

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
И.М. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА**

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 39 (99)

«СТАНДАРТГИЗ»

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

1980

Ж 122998
Э 66881 Ж

900005

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
при СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

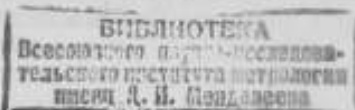
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 39 (99)

Под редакцией
канд. техн. наук **Е. Т. ЧЕРНЫШЕВА**



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
«СТАНДАРТГИЗ»
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1960

ЖС 122995

Ответственный редактор директор ВНИИМ
д-р техн. наук проф. В. О. АРУТЮНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник трудов Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева посвящен исследованиям в области электрических измерений.

Из статей, помещенных в настоящем сборнике, в первую очередь следует отметить работы в области эталонов электрического сопротивления и электродвижущей силы. Эти эталоны имеют наиболее долгую историю изучения, причем международные сличения дают возможность составить наиболее полную картину их состояния.

Этому вопросу посвящены в настоящем сборнике статьи «Состояние эталонов единицы электрического сопротивления» — авторы С. В. Горбачевич, А. Н. Индик и А. И. Петунова и «Состояние государственного эталона вольта СССР» — авторы А. К. Колосов и Е. А. Чалова.

Развитие точных электрических измерений связано не только с методическими вопросами, но и с изучением физических процессов, приводящих к изменению воспроизводимой ими величины.

В статье В. В. Мюллер «Естественное старение нормальных элементов», помимо теоретического рассмотрения природы старения, приводится экспериментальный материал, подтверждающий в основном теорию Шоу и позволивший определить период вызревания нормальных элементов и сформулировать рекомендации по хранению эталона вольта.

Повышение точности сличений мер электрического сопротивления и э. д. с. зависит от учета систематических погрешностей измерения. Этим вопросам посвящены статьи С. В. Горбачевича «О систематических погрешностях при сравнении сопротивлений компенсационным методом» и З. И. Зеликовского «О влиянии температуры при сличении нормальных элементов».

Вопросы влияния нагрузки током на величину электрического сопротивления при точных измерениях манганиновых катушек сопротивления рассматриваются в статье Е. К. Вессо-Адо.

Проблема так называемых нагрузочных коэффициентов по существу еще окончательно не решена и выводы, к которым приходит автор на основе обширного экспериментального материала, являются ценными, так как позволяют устранять нагрузочные погрешности путем введения в температурную формулу поправки на превышение температуры элемента сопротивления над температурой окружающей среды.

К области теоретических работ относится статья Е. Ф. Долинского «Оценка погрешности группового эталона э. д. с.», в которой для хранения единицы э. д. с. на основе результатов сличений даются новые рекомендации, вытекающие из положений математической статистики.

Эталоны ома и вольта на постоянном токе с эталонами генри и фарады на переменном токе составляют в настоящее время метрологическую основу электрических измерений.

Сличениям рабочих эталонов емкости посвящены две статьи И. Н. Кротова и Т. М. Гущиной. В первой статье рассматривается метод точных сличений параметров конденсаторов с различными номинальными значениями. В этой статье приводится теоретическое обоснование метода декадных сличений. Во второй статье тех же авторов приводится изложение метода декадных сличений с подробным анализом погрешностей метода при определении емкости и тангенса угла потерь, а также приводятся частотные характеристики конденсаторов различных типов.

За последнее время точные электрические измерения существенно расширились в область частот звукового и ультразвукового диапазона.

ВНИИМ, успешно работая в этом направлении, дал ряд исследований как методического, так и приборостроительного характера, уже опубликованных в прежних выпусках трудов.

Здесь приводятся статьи А. Я. Безикович и Д. И. Зорина, А. Я. Безикович и В. С. Попова, посвященные методике и аппаратуре для электрических измерений в области звуковых частот.

Редактор

С. В. ГОРБАЦЕВИЧ, А. Н. ИНДРИК, А. И. ПЕТУНОВА

СОСТОЯНИЕ ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Поддержание единства мер является одной из важнейших задач метрологии, особенно в связи со все возрастающими требованиями к точности измерений, производимых в различных областях науки и техники.

Обширной областью, требующей высокой точности исходных мер, являются электрические измерения и, в частности, те из них, в которых применяются меры и приборы электрического сопротивления. Вследствие этого поддержание единства мер в области электрических сопротивлений является одной из главных предпосылок для обеспечения требуемой точности измерений.

Метрологическая задача поддержания единства мер должна состоять из трех частей:

- 1) установления (воспроизведения) единицы;
- 2) поддержания единицы;
- 3) передачи значения (размера) единицы.

Указанная последовательность метрологической задачи является общей для всех областей измерения, и едва ли не самой сложной является первая из перечисленных частей.

1. Для установления производной единицы используется та или иная закономерная связь между физическими величинами, позволяющая принципиально определить требуемую единицу. Не останавливаясь на значении систем единиц для рассматриваемой в этой статье задачи, можно сказать, что на заре установления электрических единиц оказалось невозможным воспроизвести эталоны единицы силы тока и электрического сопротивления в соответствии с теоретическими определениями этих единиц.

Причиной этого и явилось установление так называемой системы международных электрических единиц, основу которой составляли специфицированные эталоны ома и ампера.

Хотя по своей идее эти эталоны ома и ампера должны были по возможности воспроизводить теоретические единицы, однако на основе закономерных связей между физическими величинами эти теоретические единицы не воспроизводились, и эталоны ома и ампера значительно от них отличались. В дальнейшем развитие методов так называемых абсо-

лютных измерений позволило создать эталоны ома и ампера в соответствии с их теоретическими определениями.

Анализ результатов воспроизведения ома различными методами (метод Лоренца, Веннера, мостовые методы с применением расчетной индуктивности) и ампера методом токовых весов в их различных модификациях, проводившихся за последние 50 лет в США и Англии, а также за последние 10 лет в СССР, показывает, что достигнутая точность воспроизведения единиц может быть оценена погрешностью в $0,001 \pm 0,002\%$. Если учесть, что различие между абсолютным и международным ампером составляет величину порядка $1,5 \cdot 10^{-2}\%$, а между абсолютным и международным омом $5 \cdot 10^{-2}\%$, то достижение указанной выше точности воспроизведения абсолютными методами ампера и ома явилось значительным приближением полученных размеров единиц к их теоретическим определениям. Методологическое значение развития и уточнения абсолютных методов измерения тока и сопротивления заключалось в том, что была установлена эталонная основа абсолютной системы электрических единиц, а следовательно, и непосредственная связь с единицами длины, массы и времени.

2. Переходя ко второй части метрологической задачи — поддержанию единицы сопротивления, следует, по нашему мнению, допустить положение, что наилучшим методом поддержания единицы сопротивления был бы тот же абсолютный метод, при помощи которого она воспроизводится. Однако поддержанию единицы сопротивления абсолютным методом препятствует недостаточная точность этого метода измерения, хотя основные исходные эталоны — эталоны длины и времени — поддерживаются с точностью, при которой погрешность, вносимая в электрические измерения этими единицами, по крайней мере на два порядка ниже требуемой.

При этих условиях метрологическая практика идет по пути создания групповых эталонов, состоящих из мер одинакового номинального значения, соответствующего выбранной единице или близкого к ней.

В частности, для эталона ома составляется группа из одноомных катушек электрического сопротивления. Действительные значения сопротивления катушек определяются одним из абсолютных методов. Ранее они определялись сличениями со специфицированными ртутными образцами международного ома [1].

Среднее арифметическое из полученных значений принимается за значение эталона ома в принятой единице.

Хотя величина (размер) этой единицы — ома — имеет погрешность порядка $0,001\%$ и в этом смысле является приближенной, однако для поддержания ее значения должна обеспечиваться неизменность в пределах $0,0001 \pm 0,0002\%$.

Отсюда следует, насколько важно уточнять и совершенствовать методику абсолютных измерений для достижения точности, удовлетворительной и для поддержания единицы. Уточнение и совершенствование методики абсолютных измерений важно еще и потому, что, помимо большей достоверности воспроизводимой единицы, была бы решена проблема ее поддержания, а также отпала бы надобность в групповых эталонах и в высоких требованиях к их стабильности.

Однако в настоящих условиях роль группового эталона является исключительно важной и вытекает из достаточно обоснованного предположения, что несколько катушек, составляющих группу, за некоторый промежуток времени дадут в среднем меньшее изменение сопротивления, чем изменение сопротивления каждой из них в отдельности, или какой-то части из этих катушек.

Пусть мы имеем n катушек с сопротивлениями R_1, R_2, \dots, R_n .
Среднее значение

$$R_{\text{ср}} = \frac{\sum_{l=1}^n R_l}{n} \quad (1)$$

будем считать неизменным.

Определим разности между сопротивлениями отдельных катушек

$$\Delta_{sk} = R_s - R_k \quad (2)$$

Минимальное число независимых разностей должно быть $n - 1$.

Пусть $s = 1$ и k принимает значения от 2 до n , тогда полученные разности будут иметь значение $\Delta_{12}, \Delta_{13}, \dots, \Delta_{1n}$. Суммируя измеренные разности, получим

$$\sum_{k=2}^n \Delta_{1k} = nR_1 - \sum_{l=1}^n R_l \quad (3)$$

Из формул (1) и (3)

$$R_1 = \frac{\sum_{l=1}^n R_l}{n} + \frac{\sum_{k=2}^n \Delta_{1k}}{n} = R_{\text{ср}} + \frac{\sum_{k=2}^n \Delta_{1k}}{n} \quad (4)$$

По значению R_1 и разностям Δ_{1k} можно определить остальные значения сопротивления $R_{(k)}$ катушек для всех значений k от 2 до n по формуле, полученной из формул (2) и (4),

$$R_{(k)} = R_{\text{ср}} + \frac{\sum_{k=2}^n \Delta_{1k}}{n} - \Delta_{1k} \quad (5)$$

Для большей достоверности определяемых значений производится измерение и последующих разностей Δ_{2k}, Δ_{3k} и т. д., что дает возможность составить систему условных уравнений и при помощи способа наименьших квадратов определить искомые R_l от $i = 1$ до $i = n$ с наименьшей погрешностью.

Вполне очевидно, что такая методика вносит всегда одну и ту же систематическую погрешность в определяемое значение сопротивления каждой катушки, входящей в групповой эталон, равную неучтенному изменению среднего значения сопротивления всей группы. В связи с этим весьма существенно наличие в групповом эталоне катушек, имеющих различные конструктивные параметры, так как при этих условиях имеется большая вероятность изменений, разных по величине и знаку.

Многолетнее изучение группового эталона ома СССР, состоящего из четырех катушек, показало, что две из них уменьшают свое сопротивление, а другие две — увеличивают, причем среднее значение за 7 лет (1948—1955 гг.) изменилось на 1,9 мком. По данным международных сличений 1957 года ом СССР отличается от ома Международного Бюро мер и весов на 0,4 мком.

Изучение катушек группового эталона заключается в их ежегодных сличениях.

Не останавливаясь на вопросах методики сличений, изложенных в статье М. Ф. Маликова и Е. К. Вессо-Адо [2], отметим, что в процессе сличения катушек производится целый ряд измерений, имеющих целью исключение систематических погрешностей.

Повышение точности измерений достигается как высокой чувствительностью схемы, так и стабильностью режима в процессе измерений. В частности, выполняются следующие требования:

а) измеряемые катушки находятся в термостатных ваннах, заполненных маслом, которое перемешивается;

б) температура катушек должна определяться в процессе измерения с погрешностью, не превышающей $0,02^\circ \text{C}$;

в) температурный интервал, при котором производится сличения катушек, должен находиться в пределах $19 + 21^\circ \text{C}$;

г) гальванометр и оптическое устройство должны обеспечивать чувствительность схемы по сопротивлению не менее 10^{-7} ом/дел .

Накопленный опыт и анализ результатов позволили установить, что вероятная погрешность результата определения сопротивления катушек первичного эталона не превышает $0,5 \cdot 10^{-4} \%$.

В табл. 1 и 2 показан характер изменения сопротивлений катушек первичного эталона за последние 20 лет.

Таблица 1

Номер катушки	Значения сопротивления катушек первичного эталона ома в 1937 г.	Изменение значений сопротивлений катушек первичного эталона ома по годам, жком									
		1937—1938	1938—1939	1939—1940	1940—1941	1941—1944	1944—1945	1945—1946	1946—1947	1947—1948	1948—1949
6	0,9999644	-1,6	-1,4	-3,7	-0,5	-3,3	0	-0,2	-3,0	+1,9	-0,5
8	0,9999544	-1,3	-0,7	+0,1	+0,3	+3,4	+3,6	-4,2	-2,9	+3,1	+0,4
4044	1,0000807	+0,3	+2,4	+1,3	+1,2	—	—	+6,6	-0,5	-1,0	+0,2
4046	1,0000446	+2,5	-0,2	+2,3	-1,2	—	—	-2,1	+6,4	-3,9	-0,2

Таблица 2

Номер катушки	Значения сопротивления катушек первичного эталона ома в 1937 г.	Изменение значений сопротивлений катушек первичного эталона ома по годам, жком									
		1949—1950	1950—1951	1951—1952	1952—1953	1953—1954	1954—1955	1955—1956	1956—1957	1957—1958	
6	0,9999644	-0,8	-2,2	-3,8	+2,5	-2,5	-3,4	-0,6	+2,0	0	
8	0,9999544	-1,2	-0,4	-2,4	+2,8	-2,0	-2,5	+0,2	+2,0	+0,2	
4044	1,0000807	+0,4	+0,6	+3,4	-2,2	+2,4	+2,6	-0,5	-1,5	+2,6	
4046	1,0000446	+1,7	+2,0	+2,8	-3,3	+1,8	+3,3	+0,8	-2,3	-2,9	

3. Третья часть метрологической задачи — передача значения единицы — имеет целью поддержание единства измерений в области мер и приборов сопротивления. Таким образом, если вторая часть задачи являлась чисто метрологической проблемой, то третья — представляет собой широкое внедрение правильных значений мер и показаний приборов во всех областях измерительной техники. Это мероприятие осуществляется по строгой поверочной схеме, предусматривающей определение сопротивления рабочих эталонов кратных и дольных значений ома, последующее определение по рабочим эталонам сопротивления образцо-

вых мер 1-го разряда и по образцовым мерам 1-го разряда — сопротивления образцовых мер 2-го разряда.

Рабочие эталоны хранятся во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии, образцовые меры 1-го разряда — в институтах мер и измерительных приборов, а также в крупных контрольных лабораториях по измерительной технике, образцовые меры 2-го разряда — во всех контрольных лабораториях по измерительной технике.

Государственные контрольные лаборатории с помощью образцовых мер определяют сопротивления рабочих катушек различных классов точности, применяемых в народном хозяйстве.

Рассмотрим выполнение указанных этапов передачи значения единицы.

Определение сопротивления рабочих эталонов

Рабочие эталоны состоят из групп катушек (в каждой группе не менее трех). В настоящее время имеются рабочие эталоны с номинальными значениями 10^k ом для целых значений k от -3 до $+5$.

