление соединительного проводника x , так как при схеме по рис. 6, a

$$X + x = \frac{AY}{B},$$

а при схеме по рис. 6, b

$$X = \frac{(A + x)Y}{B}.$$

Схемы по рис. 3, 4 и 5 также могут применяться для сравнения катушек не очень малого сопротивления, например 5-омных катушек. Может также применяться схема рис. 7. Здесь применяется вспомогательная катушка $S = 10 \Omega$ и сопротивления с известным отношением A и B . Производят два уравнивания, при видоизменениях схемы, показанных на рис. 7, a и 7, b . Если ни одна из катушек потенциометра X , C , D не отличается от $0,5(S - L)$ более, чем на $0,1\%$, можно значения их вычислять по приближенной формуле:

$$X = \frac{(S - L)}{2} \left(1 - r + \frac{r'}{2}\right),$$

где $r = \frac{A}{B} - 1$ и $r' = \frac{A'}{B} - 1$, причем погрешность от применения приближенной формулы не превышает 10^{-5} .

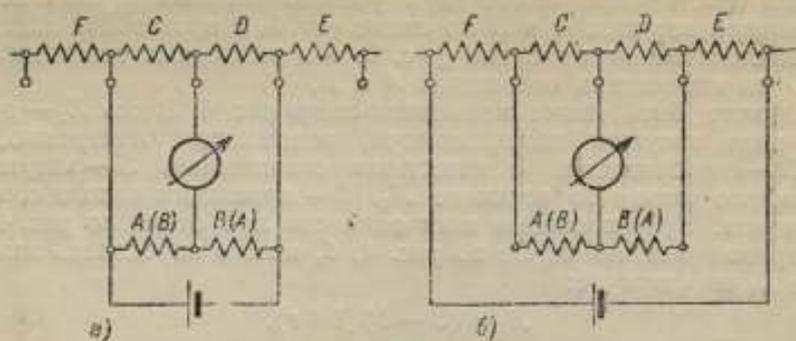


Рис. 3. Сравнение катушек многооминого потенциометра методом моста.

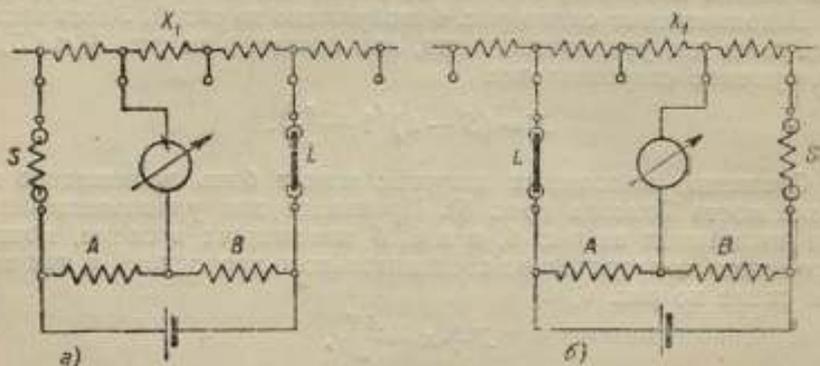


Рис. 4. Схема сравнения катушек многооминого потенциометра.

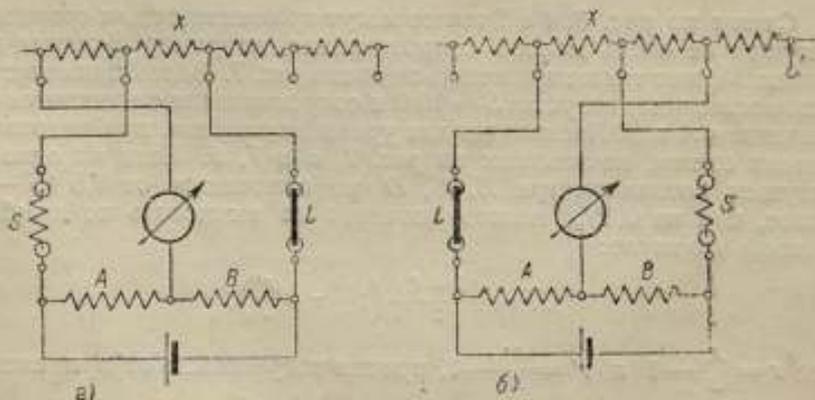


Рис. 5. Видоизменение схемы рис. 4.

Сравнение катушек может также производиться компенсационным методом по схеме рис. 8. Для получения высокой точности при пользовании этим методом компенсацию напряжений на сравниваемых катушках надо производить, изменяя положение

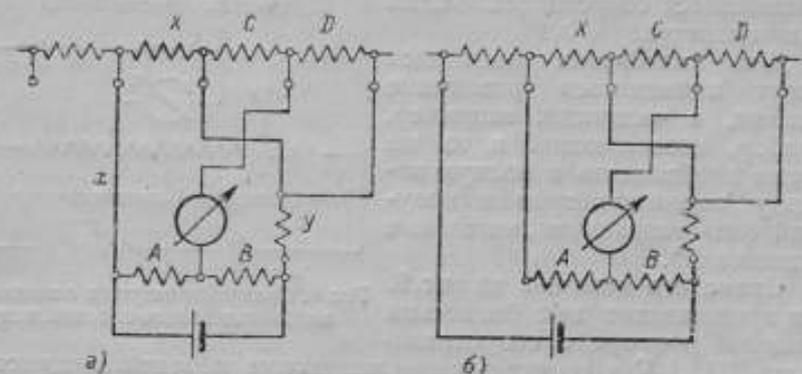


Рис. 6. Сравнение катушек потенциометра методом моста Томсона.

одного или двух последних рычагов вспомогательного потенциометра, иными словами, измерительное сопротивление между движками вспомогательного потенциометра при обоих уравновешиваниях должно состоять из тех же самых катушек. В этом

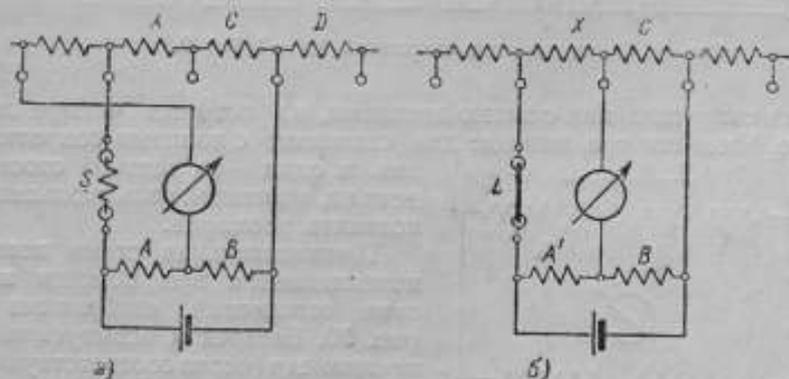


Рис. 7. Схема сравнения 5-омных катушек ($S = 10 \Omega$).

случае погрешности вспомогательного потенциометра не играют существенной роли. Нужно обеспечить также достаточную чувствительность схемы, для чего иногда приходится работать при повышенном токе в сравниваемых катушках, особенно если они малого сопротивления. Чтобы при этом не перегружались многоомные катушки, их можно замкнуть накоротко. Если пользуются

в качестве вспомогательного многооменным потенциометром и первая декада не участвует в измерении, ее также полезно замкнуть накоротко для повышения чувствительности, так как при этом уменьшается сопротивление цепи гальванометра.

Для калибровки реохордов могут применяться различные методы, в частности, например, прибор, позволяющий в то же время производить и полную поверку потенциометров и могущий быть названным «магазином отношений».

Схема его показана на рис. 9. Он представляет как бы весьма длинный реохорд с сопротивлением $2111,1 \Omega$ и со скользящим контактом, передвигающимся через ступени в $0,01 \Omega$. Конструктивно он выполнен в виде мага-



Рис. 8. Сравнение катушек с помощью вспомогательного потенциометра.



Рис. 9. Схема магазина отношений $\Sigma r = 2111,1 \Omega$.

зина сопротивления с пятью декадами, из которых четыре двойные. Имеются три вывода: два, связанные с концами сопротивления, и один — со щеткой стоимой декады, играющей роль скользящего контакта реохорда.

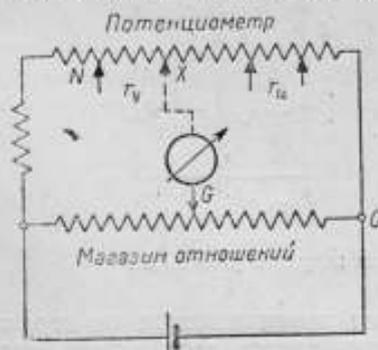


Рис. 10. Схема проверки потенциометра с помощью магазина отношений.

которые дадут четыре показания магазина отношений, например A_X ,

A'_X , A'_N и A'_N , можно определить отношение включенных частей измерительного и установочного сопротивлений, а именно

$$\frac{r_n}{r_y} = \frac{(A'_X - A_X)}{(A'_N - A_N)}$$

Добавочное сопротивление подбирают так, чтобы токи в поверяемом потенциометре и магазине отношений находились в отношении, кратном 10^n , где n — целое число.

Магазин отношений может применяться для проверки потенциометров различных типов, а также и других приборов сопротивления, например делителей напряжения для потенциометров. При его помощи возможно также сравнение сопротивлений между точками, соединенными с зажимами через другие сопротивления, например секций измерительного сопротивления потенциометра с неполной компенсацией.

Проверка потенциометра по элементам представляет довольно кропотливую операцию, требующую большого числа изменений в схеме и довольно сложных вычислений. Поэтому в тех случаях, где не требуется предельная точность проверки, проще ее производить путем сличения показаний поверяемого потенциометра с показаниями образцового. Очень удобно, если поправки последнего настолько малы, что ими можно пренебрегать.

Схемы соединений, часто применяемые в поверочных учреждениях, изображены на рис. 11 и 12. Поверяемый (P_n) и образцовый (P_0) потенциометры питаются от батарей B_1 и B_2 . Рабочие токи в них устанавливаются при помощи нормального элемента HE , присоединяемого через гальванометр поочередно к установочным сопротивлениям обоих потенциометров. Измерительные сопротивления, вернее падения напряжения на них, сравниваются при помощи того же гальванометра, после перевода переключателей обоих потенциометров с N на X . По схеме рис. 11 можно производить проверку декады с падением напряжения на секциях 0,1 V, но для проверки низших декад схема непригодна, так как показание образцового потенциометра содержит то же число значащих цифр, что и показание поверяемого. Для низших же декад требуется производить отсчет с числом значащих цифр на одну больше. Это возможно при использовании схемы рис. 12, в которой рабочие токи устанавливаются так же, как и раньше, но сравнение падений напряжения на измерительных сопротивлениях производится через посредство вспомогательной цепи с двумя образцовыми катушками R_{01} и R_{02} , питаемой от батареи B_2 . Сопротивление катушки R_{01} меньше сопротивления катушки R_{02} в десять (иногда в сто) раз.

Недостатками этого метода проверки являются следующие обстоятельства: рабочие токи обоих сравниваемых потенциометров контролируются не одновременно, кроме того, вовсе не обязательно, чтобы они в точности равнялись номинальным зна-

чениям, важно лишь, чтобы они были согласованы друг с другом; проверка низших декад через посредство вспомогательных образ-

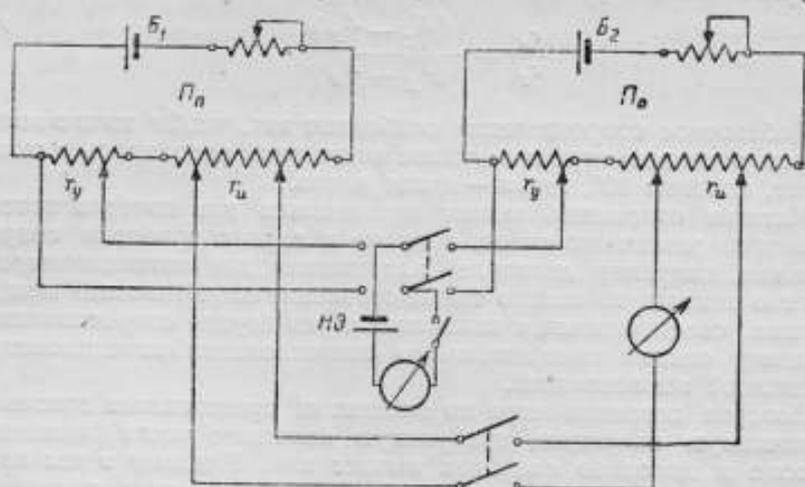


Рис. 11. Схема с нормальным элементом для проверки высших декад.

цовых катушек, не давая выигрыша в точности измерений, значительно увеличивает затрату времени на проверку, так как ток

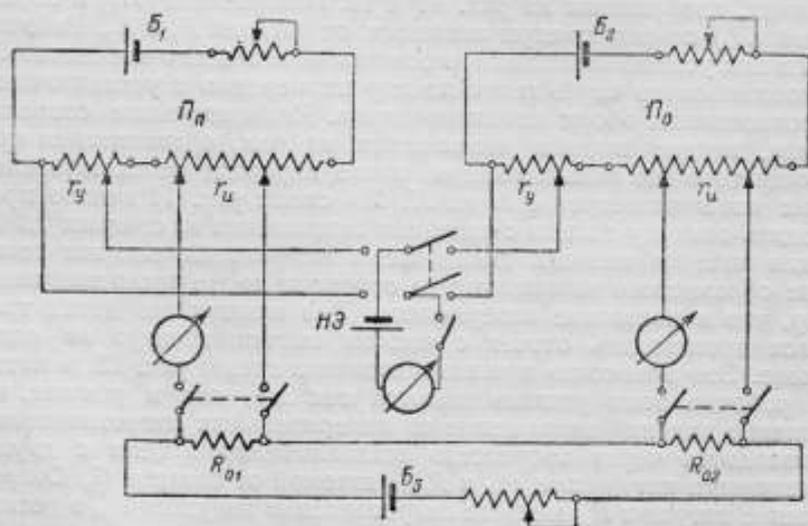


Рис. 12. Схема с нормальным элементом и двумя вспомогательными образцовыми катушками для проверки низших декад.

в цепи катушек должен регулироваться в каждой проверяемой точке.

Исходя из этих соображений, в Лаборатории электрических измерений ВНИИМ приняты несколько иные, упрощенные схемы сравнения потенциометров, показанные на рис. 13 и 14. По схеме рис. 13 производится сравнение первых декад. Рабочие токи уста-

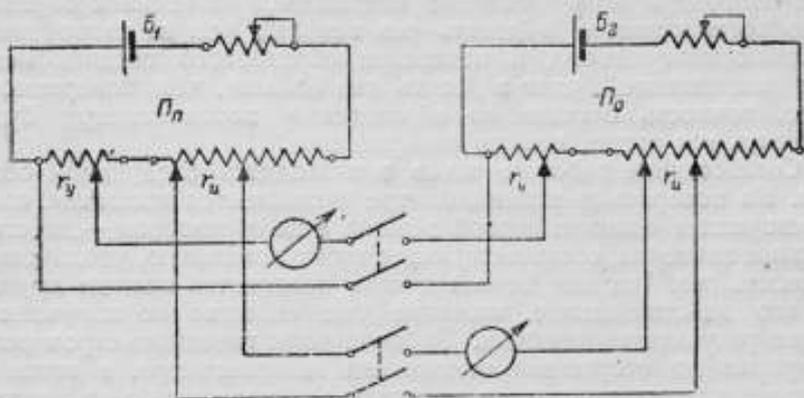


Рис. 13. Схема проверки высших декад (без нормального элемента).

навливаются путем непосредственного сравнения падений напряжения на установочных сопротивлениях обоих потенциометров, без применения нормального элемента. При этом, правда, рабочие токи не в точности равны номинальным, а могут несколько от-

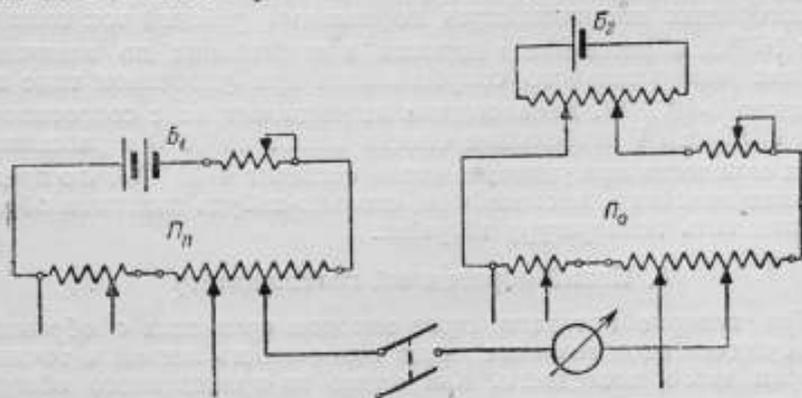


Рис. 14. Схема проверки низших декад без нормального элемента и без вспомогательных катушек.

них отличаться, но это может сказаться лишь на ничтожном изменении чувствительности, совершенно не влияя на точность результатов проверки.

Для проверки второй, третьей и т. д. декад применяется схема рис. 14, в которой питание проверяемого потенциометра произво-

дится от источника с напряжением в два раза выше нормального, а питание образцового потенциометра осуществляется через делитель напряжения (в виде, например, штепсельного магазина сопротивления), который понижает ток потенциометра в пять раз. Благодаря этому падение напряжения на секциях образцового потенциометра в десять раз меньше, чем на равноценных секциях поверяемого, и показание образцового потенциометра при компенсации будет в десять раз больше, чем поверяемого, т. е. точность отсчета по образцовому потенциометру будет в десять раз выше, чем по поверяемому.

Согласование рабочих токов производится следующим образом. На поверяемом потенциометре выставляется показание, соответствующее единице первой декады, а на образцовом — действительное значение, соответствующее этому показанию, увеличенное в десять раз. Так как первая декада поверяется прежде других, то это действительное значение уже известно по полученным ранее результатам поверки. Рабочие токи потенциометров регулируются до отсутствия отклонения гальванометра, а затем на поверяемом потенциометре выставляется поверяемое значение и измеряется обычным образом при помощи образцового потенциометра. Способ имеет то преимущество, что позволяет значительно ускорить процесс поверки, так как не требуется от точки к точке изменять значение тока, приходится лишь контролировать постоянство. Удвоенное тока в поверяемом потенциометре не является опасным с точки зрения нагрева катушек, так как в многоомных потенциометрах нормальный рабочий ток составляет 10^{-4} А и рассеяние мощности в наибольших по величине секциях измерительного сопротивления при удвоенном токе не превысит $4 \cdot 10^{-5}$ Вт. В малоомных потенциометрах с сопротивлением 100 Ом на 1 В наибольшие секции имеют по 10 Ом и рассеяние в них мощности при удвоенном токе составит $4 \cdot 10^{-3}$ Вт, что представляет величину, неспособную сколько-нибудь заметным образом повысить температуру катушек.

3. Новый образцовый потенциометр

При поверке потенциометров методом сравнения с образцовым существенное значение имеет возможность легкой и точной поверки этого последнего. Как видно из приведенного обзора методов поверки, процесс поверки требует переходов от одних схем к другим. Он еще более усложняется, если поверяемый потенциометр имеет больший предел измерений, чем образцовый, или если пределов измерения не один, а два. Эти соображения, а также желание создать тип потенциометра с открытыми контактами, имеющий последовательную схему соединения декад и снабженный защитой от токов утечки методом эквипотенциальных экранов, послужили основанием для разработки описываемого ниже прибора.

Принципиальная схема нового потенциометра изображена на рис. 15. Измерительное сопротивление состоит из шести декад — I, II, III, IV, V и VI, три из которых, как и в схеме Фейсснера, выполнены двойными. Первая декада состоит из 19 катушек по 1000 Ω , вторая — из 10 катушек по 100 Ω , третья, четвертая и пятая имеют сопротивление 10×10 , 10×1 и $10 \times 0,1$ Ω . Шестая декада выполнена в виде декады Томсона-Варлея из 10 катушек по 0,1 Ω и вместе с добавочным сопротивлением 899 Ω включена параллельно одной катушке второй (стоимной) декады. Благодаря этому ток в шестой декаде составляет 0,1 часть рабочего тока потенциометра и, следовательно, падение напряжения на каждой из ее катушек равно 0,1 части падения напряжения на катушке пятой декады. Падение напряжения при рабочем токе 10^{-4} А на секциях первой декады составляет 0,1 V, второй 0,01 V и т. д. Наименьшая ступень регулирования — 1 секция шестой декады — составляет 10^{-6} V, а верхний предел измерения — 2,01111 V. Установочное сопротивление потенциометра состоит из 10 секций первой декады (от 2-й до 11-й) с добавлением постоянного сопротивления 180 Ω и двух установочных декад — первой установочной декады 10×1 Ω и второй установочной декады $10 \times 0,1$ Ω . Благодаря наличию двух установочных декад значение э. д. с. нормального элемента можно выставлять с точностью до 10^{-6} V. Последовательно с сопротивлением собственно потенциометра включены две регулировочные декады 10×10 и 10×1 Ω и движковый реостат для особо тонкой регулировки. Потенциометр рассчитан на применение одного двухвольтового аккумулятора с напряжением не менее 2,01111 V.

Схема нового потенциометра имеет следующие особенности:

1. Все декады, начиная со второй, имеют по 10 катушек вместо девяти, как обычно, что позволяет с большой точностью сравнивать между собой соседние декады и определять отношение их сопротивлений.

2. Для повышения чувствительности при измерении малых сопротивлений предусмотрена возможность замыкания накоротко первой декады при помощи штепселя А (рис. 15).

3. Для облегчения и повышения точности поверки шестой декады вторая декада имеет не одиннадцать, а двенадцать контактов, причем последние два контакта нормально замкнуты штепселем С. При поверке шестой декады щетки второй декады устанавливаются на последние контакты и штепсель С вынимается, благодаря чему шестая декада включается последовательно в цепь потенциометра и может быть поверена совершенно так же, как пятая декада. Для того, чтобы при этом не возросло общее сопротивление потенциометра, девять катушек второй декады могут быть замкнуты накоротко штепселем В.

4. Для удобства поверки второй декады независимо от поло-

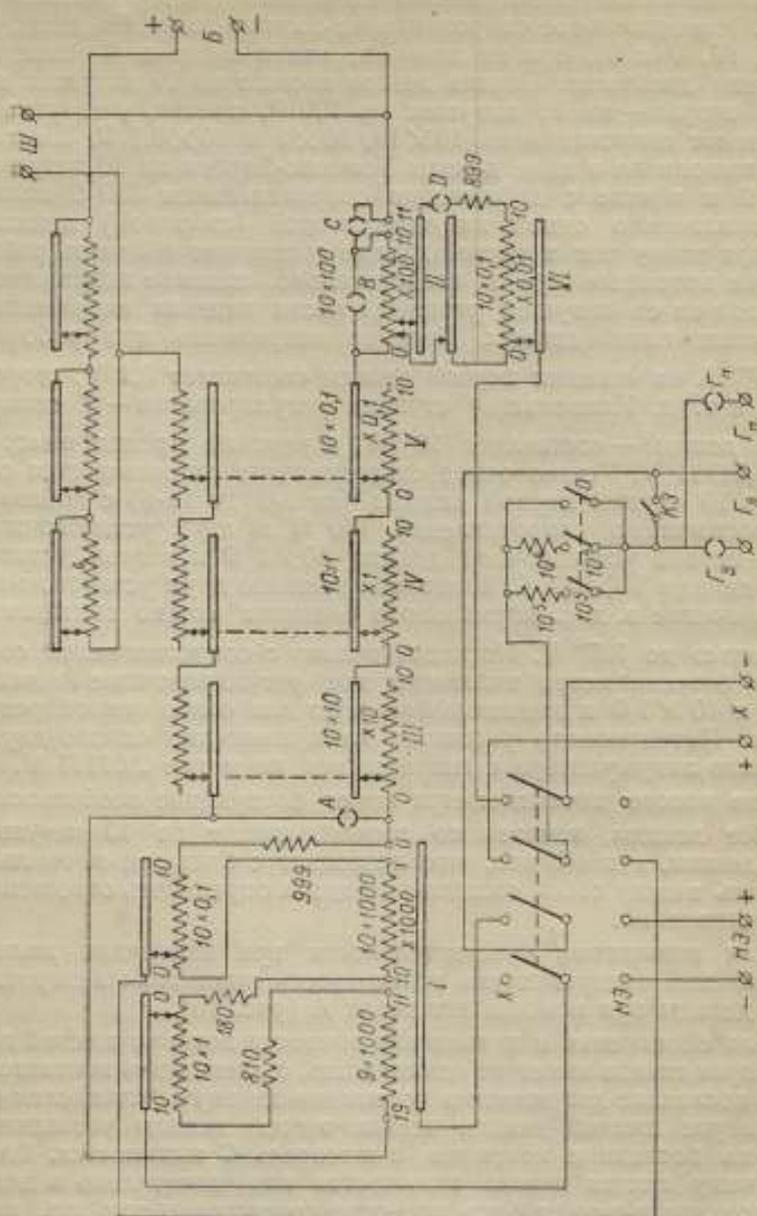


Рис. 15. Принципиальная схема шестидекадного потенциометра типа ПВ-4.

жения ее щеток цепь шестой декады может быть разомкнута при помощи штепселя *D*.

5. Так как потенциометр предназначен главным образом для проверки потенциометров по схеме рис. 13, переключатель *HЭ — X* выполнен так, что он обеспечивает двухполюсное выключение зажимов *HЭ* или *X*. При обычных переключателях, дающих однополюсное выключение, в случае проверки потенциометров по схеме рис. 13 остаются паразитные соединительные цепи между потенциометрами, для размыкания которых приходится вводить отдельный переключатель.

6. Предусмотрено три зажима для гальванометра вместо двух, что позволяет с удобством пользоваться двухобмоточным гальванометром, т. е. гальванометром с двумя обмотками на рамке — одной многоомной и одной малоомной. Включение той или иной обмотки осуществляется при помощи двух штепсельных гнезд *B* и *C*, в одно из которых вставляется штепсель. Пользование двухобмоточным гальванометром дает большой выигрыш в чувствительности без затраты лишнего времени на перемену гальванометра. При измерении больших напряжений или сопротивлений, когда сопротивление цепи гальванометра велико, применяется многоомная обмотка, а при измерении малых напряжений, когда цепь гальванометра замыкается на небольшое сопротивление последних декад, применяется малоомная обмотка.

7. Применена шестая декада, позволяющая производить отсчет с точностью до $10^{-6}V$. Эта особенность, так же как и выбор верхнего предела, равного округленно $2V$, позволяет производить полную проверку потенциометров без какого-либо изменения схемы. При проверке первой декады шестая декада является нерабочей, при проверке же остальных декад она позволяет получить на образцовом потенциометре отсчет с числом значащих цифр на одну больше, чем на поверяемом.

В приборе применены переключатели с открытыми контактами, снабженными штепсельными гнездами. Как показал опыт применения лучших образцов приборов сопротивления, доступность контактов, расположенных на верхней панели, обеспечивает точную подгонку и проверку сопротивлений. Облегчается также наблюдение за чистотой контактов и их смазка. Цель, которая ставится при конструировании приборов с закрытыми контактами, — предохранение поверхностей, несущих контакты, от запыления, — обычно не достигается, так как щитки, закрывающие контакты, имеют отверстия для пропуска рукояток, ключей, зажимов и пр., вокруг которых, как правило, имеются неплотности и щели. Таким образом, осаждение пыли на эбонитовую панель происходит и в приборах закрытого типа, с той разницей, что для ее удаления приходится частично разбирать прибор. Конечно, приборы с открытыми контактами больше подвержены действию прямого света на эбонит, однако с точными приборами работает всегда

квалифицированный персонал, в руках которого прибор может прожить долгую жизнь без существенных изменений верхнего слоя эбонита. У лаборатории было много случаев убедиться в прекрасном состоянии эбонитовых панелей приборов сопротивления с открытыми контактами, изготовленных 40 и даже 50 лет тому назад.

Все оперативные элементы, как то: рукоятки переключателей, ключи и штепсельные гнезда, расположены на верхней горизонтальной плоскости прибора (рис. 16). Зажимы расположены на

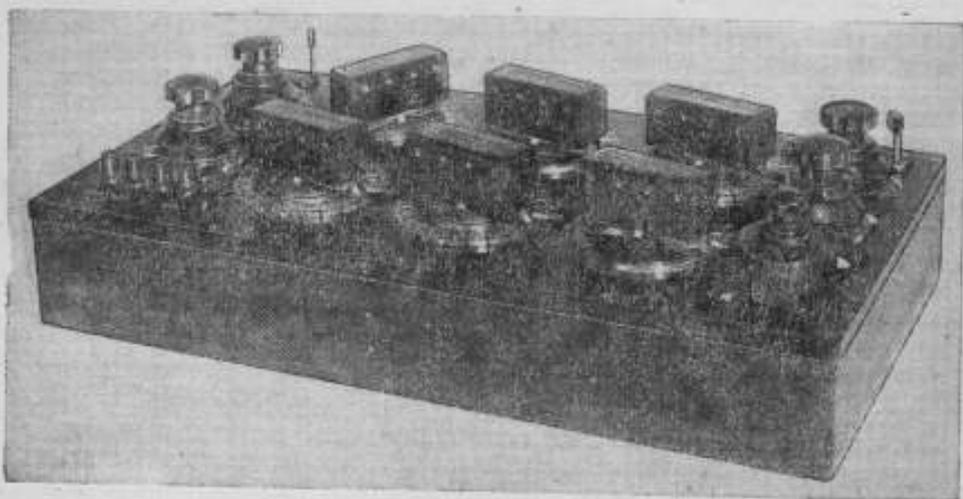


Рис. 16. Внешний вид шестидекадного потенциометра типа ПВ-4, изготовленного заводом „Эталон“.