Возможны различные пути для определения сопротивления эталонных катушек в единице, воспроизводимой первичным эталоном, однако первый переход к десятичным эталонам производится через переходную «суммирующую меру», имеющую десять одноомных секций.

Вполне возможно и применение переходной катушки равномерного типа: такие катушки имеют преимущество при использовании мостовых методов измерения. При компенсационных методах, применяемых в лаборатории эталонов электрических единиц при передаче значения единицы сопротивления в интервале $0,01$ — 100 ом, преимущество имеют переходные катушки с одинаковыми секциями, так как обеспечивается неизменность режима в гальванометрической цепи.

Собственно методика перехода осуществляется определением сопротивления каждой из десяти секций путем поочередного их сличения с двумя катушками первичного эталона ома и далее сличением десятиомных катушек рабочего эталона с переходной мерой.

Для повышения достоверности получаемых результатов производятся взаимные сличения катушек, что позволяет определить их значения в соответствии с действительными разностями их сопротивлений.

Полученные путем взаимных сличений разности сопротивлений эталонных катушек не должны отличаться от разностей, вычисленных по переходной мере, больше, чем на $2 \cdot 10^{-4}$ от номинального значения.

Сопротивления эталонных катушек, с номинальными значениями $0,01$, $0,1$ и 100 ом, определяются, аналогично сказанному, через суммирующие меры $0,01 \times 10$, $0,1 \times 10$ и 10×100 ом.

Переход к катушкам с номинальными значениями $0,001$, 1000 , $10\,000$ и $100\,000$ ом осуществляется мерами отношения $1 : 10$, с секциями 10 и 100 ом, и эталонной мерой, соответственно $0,01$, 100 , 1000 и $10\,000$ ом.

Вся методика контроля достоверности получаемых результатов такая же, как и в описанном выше случае перехода к 10 ом.

Изменение средних значений сопротивления групп рабочих эталонов за последние 5 лет приведены в табл. 3.

Данные табл. 3 показывают, что рабочие эталоны высоких номинальных значений не являются удовлетворительными вследствие их нестабильности. Одной из предполагаемых причин, которой возможно объяснить их нестабильность, являются сезонные изменения, имеющие место в негерметизированных конструкциях. Эти изменения особенно возможны в катушках, намотанных из тонкой манганиновой

Таблица 3

Номинальное значение групп	Число катушек в группе	Действительное значение среднего значения группы в 1952 г.	Изменение средних значений сопротивления групповых рабочих эталонов по отношению к предыдущему году, $\Delta \cdot 10^4\%$				
			1953 г.	1954 г.	1955 г.	1956 г.	1957 г.
0,001	3	0,00100040	+60	—	+40	+10	0
0,01	4	0,0100080 _в	+2	+6	+8	+6	+12
0,1	5	0,100060 _г	-5	-1	-2	-7	+2
10	5	10,0060 _в	+9	-3	-8	+9	-8
100	3	100,068 _д	+8	0	-12	+26	-20
1 000	3	1001,04 _в	+16	+22	+5	+28	+12
10 000	3	10 008,7 _з	+3	+13	-34	0	+13
100 000	3	100 068 _з	+6	-2	-31	-9	+26

проводами. В связи с таким положением в течение последних трех лет в лаборатории эталонов электрических единиц проводится изучение изготовленных Краснодарским заводом «ЗИП» катушек герметизированной конструкции, которыми предполагается пополнить либо заменить рабочие эталоны сопротивления и оснастить комплектами образцовых мер институты Комитета.

Изменения сопротивления катушек в период с 1956—1957 гг. приведены в табл. 4.

Таблица 4

Изменение сопротивления в пределах, %	Номинальные значения сопротивлений, ом								
	0,001	0,01	0,1	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
0 + 1·10 ⁻³	—	6	15	12	15	13	13	10	6
1·10 ⁻³ + 2·10 ⁻³	—	9	—	3	—	2	1	5	9
2·10 ⁻³ + 3·10 ⁻³	—	—	—	—	—	—	1	—	—

Выводы

1. Состояние первичного группового эталона ома является удовлетворительным, так как по данным международных сличений за период 1948—1957 гг. значение ома СССР изменялось за год не более, чем на 1 мкОм.

2. Состояние рабочих эталонов кратных и дольных значений ома нельзя считать удовлетворительным вследствие их нестабильности. В связи с этим ВНИИМ производит изучение большого количества мер герметизированной конструкции, а также некоторых иностранных образцов.

Результаты изучения показывают, что меры, изготовленные Краснодарским заводом, по своей стабильности не выходят за пределы требований ГОСТ 6864—54, и большинство из них имеет стабильность в пре-

делах 0,001%. Такая стабильность может считаться удовлетворительной для образцовых мер, однако эталоны электрического сопротивления должны иметь стабильность в пределах $1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4} \%$. Особые требования должны быть предъявлены к первичному эталону ома, хранящему единицу сопротивления. Из приведенных данных следует, что среднее значение сопротивления группы эталона ома в течение ряда лет не изменялось более, чем на $(1 \pm 2) \cdot 10^{-4} \%$, и поэтому состояние эталона ома следует считать удовлетворительным.

В настоящее время разработаны новые конструкции и технология для катушек значениями 0,1, 1, 10 и 100 ом, которые изготавливаются и в ближайшее время будут подвергнуты изучению с целью замены существующих эталонов более стабильными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Георгиевский А. Н., Маликов М. Ф., Ртутные образцы международного ома, 1918.
2. Маликов М. Ф., Вессо-Адо Е. К., Труды ВИМС, № 127, 1933.

О СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЯХ ПРИ СРАВНЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЙ КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

В практике точных измерений для сравнения сопротивлений в диапазоне $0,01 \div 100$ ом среди других схем применяются компенсационные схемы. Несмотря на их основной недостаток — наличие двух цепей с самостоятельными источниками питания — они, благодаря своей простоте, до сих пор еще имеют большое значение. В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с систематическими погрешностями измерений на компенсационных схемах и дается их оценка.

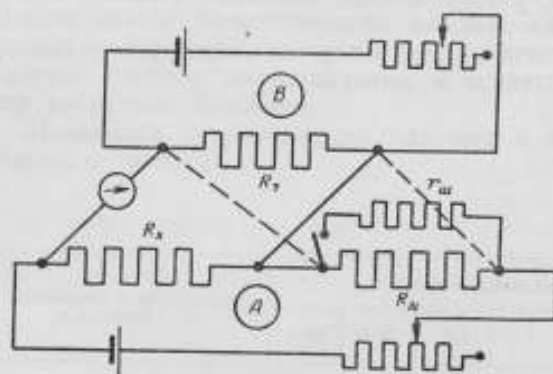


Рис. 1.

Рассмотрим принципиальную компенсационную схему (рис. 1) для сравнения сопротивлений.

Сущность метода сравнения заключается в том, что при соответствующем подборе сопротивления R_T и тока в цепях A и B при

заданных сопротивлениях R_X и R_N определяют поочередно разности падения напряжения на катушках измерительной и тарной цепей.

Если ток в цепях B и A обозначим через i_T и i_u , а отклонения гальванометра — через α_i , то для случая $R_N > R_X$ можно написать следующие равенства:

$$\left. \begin{aligned} i_u R_X - i_T R_T &= k\alpha_1, \\ i_u R_N - i_T R_T &= k\alpha_2, \\ i_u \frac{R_N r_m}{R_N + r_m} - i_T R_T &= k\alpha_3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Предполагая, что сила тока в цепи A не изменяется при шунтировании сопротивления R_N (или R_X при $R_X > R_N$), из системы уравнений (1) получим

$$\frac{R_X - R_N}{R_N \left[1 - \frac{r_m}{R_N + r_m} \right]} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_3} = a. \quad (2)$$

Из выражения (2) определяется искомая разность $R_X - R_N$, а при заданном R_N определяется и R_X .

Рассматриваемая схема теоретически является совершенной для сравнения четырехзажимных сопротивлений, однако при точных измерениях необходимо учесть ряд недостатков метода, вносящих погрешность в получаемый результат. Главными из них являются: изменение силы тока в цепи A при шунтировании сопротивления R_X или R_N и падение напряжения на потенциальных проводах при шунтировании.

Рассмотрим влияние каждой из указанных причин на погрешность результата и выведем более точные выражения для вычисления искомой разности $R_X - R_N$ или значения R_X по заданному R_N .

Учет изменения силы тока в цепи A

При шунтировании сопротивления R_N сила тока i_u в цепи A изменится на Δi_u .

Если

$$i_u = \frac{E}{R_X + R_N + r},$$

то

$$\Delta i_u = - \frac{E \Delta R_N}{(R_X + R_N + r)^2}, \quad (3)$$

где E — э. д. с. источника тока;

r — дополнительное (в некоторой части и регулируемое) сопротивление цепи A .

Третье уравнение из системы уравнений (1) принимает вид

$$(i_u + \Delta i_u) \frac{R_N r_m}{R_N + r_m} - i_u R_T = k \alpha_3 \quad (4)$$

и тогда решение системы уравнений (1), в которой третье уравнение заменено уравнением (4), приводит к выражению

$$\frac{R_X - R_N}{R_N \left[1 - \left(1 + \frac{\Delta i_u}{i_u} \right) \frac{r_m}{R_N + r_m} \right]} = a, \quad (5)$$

где a имеет то же значение, что и в уравнении (2).

Имея в виду выражения (3) для i_u и Δi_u , а также учитывая, что уменьшение сопротивления происходит только вследствие шунтирования сопротивления R_N сопротивлением r_m , и, следовательно,

$$\Delta R_N = - \frac{R_N^2}{R_N + r_m},$$

получаем

$$\frac{\Delta i_u}{i_u} = \frac{R_N^2}{(R_N + r_m)(R_N + R_X + r)}. \quad (6)$$

Подставляя выражение для $\frac{\Delta i_u}{i_u}$ в уравнение (5), получим значение $R_X - R_N$

$$R_X - R_N = \frac{a R_N^2}{R_N + r_m} \left[1 - \frac{R_N r_m}{(R_N + r_m)(2R_N + r)} \right]. \quad (7)$$

При этом в правой части равенства (7) сделано допущение

$$R_N + R_X \simeq 2R_N.$$

Из уравнения (2) для разности $R_X - R_N$ получается выражение

$$R_X - R_N = \frac{aR_N^2}{R_N + r_w} \quad (2')$$

Из выражений (7) и (2') получим относительную погрешность определения $R_X - R_N$, вызываемую изменением токового режима

$$\frac{\delta(R_X - R_N)}{R_N} = - \frac{aR_N^2 r_w}{(R_N + r_w)^2 (2R_N + r)} \quad (8)$$

где

$$\delta(R_X - R_N) = (R_X - R_N)_2 - (R_X - R_N)_1,$$

причем индексы 2 и 1 соответственно относятся к выражениям (7) и (2').

Для правильного определения разности $R_X - R_N$ следует пользоваться формулой (7).

На основании проведенного выше анализа можно определить те значения $\frac{r}{R_N}$ для конкретных отношений $\frac{R_N}{r_w}$, при которых изменение токового режима не вызовет относительной погрешности при измерении разности $R_X - R_N$, большей $5 \cdot 10^{-7}$.

Рассмотрим эти условия, для чего, пренебрегая R_N по сравнению с r_w , представим формулу (8) в следующем виде:

$$\frac{\delta(R_X - R_N)}{R_N} = \frac{aR_N}{r_w \left(\frac{r}{R_N} + 2 \right)} \quad (8')$$

Указанное выше ограничение погрешности величиной $5 \cdot 10^{-7}$ будет выполнено, если

$$\frac{aR_N}{r_w \left(\frac{r}{R_N} + 2 \right)} = 5 \cdot 10^{-7} \quad (9)$$

Величина a заключается обычно в пределах $0,3 \div 0,5$ и, следовательно,

$$\frac{r}{R_N} + 2 = (0,06 \div 0,1) \cdot 10^7 \frac{R_N}{r_w} \quad (10)$$

В зависимости от величины разности $R_X - R_N$ величина $\frac{R_N}{r_w}$ может принимать различные значения.

Наибольший интерес представляет случай, когда $\frac{R_X - R_N}{R_N}$, а следовательно, и $\frac{R_N}{r_w}$ находятся в пределах $1 \cdot 10^{-4} \div 10 \cdot 10^{-4}$ и тогда имеем следующие величины для $\frac{r}{R_N}$:

$$\frac{R_N}{r_w} = 0,0001; \quad \frac{r}{R_N} + 2 = 100 \div 60;$$

$$\frac{R_N}{r_w} = 0,0005; \quad \frac{r}{R_N} + 2 = 500 \div 300;$$

$$\frac{R_N}{r_w} = 0,001; \quad \frac{r}{R_N} + 2 = 1000 \div 600.$$

Эти же величины без какой-либо погрешности могут быть приняты и для $\frac{r}{R_N}$.

В случае выполнения этих условий, вычисление $R_X - R_N$ может производиться по формуле (2').

Если сопротивления сравниваемых катушек отличаются на величину, превосходящую 0,01%, тогда оказывается необходимым двукратное шунтирование катушки с большим сопротивлением.

Очевидно, что изменение силы тока связано при этом с переходом от

$$R'_N = \frac{R_N r_{ш1}}{R_N + r_{ш1}} \quad \text{к} \quad R'_N = \frac{R_N r_{ш2}}{R_N + r_{ш2}}.$$

Легко доказать, что выражение (7) остается правильным, если заменить R_N на R'_N и $r_{ш}$ на $\frac{r_{ш1} r_{ш2}}{r_{ш1} + r_{ш2}}$.

Остаются правильными и выводы о нижней границе $\frac{r}{R_N}$, причем численное значение $\frac{R_N}{r_{ш}}$ должно определяться из условия, что

$$r_{ш} = \frac{r_{ш1} r_{ш2}}{r_{ш1} + r_{ш2}}.$$

Оценка влияния сопротивления потенциальных выводов на точность измерения малых сопротивлений в компенсационной схеме

Уравнения измерений применительно к схеме, изображенной на рис. 2, в предположении, что $R_X < R_N$ и шунтирование производится один раз, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} i_u R_X - i_r R_r &= k \alpha_1 \\ i_u R_N - i_r R_r &= k \alpha_2 \\ i_w r_{ш} - i_r R_r &= k \alpha_3 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

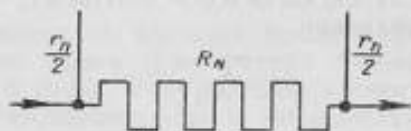


Рис. 2.

Но

$$\frac{i_w}{i - i_w} = \frac{R_N}{r_{ш} + r_n},$$

где $i = i_u + i_w$, и, следовательно,

$$i_w r_{ш} = \frac{i R_N r_{ш}}{R_N + r_{ш} + r_n},$$

поэтому третье уравнение (11) принимает вид

$$\frac{i R_N r_{ш}}{R_N + r_{ш} + r_n} - i_r R_r = k \alpha_3.$$

Исключая из уравнений (11) величины $i_r R_r$ и k , получим:

$$\frac{R_X - R_N}{R_N - \frac{R_N r_{ш}}{R_N + r_{ш} + r_n}} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_3} = a, \quad (12)$$

откуда

$$R_X - R_N = a R_N \left(\frac{R_N + r_n}{R_N + r_{ш} + r_n} \right) \approx \frac{a R_N^2}{r_{ш}} + \frac{a R_N r_n}{r_{ш}}$$

и

$$\frac{R_X - R_N}{R_N} = \frac{a}{r_{ш}} (R_N + r_n). \quad (13)$$

Это выражение остается справедливым и для случая, когда $R_X > R_N$.