задней продольной стенке, так что прибор можно закрывать крышкой, не разбирая схемы его включения. Оперативные элементы размещены в предположении, что прибор будет расположен справа от поверяемого потенциометра. В сфере действия правой руки находятся переключатель $HЭ-X$, рукоятки регулировочного сопротивления и часть декадных переключателей измерительного сопротивления. Остальная их часть, а также ключи гальванометра управляются левой рукой, на долю которой приходится и перестановка рычагов поверяемого потенциометра.

Все рукоятки снабжены под эбонитовой поверхностью металлическими прокладками (изолированными от щеток), имеющими металлический контакт с осевыми стержнями переключателей. Эти последние при помощи изолированного проводника соединены между собой и присоединены к щетке шестой декады (вернее, к ее сегменту). Между эбонитовой панелью и ящиком, на котором она покоится, сделана металлическая прокладка, присоединенная к той же точке.

Схема экранирования потенциометра и цепи гальванометра показана на рис. 17, на котором слой изолирующего материала заштрихованы. Благодаря такому устройству, изменение сопро-

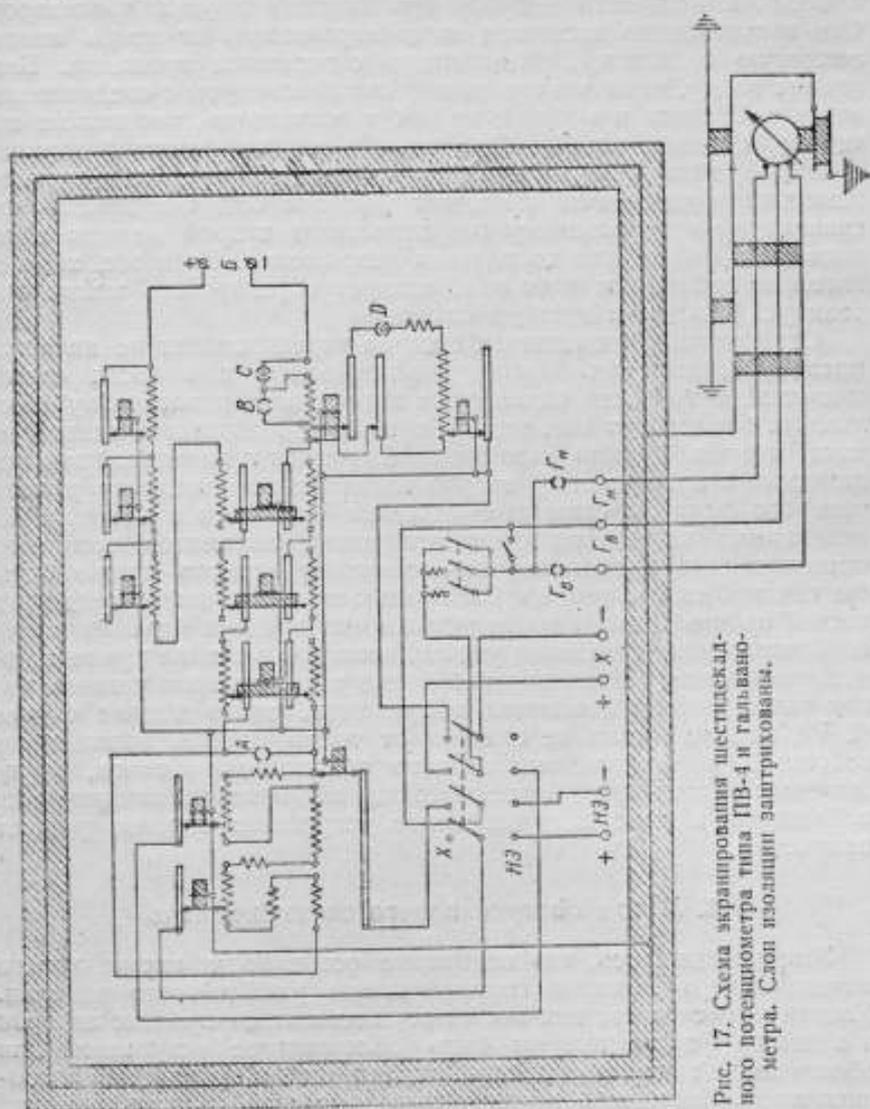


Рис. 17. Схема экранирования шестидесятиградусного потенциометра типа ПВ-4 и гальванометра. Слой изоляции заштрихованы.

тивления изоляции по отношению к земле не вызывает появления токов утечки от какого-нибудь элемента потенциометра, так как панель окружена экраном, имеющим потенциал, близкий к потенциалу цепи потенциометра. Прикосновение к рукояткам

не вызывает также никаких токов утечки. Провода, идущие к гальванометру, подвешены на изоляторах к проводнику, соединенному с системой экранов и имеющему ее потенциал. Этот проводник подвешен к тросу при помощи других изоляторов. Сам гальванометр поставлен на изолированную от земли металлическую прокладку, соединенную с экранным проводом. Благодаря этому, токи утечки между гальванометром с соединительными проводами и экраном не могут возникнуть, так как их потенциалы весьма близки. Токи утечки между системой экранов и землей хотя и могут возникнуть, но их влияние на результат измерения будет ничтожным, так как они будут проходить по сравнительно небольшому сопротивлению второй декады и не вызовут в ней заметного падения напряжения. Если все же желательно избавиться и от них, следует экранировать также питающую батарею и провода от нее.

Строго говоря, описанная система экранирования не является идеальной, так как экраны и защищаемые ими части схемы имеют не в точности одинаковые потенциалы, и поскольку абсолютных изоляторов нет, между ними будут возникать некоторые токи утечки. Можно было бы приблизиться к идеальной защите, поместив в потенциометр второй такой же потенциометр, рычаги которого были бы связаны с рычагами основного и задавали бы потенциалы на экраны соответствующих элементов основного потенциометра. В этом случае потенциалы экранов можно было бы сделать сколь угодно близкими к потенциалам защищаемых частей схемы. Однако такое усложнение прибора едва ли целесообразно ради устранения утечек, неощутимых даже при высокочувствительном гальванометре. Кроме того, опыт показывает, что при таком низком питающем напряжении, как в данном случае (2 V), защита нужна не столько от токов утечки, вызываемых собственным источником, сколько от ползучих токов, порождаемых источниками более высокого напряжения, имеющимися поблизости, а эту задачу описанное устройство экранов решает полностью.

4. Метод поверки нового потенциометра

Уже упоминалось, что некоторые особенности схемы нового потенциометра вызваны соображениями удобства его поверки. Уместно проследить, как может осуществляться процесс поверки и в какую форму должны быть облечены ее результаты для облегчения их использования при практическом применении потенциометров. Порядок поверки и связанные с ней подсчеты могли бы быть изложены, как это сделано в опубликованных по этому вопросу работах, описательно, но, по нашему мнению, полезно перевести все операции, производимые при поверке, на математический язык. Метод, который будет проиллюстрирован на примере поверки нового потенциометра, может быть применен и для по-

верки других приборов. С его помощью можно зафиксировать приемы, применяемые при поверке приборов сопротивления, а также сравнивать различные методы поверки одного и того же прибора, подвергая их математическому анализу. Предлагаемая форма записи процедуры поверки позволит также проанализировать и требуемую точность измерения отдельных элементов прибора в зависимости от точности, с которой должны вводиться поправки. Результат записи в математическом виде всех требуемых измерений может быть назван „формулой поверки“.

Как известно, всякую физическую величину можно представить в виде уравнения измерения:

$$Q = n[U], \quad (3)$$

где Q — измеряемая величина, n — числовое значение и U — единица измерения. Это выражение можно записать и так:

$$\frac{Q}{[U]} = n, \quad (4)$$

и трактовать, как символ процесса сравнения величины Q с принятой единицей измерения U , дающего численный результат n . В виде таких символов можно изобразить все измерения, производимые при поверке прибора, и сгруппировать так, чтобы их совокупность давала значение измеряемой прибором величины. Полученная формула позволит проследить все сделанные при поверке операции, а также выяснить влияние отдельных измерений, производимых при поверке, на точность получаемого с помощью данного прибора результата.

Для иллюстрации этого метода записи ниже рассмотрены приемы поверки нового потенциометра методом измерения отдельных его элементов. В общих чертах, процесс поверки состоит из следующих операций: все катушки, входящие в измерительное сопротивление декад, сличают с первой катушкой первой декады; сопротивление декад, равное по номиналу 10180 Ω , сличают с таким же по величине установочным сопротивлением; поверяют постоянство сопротивления потенциометра при перемещениях рычагов двойных декад; измеряют нулевое сопротивление; наконец, поверяют две установочные декады. Результаты всех измерений должны быть подставлены в основную формулу (2) для измеряемой э. д. с.

В дальнейшем изложении сопротивления катушек первой декады будут обозначаться $r_{1,i}$, где i — порядковый номер катушки, начиная от нулевого контакта; аналогично, сопротивления второй декады — $r_{2,i}$, и т. д. Сопротивления установочной декады „ $\times 1$ “ будут обозначаться $r_{y,1,i}$, установочной декады „ $\times 0,1$ “ — $r_{y,2,i}$ (см. рис. 15).

Процесс сличения катушек первой декады с первой катушкой $r_{1,1}$ можно записать в виде столбца отношений

$$\frac{r_{1,1}}{r_{1,1}}, \frac{r_{1,2}}{r_{1,1}}, \frac{r_{1,3}}{r_{1,1}}, \dots, \frac{r_{1,10}}{r_{1,1}}.$$

Сумму десяти катушек второй декады можно непосредственно сличить с $r_{1,1}$:

$$\frac{r_{2,1-10}}{r_{1,1}} = A_{2,1} \quad (5)$$

и, кроме того, каждую из них с первой катушкой:

$$\frac{r_{2,1}}{r_{2,1}}, \frac{r_{2,2}}{r_{2,1}}, \frac{r_{2,3}}{r_{2,1}}, \dots, \frac{r_{2,10}}{r_{2,1}},$$

а затем подсчитать сумму

$$\frac{\sum_{i=1}^{10} r_{2,i}}{r_{2,1}} = B_2. \quad (6)$$

Отсюда

$$\frac{r_{2,1}}{r_{1,1}} = \frac{r_{2,1-10}}{r_{1,1}} \frac{r_{2,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{2,i}} = \frac{A_{2,1}}{B_2}. \quad (7)$$

Нахождение $\frac{r_{2,1}}{r_{1,1}}$ требует десяти сравнений.

Точно так же сличением суммы десяти катушек основной третьей декады с первой катушкой второй декады можно найти

$$\frac{r_{3,1-10}}{r_{2,1}} = A_{3,2} \quad (8)$$

и, кроме того, сличением всех катушек с первой

$$\frac{r_{3,1}}{r_{3,1}}, \frac{r_{3,2}}{r_{3,1}}, \frac{r_{3,3}}{r_{3,1}}, \dots, \frac{r_{3,10}}{r_{3,1}},$$

а затем подсчитать сумму

$$\frac{\sum_{i=1}^{10} r_{3,i}}{r_{3,1}} = B_3. \quad (9)$$

Это дает возможность определить отношение

$$\begin{aligned} \frac{r_{3,1}}{r_{1,1}} &= \frac{r_{2,1}}{r_{1,1}} \frac{r_{3,1-10}}{r_{2,1}} \frac{r_{3,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{3,i}} = \frac{r_{2,1-10}}{r_{1,1}} \frac{r_{2,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{2,i}} \frac{r_{3,1-10}}{r_{2,1}} \frac{r_{3,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{3,i}} = \\ &= \frac{A_{2,1}}{B_2} \frac{A_{3,2}}{B_3}. \end{aligned} \quad (10)$$

Нахождение $\frac{r_{3,1}}{r_{1,1}}$ требует двадцати сравнений.

Аналогично для четвертой и пятой декад:

$$\begin{aligned} \frac{r_{4,1}}{r_{1,1}} &= \frac{r_{3,1}}{r_{1,1}} \frac{r_{4,1-10}}{r_{3,1}} \frac{r_{4,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{4,i}} = \\ &= \frac{r_{2,1-10}}{r_{1,1}} \frac{r_{2,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{2,i}} \frac{r_{3,1-10}}{r_{2,1}} \frac{r_{3,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{3,i}} \frac{r_{4,1-10}}{r_{3,1}} \frac{r_{4,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{4,i}} = \\ &= \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{4,3}}{B_2 B_3 B_4}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{r_{5,1}}{r_{1,1}} &= \frac{r_{4,1}}{r_{1,1}} \frac{r_{5,1-10}}{r_{4,1}} \frac{r_{5,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{5,i}} = \\ &= \frac{r_{2,1-10}}{r_{1,1}} \frac{r_{2,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{2,i}} \frac{r_{3,1-10}}{r_{2,1}} \frac{r_{3,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{3,i}} \frac{r_{4,1-10}}{r_{3,1}} \frac{r_{4,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{4,i}} \frac{r_{5,1-10}}{r_{4,1}} \frac{r_{5,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{5,i}} = \\ &= \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{4,3} A_{5,4}}{B_2 B_3 B_4 B_5}, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\frac{r_{4,1-10}}{r_{3,1}} = A_{4,3}; \quad \frac{\sum_{i=1}^{10} r_{4,i}}{r_{4,1}} = B_4; \quad \frac{r_{5,1-10}}{r_{4,1}} = A_{5,4}; \quad \frac{\sum_{i=1}^{10} r_{5,i}}{r_{5,1}} = B_5.$$

Для измерения отношения $\frac{r_{4,1}}{r_{1,1}}$ требуется тридцать, а для $\frac{r_{5,1}}{r_{1,1}}$ сорок сравнений.