Действительно, аналогичные рассуждения при шунтировании R_X приводят к следующему равенству:

$$R_X - R_N \cong \frac{aR_N R_X + aR_N r_n}{r_m}$$

и, следовательно,

$$\frac{R_X - R_N}{R_N} = \frac{a}{r_m} (R_X + r_n). \quad (13')$$

Наравне с однократным шунтированием очень часто применяется двукратное шунтирование. Это было рассмотрено выше.

Вследствие простоты выводов приведем окончательное выражение для $R_X - R_N$, если R_N шунтируется сопротивлениями $r_{ш1}$ и $r_{ш2}$:

$$R_X - R_N = aR_N \left(\frac{R_N + r_n}{r_{ш2}} - \frac{R_N + r_n}{r_{ш1}} \right) - R_N \frac{R_N + r_n}{r_{ш1}}$$

и

$$\frac{R_X - R_N}{R_N} = a \frac{R_N + r_n}{r_{ш2}} - (a + 1) \frac{R_N + r_n}{r_{ш1}}. \quad (14)$$

По формулам (13) и (14) должны вычисляться искомые разности, а по известным R_N — сопротивления R_X . Однако учет сопротивления потенциальных выводов в компенсационных схемах имеет смысл только для катушек с номинальным значением 0,01 ом и менее, так как обычно сопротивление r_n находится в пределах $2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-4}$ ом.

Оценка систематической погрешности для наиболее благоприятного случая, когда $R_N = 0,01$ ом и $r_n = 0,0002$ ом, дает при $a = 0,5$ и $r_m = 10$ ом величину

$$\frac{\delta(R_X - R_N)}{R_N} = \frac{a r_n}{r_m} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{10} = 10^{-5}, \text{ или } 0,001\%.$$

При более близких значениях R_X и R_N шунтирующее сопротивление имеет величину 100 ом, и тогда погрешность составит 0,0001%.

Обычно величины шунтирующих сопротивлений находятся в пределах $10 \div 100$ ом и учет рассматриваемой погрешности безусловно необходим при сличениях катушек со значением 0,01 ом и более низких номинальных значений.

ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ ТОКОМ НА ВЕЛИЧИНУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Меры электрического сопротивления являются метрологической основой при поверке приборов сопротивления, а также при использовании наиболее точных методов электрических измерений. В связи с этим требования к точности определения сопротивления указанных мер в зависимости от характера их применения могут быть очень высокими. Даже рабочие меры сопротивления I класса и класса 0,01 в соответствии с ОСТ 85001—39 и ГОСТ 6864—54 должны поверяться с погрешностью не выше 0,001%. Что касается образцовых и эталонных мер сопротивления, то требования к точности их поверки повышаются в пять—десять раз.

Одним из главных источников погрешностей является температура элемента сопротивления, которую трудно учесть. Температура обычно измеряется термометром, погруженным в среду, окружающую элемент сопротивления. Несомненно, что градиент температуры в направлении от места погружения термометра к элементу сопротивления зависит от теплообмена и от нагрузки током. Нахождение зависимости между мощностью тока катушки P и превышением температуры элемента сопротивления над температурой среды θ позволит решить задачу так называемых нагрузочных коэффициентов. Эта задача становится особенно важной при измерении эталонных сопротивлений. Действительно, для катушек с обычным температурным коэффициентом $2 \cdot 10^{-2} \% / \text{град}$ неучитываемое превышение температуры на $0,1^\circ \text{C}$ вызовет погрешность $2 \cdot 10^{-4} \%$, что недопустимо при измерении сопротивления эталонных катушек.

Таким образом, установление предельно возможных нагрузок для эталонных, образцовых и рабочих катушек классов I, 0,01 и для образцовых катушек, применяемых при измерениях силы тока и поверке шунтов, а также нахождение упомянутой выше функциональной зависимости $\theta = F(P)$, а следовательно, и $r = f(t, P)$, должно устранить одну из систематических погрешностей, а вместе с тем и повысить точность измерения сопротивлений.

Аттестация катушек, осуществляющая передачу значения ома от эталонов ко всем образцовым катушкам сопротивления, заключается в определении коэффициентов температурной формулы α и β , а также в установлении значения сопротивления катушки при 20°C (r_{20}), и обычно производится при малой мощности, как правило не превышающей $0,1 \text{ вт}$. Между тем, в соответствии с нормативными документами катушки



сопротивления могут использоваться при мощностях $1 \div 3 \text{ вт}$. Кроме того, при абсолютных измерениях сопротивления и силы тока в эталонных катушках должна рассеиваться мощность порядка 1 вт .

Перед лабораторией электрических измерений ВНИИМ возникла задача: исследовать погрешности определения сопротивления образцовых катушек при различных токовых нагрузках (нагрузочные погрешности) и установить возможность их учета.

В настоящей работе приведены результаты изучения образцовых катушек с сопротивлением от 1 до 10^{-4} ом при мощностях до $3 \div 5 \text{ вт}$, а также

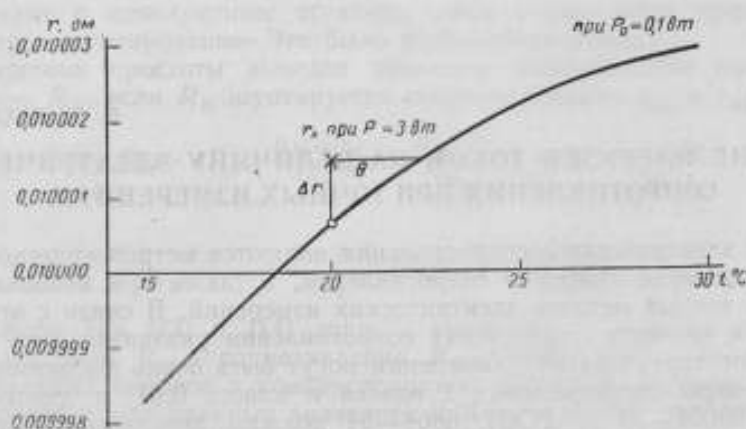


Рис. 1. Нагрузочные характеристики катушки сопротивления.

образцовых катушек малого сопротивления, предназначенных для больших токов.

Перейдем к рассмотрению основных положений теории этого вопроса. Электрическое сопротивление является функцией температуры

$$r = F(t).$$

Для образцовых катушек при температурах $15 \div 30^\circ \text{C}$

$$r_t = r_{20} + \alpha (t_n - 20) + \beta (t_n - 20)^2. \quad (1)$$

При этом коэффициенты α и β принимаются неизменными от температуры.

В действительности величина t_n неизвестна, а известна лишь температура окружающей среды t (обычно масла), которая практически совпадает с t_n лишь при малой нагрузке, называемой нулевой, при которой и производится аттестация катушки. Наличие превышения температуры $\theta = t_n - t$ при повышенных нагрузках током приводит к некоторой погрешности Δr (величины θ и Δr являются нагрузочными характеристиками катушки).

На рис. 1 представлена температурная кривая одной из исследованных катушек, вычисленная по температурам t при мощности $0,1 \text{ вт}$. Здесь же крестиком обозначено сопротивление r_x , измеренное при мощности 3 вт и при температуре масла 20°C . Тогда Δr является погрешностью определения сопротивления, а величина θ — имеющимся превышением температуры.

В общем виде

$$r = f(t, P),$$

где P — выделяемая в катушке мощность.

Тогда, при $P = 0$

$$r = f(t, 0),$$

или

$$r_{t,0} = r_{20,0} + \alpha(t-20) + \beta(t-20)^2; \quad (2)$$

при $P \neq 0$

$$r_{t,P} = f(t, 0) + \left(\frac{\partial f}{\partial P}\right) \Delta P + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial P^2}\right) (\Delta P)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{\partial^3 f}{\partial P^3}\right) (\Delta P)^3 + \dots \quad (2')$$

Обозначив через N сумму слагаемых (кроме первого), из уравнений (2) и (2') получим

$$r_{t,P} = r_{20,0} + \alpha(t-20) + \beta(t-20)^2 + N, \quad (3)$$

где N — нагрузочная поправка или погрешность.

Возникает вопрос, нельзя ли ограничиться первым приближением функции N , представив ее в виде линейной функции от P так, чтобы выражение (3) приняло вид

$$r_{t,P} = r_{t,0} + \lambda P.$$

Рассмотрим нагрузочную поправку как некоторое изменение сопротивления $r_{t,P} - r_{t,0}$, вызванное изменением температуры t на величину θ .

Опыт показывает, что превышение температуры может быть значительным, поэтому нагрузочную погрешность определяем по формуле Лагранжа

$$\Delta f(x) = f' \left(x + \frac{\Delta x}{2} \right) \Delta x,$$

где

$$x = t, \quad \Delta x = \theta, \quad f(x) = r_{t,0}.$$

Тогда

$$\Delta r = -N = -\theta \{ \alpha + 2\beta(t-20) + 3\beta\theta \}. \quad (4)$$

Из этого выражения видно, что нагрузочная погрешность зависит не только от величины θ и температурных коэффициентов, но и от действительной температуры катушки. При одной и той же мощности нагрузочная погрешность может быть различной при разных температурах измерения. Отсюда следует, что нагрузочная погрешность не может характеризовать катушку однозначно для каждой мощности и поэтому рассматривать ее как функцию только мощности и, тем более, линейную можно только при некоторых условиях.

Достаточно определены нагрузочные свойства катушки характеризует превышение температуры элемента над температурой среды θ . Поэтому оказалось целесообразным изучать именно величину θ как функцию мощности, рассматривая катушку как термометр сопротивления.

Значение θ определяется как корень одного из квадратных уравнений:

$$r_{t,p} - r_{t,0} = \theta [\alpha + 2\beta(t - 20) + \beta\theta],$$

или

$$r_{t,p} = r_{20,0} + \alpha(t + \theta - 20) + \beta(t + \theta - 20)^2. \quad (5)$$

Последнее выражение получается после подстановки в уравнение (1) $t_n = t + \theta$ и представляет собой полную температурную формулу катушки, учитывающую ее нагрузочные свойства.

В обоих случаях требуется знать значения α , β и $r_{20,0}$, определяемые при мощности $0,1 \div 0,2$ Вт, и измерить сопротивление катушки $r_{t,p}$ при повышенной мощности.

Таким образом, изучение нагрузочных характеристик θ и Δr сводится к измерениям сопротивления катушки при различных токах путем сравнения с образцовой мерой; при этом точность измерений должна быть очень высокой.

Расчеты показывают, что несмотря на то, что для катушек кл. 1 или 0,01 значение θ должно быть известно в худшем случае с точностью $\pm 0,4^\circ \text{C}$, для обеспечения этой точности сопротивления должны измеряться с точностью $1 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-4} \%$, в зависимости от величины α , β и t_{max} катушек. Для эталонных катушек требования

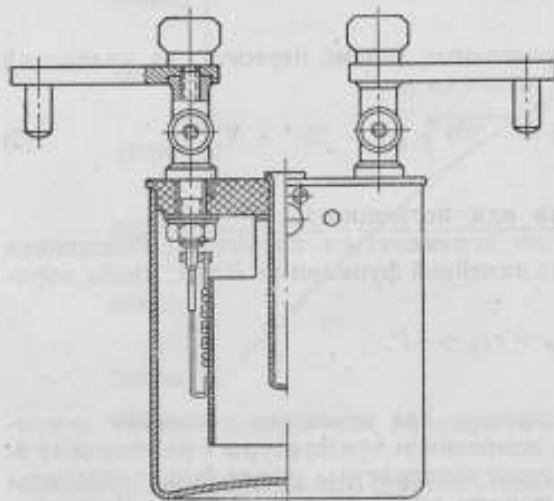


Рис. 2. Маслонаполненная катушка.

к точностям всех определений повышаются в соответствии с допустимыми погрешностями этих катушек.

Для исследования нагрузочных характеристик катушек сопротивления были изучены и применены две схемы: схема двойного моста с уравновешиванием по частям и схема магнитного компаратора. В схеме двойного моста при отношении 10:1 образцовая мера имеет сопротивление в 10 раз меньше, чем измеряемое, вследствие чего и мощность, выделяемая в ней, оказывается в 10 раз меньше, чем в измеряемой катушке. В схеме магнитного компаратора образцовая мера включается в цепь компенсационного тока, во много раз меньшего, чем ток, проходящий через измеряемую катушку. Кроме того, образцовые меры выбираются с малым температурным коэффициентом. Эти мероприятия приводят к существенному ослаблению влияния нагрева образцовой меры на величину измеряемого сопротивления. Схема магнитного компаратора применялась главным образом для изучения малых сопротивлений на большие токи.

Для установления величины θ принят режим охлаждения, рекомендуемый для эксплуатации катушек с допустимой погрешностью $\pm 0,001 \%$, т. е. помещение катушки в термостат, в котором происходит перемешивание масла. Однако опыт показывает, что и без перемешивания масла величина θ практически не изменяется, а лишь удлиняется время, необходимое на ее установление.

В процессе работы были исследованы марганциевые катушки трех конструкций.

1. Маслонаполненные катушки (рис. 2) — наиболее распространенные в СССР. Эти катушки для всех номинальных значений от 10^{-4} до 10^5 ом изготавливаются заводом «Эталон» по образцу Германского физико-технического института (PTR). В этой конструкции проволочный или пластинчатый элемент сопротивления помещен в металлический футляр, заполненный трансформаторным маслом и закрытый эбонитовой крышкой. Температура измеряется термометром, погруженным в масло через центральное отверстие в крышке катушки. В некоторых катушках отверстие расположено не в центре, а сбоку, вблизи элемента сопротивления.

2. Катушки из сплошного металла конструкции проф. М. Ф. Маликова [1].

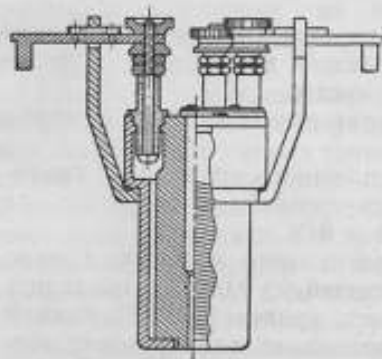


Рис. 3. Катушка из сплошного металла.

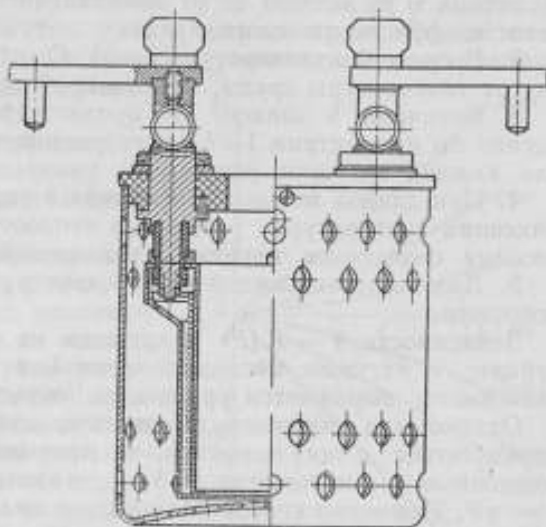


Рис. 4. Катушка двустенной конструкции, герметизированная.

В этих катушках (рис. 3) марганциновая проволока намотана на сплошной цилиндр из меди или алюминия, по оси которого просверлен канал для термометра. Верхняя расширенная часть цилиндра служит крышкой, на которую снизу навинчивается наружный металлический футляр. Таким образом обмотка оказывается помещенной в узкую, герметически закрытую полость, заполняемую трансформаторным маслом. В этой конструкции большая масса хорошо теплопроводящего металла, окружающая проволоку, способствует быстрому распространению тепла, выделяющегося в проволоке, и выравниванию температуры в поле, ограниченном обмоткой. Поэтому при установившемся тепловом режиме температура в центре катушки должна быть близка к температуре обмотки. Катушки изготовлены только с номинальным значением в 1 ом.

3. Двустенные герметизированные катушки (рис. 4), разработанные в Национальном Бюро стандартов (NBS). В таких катушках проволока намотана на внутренний цилиндр и оказывается благодаря этому в кольцевой полости между двумя тонкими спаянными коаксиальными цилиндрами. Кольцевая полость шириной около 10 мм заполнена водородом или воздухом. Отверстие для помещения термометра в катушке не предусмотрено. Катушка помещается в масляную ванну, и благодаря быстрой циркуляции масла должна достигаться хорошая теплоотдача, а следовательно, и выравнивание температуры между стенками катушки и маслом ванны. Завод «Эталон» изготовил опытные экземпляры такой конструкции со значениями сопротивления в 0,1, 1 и 10 ом.

Температурно-нагрузочный коэффициент

Подробные исследования величины θ при различных мощностях и в различных режимах охлаждения позволили сделать следующие выводы.

1. Превышение температуры элемента над температурой среды (величина θ) не зависит ни от номинального значения, ни от температурного коэффициента сопротивления катушки.

2. В пределах температур $15 \div 35^\circ \text{C}$ величина θ практически не зависит от температуры среды, при которой производятся измерения.

3. Величина θ зависит от продолжительности прохождения тока, однако по прошествии $1 \div 1,5$ часа устанавливается вполне определенное для каждой катушки значение θ .

4. При данной мощности величина θ определяется в основном местом фиксации температуры, размерами теплоотдающей поверхности и физическими свойствами тепловоспринимающей среды.

5. Для катушки каждой данной конструкции величина θ есть функция мощности.

Зависимость $\theta = F(P)$ у катушек из сплошного металла прямолинейная; у катушек маслонаполненной и двустенной конструкции эта зависимость выражается уравнением вида $\theta = aP^b$.

Однако для образцовых катушек, сопротивление которых должно определяться с погрешностью, не превышающей $\pm 0,001\%$, оказалось возможным при мощностях до $3 \div 4$ Вт заменить кривую $\theta = aP^b$ прямой $\theta = \tau P$. Применяя способ наименьших квадратов, находим условие наилучшего приближения прямой к кривой при мощностях до 4 Вт. В этом случае функция

$$Q = \int_0^4 (\tau P - aP^b) dP \quad (6)$$

должна иметь минимум.

Коэффициент τ , определенный из уравнения (6), у большинства катушек оказался близким к величине, вычисленной при мощности 3 Вт из выражения

$$\tau = \left(\frac{\theta}{P} \right)_{3 \text{ Вт}} \quad (7)$$

Таким образом, может быть предложена методика определения величины τ , заключающаяся:

а) в измерениях сопротивления катушки при двух мощностях: $P_0 = 0,1 \div 0,2$ Вт и $P = 3$ Вт;

б) в последующем определении значения θ из уравнений (4) или (5);

в) в вычислении τ из уравнения (7).

Вследствие того, что коэффициент τ не зависит от температуры, при которой находится катушка сопротивления, он является однозначной нагрузочной характеристикой катушки. Он может быть назван температурно-нагрузочным коэффициентом (с размерностью $\frac{\text{град}}{\text{Вт}}$) и определен, как превышение температуры элемента над температурой среды, приходящееся в среднем на каждый ватт мощности.

Если вместо величины θ в формулу (5) подставить ηP , то для катушек с допустимыми погрешностями 0,001% полные температурные формулы, учитывающие нагрузочные свойства катушек, примут вид

$$r_{t,P} = r_{20,0} + \alpha(t + \eta P - 20) + \beta(t + \eta P - 20)^2, \quad (8)$$

или

$$r_{t,P} = r_{20,0} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 + \eta P[\alpha + 2\beta(t - 20) + \beta\eta P]. \quad (9)$$

По значению величин η или θ катушки всех трех конструкций существенно отличаются друг от друга. Однако даже катушки одной конструкции, например маслонеполненные, могут иметь несколько различные значения θ .

Одним из важнейших конструктивных факторов, влияющих на величину θ , является расположение термометра относительно обмотки.

На рис. 5 приведены кривые примерного распределения температуры при разных мощностях в разных точках масляной среды одной из катушек по ее высоте. В крышке катушки предусмотрено отверстие (вместо специальной трубочки), куда вставляется термометр и опускается на желаемую глубину. Ось абсцисс соответствует исходной температуре в центре объема масла, ограниченного цилиндрическим каркасом с обмоткой. Каждая из кривых снабжена индексом, показывающим расстояние от центра (в миллиметрах) точки, в которой производилось измерение температур. Знак плюс показывает направление вверх от центра, знак минус — вниз от центра.

Из рис. 5 видно, что, например, при мощности 5 вт разность температур в двух точках, находящихся на расстоянии 20 мм друг от друга по вертикальной оси (+10 мм и -10 мм от центра), превышает 2° . А так как в верхних слоях масла катушки температура выше, чем в нижних, то превышение температуры $\theta = t_n - t$ при погружении термометра в верхние слои будет соответственно меньше, чем при погружении его в нижние слои масла.

Таким образом, становится очевидной неопределенность значения θ у катушек, не снабженных трубочками для термометра. У катушек, имеющих трубочки, величины θ и η имеют достаточно определенные значения; тем не менее, у разных катушек они могут быть различными, в зависимости от расположения трубочки. Однако у катушек одного типа различия эти незначительны и величины θ и η здесь могут быть усреднены.

На рис. 6 представлены кривые зависимости величин θ от P для катушек из сплошного металла, маслонеполненной и двустенной герметизированной. В двух последних случаях прямые аппроксимируют действительные кривые. Температура масла t у всех катушек измерялась в центре.

В соответствии с найденными значениями θ установлены температурно-нагрузочные коэффициенты у катушек в 0,001, 0,01, 0,1 и 1 ом, приведенные в табл. 1.

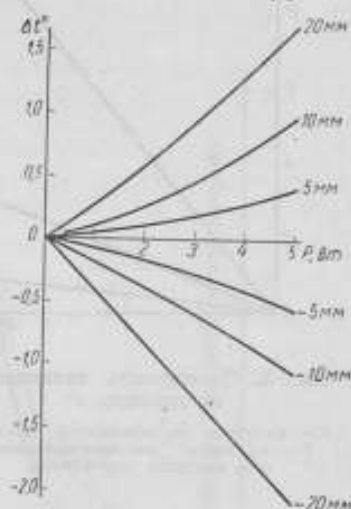


Рис. 5. Распределение температуры по высоте масляного пространства в центральной части маслонеполненной катушки.

Столь значительное различие в температурно-нагрузочном коэффициенте катушек различных конструкций делается понятным, если проанализировать сводный график приблизительного распределения температур по диаметру этих катушек в установившемся режиме при мощности 4 Вт (рис. 7). График построен на основании наших собственных экспериментальных исследований* и эмпирических выводов из исследований, приводимых проф. Г. Т. Третьяком [2]. Основным для построения сводного графика является вывод, что 30% спада температуры наблюдается на расстоянии 2—3 мм от поверхности нагрева, а полный спад (до температуры окружающей среды) — на расстоянии 10—15 мм.

На рис. 7 по горизонтальной оси отложены расстояния по диаметру

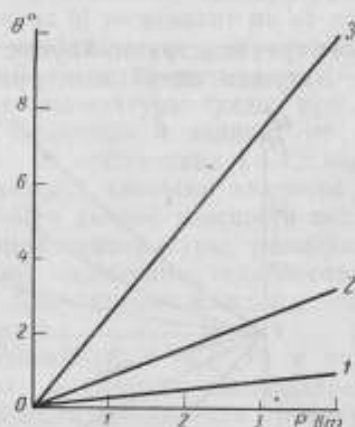


Рис. 6. Зависимость величины θ от значения P .

1 — катушка из сплошного металла;
2 — катушка маслонаполненная;
3 — катушка двустенная.

Таблица 1

Конструкция катушки	γ , град/Вт
Из сплошного металла	0,25
Маслонаполненная, с трубкой для термометра, расположенной в центре	0,8
Двустенная, герметизированная, без трубки для термометра	2,5

катушек, по вертикальным осям отложены температуры в различных местах по диаметру катушек.

На вертикальной оси t_n нанесены температуры элементов сопротивления катушек всех трех конструкций. Слева от линии t_n — по вертикальным линиям нанесены температуры масла в центре катушек, а так как диаметры цилиндрических намоток катушек различны (из сплошного металла — 36 мм, у маслонаполненной и двустенной — 50 мм), то проведены две вертикальные линии t на расстояниях 18 и 25 мм от линии t_n слева.

Кривые 1, 2 и 3 слева от линии t_n показывают распределение температур до середины внутреннего пространства катушек, охватываемого обмоткой, справа от линии t_n — во внешней, по отношению к обмотке, среде. При этом для катушек из сплошного металла (кривая 1) и двустенной (кривая 3) внешней средой является масло в термостате, так что на рис. 7 внешняя среда для этих катушек условно начинается непосредственно у линии t_n справа. В маслонаполненной катушке (кривая 2) внешняя по отношению к обмотке среда состоит из двух частей: от обмотки до наружного футляра катушки — одна часть и, далее, в термостате — другая. Для разделения этих двух частей в правой стороне от линии t_n проведена вертикальная линия с обозначением «футляр маслонаполненной катушки», которая не должна приниматься во внимание при рассмотрении распределения температур в катушках из сплошного металла и двустенной.

* Измерение температур в различных точках катушек.

Спад кривой температур во внутреннем пространстве характеризует нагрузочные свойства катушки. Чем выше здесь кривая, тем меньше температурно-нагрузочный коэффициент, тем лучше нагрузочные свойства. Удовлетворительной может считаться катушка, в диаграмме распределения температур которой кривая слева от оси t_n превращается в горизонтальную линию, а идеальной — если при этом и значение t_n невелико.

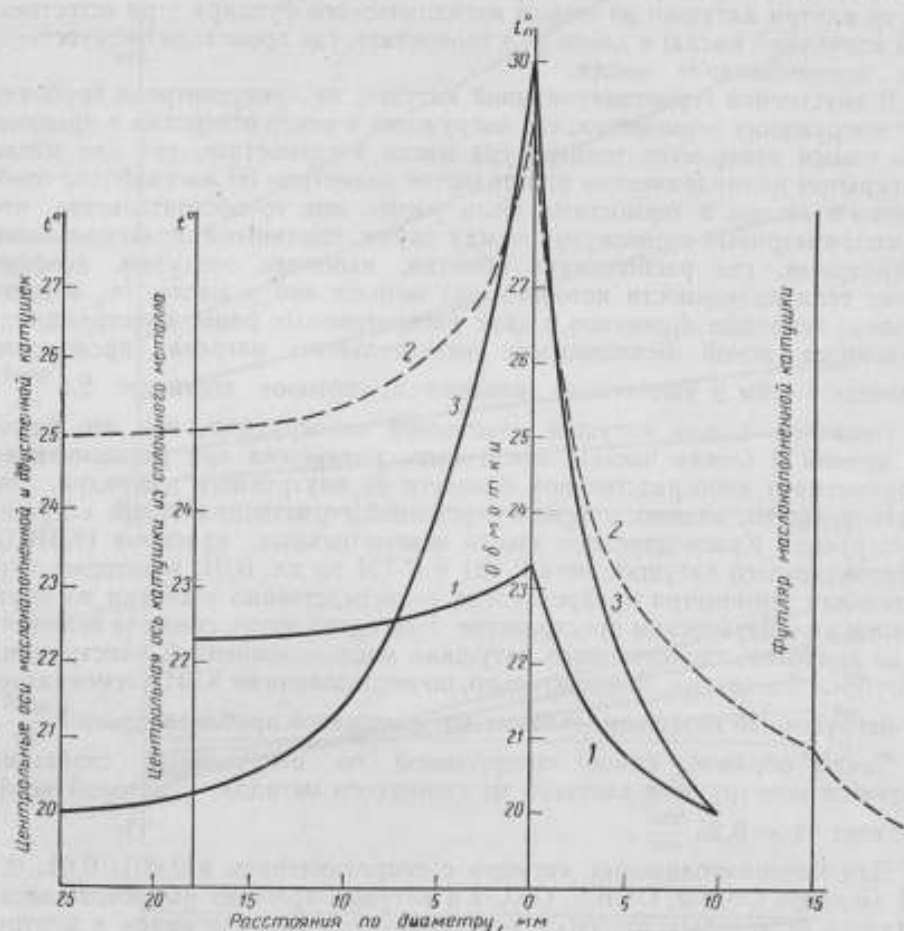


Рис. 7. Сводный график распределения температур по диаметру катушек:

1 — катушки из сплошного металла; 2 — катушка маслонеполненная; 3 — катушка двустенная.

Указанными двумя особенностями отличается катушка конструкции М. Ф. Маликова, в которой внутреннее пространство заполнено вместо масла металлической массой. Благодаря хорошей теплопроводности металла и большой массе его, на прогрев которой затрачивается значительное количество энергии, тепло быстро и равномерно распространяется по средней части катушки. В результате наблюдается малое превышение температуры проволоки над температурой в середине катушки и небольшой подъем величины t_n .

В силу малого коэффициента теплопроводности масла во внутреннее пространство маслонеполненной катушки поступает небольшое количество тепла, а значительная часть энергии затрачивается на нагрев проволоки. При этом создается значительное превышение температуры

проволаки над температурой масла в центре масляного пространства, где расположен термометр. Затрудненная теплоотдача в наружное пространство увеличивает подъем величины t_n в маслонеполненной катушке. В самом деле, если кривая 1 справа от линии t_n характеризует распределение температур непосредственно в термостате, где масло специально перемешивается, то кривая 2 справа характеризует распределение температур внутри катушки до стенки металлического футляра (при естественной конвекции масла) и далее — в термостате, где происходит искусственное перемешивание масла.