Шестая декада при проверке включается в цепь общего рабочего тока (штупсель C вынут, щетки второй декады в последнем положении):

$$\begin{aligned} \frac{r_{6,1}}{r_{1,1}} &= \frac{r_{2,1-10}}{r_{1,1}} \frac{r_{2,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{2,i}} \frac{r_{3,1-10}}{r_{2,1}} \frac{r_{3,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{3,i}} \frac{r_{4,1-10}}{r_{3,1}} \frac{r_{4,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{4,i}} \frac{r_{6,1-10}}{r_{4,1}} \frac{r_{6,1}}{\sum_{i=1}^{10} r_{6,i}} = \\ &= \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{4,3} A_{6,4}}{B_2 B_3 B_4 B_6}, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\frac{r_{6,1-10}}{r_{4,1}} = A_{6,4}, \quad \frac{\sum_{i=1}^{10} r_{6,i}}{r_{6,1}} = B_6.$$

Так как сопротивления шестой декады такие же, как и пятой,

их сумму сличают с $r_{4,1}$, а затем каждое по отдельности — с $r_{5,1}$. Для определения отношения $\frac{r_{6,1}}{r_{1,1}}$ требуется сорок сравнений.

Для получения всех данных об измерительном сопротивлении требуется еще измерить общее сопротивление шестой декады вместе с добавочным сопротивлением 899 Ω , а также определить нулевое сопротивление. Шестая декада вместе с добавочным сопротивлением может быть сличена с девятью катушками второй декады ($\times 100$). Если сопротивление 899 Ω обозначить r_{899} , это можно записать так:

$$\frac{r_{6,1-10} + r_{899}}{r_{2,1-9}} = C. \quad (14)$$

Нетрудно подсчитать отношение тока I_0 в шестой декаде к общему рабочему току I_p :

$$\frac{I_{6,z_2}}{I_p} = \frac{\frac{r_{2,z_2}}{r_{2,1}}}{C \frac{r_{2,1-9}}{r_{2,1}} + \frac{r_{2,z_2+1}}{r_{2,1}}} = D. \quad (15)$$

На это отношение следует умножить действительное значение включенной части шестой декады (от нулевого контакта до щетки), чтобы получить ее эквивалентное сопротивление, которое, будучи умножено на рабочий ток, даст падение напряжения в долях падения напряжения на первой катушке первой декады.

Кроме сопротивлений отдельных декад, в измерительное сопротивление входит так называемое нулевое сопротивление, которое может быть сравнено с первой катушкой шестой декады. Замечают отклонения гальванометра при замкнутых накоротко зажимах X , при двух направлениях тока в потенциометре и всех рычагах на нуле, т. е. $z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_5 = z_6 = 0$, а затем отклонения при $z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_5 = 0$ и $z_6 = 1$.²

Пусть в первом случае разность отклонений будет n_0 , а во втором — n_1 (следует учитывать знаки отклонений). Обозначая нулевое сопротивление r_{n_0} , можно написать:

$$\frac{\frac{r_{n_0}}{r_{1,1}}}{\frac{r_{n_0}}{r_{1,1}} + 0,00001} = \frac{n_0}{n_1},$$

откуда

$$\frac{r_{n_0}}{r_{1,1}} = \frac{n_0}{n_1} \left(\frac{r_{n_0}}{r_{1,1}} + 0,00001 \right).$$

¹ Через z_2 обозначено условное показание второй декады.

² z_1, z_2, \dots, z_6 — условные показания декад потенциометра от первой до шестой.

или

$$\frac{r_{нз}}{r_{1,1}} = 0,00001 \frac{n_0}{n_1 - n_0} = 10^{-5} \frac{n_0}{n_1 - n_0}. \quad (16)$$

Измерительное сопротивление состоит из суммы сопротивлений катушек, включенных на различных декадах. Пусть условные показания декад (число включенных катушек) следующие:

$$z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6,$$

где индексами обозначены номера декад. Измерительное сопротивление можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{r_{нз}}{r_{1,1}} &= \frac{\sum_{i=1}^{z_1} r_{1,i}}{r_{1,1}} + \frac{A_{2,1}}{B_2} \frac{\sum_{i=1}^{z_2} r_{2,i}}{r_{2,1}} + \frac{A_{2,1} A_{3,2}}{B_2 B_3} \frac{\sum_{i=1}^{z_3} r_{3,i}}{r_{3,1}} + \\ &+ \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{4,3}}{B_2 B_3 B_4} \frac{\sum_{i=1}^{z_4} r_{4,i}}{r_{4,1}} + \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{4,3} A_{5,4}}{B_2 B_3 B_4 B_5} \frac{\sum_{i=1}^{z_5} r_{5,i}}{r_{5,1}} + \\ &+ \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{4,3} A_{5,4}}{B_2 B_3 B_4 B_5} \frac{D \sum_{i=1}^{z_6} r_{6,i}}{r_{6,1}} + 10^{-5} \frac{n_0}{n_1 - n_0} = F. \end{aligned} \quad (17)$$

Теперь нужно найти выражение для установочного сопротивления. Поскольку в формулу для э. д. с. входит отношение измерительного и установочного сопротивлений, последнее должно быть выражено также в единицах $r_{1,1}$. Значение его, номинально равное $10,180 r_{1,1}$, будет считаться основным и обозначаться $r_{у осн}$. Аналогично часть измерительного сопротивления, номинально равная $10,180 r_{1,1}$, будет обозначаться $r_{н осн}$. Непосредственное сличение этих двух сопротивлений дает

$$\frac{r_{н осн}}{r_{у осн}} = G. \quad (18)$$

По таблицам проверки измерительного сопротивления и по формуле (17), подставив $z_1=10$, $z_2=1$, $z_3=8$ и $z_4=0$, можно найти значение

$$\begin{aligned} \frac{r_{н осн, з}}{r_{1,1}} &= \frac{\sum_{i=1}^{10} r_{1,i}}{r_{1,1}} + \frac{A_{2,1}}{B_2} \frac{r_{2,1}}{r_{2,1}} + \frac{A_{2,1} A_{3,2}}{B_2 B_3} \frac{\sum_{i=1}^8 r_{3,i}}{r_{3,1}} + \\ &+ \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{4,3}}{B_2 B_3 B_4} \frac{\sum_{i=1}^3 r_{4,i}}{r_{4,1}} + 10^{-5} \frac{n_0}{n_1 - n_0} = H, \end{aligned} \quad (19)$$

откуда

$$\frac{r_{у осн, з}}{r_{1,1}} = \frac{r_{н осн, з}}{r_{1,1}} \frac{H}{G} = \frac{H}{G}. \quad (20)$$

Номинальное значение установочного сопротивления r_y может отличаться от $r_{y \text{ осн}}$ так как э. д. с. E_N может не равняться 1,0180 V.

$$\frac{r_y}{r_{1,1}} = 10,180 + 0,001 z_{y_1} + 0,0001 z_{y_2} = K + 10^{-3} z_{y_1} + 10^{-4} z_{y_2} \quad (21)$$

где z_{y_1} и z_{y_2} — условные показания установочных декад потенциометра ($\times 1$ и $\times 0,1$).

Установочные декады $\times 1$ и $\times 0,1$ могут быть сличены с катушками измерительных декад, а именно, первая установочная декада в целом сличается с первой катушкой третьей декады

$$\frac{r_{y \ 1,1-10}}{r_{3,1}} = A_{y \ 1,3} \quad (22)$$

и каждая ее катушка — с первой, откуда получается ряд чисел

$$\frac{r_{y \ 1,1}}{r_{y \ 1,1}}, \frac{r_{y \ 1,2}}{r_{y \ 1,1}}, \frac{r_{y \ 1,3}}{r_{y \ 1,1}}, \dots, \frac{r_{y \ 1,10}}{r_{y \ 1,1}}$$

Суммирование дает:

$$\frac{\sum_{i=1}^{10} r_{y \ 1, i}}{r_{y \ 1,1}} = B_{y1} \quad (23)$$

Точно так же вторая установочная декада в целом сличается с первой катушкой четвертой декады, а затем каждая ее катушка — с первой:

$$\frac{r_{y \ 2,1-10}}{r_{y,1}} = A_{y \ 2,4},$$

$$\frac{r_{y \ 2,1}}{r_{y \ 2,1}}, \frac{r_{y \ 2,2}}{r_{y \ 2,1}}, \frac{r_{y \ 2,3}}{r_{y \ 2,1}}, \dots, \frac{r_{y \ 2,10}}{r_{y \ 2,1}} \quad (24)$$

что дает возможность вычислить сумму

$$\frac{\sum_{i=1}^{10} r_{y \ 2, i}}{r_{y \ 2,1}} = B_{y2} \quad (25)$$

Теперь можно вычислить действительное значение установочного сопротивления:

$$\frac{r_{y \ 1}}{r_{1,1}} = \frac{r_{y \text{ осн } 1}}{r_{1,1}} + \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{y \ 1,3}}{B_2 B_3 B_{y1}} \frac{\sum_{i=1}^{z_{y_1}} r_{y \ 1, i}}{r_{y \ 1,1}} +$$

$$+ \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{4,3} A_{y \ 2,4}}{B_2 B_3 B_4 B_{y2}} \frac{\sum_{i=1}^{z_{y_2}} r_{y \ 2, i}}{r_{y \ 2,1}} = \frac{H}{G} + L, \quad (26)$$

где

$$L = \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{y,1,3}}{B_2 B_3 B_{y,1}} \frac{\sum_{i=1}^{z_{y_1}} r_{y,1,i}}{r_{y,1,1}} + \frac{A_{2,1} A_{3,2} A_{4,3} A_{y,2,4}}{B_2 B_3 B_4 B_{y_2}} \frac{\sum_{i=1}^{z_{y_2}} r_{y,2,i}}{r_{y,2,1}}. \quad (27)$$

Подстановка полученных выражений в формулу (2) для действительного значения измеряемой э. д. с. дает

$$E_{Xa} = E_N \frac{F}{\frac{H}{G} + L}. \quad (28)$$

5. Экспериментальные данные

Опытный экземпляр нового потенциометра был изготовлен заводом „Эталон“ под наименованием „тип ПВ-4“ и получил заводский номер 1. Он был подвергнут исследованию в лаборатории электрических измерений ВНИИМ, которое показало, что некоторая часть катушек прибора имеет довольно значительные погрешности. Эти катушки были подвергнуты подгонке, для чего была изменена конструкция заделки концов обмотки: к ним были припаяны отрезки манганиновой проволоки несколько большего диаметра, чем проволока основной обмотки, которые были закреплены на изолирующей прокладке вдоль образующих цилиндра катушки параллельно друг другу. Благодаря этому стало возможно производить окончательную подгонку этих катушек после установки их в прибор путем подпиливания или соскабливания поверхности припаянных отрезков проволоки. Таким путем катушки с наибольшими погрешностями были доведены до значений, отличающихся от номинала не более чем на 0,001%. После этого была произведена полная поверка потенциометра, которая дала результаты, приводимые ниже применительно к следующей формуле для определения измеряемой э. д. с.

$$E_X = \frac{E_N}{10,1799 + \frac{\sum_{i=1}^{z_{y_1}} r_{y,1,i}}{r_{1,1}} + \frac{\sum_{i=1}^{z_{y_2}} r_{y,2,i}}{r_{1,1}}} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{z_1} r_{1,i} + \sum_{i=1}^{z_2} r_{2,i} + \sum_{i=1}^{z_3} r_{3,i} + \sum_{i=1}^{z_4} r_{4,i} + \sum_{i=1}^{z_5} r_{5,i} + \sum_{i=1}^{z_6} r_{6,i}}{r_{1,1}} + 0,000008 \right) V.$$

где z_1, z_2, \dots, z_6 — условные показания первой, второй, ..., шестой декад,
 $r_{1,1}$ — сопротивление первой катушки первой декады;

$\frac{\sum_{i=1}^{z_1} r_{1,i}}{r_{1,1}}, \frac{\sum_{i=1}^{z_2} r_{2,i}}{r_{1,1}}$ — сопротивления включенных катушек декад, выраженных в долях $r_{1,1}$;

z_{y1} и z_{y2} — условные показания установочных декад, соответствующие десяткам и единицам микровольт в значении э. д. с. нормального элемента.

Эта формула получена из формулы проверки после введения конкретных числовых значений ряда ее членов.

Первая декада ($\times 1000$)

Вторая декада ($\times 100$)

Условные показания (z_1)	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^{z_1} r_{1,i} / r_{1,1}$	Условные показания (z_2)	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^{z_2} r_{2,i} / r_{1,1}$
1	1,00000	1	0,10000
2	2,00003	2	0,20000
3	3,00005	3	0,29999
4	4,00003	4	0,39998
5	5,00011	5	0,49997
6	6,00003	6	0,59997
7	7,00005	7	0,69995
8	8,00008	8	0,79995
9	9,00014	9	0,89995
10	10,00024	10	0,99994
11	11,00020		
12	12,00013		
13	13,00027		
14	14,00024		
15	15,00026		
16	16,00034		
17	17,00036		
18	18,00037		
19	19,00037		

Третья декада ($\times 10$)

Четвертая декада ($\times 1$)

Условные показания (z_3)	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^{z_3} r_{3,i} / r_{1,1}$	Условные показания (z_4)	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^{z_4} r_{4,i} / r_{1,1}$
1	0,01000	1	0,00100
2	0,02000	2	0,00200
3	0,03000	3	0,00300
4	0,04000	4	0,00400
5	0,05000	5	0,00500
6	0,05999	6	0,00600

Условные показания (z_3)	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^z r_{3,i} / r_{1,1}$	Условные показания (z_4)	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^z r_{4,i} / r_{1,1}$
7	0,07000	7	0,00700
8	0,08000	8	0,00800
9	0,09000	9	0,00900
10	0,10000	10	0,01000

Пятая декада ($\times 0,1$)Шестая декада ($\times 0,01$)

Условные показания (z_5)	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^z r_{5,i} / r_{1,1}$	Условные показания (z_6)	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^z r_{6,i} / r_{1,1}$
1	0,00010	1	0,00001
2	0,00020	2	0,00002
3	0,00030	3	0,00003
4	0,00040	4	0,00004
5	0,00050	5	0,00005
6	0,00060	6	0,00006
7	0,00070	7	0,00007
8	0,00080	8	0,00008
9	0,00090	9	0,00009
10	0,00100	10	0,00010

Первая установочная декада ($\times 1$)Вторая установочная декада ($\times 0,1$)

Условные показания (z_{y1})	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^{z_{y1}} r_{y1,i} / r_{1,1}$	Условные показания (z_{y2})	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^{z_{y2}} r_{y2,i} / r_{1,1}$
1	0,00100	1	0,00010
2	0,00200	2	0,00020
3	0,00299	3	0,00030
4	0,00399	4	0,00040

Условные показания (z_{y1})	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^{z_{y1}} r_{y1,i}/r_{i-1}$	Условные показания (z_{y2})	Действительные значения сопротивления $\sum_{i=1}^{z_{y2}} r_{y2,i}/r_{i-1}$
5	0,00500	5	0,00051
6	0,00601	6	0,00061
7	0,00702	7	0,00071
8	0,00802	8	0,00081
9	0,00903	9	0,00091
10	0,01003	10	0,00102

Действительное значение установочного сопротивления, соответствующего э. д. с. нормального элемента 1,0180 V, выраженное в долях $r_{1,1}$,

$$\frac{r_{1-0180}}{r_{1,1}} = 10,1799.$$

Изменения сопротивления, вызываемые перемещениями рычагов третьей, четвертой и пятой декад, — меньше 0,01 Ω . Поверка произведена при температуре 17°C 8 февраля 1947 г.

Результаты поверки показывают, что погрешности потенциометра нигде не превосходят 0,002... 0,003% для показаний, при которых точность отсчета не менее 0,001%, т. е. при измерении э. д. с. не менее 0,1 V. Подгонка сопротивлений могла бы быть произведена еще более тщательно, однако это представлялось нецелесообразным, поскольку нет уверенности, что катушки будут сохранять постоянными свои значения. Имеется в виду произвести вторичную более тщательную подгонку через один-два года, после естественной стабилизации сопротивлений.

После поверки потенциометр был использован в качестве образцового для поверки имеющегося в лаборатории потенциометра № 3977, который ранее был поверен по элементам, с целью оценки точности получаемых при помощи нового потенциометра результатов. Расхождение в результатах, если их относить к значениям, соответствующим показаниям не меньшим 0,1 V, нигде не превосходит 0,001... 0,002%, откуда можно сделать заключение, что новый потенциометр решает задачу простой и быстрой поверки потенциометров без ущерба для точности результатов.

Выводы

Из двух способов проверки потенциометров — путем измерения всех их элементов по отдельности и сравнения с образцовым — последний предпочтительнее вследствие меньшей требуемой.

затраты времени и большей наглядности получаемых результатов. Однако при пользовании в качестве образцового обычным пятидекадным потенциометром возникают неудобства, связанные с необходимостью применения разных схем включения при поверке различных декад, с целью получения отсчета по образцовому потенциометру с достаточным числом значащих цифр. Новый шестидекадный потенциометр позволяет производить всю поверку без изменения схемы включения, давая непосредственно требуемую точность отсчета.

Для получения достоверных результатов поверки весьма важное значение имеет точность определения поправок образцового потенциометра. Поскольку образцовый потенциометр по самому своему положению в поверочной схеме должен поверяться по элементам, целесообразно в качестве образцовых применять потенциометры, допускающие производить их поверку с возможно высокой точностью. Для удовлетворения этого требования новый потенциометр выполнен с открытыми контактами, снабженными гнездами для потенциальных штепселей. Все декады, начиная со второй, состоят из 10 катушек, что облегчает определение соотношений между катушками соседних декад. Для облегчения поверки шестой декады предусмотрены штепсельные переключатели, позволяющие включить ее последовательно в цепь остальных декад.

Поверка по элементам является сложным процессом, требующим большого числа измерений и вычислений. Приведенная в работе формула поверки нового потенциометра однозначно определяет все производимые при поверке операции сравнения катушек прибора и позволяет определять действительное значение измеряемой потенциометром величины. Метод записи процесса поверки в виде математической формулы может быть применен не только к данному прибору, но и к потенциометрам других типов, а также вообще к приборам сопротивления. Его можно распространить и на поверку наборов мер как электрических, так и других физических величин. Он даст возможность наглядного сравнения и оценки различных методов поверки и может быть использован при составлении поверочных инструкций.

Формула поверки является одновременно выражением для действительного значения величины, измеряемой данным прибором, или действительного значения меры, входящей в набор. Поэтому она может быть использована не только при поверке, но и при пользовании результатами поверки.

Наконец, формула поверки может быть подвергнута математическому анализу и дать ответ на вопрос о требуемой точности измерения элементов прибора и о допустимых отклонениях их от номинальных значений. Этот сложный вопрос будет рассмотрен в отдельной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Кронова, Потенциометры. ВНИИМ, 1940.
2. W. Krukowski, Die Genauigkeit der Gleichstromkompensationsmessungen und die Mittel zu ihrer Steigerung, Annales des l'Acad. des Sciences Techn. a Varsovie, 1, 1935, p. 123.
3. F. Wenner and E. Weibel, The testing of potentiometers, Scient. Papers of the Bureau of Standards, No 223, 1914.
4. А. А. Павлова, Потенциометры системы Рапса и методы их поверки. Сборник ВНИИМ „Исследования в области электроизмерительной аппаратуры“ № 16 (32), ОНТИ, 1938.
5. А. А. Павлова, Методы поверки и испытания потенциометров, применяемые в лаборатории постоянного тока ВИМС. Сборник ВИМС № 11 (27) „Электрические измерения“, Стандартгиз, 1936.
6. Ф. Н. Николаев, Теория погрешностей потенциометров. Сборник ВИМС № 11 (27), Стандартгиз, 1936.
7. М. Ф. Маликов, Точные измерения. Стандартгиз, 1935.

СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ

1. Типы стабилизаторов

Измерения с помощью потенциометра постоянного тока возможны только при наличии стабильного источника питания. Обычно таким источником является аккумуляторная батарея, емкость которой выбирается в зависимости от величины потребляемого тока, необходимой длительности измерений, точности и т. д.

Аккумуляторной батарее присущи следующие основные недостатки:

- 1) явление снижения напряжения при разряде;
- 2) необходимость квалифицированного ухода;
- 3) дороговизна и громоздкость устройства в целом.

Наличие источника питания, свободного от этих недостатков, способствовало бы еще более широкому применению компенсационного метода измерений на постоянном токе.

В настоящее время существует большое число типов параметрических стабилизаторов, основанных на использовании электрических цепей с нелинейными характеристиками. В качестве таковых широко применяются феррорезонансные стабилизаторы, а также неоновые стабилизаторы — стабиливольты.

В последние годы была выполнена большая работа, посвященная изучению и разработке источников питания, использующих для целей стабилизации свойства электронных ламп. В результате этих работ удалось создать стабильный источник постоянного тока, отличающийся очень высокими показателями. Его отличительной особенностью являются: возможность в довольно широких пределах плавно регулировать напряжение, высокая степень стабильности на выходе и малое эквивалентное внутреннее сопротивление. Это последнее свойство делает его незаменимым источником питания многих радиосхем. Указанные преимущества во многих случаях вполне искупают как некоторую их сложность, так и их относительно невысокий коэффициент полезного действия.

Достигнутые в этом направлении результаты, а также большая гибкость схем с электронными лампами позволили нам предположить, что дальнейшее развитие этого принципа стабилизации может привести к созданию источника „постоянного тока“, способного заменить аккумуляторную батарею напряжения при потенциометрических измерениях. Мы предполагаем при этом, что колебания напряжения на выходе такого устройства могут быть сделаны столь малыми, что вызванная ими дополнительная погрешность будет значительно меньше допустимой, если не в случае точных метрологических измерений, то хотя бы в случае применения потенциометрических схем для целей поверки вольтметров и ваттметров всех типов и классов.

В электроизмерительных лабораториях поверка и градуировка стрелочных приборов классов 0,2 и 0,5 производится в большинстве случаев с помощью пятидекадных лабораторных потенциометров. Большая точность, получаемая с помощью этих потенциометров, не является для указанных целей необходимой, и более эффективно применение специализированных потенциометров. Из числа известных нам более всего отвечает указанным целям потенциометр с неполной компенсацией. В этом случае погрешность измерения близка к 0,07% и можно считать, что колебание напряжения источника питания потенциометрической схемы в 0,01—0,005% не может привести к заметному увеличению погрешности измерения. Если принять при этом, что в питающей стабилизатор осветительной или силовой сети переменного тока напряжение может меняться на $\pm 10\%$ от номинала, то окажется, что стабилизатор должен обладать коэффициентом стабилизации $k = 1500$.

Произведенное нами исследование большого числа схем стабилизаторов с электронными лампами показало, что все они не обладают столь большим коэффициентом стабилизации, так как они разрабатывались применительно к нуждам радиотехнических схем, для которых коэффициент стабилизации порядка 200—300 более чем достаточен. Таким образом возникла необходимость в выяснении причин, ограничивающих стабилизирующие свойства электронных стабилизаторов, и в создании новой схемы стабилизатора, обладающей большим коэффициентом стабилизации.

2. Ламповые стабилизаторы

Возможность использования электронной лампы для целей стабилизации была установлена при исследовании схем для измерения крутизны анодной характеристики ламп и позднее при изучении мостовых схем для измерения коэффициента усиления ламп. Схемы эти приводятся на рис. 1 и 2.

Из рассмотрения рис. 1 видно, что условием постоянства напряжения на нагрузке r_3 является

$$\frac{r_1 + r_3}{r_1 \cdot r_2} = S.$$

При соблюдении этого условия коэффициент стабилизации, равный отношению процентного изменения напряжения на входе к процентному изменению напряжения на выходе, будет равен (теоретически) бесконечности.

К сожалению, крутизна анодной характеристики

$$S = \frac{di_a}{du_a}$$

является функцией анодного тока и, следовательно, схема не может оставаться сбалансированной для сколько-нибудь широ-

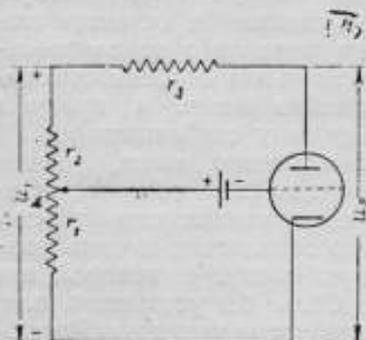


Рис. 1

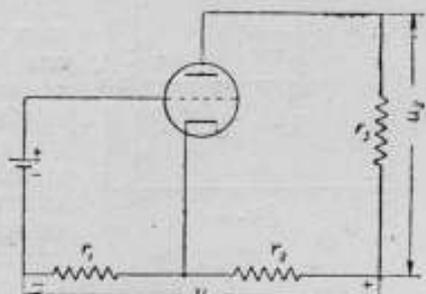


Рис. 2

кого диапазона изменений входного напряжения или тока нагрузки.

По литературным данным, на базе приведенных схем целесообразно создание стабилизаторов для постоянной нагрузки до 50 мА и на напряжение до 500 В при незначительных (до 1%) колебаниях напряжения в питающей сети.

Для схемы рис. 2 очевидно, что при условии

$$\mu = \frac{r_2}{r_1}$$

сила анодного тока в некоторых пределах не будет зависеть от величины стабилизируемого напряжения.

Схемы этого типа особенно целесообразны для постоянной небольшой нагрузки при высоком напряжении. В этом случае, благодаря последовательному включению ламп и нагрузки, для стабилизации напряжения порядка нескольких тысяч вольт могут быть применены обычные приемные лампы без нарушения допустимых для них нагрузок по напряжению.

Одновременно с предыдущей схемой была предложена еще одна схема стабилизатора, получившего название стабилизатора с обратной отрицательной связью.

Схема эта представлена на рис. 3. Здесь лампа включена последовательно между выпрямителем и нагрузкой. Действие схемы аналогично действию последовательно включенного реостата, управляемого выходным напряжением таким образом, чтобы уменьшить изменения этого напряжения.

Коэффициент стабилизации для схемы рис. 3 невысок и в первом приближении не больше коэффициента усиления лампы.

Наряду с указанным недостатком (малый коэффициент стабилизации) эта схема обладает и весьма ценным свойством, заключающимся в том, что путем простого перемещения точки *a* на

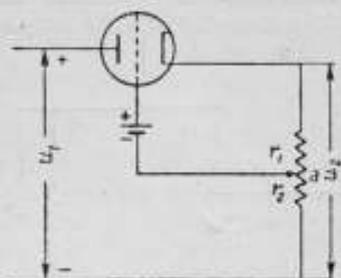


Рис. 3

делителе можно плавно изменять напряжение на выходе стабилизатора, причем это напряжение остается стабильным без каких-либо дополнительных мер. Указанная особенность схемы чрезвычайно ценна и присуща только этому типу стабилизаторов.

Как было указано выше, каждая из рассмотренных схем обладает своими достоинствами и недостатками. Естественно было попытаться создать комбинированную схему, в которой эти недостатки были бы устранены, или,

по крайней мере, уменьшены. В настоящее время таких комбинированных схем, более или менее сложных, имеется большое количество и рассмотреть их все невозможно, тем более, что значительная часть из них является достоянием производящих фирм и не публикуется.

В случаях, к которым относится и интересующий нас, когда стабильный источник питания должен работать с переменной нагрузкой как по току, так и по напряжению, эффективные результаты могут быть получены только от схем третьего типа. На базе скелетной схемы стабилизатора этого типа (рис. 3) путем различного рода усложнений разработано значительное число устройств, обладающих высокими и универсальными свойствами, благодаря которым этот тип схем стал преобладающим в современных технических решениях.

Подобная схема приводится на рис. 4. Она отличается значительной простотой и гибкостью и представляет собой комбинацию усилительного каскада и стабилизатора с обратной связью.

Коэффициент стабилизации для данной схемы может быть получен из выражения:

$$k = 1 + \mu_1(1 + Ak_2) + \frac{R_1}{r_4}$$

где

$$A = \frac{r_3}{R_{i_1} + r_3},$$

$$k_2 = \frac{\mu_2 r_3}{R_{i_1} + r_3 + r(1 + \mu_2)}.$$

Эквивалентное внутреннее сопротивление может быть выражено в виде

$$R_0 = \frac{R_{i_1}}{k - \frac{R_{i_1}}{r_4}}.$$

При всех положительных свойствах рассматриваемых схем стабилизаторов с обратной связью и усилением постоянного тока им до самого последнего времени был присущ и один существенный недостаток. Заключается он в том, что от этих схем нельзя получить сколь угодно большой коэффициент стабилизации, так как сам принцип работы схемы основан на том, что выходное напряжение должно колебаться для получения корректирующего напряжения, противодействующего этим колебаниям. Другими словами, от этого рода схем нельзя добиться полного устранения колебаний напряжения на выходе, вызываемых изменениями входного напряжения, так как корректирующее напряжение берется с той же стороны выхода.