В двустенной герметизированной катушке не предусмотрена трубочка для погружения термометра; его погружают в центр отверстия в крышке. Тем самым измеряется температура масла в термостате, так как масло в открытом цилиндрическом пространстве диаметром 50 мм свободно сообщается с маслом в термостате. Если учесть еще то обстоятельство, что 10-миллиметровый промежуток между двумя спаянными коаксиальными цилиндрами, где расположена обмотка, наполнен воздухом, коэффициент теплопроводности которого еще меньше чем у масла, то, в свете анализа тепловых процессов в двух рассмотренных ранее конструкциях, становится ясной неизбежность значительного нагрева проволоки, а вместе с этим и увеличения значения η , которое достигает $2,5 \frac{\text{град}}{\text{ат}}$.

Величина η для катушки двустенной конструкции, как это видно на кривой 3 (левая часть), может быть уменьшена при расположении термометра в непосредственной близости от внутреннего цилиндра. Это обстоятельство, видимо, учтено в двустенной герметизированной катушке конструкции Краснодарского завода измерительных приборов (КЗИП), изготовляющего катушки типа Р-321 и Р-331 по кл. 0,01, в которых трубочка для термометра предусмотрена непосредственно у стенки во внутреннем цилиндрическом пространстве. Благодаря этому снижена величина η до значения, свойственного катушкам маслонеполненной конструкции с трубочкой в центре. Действительно, по исследованиям КЗИП температурно-нагрузочный коэффициент таких катушек равен приблизительно $1 \frac{\text{град}}{\text{ат}}$.

Таким образом, самой совершенной по нагрузочным свойствам является конструкция катушки из сплошного металла, у которой коэффициент $\eta = 0,25 \frac{\text{град}}{\text{ат}}$.

Для маслонеполненных катушек с сопротивлением в 0,001, 0,01, 0,1 и 1 Ом типов ОКН-2, ОКВ-2, ОКС-2 и катушек прежних выпусков завода «Эталон», у которых трубочки для термометра располагаются в центре, а также для катушек герметизированных типа Р-321 можно принять коэффициент $\eta = 0,8 \frac{\text{град}}{\text{ат}}$.

Так как величина η является конструктивной характеристикой, определение ее требуется не для каждой катушки, а только для типовых.

Нагрузочные погрешности

Нагрузочные погрешности определяются по формуле (4). Если в нее подставить значение температуры, при которой сопротивление достигает максимума

$$t_{\max} = -\frac{\alpha}{2\beta} + 20,$$

то

$$\Delta r = -2\beta\theta \left(t - t_{\max} + \frac{\theta}{2} \right). \quad (10)$$

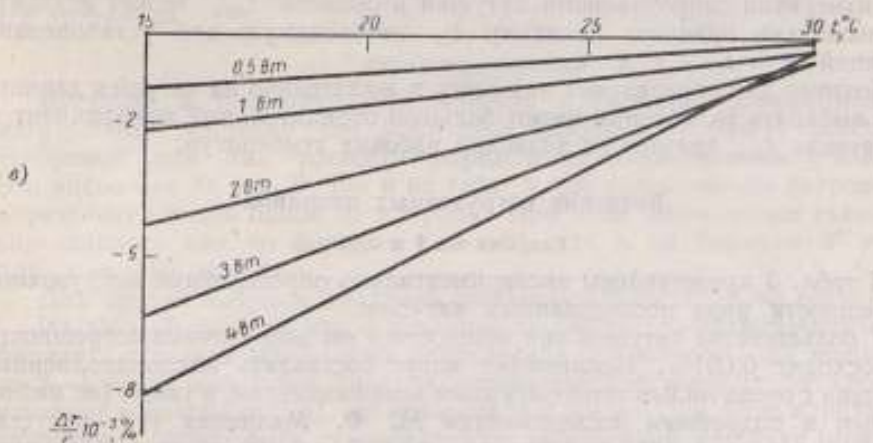
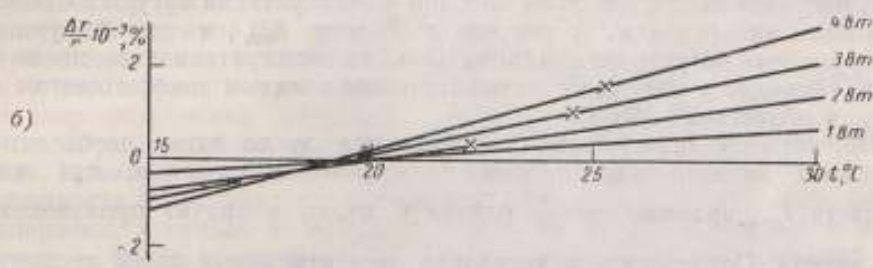
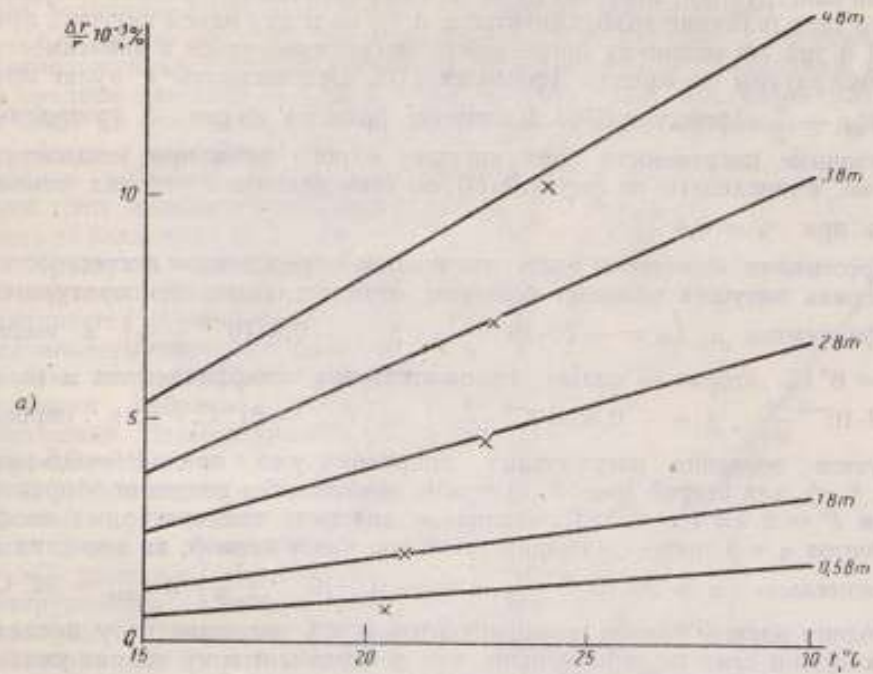


Рис. 8. Нагрузочные погрешности катушек с различными параметрами.

В то время, как величины θ и η однозначно характеризуют все катушки данной конструкции, значения Δr не только различны для разных катушек одного типа (влияние коэффициентов α и β), но и для одной катушки при одной и той же мощности погрешности могут изменяться в зависимости от температуры измерения [формула (4)], приближаясь к нулю при $t = t_{\max} - \frac{\theta}{2}$ [формула (10)]. В качестве примера на рис. 8 приведены нагрузочные погрешности трех катушек одного типа при мощностях до 4 *вт*, вычисленные по формуле (4), во всем диапазоне рабочих температур при $\eta = 0,8 \frac{\text{град}}{\text{вт}}$.

Крестиками обозначены экспериментально определенные погрешности. Первая катушка обладает большим отрицательным температурным коэффициентом α ($\alpha = -20 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$, $\beta = -0,8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}^2}$) и имеет $t_{\max} = 8^\circ \text{C}$, вторая — малым положительным коэффициентом α ($\alpha = 0,9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$, $\beta = -0,45 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}^2}$) и $t_{\max} = 21^\circ \text{C}$. Для первой требуется введение нагрузочных поправок уже при $P = 0,5 \text{ вт}$ (рис. 8, а), для второй (рис. 8, б) можно обойтись без введения поправок и при $P = 2 \text{ вт}$ (до 27°C). Численные значения температурных коэффициентов α и β третьей катушки такие же, как у первой, но значение α положительно ($\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}}$, $\beta = -0,8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}^2}$) и $t_{\max} = 32^\circ \text{C}$. Благодаря разным знакам коэффициентов α и β погрешности у последней катушки сами по себе меньше, чем у первой, к тому же они уменьшаются с увеличением температуры (рис. 8, в).

Из рисунков видно, что более выгодны в эксплуатации катушки с положительным значением α . А так как в области t_{\max} и температурные и нагрузочные погрешности минимальны, то эксплуатационное преимущество очевидно у катушек с положительным и малым коэффициентом α и t_{\max} в области $22-25^\circ \text{C}$.

Что касается определения коэффициента η , то здесь необходимы катушки с диаметрально противоположными параметрами, так как в области t_{\max} производная $\frac{dr}{dt}$ близка к нулю, а значит производная $\frac{dt}{dr}$ — велика. Погрешность в несколько десятитысячных долей процента при измерении сопротивления катушки в области t_{\max} может исказить на несколько градусов величину t_n , необходимую для установления значений $\theta = t_n - t$ и η .

Поэтому для определения значения η желательно из катушек данного типа выбирать те, которые имеют большой отрицательный коэффициент α и значение t_{\max} далекое от значений рабочих температур.

Введение нагрузочных поправок

Катушки кл. I и 0,01

В табл. 3 представлены экспериментально определенные нагрузочные погрешности ряда исследованных катушек.

У большинства катушек при мощности 1 *вт* нагрузочные погрешности превосходят 0,001%. Исключение могут составлять маслonaполненные катушки с очень малым температурным коэффициентом, а также (по нашим данным и подробным исследованиям М. Ф. Маликова [1]) катушки из сплошного металла, для которых при $P = 1 \text{ вт}$ трудно установить определенное значение Δr вследствие его малости.

Надо напомнить, что приведенные в табл. 2 величины погрешностей получены при определенных температурах, и в соответствии с формулой (4) эти величины могут быть иными при других температурах.

Как видно из табл. 2, маслонеполненные катушки с термометром, расположенным в центре, независимо от их номинальных значений, имеют в среднем значение γ , равное 0,8 град/вт. Две последние катушки в 0,001 ом относятся к старой конструкции завода «Эталон», у которой трубочки находятся сбоку, вблизи элемента сопротивления. Это положительно сказалось на величине γ (0,2 град/вт).

Трудность определения достоверного значения γ увеличивается с уменьшением номинального значения сопротивления катушки. Поэтому часть катушек выбрана с заведомо большими температурными коэффициентами, и для катушек в 0,001 ом экспериментальные данные для мощностей, меньших 3 вт, не приводятся.

С помощью температурно-нагрузочного коэффициента, присущего катушке данной конструкции, сопротивление ее может быть определено с погрешностью $\pm 0,001\%$ по температурной формуле (8) или (9) при мощностях по крайней мере до 3 вт. На рис. 9 приводится пример устранения нагрузочных погрешностей таким способом. Кривая 1 изображает погрешности сопротивления катушки № 4121 без введения нагрузочных поправок, а кривая 2, полученная при тех же температурах и мощностях, — после введения нагрузочных поправок при значении $\gamma = 0,85$ град/вт. Как видно из рис. 9, практически нагрузочные погрешности устранены.

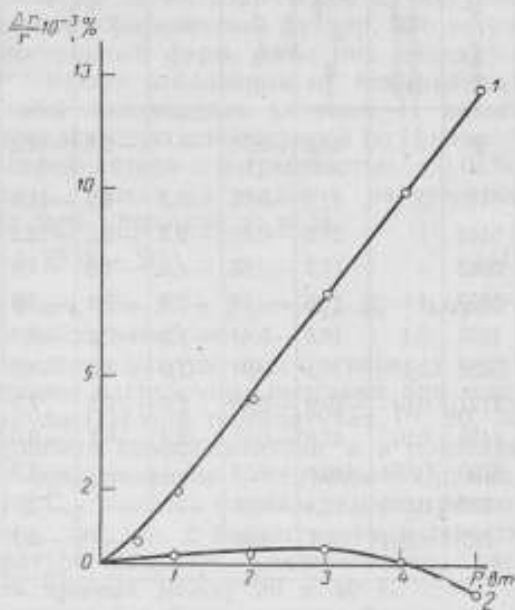


Рис. 9. Погрешности $\gamma_{\text{выч.}} - \gamma_{\text{эксп.}}$ для катушки № 4121.

1 — без введения в температурную формулу нагрузочных поправок; 2 — после введения нагрузочных поправок.

Эталонные катушки

Введение в температурную формулу с помощью коэффициента γ нагрузочной поправки для эталонных катушек не может обеспечить требуемой для них точности определения сопротивления $\pm 0,0001\%$. Это видно как из рис. 9, так и из табл. 3, где сопоставлены погрешности определения θ для одной из катушек. При этом вычисленное значение θ определялось как по формуле $\theta' = aP^2$, так и по формуле $\theta'' = \gamma P$, при $\gamma = 0,85$ град/вт.

Для других катушек получены приблизительно такие же результаты.

Из табл. 3 следует, что с помощью температурно-нагрузочного коэффициента успешно устраняется нагрузочная погрешность при мощностях до 3—4 вт только у тех катушек, сопротивление которых должно быть известно с погрешностью, не меньшей $\pm 0,001\%$. При этом определение значения γ может быть произведено по упрощенной методике (при мощностях 0,1 и 3 вт) и только для нескольких катушек данного типа.

Таблица 2

Номер катушки	Номинальное значение сопротивления, Ω	Температурные коэффициенты		Нагрузочные погрешности $\frac{\Delta r}{r} \cdot 10^{-3} \%$ при мощностях, $вт$					γ , град/вт	Конструкция
		$\alpha \cdot 10^{-6} \frac{1}{град}$	$\beta \cdot 10^{-6} \frac{1}{град^2}$	1	2	3	4	5		
2	1	16,8	-0,75	—	-0,8	-1,1	-1,3		0,25	Из сплошного металла
6140	1	21,7	-0,75	-5,3	-9,3	-12,8	-12,6		2,5	Двухстенная герметизированная
6143	1	21,0	-0,65	-5,3	-9,5	-12,2	-12,0		2,5	
5542	1	17,7	-0,65	-1,5	-1,9	-1,9	-1,9		0,8	
5959	1	21,6	-0,87	-2,0	-2,9	-3,9	-4,4		0,9	
1935	0,1	18,5	-0,44	-1,3	-2,2	-2,3	-2,8		0,8	Маслонаполненная с трубкой для термометра в центре
5636	0,1	27,1	-0,84	-1,8	-3,0	-3,7	-4,2		0,8	
4121	0,01	20,0	-0,80	2,0	4,5	7,3	10,0		0,85	
4438	0,01	47,5	-0,55	-3,0	-6,1	-9,0	-12,0	-14,8	0,7	
8190	0,001	10,6	-0,59	—	—	-2,9	—	-4,2	0,8	Маслонаполненная с трубкой сбоку
797	0,001	45,4	-0,55	—	—	-2,7	—	-4,5	0,2	
787	0,001	62,7	-0,65	—	—	-3,7	—	-6,0	0,2	

Таблица 3

P , $вт$	$\Delta \theta = (\theta_{выч} - \theta_{исп})^{\circ} C$	
	при $\theta_{выч} = 5^{\circ}$	при $\theta_{выч} = 4^{\circ}$
0,1	-0,01	-0,09
0,5	-0,01	-0,18
1	+0,03	-0,17
2	+0,04	-0,10
3,3	0	+0,05
4	-0,01	+0,17
5,6	+0,03	+0,57

Использование эталонных катушек при повышенных мощностях ограничено необходимостью изучения нагрузочной кривой $\theta = F(P)$ индивидуально для каждой катушки. При сравнительно небольших мощностях (до 1—2 $вт$), при которых в силу малого температурного коэффициента манганина нагрузочные погрешности имеют такой же порядок, как и случайные погрешности измерения, процесс изучения катушек сопряжен со значительными экспериментальными трудностями.