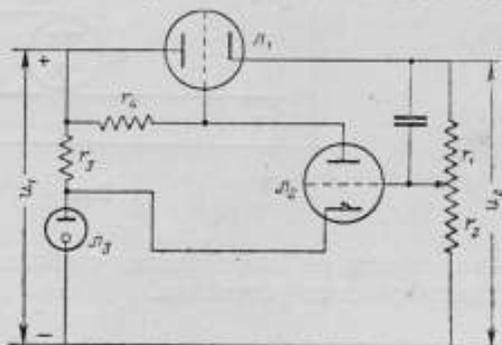


Рис. 4

Исходя из этих соображений, для полного устранения колебаний напряжения на выходе необходимо корректирующее напряжение получать от входного напряжения, так как оно и является причиной этих колебаний. С этой целью на входе стабилизатора помещают специальный делитель напряжения, с помощью которого часть входного напряжения подается на выход — на сетку усилительной лампы. Это весьма простое и эффективное дополнение показано на рис. 5, где все остальные элементы для легкости сравнения оставлены такими же, как и на предыдущем рисунке.

Подобным же образом колебания выходного напряжения, вызываемые изменением тока нагрузки, могут быть устранены, если корректирующее напряжение получать с помощью того же

тока. Очевидно, что таким путем можно получать не только полную компенсацию, но и перекомпенсацию, т. е. при повышении напряжения на входе иметь понижение напряжения на выходе, а эквивалентное внутреннее сопротивление может быть сделано равным нулю и даже отрицательным.

Несмотря на бесспорные преимущества схемы рис. 5, и ей, как будет показано ниже, присущи недостатки, не позволяющие

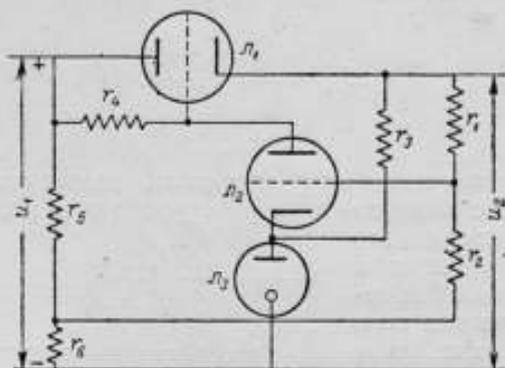


Рис. 5

использовать ее для создания стабилизатора для питания потенциометрических установок.

3. Исследование стабилизаторов с обратной отрицательной связью

К сожалению, опубликованные до сих пор материалы об электронных стабилизаторах не позволяют выбрать уже разработанную или скомпоновать новую схему, отвечающую установленным выше требованиям, без специального исследования. Объясняется это рядом причин.

1. Подавляющее большинство работ посвящено разработке стабилизаторов для питания радиотехнических схем и устройств, для которых стабильность напряжения на выходе порядка 0,2% более чем достаточна.

2. В ряде работ, посвященных теоретическому исследованию интересующих нас стабилизаторов, авторы вынуждены для решения задачи исходить из идеализированных условий их работы, вследствие чего характеристики реальной схемы большей частью очень далеки от полученных математическим путем.

3. Нам представляется бесспорным, кроме того, что в реальных условиях при питании всей схемы стабилизатора от сети переменного тока, колебания напряжения в ней приводят к изме-

нениям напряжения и на лампе тлеющего разряда, и на катодах ламп, и что стабилизирующие свойства схемы лимитируются именно этими факторами. В наших условиях, когда, с одной стороны, мы должны считаться с возможностью значительных колебаний ($\pm 10\%$) напряжения в питающей сети и когда, с другой стороны, предъявляются весьма высокие требования к стабильности выходного напряжения, влияние указанных факторов должно быть особенно резким.

На основании сказанного представлялось необходимым произвести математическое и экспериментальное исследование ряда схем стабилизаторов, раньше чем сделать заключение об их пригодности в качестве источников питания для потенциометрических установок. В этом случае основным интересующим нас свойством стабилизатора является его коэффициент стабилизации, который не должен быть меньше установленной раньше величины. Исследованию стабилизирующих свойств схем мы и уделяем в дальнейшем основное внимание.

Второму характеризующему стабилизатор параметру—эквивалентному внутреннему сопротивлению—величине, несущественной в случае применения его для питания потенциометрических схем постоянного тока, отводится значительно меньше места. Учитывая, однако, что подобного рода стабилизаторы могут найти широкое применение в высокочастотных схемах и установках, для которых этот параметр очень важен, мы и для него даем ниже результаты математического и экспериментального исследования.

Вопросы напряжения на выходе стабилизатора и его мощности в настоящей работе не рассматриваются. Эти параметры легко определяются путем чисто инженерных расчетов мощности и напряжения на выходе выпрямительной части стабилизатора, количества включенных в параллель регулирующих ламп для обеспечения заданного тока нагрузки и т. д.

Математический анализ стабилизатора по схеме, подобной схеме рис. 4, дает в первом приближении для коэффициента стабилизации следующее выражение:

$$k = \frac{1}{Ak_4 \beta_1},$$

где, применительно к обозначениям рис. 4:

$$A = \frac{r_1}{r_1 + r_2},$$

$$k_4 = \frac{\beta_2 r_4}{r_3 + R_i}.$$

Совершенно очевидно, что это выражение одинаково справедливо для очень многих модификаций рассматриваемой схемы.

Сказанное побудило нас вывести выражения для коэффициента стабилизации и эквивалентного внутреннего сопротивления для основных интересующих нас схем.

При выводе мы полагаем, что:

- 1) характеристика ламп прямолинейна,
- 2) падение напряжения на лампе тлеющего разряда постоянно,
- 3) контактная разность потенциалов сетка — катод усилительных и регулировочных ламп постоянна.

Без принятия этих ограничений вывод интересующих нас зависимостей представляется нам по необходимому математическому аппарату чрезвычайно сложным, а может быть и невозможным.

Здесь нужно отметить, что приводимый ниже вывод и полученные выражения для коэффициента стабилизации и эквивалентного внутреннего сопротивления кажутся нам справедливыми для всех частот до звуковых включительно. Для более высоких частот, благодаря распределенной емкости схем и запаздыванию ионизации в лампе тлеющего разряда, указанные выражения должны приобрести комплексный вид.

Вывод интересующих нас выражений приводится для схемы рис. 4, где:

A_1 — регулирующая лампа стабилизатора,

A_2 — лампа усилителя постоянного тока,

A_3 — лампа тлеющего разряда.

В дальнейшем везде приняты следующие обозначения:

u_1 — напряжение на входе стабилизатора,

u_2 — напряжение на выходе стабилизатора,

u_a — напряжение анод — катод лампы,

u_s — напряжение сетка — катод лампы,

u_r — напряжение анод — катод лампы тлеющего разряда,

u_c — напряжение питающей сети,

i_a — анодный ток лампы,

i_s — выходной ток стабилизатора,

r_s — внутреннее сопротивление ламп тлеющего разряда,

R, μ, S — параметры ламп.

Выходное напряжение стабилизатора является приблизительно линейной функцией входного напряжения и выходного тока, т. е.

$$u_2 = a + bu_1 + ci_2, \quad (1)$$

где a, b, c — постоянные, подлежащие исследованию.

Постоянная a определяется произвольной регулировкой выходного напряжения и не представляет интереса.

Постоянная b определяется как частная производная

$$b = \frac{\partial u_2}{\partial u_1} = \frac{1}{k}.$$

В принятой у нас терминологии величине k присвоено название коэффициента стабилизации.

Постоянная c определяется как частная производная

$$c = \frac{\partial u_2}{\partial i_2} = -R_s,$$

где R_s — эквивалентное внутреннее сопротивление стабилизатора. Минус указывает на то, что увеличение выходного тока обычно вызывает уменьшение выходного напряжения, обусловленное падением напряжения на положительном внутреннем сопротивлении.

Если полученные коэффициенты ввести в уравнение (1), то получим:

$$u_2 = a + \frac{1}{\mu} u_1 - R_s i_2. \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает, что для уменьшения зависимости выходного напряжения от изменения входного напряжения и тока нагрузки коэффициент k должен быть возможно большим, а R_s — возможно малым.

Пользуясь основными соотношениями схемы рис. 4 для интересующих нас коэффициентов, можно получить выражения:

$$k = \frac{\partial u_1}{\partial u_2} = \frac{1 + \mu_1 \left[1 + \frac{r_2}{r_1 + r_2} \cdot \frac{\mu_2 r_4}{Rl_2 + r_4} \cdot \frac{1}{1 + \mu_2 r_1 / (Rl_2 + r_1)} \right]}{1 + \mu_1 \left[1 - \frac{(1 - \mu_2 r_1 / r_1 + r_1) r_4}{Rl_2 + r_4} \cdot \frac{1}{1 + \mu_2 r_1 / (Rl_2 + r_1)} \right]}; \quad (3)$$

$$R_s = \frac{\partial u_2}{\partial i_2} = \frac{1}{S \cdot 10^{-3} \left[1 + \frac{r_2}{r_1 + r_2} \cdot \frac{\mu_2 r_4}{Rl_2 + r_4} \cdot \frac{1}{1 + \mu_2 r_1 / (Rl_2 + r_1)} \right] + \frac{1}{Rl_1}}. \quad (4)$$

Исследование уравнений (3) и (4) показывает, что для получения большого коэффициента стабилизации и малого внутреннего сопротивления необходимы одни и те же следующие условия.

1. Крутизна регулировочных ламп должна быть возможно большой, что вполне оправдывает применение у нас ламп типа 6Ф6 или 6Л6, а также ламп 2А3 и 807.

2. Коэффициент усиления регулировочных ламп должен быть в несколько раз больше единицы, но значение его несущественно.

3. Отношение $\frac{r_2}{r_1 + r_2}$ должно быть возможно большим. Так как это отношение почти равняется μ_1 , то желательно было бы применение ламп тлеющего разряда с высоким потенциалом зажигания. Это условие удовлетворяется лампами с электродами из чистых металлов, что желательно, как показано ниже, и с других точек зрения. Но применение ламп с большим μ_1 ограничивает степень регулирования напряжения на выходе стабилизатора, ибо, что очевидно, при μ_1 , равном, например, 150 V, напряжение на выходе не может быть сделано меньше этой величины. С другой стороны, эта величина $\left(\frac{r_2}{r_1 + r_2} \right)$ не является

постоянной для различных напряжений на выходе, так как именно изменением ее достигается регулирование напряжения стабилизатора. При увеличении этой величины напряжение на выходе уменьшается, и наоборот. Можно ожидать, следовательно, что по мере уменьшения выходного напряжения коэффициент стабилизации будет увеличиваться.

4. Коэффициент стабилизации схемы увеличивается, а эквивалентное внутреннее сопротивление уменьшается при увеличении усиления усилительного каскада, что оправдывает применение на практике в качестве ламп A_2 триодов с большим μ или пентодов.

5. Крупным дефектом схемы рис. 4 является значительная зависимость напряжения на лампе тлеющего разряда от входного напряжения.

Этот крупный недостаток схемы рис. 4 легко может быть устранен, или, по крайней мере, уменьшен перенесением точки питания лампы тлеющего разряда со входа стабилизатора на его выход. Очевидно, что в этом случае напряжение на лампе тлеющего разряда будет меньше зависеть от колебаний входного напряжения соответственно коэффициенту стабилизации.

Коэффициент стабилизации и эквивалентное внутреннее сопротивление видоизмененной таким образом схемы могут быть представлены выражениями:

$$k = \frac{1 + \mu_1 \left[1 + \frac{\mu_2 r_4}{R_{i_2} + r_4} \left(\frac{r_2}{r_1 + r_2} - \frac{r_T}{r_1 + r_n} \right) \frac{1}{1 + \mu_2 r_T / (R_{i_2} + r_4)} \right]}{1 + \mu_1 \left[1 - \frac{r_4}{R_{i_2} + r_4} \cdot \frac{1}{1 + \mu_2 r_T / (R_{i_2} + r_4)} \right]} \quad (5)$$

$$R_s = \frac{1}{S \cdot 10^{-3} \left[1 + \left(\frac{r_2}{r_1 + r_2} - \frac{r_T}{r_1 + r_n} \right) \cdot \frac{\mu_2 r_4}{R_{i_2} + r_4} \cdot \frac{1}{1 + \mu_2 r_T / (R_{i_2} + r_4)} \right] + \frac{1}{R_{i_2}}} \quad (6)$$

Все выводы, сделанные нами из уравнений (3), (4), (5) и (6), как и сами уравнения, были подвергнуты экспериментальной проверке, для чего была осуществлена схема, подобная представленной на рис. 4.

В реально осуществленной схеме:

A_1 — две лампы типа 6Ф6, включенные параллельно в триодном включении с $S = 7 \text{ mA/V}$, $\mu = 8$ и $R_{i_1} = 1300 \Omega$;

A_2 — лампа типа 6Ф5, $\mu = 100$, $R_{i_2} = 70\,000 \Omega$;

A_3 — лампа тлеющего разряда — неоновая — „пяточковая“ на 220 V без буферного сопротивления; $u_T = 150 \text{ V}$ и $r_T = 780 \Omega$ в рабочей точке.

Для экспериментального исследования была собрана схема, представленная на рис. 6, в которой, кроме стабилизатора с выпрямителем, включено:

1 — реостат на 0,8 А, 40 Ω для изменения напряжения на входе выпрямителя;

2 — ключ, позволяющий закоротить введенную часть реостата и тем самым толчком изменить входное напряжение;

3 — вольтметр класса 0,5 для измерения напряжения на входе;

4 — миллиамперметр на 150 мА класса 0,5 для измерения тока нагрузки;

5 — реостат на 10 000 Ω — нагрузка стабилизатора;

6 — вольтметр класса 0,5 для грубого измерения напряжения на выходе стабилизатора;

7 — потенциометрическая установка для точного измерения напряжения на выходе.

Определение интересующих нас величин в этой схеме достаточно просто. Коэффициент стабилизации находится как отношение изменения напряжения на входе к соответствующему изменению выходного напряжения. Первая величина определяется как разность двух отсчетов по вольтметру, включенному на входе выпрямителя, а вторая — как разность двух отсчетов на потенциометре. Величина эквивалентного внутреннего сопротивления стабилизатора определяется как отношение изменения напряжения на выходе к вызывающему изменению току нагрузки. Так как при определении значения коэффициента стабилизации и эквивалентного внутреннего сопротивления ошибка в 10% не является существенной, то принятый метод и аппаратура вполне обеспечивали нужную точность измерений.

Собранная схема стабилизатора проверялась и регулировалась перед каждой серией измерений, а сами измерения производились через полчаса после включения стабилизатора. За этот промежуток времени все детали схемы, лампы, сопротивления и пр. успевали приобрести установившуюся температуру, что обеспечивало надежность и повторимость результатов измерений. Измерение коэффициента стабилизации производилось для напряжений на выходе стабилизатора в 350, 300, 250 и 200 В при $r_r = 500 \Omega$. Напряжение в сети менялось с помощью реостата от 110 до 130 В.