В связи с этим, в особенности учитывая сложные вычисления, следует воздерживаться от применения эталонных катушек (с погрешностью $\pm 0,0001\%$) при мощностях, превышающих $0,1 \text{ вт}$.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШЕК II КЛАССА

Катушки с сопротивлением от 1 до 10^{-3} ом на мощности до 3 вт

Катушки II класса на мощности до 3 вт отличаются от катушек I класса тем, что либо они имеют перфорированный футляр, что встречается только среди катушек иностранных фирм, либо они находятся в сплошном футляре, но имеют большие отклонения от номинальных значений. Специальных конструкций маломощных катушек II класса не имеется, поэтому катушки I класса зачастую используются по II классу. Однако сопротивление их может определяться с погрешностью $\pm 0,01\%$. В этом случае требуется проверить, нужно ли введение нагрузочной поправки (4), которая здесь может быть упрощена до вида

$$N = \theta [\alpha + 2\beta (t - 20)], \quad (11)$$

так как в худшем случае ($P = 3 \text{ вт}$, $\theta = 3^\circ$ и $\beta = -0,1 \cdot 10^{-3} \%/град^2$) расчет дает $\beta\theta^2 = 1 \cdot 10^{-3}\%$, чем можно пренебречь.

Для проверки необходимости введения нагрузочных поправок у катушек II класса на рис. 10, а построены нагрузочные поправки при мощности 3 вт , вычисленные по формуле (11) при температурах $10, 20, 30$ и 40° C для катушек с температурными коэффициентами α в пределах от $-4 \cdot 10^{-3}$ до $+4 \cdot 10^{-3} \%/град$ и коэффициентом $\eta = 1 \text{ град/вт}$. Прямая, соответствующая поправкам при 10° C , относится к очень редко встречающимся, почти веревальным случаям, так как с возрастанием мощности естественно возрастает и температура катушки. Следовательно, рассматривать нужно только область прямых между 20 и 40° C .

Из рис. 10, а, где жирными линиями 1 и 2 ограничена область допустимых погрешностей для катушек II класса, видно, что при значении $\eta = 1 \text{ град/вт}$ не требуется вводить нагрузочные поправки в диапазоне температур $20-40^\circ \text{ C}$ для катушек с температурными коэффициентами α от $-1 \cdot 10^{-3}$ до $+3 \cdot 10^{-3} \%/град$. При температурных коэффициентах, численно превосходящих указанные значения, уменьшается диапазон температур измерения, при которых можно обойтись без введения нагрузочной поправки. Треугольные участки за пределами линий 1 и 2, ограниченные линиями 10° и 40° соответственно, указывают, при каких значениях α и t нагрузочные поправки превосходят допустимую величину $\pm 0,01\%$.

Приведенный выше цифровой материал и график (рис. 10) справедливы при значении $\eta < 1 \text{ град/вт}$. Изменение значения η в ту или иную сторону поворачивает параллельные прямые относительно оси α , расширяя диапазон величин α и t при уменьшении значения η и сужая его при увеличении значения η (рис. 10, б).

Таким образом, катушки типов ОКВ-2, ОКН-2, ОКС-2 и Р-321 с сопротивлением $1-10^{-3} \text{ ом}$, имеющие температурный коэффициент α в пределах от $-1 \cdot 10^{-3}$ до $+3 \cdot 10^{-3} \%/град$ при использовании их по II классу не требуют введения нагрузочных поправок при мощностях до 3 вт .

Для катушек II класса серийного производства, отличных от указанных типов, может потребоваться определение величины η , являющейся характеристикой типа. Так как расчеты показывают, что незначительная погрешность измерения сопротивления в некоторых случаях может исказить величину θ на несколько градусов, а вместе с нею и значение η , то, несмотря на значительно большие допустимые погрешности для

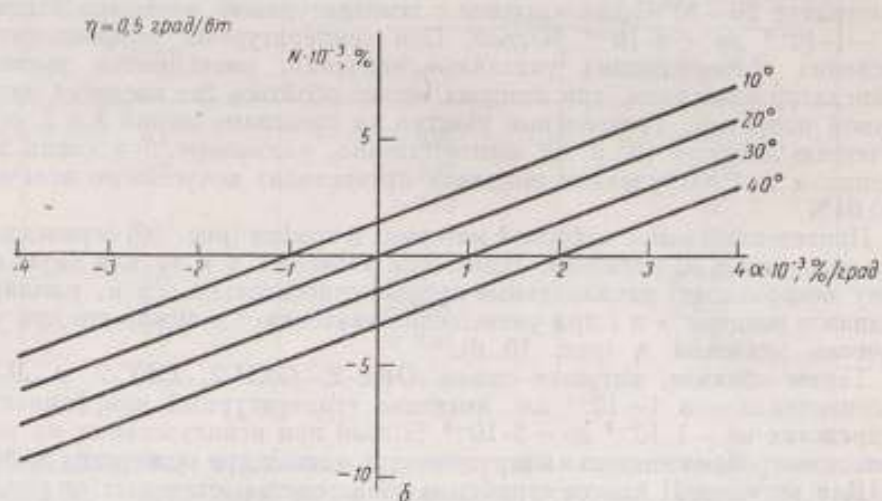
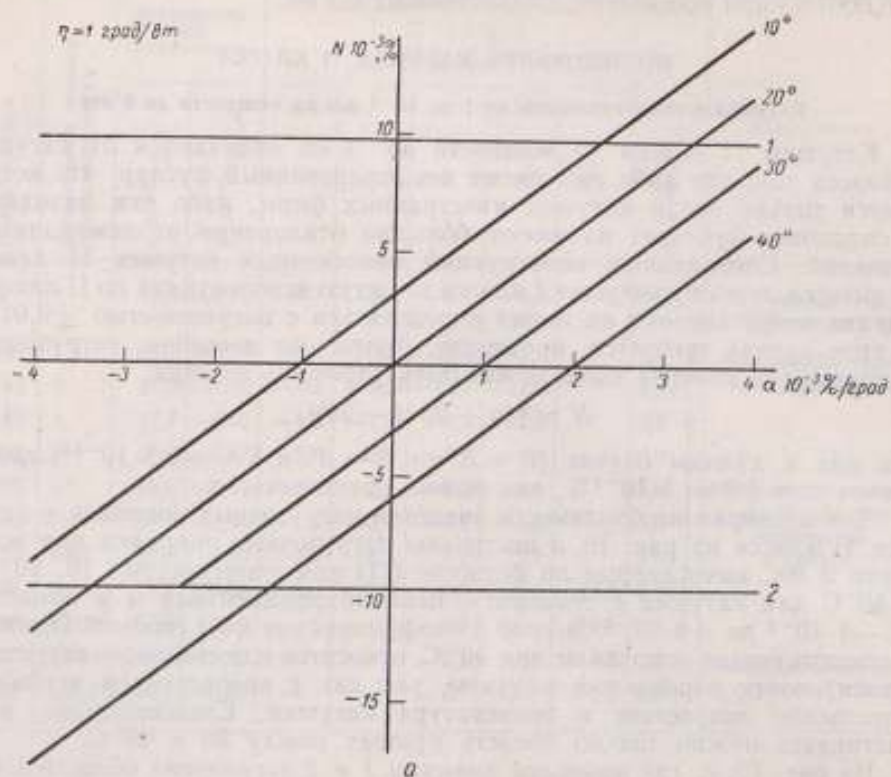


Рис. 10. Нагрузочные поправки для катушек II класса при $P = 3 \text{ вт}$.

катушек II класса (0,01%), их сопротивление при малой³ и большой нагрузке для определения θ должно измеряться с той же высокой точностью ($1 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-4}$ %), как и для катушек более высоких классов точности.

Катушки в 0,0001 Ом на мощности до 3 Вт

Исследовались четыре катушки: две типа ОКН-5 завода «Эталон» с центральным расположением трубочки для термометра (№ 7600 и 7601) и две фирмы Сименс-Гальске, из которых одна (№ 3054032) в перфорированном футляре. В катушки фирмы Сименс термометр устанавливается на дно через центральное отверстие крышки.

В табл. 4 приведены значения η , полученные для исследуемых катушек; тут же для справок приведены свойственные им величины α , β и t_{\max} .

Таблица 4

Номер катушки	α , $10^{-6} 1/\text{град}$	β , $10^{-6} 1/\text{град}$	t_{\max} , град	Экспериментальные данные при $P = 3 \text{ Вт}$			Вид футляра
				t , °C	t_n^a , °C	η , град/Вт	
Фирма Сименс-Гальске							
1985572	-37,6	-0,32	-39	23,5	29	1,8	Сплошной
3054032	-5,5	-0,32	11	21	29	2,7	Перфорированный
Завод «Эталон»							
7600	19,8	-0,88	31	26	27	0,2—0,3	Сплошной
7601	37,5	-0,72	46	26	27	0,2—0,3	.

Анализируем данные табл. 4. В катушке с перфорированным футляром величина η (θ) велика, так как термометр здесь измеряет по существу температуру масла в термостате. Действительно, температура в этой катушке ($t = 21^\circ \text{C}$) значительно ниже, чем в других. Замена фирменного футляра сплошным (катушка № 1985572) уменьшила величину η , но не снизила ее до обычной, свойственной маслонаполненной конструкции (0,8 град/Вт). Это обстоятельство объясняется тем, что из-за отсутствия трубочки для термометра последний устанавливается на дно, где (как показала экспериментальная проверка распределения температур по высоте катушки) температура масла t оказывается самой низкой. Отсюда $\theta = t_n - t$ должна быть значительной величиной.

Вследствие больших значений η можно ожидать больших погрешностей в определении сопротивления без нагрузочных поправок, тем более, что обе катушки обладают отрицательным коэффициентом α и, в особенности, одна из них с весьма большим значением $\alpha = -37 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$. На рис. 11 представлены погрешности при мощностях 1, 2 и 3 Вт для обеих катушек, вычисленные по формуле (4) после подстановки туда значения $\theta = \eta P$. Здесь же крестиками обозначены экспериментально определенные погрешности $\frac{\Delta r}{r}$ при $P = 3 \text{ Вт}$. Из рис. 11 видно, что при таком

значении P катушки нельзя использовать по II классу без введения нагрузочной поправки, а катушка с большим коэффициентом α требует поправки даже при $P = 2 \text{ Вт}$.

В катушках завода «Эталон» трубочка укреплена в верхней части масляного пространства. Кроме того, симметрично с двух сторон к трубочке на расстояние 4—5 мм подходят две внутренние параллельные пластины. Таким образом, в катушках типа ОКН-5 центральное располо-

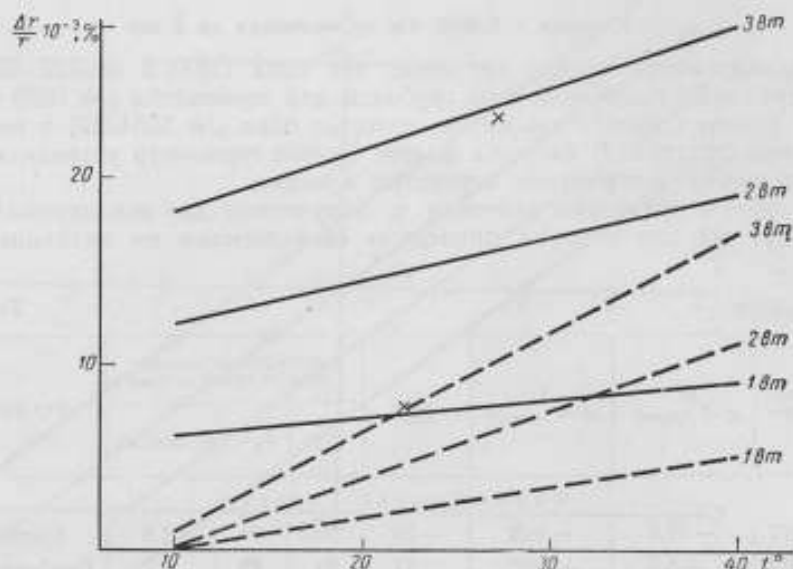


Рис. 11. Нагрузочные погрешности катушек 10^{-4} ом фирмы Сименс-Гальске. Сплошные линии — у катушки в сплошном футляре; пунктирные линии — у катушки в перфорированном футляре.

жение термометра способствует малому превышению температуры элемента, трудно уловимому при измерениях. Нагрузочные погрешности обеих катушек малы, несмотря на значительный температурный коэф-

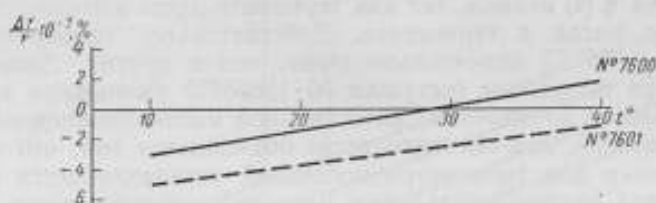


Рис. 12. Нагрузочные погрешности катушек 10^{-4} ом завода «Эталон» при $P = 3$ вт.

фициент одной из них, и, как видно из графика рис. 12, для катушек типа ОКН-5 завода «Эталон» нагрузочные поправки до 3 вт не требуются.

Для исследования катушек 10^{-4} ом при мощностях 3 вт применялась та же методика, что и для катушек большего номинального значения, потому что было желательно установить примерные величины θ и η у катушек, выпускаемых в серийном порядке. Однако, если для катушек фирмы Сименс-Гальске можно было установить достаточно определенные значения θ и η в силу их значительных величин, то для катушек завода «Эталон» присущие им очень малые значения η можно было выявить с величайшим трудом путем многократных измерений, сопоставлений результатов и всестороннего их анализа.

Допустимые токи для катушек малого сопротивления, рассчитанных даже на небольшие мощности, достаточно велики. Так, например, ток для катушки в 0,0001 ом при мощности рассеяния 3 вт составляет ~ 170 а.

Трудности, связанные с недостаточной чувствительностью схемы и с большими погрешностями, неизбежными при больших токах, заставляют отказаться от определения значения η и искать другие методики для выявления нагрузочных свойств образцовых мер с сопротивлением 10^{-4} ом и ниже, применяемых по II классу.

Один из таких методических приемов заключается в следующем. При малой нагрузке устанавливаются параметры $r_{20,0}$, α и β . Затем при номинальной мощности определяют величины нагрузочных поправок при различных температурах, хотя бы при двух, по возможности отдаленных от t_{max} на несколько градусов. Далее, построив по экспериментальным данным график вида $N = \varphi(t)$ при $P = \text{const}$ (рис. 13),

который в соответствии с формулой (4) является прямой линией, можно путем экстраполяции выявить максимальную разницу поправок во всей области рабочих температур. Если эта разница не превышает 0,01%, то выражение в квадратных скобках формулы (11) можно положить постоянной величиной, вследствие чего эта формула примет вид

$$N = A\theta.$$

Подставив сюда величину $\theta = \eta P$, получим

$$N = A\eta P = \lambda P. \quad (12)$$

При помощи формулы (12) по экспериментальным данным графика рис. 13 можно оценить нагрузочные свойства изучаемой катушки нагрузочной характеристикой λ , полученной как среднее значение из двух:

$$\lambda_1 = \frac{N_{t_1}}{P} \quad \text{и} \quad \lambda_2 = \frac{N_{t_2}}{P},$$

т. е.

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{N_{t_1} + N_{t_2}}{2P}. \quad (13)$$

Коэффициент λ имеет размерность *ом/ватт* и, в отличие от температурно-нагрузочного коэффициента η , может быть назван просто нагрузочным.

Будучи связанным с параметрами катушки через выражение

$$\lambda = \eta [\alpha + 2\beta (t - 20)],$$

коэффициент λ является сугубо индивидуальным для каждой катушки и не может быть установлен единым для типа.

Если максимальная разница поправок N превышает 0,01%, приходится коэффициент η определять по методике, применяемой для катушек I класса.



Рис. 13. $N = \varphi(t)$ при $P = \text{const}$.

МЕРЫ МАЛОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, РАССЧИТАННЫЕ НА БОЛЬШИЕ ТОКОВЫЕ НАГРУЗКИ (БОЛЬШЕГРУЗНЫЕ)

Большегрузные меры изготовлены главным образом иностранными фирмами; отечественная промышленность выпускает их в редких случаях единичными экземплярами. Погрешности большегрузных мер не нормированы. Однако в связи с тем, что эти меры предназначены для измерения больших токов и для поверки шунтов, аттестация их желательна как мер II класса с погрешностью, не превышающей 0,01%.

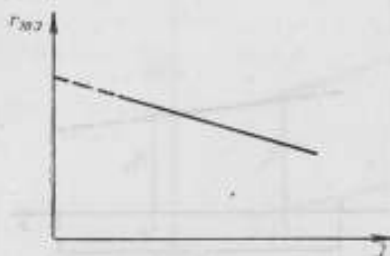


Рис. 14. $r_{20,J} = \psi(J)$.

Так как меры на большие токи встречаются в виде единичных мер, они не требуют типовых характеристик и могут быть исследованы и аттестованы одним из наиболее удобных для них способов.

При правильном расчете конструкции меры на большие токи удается посредством водяного охлаждения поддерживать в ней желаемую температуру. Возможность применения водяного охлаждения и используется при исследовании меры. Поддерживая при различных токовых нагрузках температуру, близкую к 20°С, можно определить приближенное значение η из формулы (11)

$$\eta = \frac{N}{P_{\Sigma}} \quad (14)$$

При невозможности поддерживать температуру 20°С при всех нагрузках приходится определять значение η с помощью формулы (4).

Оба способа правомочны при условии, что температура элемента сопротивления не превосходит 40°С, иначе появляется опасность, что температурные коэффициенты α и β , считающиеся в среднем неизменными в диапазоне температур 10 ÷ 40°С, могут принять другие значения.

Однако можно получить правильную температурно-нагрузочную закономерность, приняв чисто условно другие допущения. Например, считать коэффициенты α и β функциями мощности, или сопротивление r_{20} — функцией мощности или тока.

Первая закономерность

$$r_{t,P} = r_{20,0} + \alpha(P)(t - 20) + \beta(P)(t - 20)^2$$

очевидно крайне громоздка и сложна во всех отношениях.

Вторая закономерность

$$r_{t,J} = r_{20,J} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (15)$$

оказывается гораздо удобнее. Для этого вычисляем значения $r_{20,J}$ по формуле (15) через измеренные сопротивления $r_{t,J}$. Затем строим график вида $r_{20,J} = \psi(J)$ (рис. 14), откладывая здесь же значение $r_{20,0}$, определенное при малой нагрузке, и устанавливаем возможность спрямления кривой. В последнем случае (наиболее благоприятном и обычно возможном) для катушек II класса найдем уравнение прямой

$$r_{20,J} = r_{20,0} + KJ$$

и, наконец,

$$r_{t,J} = r_{20,0} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 + KJ. \quad (16)$$

(Здесь K является также нагрузочным коэффициентом, однако размерность его будет ом/а.)

Формула (16), как и выражение (12), удобна тем, что избавляет от необходимости определения температуры как величины, требующей очень высокой точности измерения сопротивления. Однако нагрузочные коэффициенты в этих формулах зависят от температуры, при которой измеряются катушки. Погрешности в величине сопротивления определяются различием в коэффициенте λ или K при разных температурах и одной и той же мощности. Погрешности уменьшаются, если катушка эксплуатируется при той же температуре, при которой определяется нагрузочный коэффициент.

По ходу выполнения работы было изучено несколько большегрузных катушек, имеющихся в распоряжении ВНИИМ. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Номер катушки	Фирма	Номинальное значение сопротивления, ом	$\alpha \cdot 10^{-3} \%/град$	$J_{ном}, вт$	$\gamma, град/вт$	$\frac{\Delta r}{r} \%$ при $J_{ном}$ и $t=20^\circ C$
1430	Вольф	10^{-4}	1,8	1000	0,06	0,01
3842	"	10^{-4}	0,6	1000	0,05	0,01
465	ВИМС	10^{-4}	2,5	1000	0,09	0,02
463	"	10^{-4}	3,1	1000	0,03	0,01
30004	КЗИП	10^{-4}	-3,7	400	0,25	0,02
L-187798	Кембридж	10^{-5}	0,8	1000		
			В пределах погрешности измерений (0,002%) нагрузочные погрешности неощутимы			
30001	КЗИП	10^{-5}	-28	1200	0,21	0,09
			Для определения сопротивления катушки № 30001 установлена формула			
			$r_t, \Omega = r_{20,0} + \alpha (t - 20) + KJ,$			
			$\alpha = -28 \cdot 10^{-3} \%/град,$			
			$K = -0,75 \cdot 10^{-11} ом/вт$			

Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Электрические характеристики образцовых катушек сопротивления $r_{20,0}$, α и β , определенные при малой мощности (0,1—0,2 вт), не обеспечивают при повышенных нагрузках точность определения сопротивления, соответствующую разряду и классу катушки.

Нагрузочные погрешности можно устранить введением в температурную формулу дополнительной поправки, учитывающей превышение температуры элемента сопротивления t_n над температурой окружающей его среды t .

2. Для эталонных катушек (допустимая погрешность $\pm 0,0001\%$) устранение нагрузочной погрешности возможно путем исправления температуры на величину θ . Однако, вследствие трудности ее определения и сложности подсчетов сопротивления с введением ее в температурную формулу, эталонные катушки не рекомендуется применять при мощностях, больших 0,1 вт.

3. Для образцовых катушек с допустимой погрешностью $\pm 0,001$ и $\pm 0,01\%$ нагрузочные погрешности успешно устраняются при мощ-

ностях до 3 *вт* введением в температурную формулу дополнительного температурно-нагрузочного коэффициента η , зависящего от конструкции катушки. Вследствие того, что величина η является конструктивной нагрузочной характеристикой, определение ее требуется не для каждой катушки, а только для нескольких катушек, выбранных из типа.

Исследованиями существующих конструкций образцовых катушек сопротивления отечественного производства с сопротивлением от 1 до 10^{-3} *ом* установлены определенные значения коэффициента η , причем для маслонаполненных катушек типов ОКС-2, ОКВ-2, ОКН-2, катушек прежних выпусков завода «Эталон» с центральным расположением трубочки для термометра и катушек двустенной герметизированной конструкции типа Р-321 коэффициент $\eta = 0,8$ *град/вт*, а для катушек из сплошного металла $\eta = 0,25$ *град/вт*. Определение значения η требуется при разработке новой конструкции катушек или для катушек других номинальных значений.

4. Точность определения сопротивления $\pm 0,01\%$ обеспечивается при мощностях до 3 *вт* без введения нагрузочных поправок:

а) для катушек указанных выше типов, обладающих температурными коэффициентами α в пределах от $-1 \cdot 10^{-3}$ до $+3 \cdot 10^{-3}$ *%/град*;

б) для катушек в 0,0001 *ом* типа ОКН-5 ($\eta = 0,2$ *град/вт*).

5. Меры электрического сопротивления с водяным охлаждением, рассчитанные на большие токи, отличаются малыми значениями η , однако при больших мощностях влияние коэффициента η делается значительным, так что для обеспечения точности $\pm 0,01\%$ его приходится учитывать.

6. Так как величина η , определяемая через превышение температуры элемента сопротивления над температурой окружающей среды θ , требует для своего установления высокой точности измерения сопротивления, трудно достижимой при исследовании катушек сопротивления 10^{-4} *ом* и ниже, то для них предлагается пользоваться одним из приближенных нагрузочных коэффициентов λ или K , для установления которых не требуется определение значения θ . Коэффициенты λ и K не являются типовыми и должны устанавливаться для каждой катушки отдельно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маликов М. Ф., Труды ВИМС, № 127, 1933.
2. Третьяк Г. Т., Лысов Н. Е., Основы тепловых расчетов электрической аппаратуры, ОНТИ, 1935.

А. К. КОЛОСОВ, Е. А. ЧАЛОВА

СОСТОЯНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭТАЛОНА ВОЛЬТА СССР

Государственный эталон вольты воспроизводится и хранится во ВНИИМ в лаборатории эталонов электрических единиц имени М. Ф. Маликова.

Первичная эталонная группа, состоящая в настоящее время из 20 насыщенных нормальных элементов*, изготовленных согласно спецификации, разработанной ВНИИМ, представляет собой производный групповой эталон вольты переменного состава.

Хранение вольты осуществляется посредством этого эталона; значение вольты определяется как среднее арифметическое из всех значений насыщенных нормальных элементов, входящих в состав эталона. Каждый насыщенный нормальный элемент группового эталона имеет определенное численное значение э. д. с., но сам он не может воспроизводить вольт с метрологической точностью. Хранение вольты с помощью группового эталона обеспечивает более высокую неизменность его, так как каждый насыщенный нормальный элемент контролируется другими элементами и сам в свою очередь служит для контроля. Если взаимное постоянство элементов сохраняется, то можно полагать, что величина вольты, определенная средним арифметическим из значений элементов, составляющих первичную группу, не претерпевает больших изменений. При этом необходимо учитывать, что насыщенный нормальный элемент, хотя и дает при определенных условиях устойчивую э. д. с., однако со временем она понижается. Насыщенный нормальный элемент является сложной многофазной физико-химической системой, в которой совершается длительный процесс «старения элемента», связанный с понижением э. д. с. со временем.

Опыт хранения эталона вольты во ВНИИМ показал, что в среднем понижение значения э. д. с. эталонных насыщенных нормальных элементов составляет от 1 до 3 *мкв* в год при условии хранения элементов при постоянной температуре, причем элементы могут обладать нормальной э. д. с. 30 и более лет. Однако иногда наблюдается резкое понижение э. д. с. элементов, и они выходят из строя.

Насыщенные нормальные элементы, изготовленные для Главной палаты мер и весов в 1912 г. в Национальной физической лаборатории Англии сотрудником Главной палаты А. Б. Ферингером, проработали 20 лет в качестве эталонных элементов [1].

* Первоначально число их было равно 25.

В 1932 г. точная величина международного вольта была вновь установлена посредством серебряного вольтметра и ртутных образцов международного ома [2]. Среднее значение э. д. с. элементов оказалось равным 1,018254 международного вольта, вероятная погрешность была равна 8 *мкв*. В результате этой работы было обнаружено понижение э. д. с. элементов за время их применения, равное 132 *мкв*. Причиной значительного понижения э. д. с. элементов были неблагоприятные условия хранения элементов в Главной палате мер и весов (в 1918—1921 гг. лаборатории не отапливались). Понижение значения э. д. с. действующего группового эталона вольта с 1939 г. по 1948 г. в среднем составляло около 2 *мкв* в год. Столь незначительное понижение э. д. с. эталонных элементов в условиях эвакуации (1941—1944 гг.) объясняется надлежащим хранением эталона и исключительно осторожным обращением с ним во время перевозки и хранения его в Свердловском филиале ВНИИМ.

Посредством серебряного вольтметра можно было регулярно определять понижение значения э. д. с. элементов, производя повторные определения э. д. с. К сожалению, у нас и в других национальных метрологических лабораториях не было регулярных определений значений э. д. с. по серебряному вольтметру, и это привело к большим расхождениям между эталонами различных стран.

Предпринятые по инициативе нашего института в 1926—1927 гг. международные сравнения эталонов ома и вольта показали, что наибольшее расхождение между эталонами международного ома различных метрологических лабораторий достигает 60 *мком*, а между эталонами международного вольта 100 *мкв* [3]. Состояние эталона вольта до 1938 г. было освещено в статье Е. С. Чураевой [4]. Для повышения точности и надежности поддержания группового эталона была еще создана группа эталонных элементов сравнения вольта. Ежегодно производятся сличения каждого элемента этой группы с каждым элементом, входящим в состав первичного группового эталона, и значение э. д. с. эталонных элементов сравнения выражается через среднее значение э. д. с. группового эталона. Элементы сравнения являются посредниками при сличении образцовых нормальных элементов 1-го разряда с первичным эталоном вольта. Образцовые нормальные элементы 1-го разряда применяются для дальнейшей передачи значения единицы э. д. с. во ВНИИМ, Свердловском филиале ВНИИМ, ВНИИ Комитета, ХГИМИП и НГИМИП и служат для проверки образцовых нормальных элементов 2-го разряда и рабочих насыщенных нормальных элементов I класса. По образцовым элементам 2-го разряда проверяются рабочие насыщенные нормальные элементы II класса и ненасыщенные нормальные элементы III класса. Отдельные нормальные элементы группового эталона заменялись вновь изготовленными элементами, если э. д. с. этих элементов изменялась за год больше, чем на 10 *мкв*, или если элемент обнаруживал недостаточную стабильность.

В 1938 г. было произведено обновление группового эталона путем замены элементов, э. д. с. которых понизилась более, чем на 10 *мкв*, и значение э. д. с. которых существенно отличалось от среднего значения э. д. с. группового эталона. В 1938 г. групповой эталон состоял из 24 элементов; вместо 12 исключенных элементов были включены 12 новых элементов, изготовленных в 1937 г.; значение э. д. с. их было больше значения э. д. с. исключенных элементов. Вследствие этого среднее значение э. д. с. группового эталона возросло на 11 *мкв* по сравнению с 1937 г. В табл. 1 приведены результаты сличений группового эталона вольта. Значение группового эталона электродвижущей силы было в то время равно 1,018304 международного вольта.