Эта зависимость была определена как для основной схемы (рис. 4), так и для видоизмененной схемы, в которой лампа тлеющего разряда включена на выходе стабилизатора. Полученные результаты представлены на рис. 7. Здесь кривая 1 дает зависимость $k = f(u_2)$ при $r_r = 500 \Omega$ для схемы рис. 4, кривая 2 — ту же зависимость при $r_r = 300 \Omega$, и кривая 3 — для измененной схемы при $r_r = 200 \Omega$.

Экспериментальной проверке подверглись также зависимость коэффициента стабилизации от коэффициента усиления усилительного каскада и от внутреннего сопротивления $\left(r_r = \frac{du_r}{di_r}\right)$ лампы тлеющего разряда. Соответствующие кривые приведены на рис. 9.

На рис. 7 дана также зависимость $R_s = f(u_2)$, полученная экспериментальным путем. Эти результаты полностью подтверждают выводы, которые были нами сделаны при анализе приведенных выше уравнений, и позволяют считать установленным следующее.



Рис. 6

1. Стабилизирующие свойства схемы в значительной степени определяются характеристикой лампы тлеющего разряда и режимом ее работы.

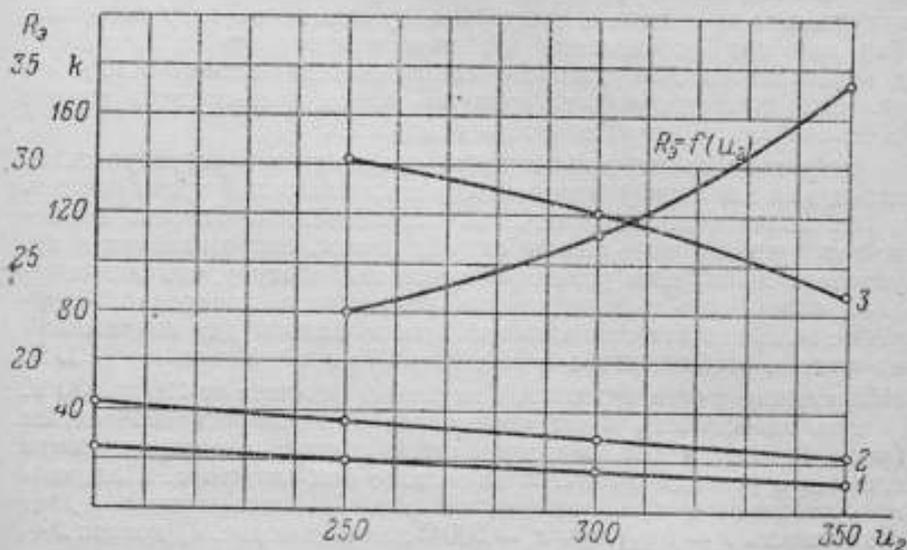


Рис. 7

Из кривой $k = f(r_v)$ рис. 8 следует, что уменьшение внутреннего сопротивления лампы тлеющего разряда с 1000 до 300 Ω приводит к увеличению коэффициента стабилизации в три раза. Включение лампы тлеющего разряда на выходе стабилизатора, уменьшающее зависимость падения напряжения на ней от коле-

баний входного напряжения, приводит к увеличению коэффициента стабилизации приблизительно в четыре раза.

2. Коэффициент стабилизации схемы не превышает 140.

3. Эквивалентное внутреннее сопротивление стабилизатора велико и определяется, благодаря малому k , главным образом сопротивлением выпрямителя постоянному току.

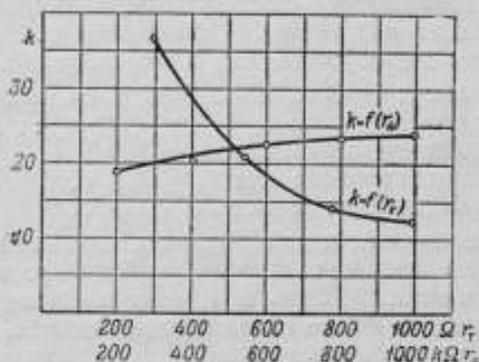


Рис. 8

4. Резкое увеличение коэффициента стабилизации не может быть достигнуто за счет увеличения коэффициента усиления усилительного каскада.

Высокий коэффициент стабилизации рассмотренной схемы, вообще говоря значительно более высокий, чем у всех других типов стабилизаторов, не является, тем не менее, ни предельным, ни достаточным с точки зрения поставленной нами задачи.

Как нами указывалось выше, этот недостаток — невозможность получить сколь угодно большой коэффициент стабилизации от рассматриваемых схем — в значительной степени устраняется с помощью весьма простого дополнения. Схема с таким дополнением дана на рис. 5. В этой так называемой компенсированной схеме с помощью специального делителя (r_3, r_4) часть входного напряжения прикладывается к управляющей сетке усилительной лампы. Для каждого данного напряжения на выходе стабилизатора можно подобрать такое значение r_4 , что оно станет независимым от изменения входного напряжения, и для выходного напряжения коэффициент стабилизации будет тогда равен бесконечности.

В реальных условиях, благодаря криволинейности характеристик электронных ламп, подобное заключение не вполне справедливо. И действительно, полученная опытным путем зависимость напряжения на выходе от входного напряжения дает для коэффициента стабилизации значение

$$k_{\text{max}} \approx 1400$$

вместо теоретического значения

$$k_{\text{теор}} = \infty.$$

Этот результат, несмотря на расхождение между опытными и теоретическими данными, нужно признать блестящим, так как чрезвычайно простое изменение, внесенное в схему рис. 4, привело к увеличению коэффициента стабилизации примерно в 10 раз.

Схема, изображенная на рис. 5, была нами собрана и исследована точно таким же образом, как и предыдущие.

При напряжениях в 350, 300 и 250 V на выходе стабилизатора были сняты зависимости $u_2 = f(u_1)$ для трех случаев:

- 1) схема скомпенсирована для $u_2 = 360$ V,
- 2) схема скомпенсирована для $u_2 = 300$ V,
- 3) схема скомпенсирована для $u_2 = 250$ V.

Для этой схемы, как и для других с питанием лампы тлеющего разряда со стороны выхода стабилизатора, напряжение меньше 250 V не могло быть получено из-за неустойчивой работы этой лампы при более низких напряжениях.

Экспериментальное исследование схемы позволяет заключить следующее.

1. Схема обладает очень высокими стабилизирующими свойствами.

2. Равенство коэффициента стабилизации бесконечности имеет место, если определять его как $\frac{\Delta u_1}{u_1} : \frac{\Delta u_2}{u_2}$, в известных пределах изменения u_1 . В действительности же напряжение на выходе стабилизатора меняется (правда, незначительно) при изменении входного напряжения даже в скомпенсированных точках, что объясняется криволинейностью характеристик электронных ламп.

3. Коэффициент стабилизации имеет разное значение для разных напряжений на выходе, но для каждого заданного напряжения его реальное значение может быть доведено до $k \approx 1500$. Выбор выходного напряжения в рабочем диапазоне стабилизатора, для которого схема компенсируется, существенным образом влияет на зависимость $k = f(u_2)$. Соответствующие кривые приведены на рис. 9. Для удобства изображения на нем даны зависимости $\frac{1}{k} = f(u_2)$ для случая компенсации выходного напряжения в 250, 300 и 350 V.

4. В зависимости от настройки коэффициент регулирования, величина обратная коэффициенту стабилизации, имеет и отрицательное значение. Это свидетельствует о перекомпенсации схемы, когда повышение напряжения на входе приводит к понижению выходного напряжения и наоборот.

Таким образом схема по своим стабилизирующим способностям во много раз превосходит как все исследованные, так и другие

известные нам схемы. К сожалению, эти возможности могут быть целиком использованы только при фиксированном напряжении на выходе стабилизатора. При отходе от этого напряжения коэффициент стабилизации резко, в значительно большей степени, чем у других схем, падает.

В большинстве случаев применения этот недостаток не является существенным, тем более, что высокая стабильность для каждого выходного напряжения может быть восстановлена специальной регулировкой. Там же, где требуется предельная стабильность по всему диапазону выходного напряжения без дополнительной подрегулировки, этот недостаток в значительной степени умаляет достоинства схемы, что в полной мере относится и к предполагаемому нами использованию стабилизатора. Недостаточная стабильность напряжения на выходе стабилизатора, питающего стрелочный прибор, может привести к колебаниям его подвижной системы и тем самым уменьшить или устранить вариацию прибора раньше, чем регулировкой будет восстановлена высокая стабильность данного напряжения. Так как при проверке прибора должны быть определены его погрешность и вариация, то указанный недостаток рассматриваемой схемы делает ее непригодной для нашей цели.

Как уже указывалось, теоретический анализ работы электронного стабилизатора возможен при условии ряда перечисленных выше допущений. Но кроме указанных причин, имеет место еще одно явление, влияющее на работу стабилизатора в не меньшей степени, чем рассмотренные: в условиях, когда стабилизатор полностью питается от сети переменного тока, колебания напряжения в ней приводят не только к изменениям входного напряжения (u_1), но и к изменениям напряжения накала (u_n) усилительных и регулирующих ламп. Учесть последнее обстоятельство при теоретическом анализе стабилизатора не представляется возможным.

Катоды современных приемно-усилительных ламп, в том числе и примененных нами, принадлежат к числу так называемых оксидных катодов, эмиссионная способность которых, согласно

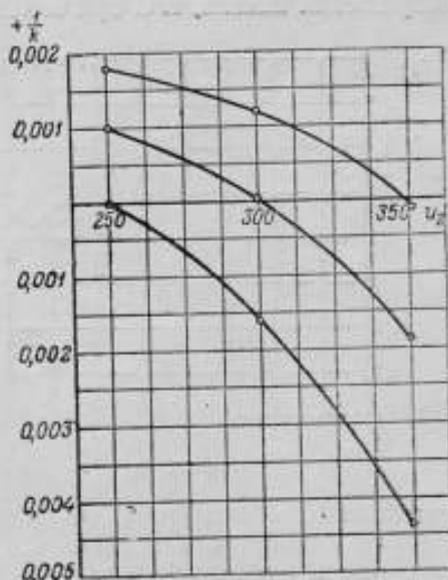


Рис. 9

общепринятой в настоящее время теории объясняется присутствием свободного барьера на поверхности катода. При изменении напряжения накала, т. е. при изменении температуры катода, количество свободного барьера на поверхности катода меняется и, следовательно, меняется его работа выхода. При повышении температуры катода, количество барьера уменьшается, что приводит к возрастанию работы выхода.

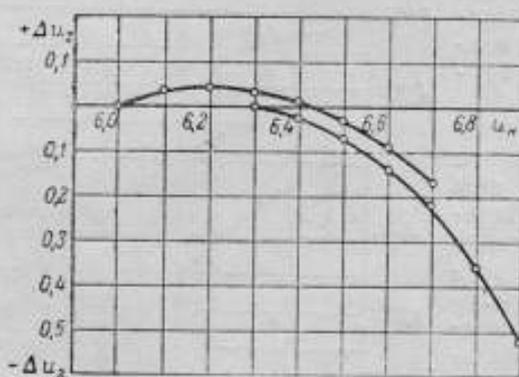


Рис. 10

Приведенные положения позволили наметить и провести ряд экспериментов, подтвердивших зависимость выходного напряжения стабилизатора от режима катодов его ламп.

Если сказанное действительно имеет место, то нужно было ожидать, что повышение напряжения в питающей сети приведет к повышению температуры катода и к увеличению работы выхода, что равносильно появлению между сеткой и катодом положительной э. д. с., и, в конце концов, к понижению напряжения на выходе стабилизатора.

Зависимость выходного напряжения от напряжения накала лампы стабилизатора приведена на рис. 10. Измерения напряжения на выходе производились через 2 минуты после установления нового значения нагрузки с тем, чтобы они относились к установившейся температуре катодов.

Обе полученные кривые с несомненностью свидетельствуют о сильном влиянии режима катодов лампы стабилизатора на его выходное напряжение и именно в том направлении, которое нами ожидалось.

Следующий эксперимент был направлен на выявление временной зависимости выходного напряжения от режима катода. Такая зависимость должна иметь место, если изменение напряжения выхода действительно вызывается изменением контактной разности потенциалов сетка — катод лампы.

Как и в предыдущем случае, накал лампы стабилизатора питался от независимого трансформатора. После включения стабилизатора и получения устойчивого напряжения на выходе, напряжение накала лампы повышалось толчком на 10% путем закорачивания части реостата специальным ключом, включенным в первичную обмотку трансформатора. Одновременно пускался секундомер

и напряжение на выходе стабилизатора измерялось через каждые 5 секунд. После того, как напряжение на выходе приобрело новое, но устойчивое значение, ключ размыкался, и таким обра-

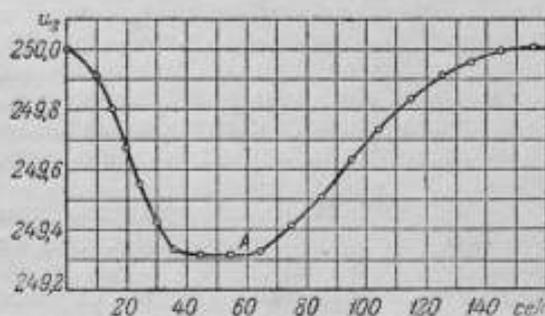


Рис. 11

зом напряжение накала возвращалось к исходному значению. Требуемая в этом опыте быстрота измерений была обеспечена применением неуравновешенного потенциометра.

Результаты опыта представлены в виде кривой на рис. 11. Точка А на кривой соответствует моменту размыкания ключа.

Вид полученной кривой вполне подтверждает наше предположение. В течение первых 40 секунд (падающая часть кривой) довольно быстро устанавливается повышенная температура катода, при которой происходит испарение части свободного бария с поверхности, что приводит к увеличению работы выхода и к понижению выходного напряжения. Вторая часть кривой свидетельствует о понижении температуры катода и относительно медленной диффузии свободного бария из толщи оксидного слоя на поверхность с постепенным понижением работы выхода и соответствующим повышением напряжения на выходе стабилизатора.

Эти опыты с несомненностью, по нашему мнению, свидетельствуют, что наблюдаемое изменение выходного напряжения вызывается изменением температурного режима катодов ламп стабилизатора.

4. Двухкаскадный стабилизатор

Приведенные выше результаты исследования различных вариантов схемы стабилизатора с обратной связью и усилением постоянного тока позволили уточнить их характеристики, установить влияние различных факторов на их стабилизирующие свойства и выявить причины, их ограничивающие.

К сожалению, при всех их положительных свойствах, ни одна из рассмотренных схем, в том числе и самая совершенная из

них — компенсированная схема не удовлетворяют, как это было показано выше, требованиям, которые должны быть к ним предъявлены в случае использования их в качестве источника питания при потенциометрических измерениях.

В этом случае основным является величина коэффициента стабилизации, которая не должна быть меньше 1500 (без дополнительного регулирования) при любом напряжении на выходе стабилизатора при изменении его в пределах от 0 до 300 V.

Как было показано выше, стабилизирующие способности стабилизаторов на электронных лампах ограничиваются главным образом наличием:

1) зависимости напряжения на электродах лампы тлеющего разряда от входного напряжения (с учетом схемы ее включения и режима работы);

2) зависимости выходного напряжения от температурного режима катодов ламп, т. е. от напряжения (в конечном счете) питающей сети.

Установленная нами зависимость выходного напряжения от температуры катодов ламп может быть устранена применением специального стабилизатора напряжения накала ламп.

Необходимая степень стабильности напряжения накала ламп может быть достигнута с помощью или барретора или феррорезонансного стабилизатора. Последний способ, как безинерционный, нужно предпочесть, если в питающей сети частота колеблется не больше чем на 0,5%. В противном случае, лучшие результаты могут быть получены более простым путем, с помощью барретора. К сожалению, тепловая инерция барретора и подогревного катода ламп различны, вследствие чего применение его дает худшие против расчетных результаты. Труднее решение вопроса об обеспечении питания лампы тлеющего разряда стабильным напряжением. Обычно принятое для этого включение ее на выходе стабилизатора имеет свои, как показано выше, недостатки. В этом случае лампа вынуждена работать в различных режимах при изменении напряжения на выходе, с одной стороны, и, кроме того, это приводит к ограничению пределов регулирования.

Благодаря сказанному, попытки получения высокого коэффициента стабилизации, с одновременным сохранением широкого диапазона регулируемого напряжения на выходе, обречены на неудачу.

В разработанной нами схеме это противоречие разрешается созданием двухкаскадного стабилизатора. В нем на долю первого каскада падает получение возможно большей стабильности выходного напряжения, а на долю второго — регулирование напряжения в возможно более широком диапазоне. Это разделение двух основных задач стабилизатора позволяет решить каждую из них наилучшим образом.

Это решение является, по нашему мнению, единственным. Может оказаться целесообразным применение вместо первого

каскада феррорезонансного стабилизатора. В качестве второго каскада тогда может быть использована схема электронного стабилизатора с лампой тлеющего разряда на входе и с компенсацией.

Отсутствие у нас феррорезонансного стабилизатора необходимой мощности, к сожалению, лишило нас возможности выяснить свойства такого комбинированного стабилизатора.

Необходимое резкое повышение коэффициента стабилизации в нашей схеме достигается не усложнением усилителя постоянного тока (малая эффективность этого способа была показана выше), а применением компенсационной схемы. Прекрасные свойства этого метода в нашей схеме используются в полной мере, так как на выходе первого каскада мы имеем постоянное, не изменяемое напряжение.

Вторая задача — задача регулирования напряжения на выходе стабилизатора в возможно более широких пределах — может быть решена различными способами. Применение нами для этой цели второго каскада по схеме стабилизатора с обратной связью и усилением постоянного тока имеет то преимущество, что попутно с решением основной задачи мы получаем и дальнейшее повышение коэффициента стабилизации всего устройства в целом. При этом основная задача решается компактнее и с меньшей потерей стабилизированного тока в параллельных цепях, чем в случае, например, применения для такой же цели делителя напряжения. Скомпонованная таким образом схема приводится на рис. 12. И в первом и во втором каскаде в качестве регулирующих применены лампы типа 6Ф6, а в качестве усилительных — лампы типа 6Ф5. Другие элементы схемы легко определяются, если установить необходимое максимальное напряжение на выходе и ток нагрузки.

Стабилизатор был собран по приведенной схеме и после длительной регулировки, позволившей установить наиболее выгодные значения элементов схемы, подвергнут всестороннему исследованию.

При этом было установлено следующее.

1. Время разогрева стабилизатора, т. е. время с момента включения до получения устойчивого значения выходного напряжения, связанного с постепенным разогревом лампы и деталей схемы, равно 15—20 минутам.

2. После непрерывной восьмичасовой работы при токе нагрузки в 100 мА, начальное напряжение на выходе стабилизатора в 250 В уменьшилось на 0,055 В. При этом стабилизатор питался от осветительной сети переменного тока с обычными для нее колебаниями по частоте и напряжению. Этот результат нужно признать вполне удовлетворительным. Он может быть еще улучшен, если в схеме применить сопротивления с малым температурным коэффициентом.

3. При выключении и повторном включении стабилизатора напряжение на нем иногда меняется против первоначального на

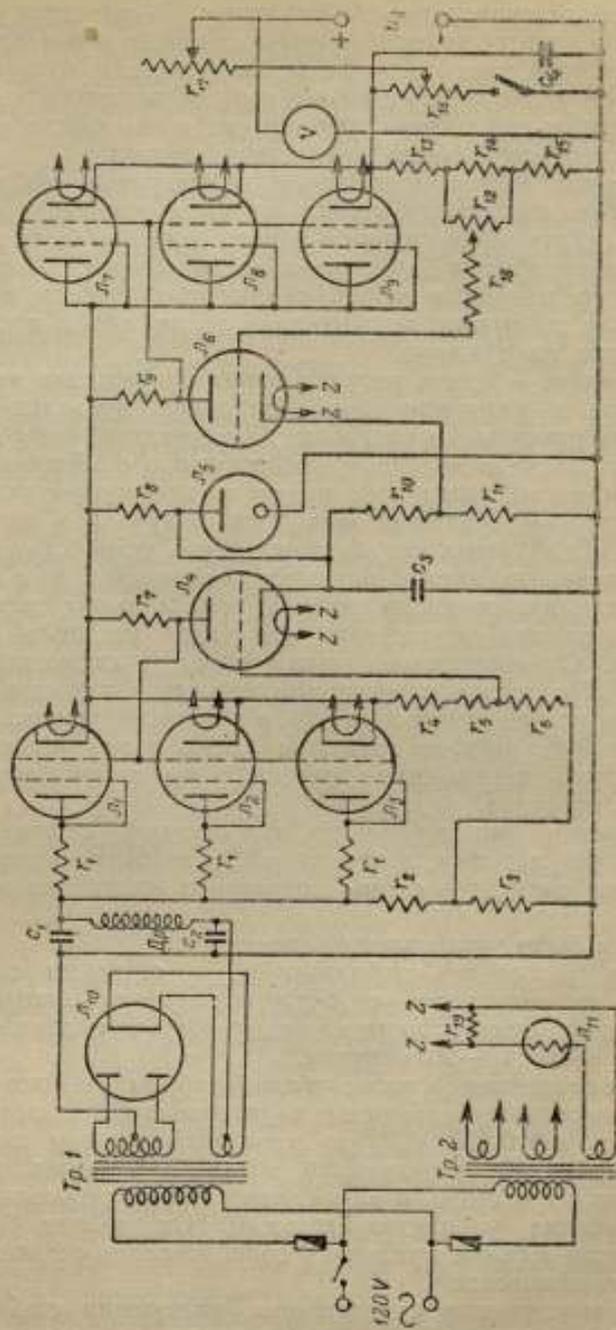


Fig. 12

величину до 0,2 В, что может быть объяснено пространственным смещением разряда в неоновой лампе.

4. При напряжениях в 300, 250 и 200 В на выходе было измерено эквивалентное внутреннее сопротивление стабилизатора

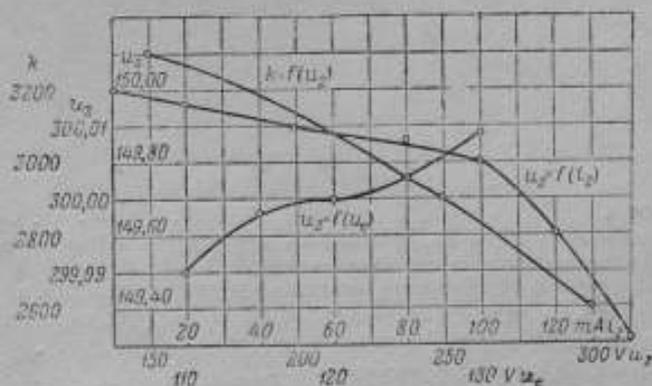


Рис. 13

при изменении тока нагрузки от 0 до 100 мА. В всех случаях оно оказалось равным

$$R_s = 2 \Omega.$$

На рис. 13 дана зависимость $u_2 = f(I_2)$ для $u_1 = 250$ В.

5. От данного экземпляра стабилизатора можно получить на выходе ток в 100 мА. Эта величина может быть легко изменена путем включения в параллель нужного числа регулирующих ламп принятого нами типа или применением более мощных ламп, если такие будут выпущены промышленностью.

6. Стабилизирующие способности схемы определялись обычным способом, путем измерения напряжения на выходе стабилизатора с помощью потенциометра. Результаты измерений представлены в виде кривых $u_2 = f(u_1)$ и $k = f(u_1)$ на рис. 13.

7. Схема допускает регулирование напряжения на выходе от 0 до 300 В, и коэффициент стабилизации ее остается не меньше 2800 для любого напряжения в указанном диапазоне.

Таким образом, двухкаскадный стабилизатор отвечает всем тем требованиям, которые могут быть предъявлены к источнику питания потенциметрических установок постоянного тока для проверок и регулировки стрелочных приборов. Последнее подтверждается результатами многократных сравнительных проверок стрелочных приборов при питании их от стабилизатора и аккумуляторной батареи.

СОДЕРЖАНИЕ

От редактора	3
Б. М. Яновский. Работы Главной палаты мер и весов и Всесоюзного изучно-исследовательского института им. Д. И. Менделеева по установлению и поддержанию эталонов электрических единиц . . .	4
И. Н. Кротков. Чувствительность электрических измерительных цепей	28
К. П. Широков. Новый шестидекадный потенциометр	45
И. И. Гейман. Стабилизатор напряжения	75

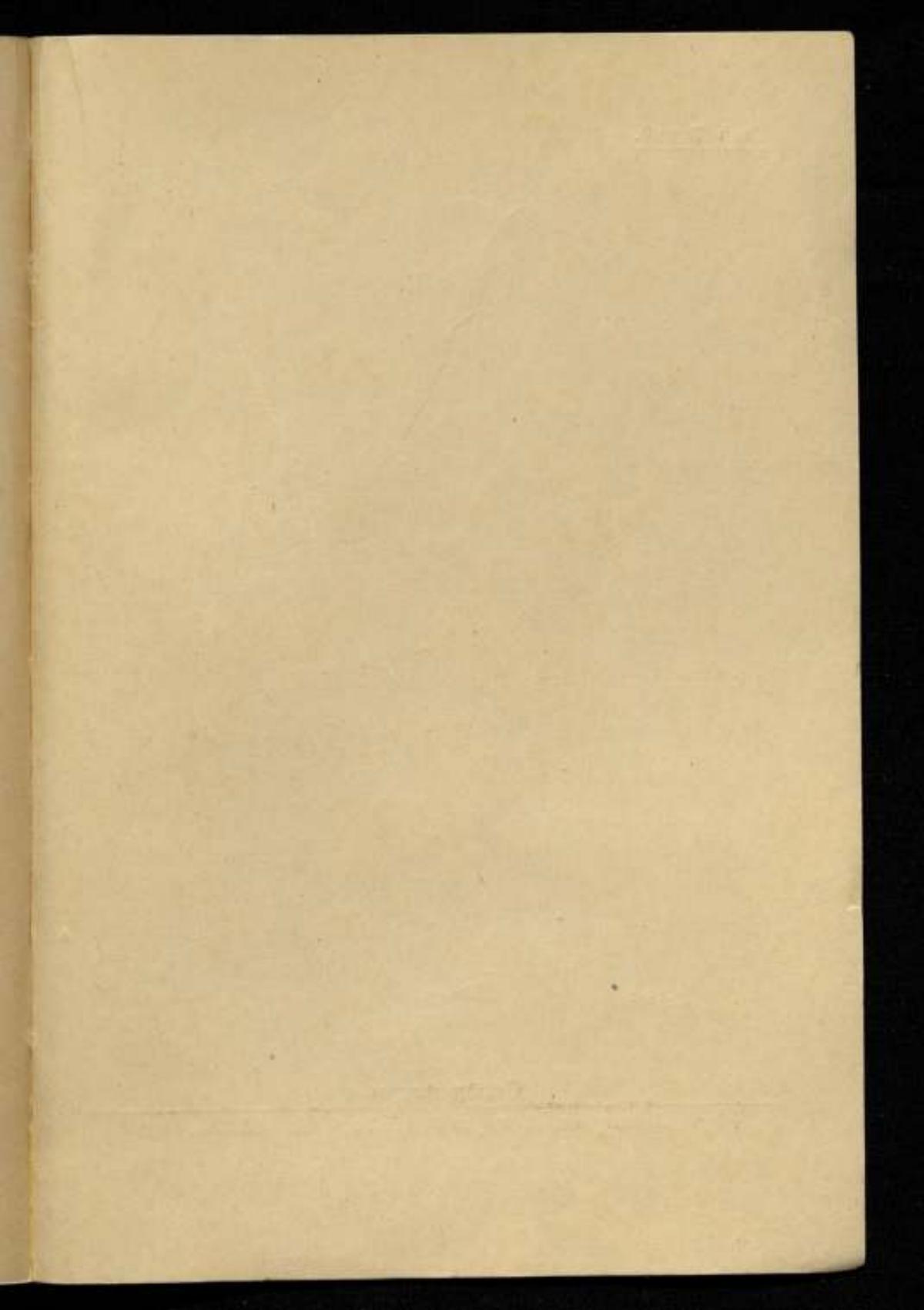
Ответственный редактор проф. *Б. М. Яновский*

Технический редактор *А. А. Двораковская*

Корректор *Н. А. Кнохе*

М-01388. Сдано в набор 1/XI-48 г. Подписано к печати 9/III 1949 г. Формат
бумаги 60×92₁₆. Печ. л. 6. Учетн.-авт. л. 6,5. Тираж 1200 экз. Заказ 1577.

Типография № 3 Управления издательства и полиграфии Исполкома
Ленгорсовета



Цена 7 руб.

Склад издания

Ленинград, Международный пр., 19. ВНИИМ