Таблица 1

№ элемента	Дата изготовления	Значение э. д. с. при 20° С 1938 г., международные вольты	Электрическое сопротивление, ом	№ элемента	Дата изготовления	Значение э. д. с. при 20° С 1939 г., международные вольты	Электрическое сопротивление, ом	Изменение э. д. с. 1938—1939 гг., мкв
201	14. I. 1927	1,018331	—	242	16. VI. 1927	1,018310	—	—
1150	10. V. 1932	251	572	1615	30. V. 1932	301	578	5,0
1171		274	679	1618		326	520	-12
1174		272	538	2471	5. I. 1936	330	576	5
1175		280	638	2474		277	541	-1
1615	30. V. 1932	296	578	2689	29. III. 1936	295	576	9
1618		338	520	2690		316	621	1
2471	5. I. 1936	325	576	2691	26. III. 1937	296	536	-13
2474		278	541	2693		310	617	-4
2533	29. III. 1936	288	641	2695	25. XII. 1937	320	937	3
2535		294	645	2697		294	567	-18
2536		286	576	2699		290	648	-14
2689		315	621	2701		301	645	-14
2690		316	614	2702		314	635	-6
2691		309	536	2704		321	616	1
2693		314	617	2707		310	566	-10
2695		317	937	2708		334	625	3
2697		312	567	2696		306	567	—
2699		304	648	2710		300	866	—
2701	26. III. 1937	315	645	2711	29. XII. 1937	314	605	—
2702		320	635	2751		321	525	—
2704		320	616	2753		319	560	—
2707		320	566	2739		317	385	—
2708		331	625	2740	25. XII. 1937	314	370	—
Среднее значение		1,018304	614			1,018310	596	

Из графика, приведенного на рис. 1, на котором изображены отклонения значений э. д. с. нормальных элементов, входящих в состав эталонной группы, от среднего значения эталонной группы, видно, что значение э. д. с. семи элементов оказалось значительно ниже среднего значения группы, а поэтому их решено было заменить другими элементами с более высокими значениями э. д. с.

Разность между значениями э. д. с. отдельных элементов составляла 80 мкв. Замена элементов была произведена перед сличениями 1939 г. Вместо 4 элементов, изготовленных в 1932 г., и 2 элементов, изготовленных в 1936 г., было введено 7 элементов, изготовленных в 1937 г. В результате замены элементов групповой эталон в 1939 г. состоял из 25 элементов, и значение его э. д. с. стало равным 1,018310 международного вольты, т. е. повысилось по сравнению с 1938 г. на 6 мкв за счет замены некоторых

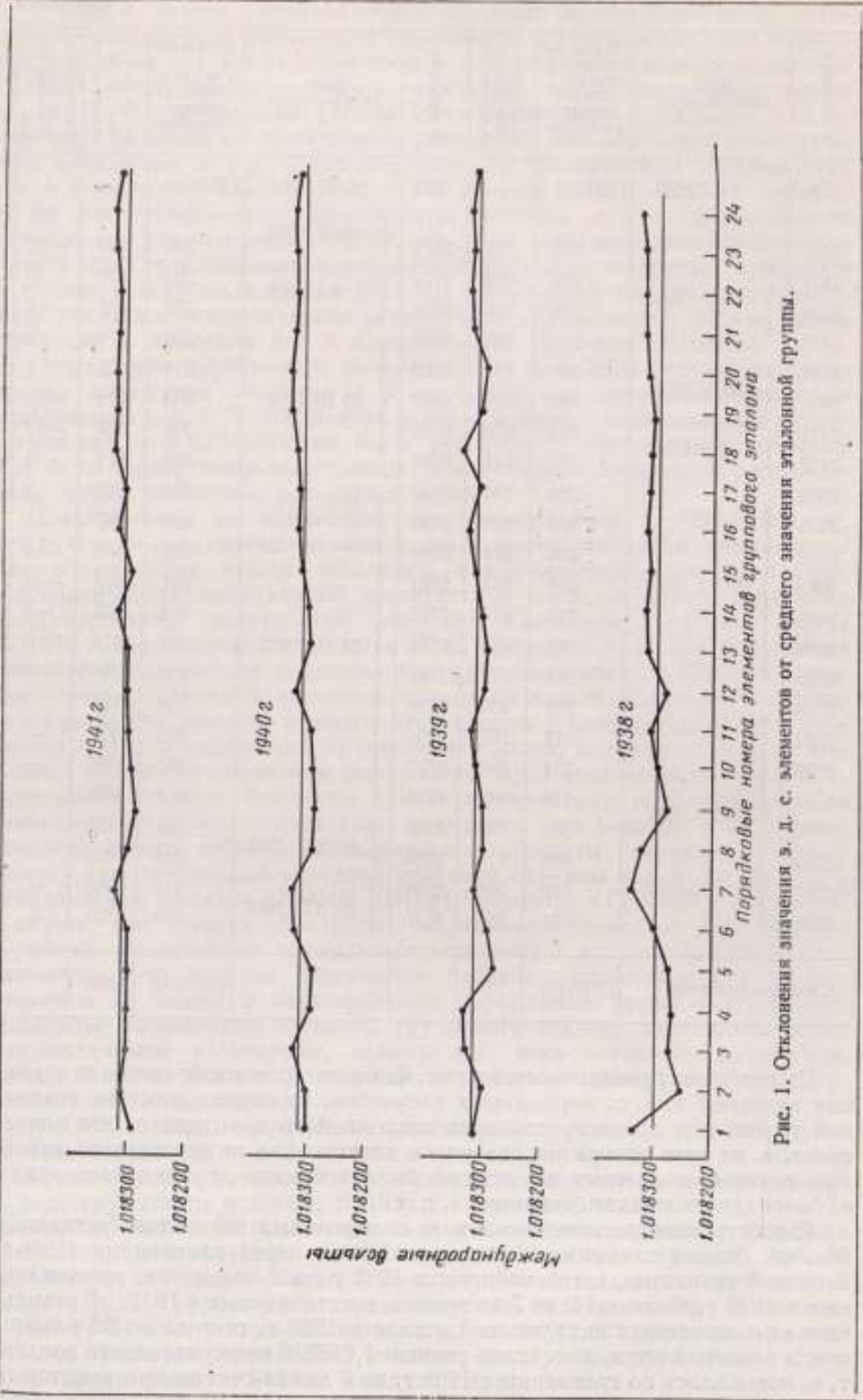


Рис. 1. Отклонения значения э. д. с. элементов от среднего значения эталонной группы.

элементов с большими значениями э. д. с. Разность между значениями э. д. с. отдельных элементов, входящих в состав группового эталона, снизилась с 80 до 56 *мкв* (рис. 1). В табл. 1 приводятся данные о времени изготовления элементов, их электрическом сопротивлении, значении их э. д. с. и ее изменении за время с 1938 по 1939 г.

В 1940 г. были исключены 8 элементов со средним значением э. д. с., равным 1,018317 международного вольта, и заменены 8 элементами, изготовленными в 1937 г. со средним значением э. д. с., равным 1,018324 международного вольта.

С 1940 г. среднее значение э. д. с. первичной эталонной группы решено было поддерживать неизменным и равным 1,018310₄ международного вольта (табл. 2). Очередные сличения показали, что в эталонной группе разность между значениями э. д. с. отдельных элементов уменьшилась и составила 35 *мкв* (рис. 1). В 1941 г. никаких замен элементов в эталонной группе не было произведено, среднее значение э. д. с. эталона, как

Таблица 2

№ элемента	Значение э. д. с. при 20° С 1940 г., международные вольты	Изменение э. д. с. 1940—1939 гг., <i>мкв</i>	Значение э. д. с. при 20° С 1941 г., международные вольты	Изменение э. д. с. 1941—1940 гг., <i>мкв</i>
1615	1,018296 ₈	-4,2	1,018295 ₁	-1,7
2536	299 ₀	4,9	303 ₁	3,2
2689	315 ₅	-0,5	302 ₀	-13,5
2690	293 ₀	-10,4	300 ₅	6,9
2691	295 ₂	-3,8	299 ₅	4,3
2693	307 ₁	-2,9	298 ₅	-8,8
2695	321 ₀	1,0	321 ₈	0,8
2697	296 ₁	2,1	300 ₀	4,8
2699	291 ₀	1,6	291 ₄	-0,2
2701	294 ₄	-6,6	295 ₄	1,0
2702	296 ₀	-17,1	304 ₀	7,1
2704	320 ₁	-0,9	310 ₁	-10,0
2707	297 ₀	-12,1	305 ₀	7,1
2710	302 ₀	2,9	307 ₅	4,9
2751	316 ₀	-5,0	305 ₈	-10,5
2739	317 ₃	0,3	316 ₂	-1,1
2740	314 ₀	0,9	311 ₅	-3,4
2870	326 ₇	—	330 ₅	4,2
2871	326 ₁	—	325 ₇	-0,4
2872	326 ₄	—	324 ₅	-1,9
2874	320 ₆	—	320 ₂	-0,4
2875	321 ₀	—	321 ₀	0,0
2876	321 ₆	—	323 ₂	2,2
2877	321 ₀	—	323 ₇	2,7
2878	319 ₅	—	322 ₁	2,3
Среднее значение	1,018310 ₄	—	1,018310 ₄	0,0

это видно из табл. 2, осталось равным 1,018310₄ международного вольта и разность между значениями э. д. с. отдельных элементов была равна 39,5 мкв (рис. 1). В июле 1941 г. эталон вольта был эвакуирован из Ленинграда в Свердловский филиал ВНИИМ вместе с частью оборудования института.

Начиная с 1942 г., в течение трех лет систематические наблюдения за эталоном вольта велись в Свердловске. Результаты этих наблюдений сведены в табл. 3, в которой указано значение и изменение э. д. с. элементов, входящих в состав эталонной группы. Из табл. 3 видно, что в 1942 г.

Таблица 3

№ элемента	Значение э. д. с. при 20° С 1942 г., международных вольты	Изменение э. д. с. 1942—1943 гг., мкв	Значение э. д. с. при 20° С 1943 г., международных вольты	Изменение э. д. с. 1943—1942 гг., мкв	Значение э. д. с. при 20° С 1944 г., международных вольты	Изменение э. д. с. 1944—1943 гг., мкв
1615	1,018310	15	1,018311	1	1,018296	-15
2536	313	10	313	0	316	3
2689	304	2	291	-13	305	14
2690	311	10	319	8	321	2
2691	310	10	309	-1	319	10
2695	306	-16	309	3	312	3
2697	305	-4	301	-4	309	8
2699	311	20	319	8	318	-1
2701	311	16	321	10	—	—
2702	316	12	320	4	321	1
2704	304	-6	303	-1	315	12
2707	319	14	321	2	321	0
2710	306	-2	302	-4	308	6
2751	299	-6	305	6	308	3
2739	307	-9	309	2	308	-1
2740	299	-12	299	0	305	6
2870	346	15	361	15	292	-69
2871	304	-22	295	-9	294	-1
2872	304	-20	307	3	299	-8
2874	317	-3	313	-4	315	2
2875	311	-10	301	-10	298	-3
2876	311	-13	314	3	315	1
2877	321	-3	329	8	322	-7
2878	—	—	323	—	—	—
Среднее значение	1,018310 ₄	0,2	1,018312 ₃	1,7	1,018309 ₃	-2,4

среднее значение э. д. с. эталонной группы, состоявшей из 23 элементов, было равно 1,018310₄ международного вольта. Отклонение отдельных элементов группового эталона показано на графике рис. 2.

В 1943 г. сличались 24 элемента, входящих в эталонную группу, и среднее значение оказалось равным 1,018312₃ международного вольта,

т. е. повысилось по сравнению с 1942 г. на 1,7 мкв за счет элемента № 2870, значение э. д. с. которого повысилось на 15 мкв, и ввода нового элемента № 2873. Отклонение отдельных элементов группового эталона показано на графике рис. 2.

В 1944 г. групповой эталон вольты состоял из 22 элементов, так как два элемента, № 2701 и 2878, были исключены. Очередное сличение показало, что среднее значение э. д. с. группового эталона, равное 1,018309, международного вольты, понизилось на 2,4 мкв по сравнению с 1943 г. Это понижение объясняется тем, что значение э. д. с. элемента № 2870 снизилось на 69 мкв, и он был исключен из состава эталонной группы. Отклонение значения э. д. с. отдельных элементов, входящих в состав группового эталона, от среднего значения э. д. с. эталона вольты показано на графике рис. 2. Из приведенной кривой видно, что значение э. д. с. большинства элементов близко к среднему значению эталона, и только значение э. д. с. элемента № 2870 отличается на 69 мкв.

В мае 1944 г. эталон вольты был возвращен во ВНИИМ из Свердловского филиала ВНИИМ. Эталонная группа в момент возвращения состояла из 22 элементов, причем значение э. д. с. трех элементов (№ 2870, 2871 и 2875) оказалось очень низким. Эти три элемента решено было заменить другими элементами и довести состав эталонной группы до 25 элементов. В 1945 г., таким образом, в эталонную группу вошло 19 элементов из прежнего состава и 6 элементов, изготовленных в 1937 г. (№ 2694, 2712, 2714, 2750, 2757 и 2758).

В 1945 г. была восстановлена и группа элементов сравнения, в состав которой вошли: элемент № 1054, изготовленный в 1931 г., элементы № 2290 и 2291, изготовленные в 1935 г., и элемент № 2974, изготовленный в 1940 г. При составлении эталонной группы и элементов сравнения стремились восстановить довоенный состав 1941 г.

Эталонная группа и элементы сравнения, находящиеся в отдельной ванне, наполненной сухим трансформаторным маслом, хранились в сейфе лаборатории. Этот сейф расположен внутри здания, лишен отопительных приборов и естественного освещения. В 1949 г. хранение эталона вольты еще улучшилось, так как температура в сейфе стала поддерживаться на уровне $20 \pm 0,05^\circ \text{C}$ нагревателями вновь изготовленного терморегулирующего устройства. Однако это устройство при внешней температуре выше 20°C перестает действовать, и поэтому в жаркое время года постоянство температуры нарушается.

В течение 1945—1947 гг. состав эталонной группы оставался постоянным. Среднее значение э. д. с. эталона, установленное в 1940 г. и равное $1,018310_4$ международного вольты, было оставлено без изменения. Результаты ежегодных сличений приведены в табл. 4. Как видно из этой таблицы, среднее значение э. д. с. эталона равно $1,018310_4 \pm 0,000001$ международного вольты. Наибольшая разность между значениями э. д. с. элементов, входящих в состав эталона, составляла 25,5 мкв (см. график рис. 2).

В результате сличений в 1945 г. выяснилось, что значение э. д. с. элемента сравнения № 1054 понизилось; вследствие этого в сентябре 1946 г. он был заменен эталонным элементом № 2733, изготовленным в 1937 г. Сличения, произведенные в 1946 г., показали, что среднее значение э. д. с. эталона, определяющее значения вольты СССР, как видно из табл. 4, равно $1,018310_4 \pm 0,0000002$ международного вольты, и наибольшая разность между значениями э. д. с. составляет 26,9 мкв (см. график рис. 2).

Сличения эталонной группы в 1947 г. показали, что эталон вольты находится в хорошем состоянии и, как видно из табл. 4, среднее значение

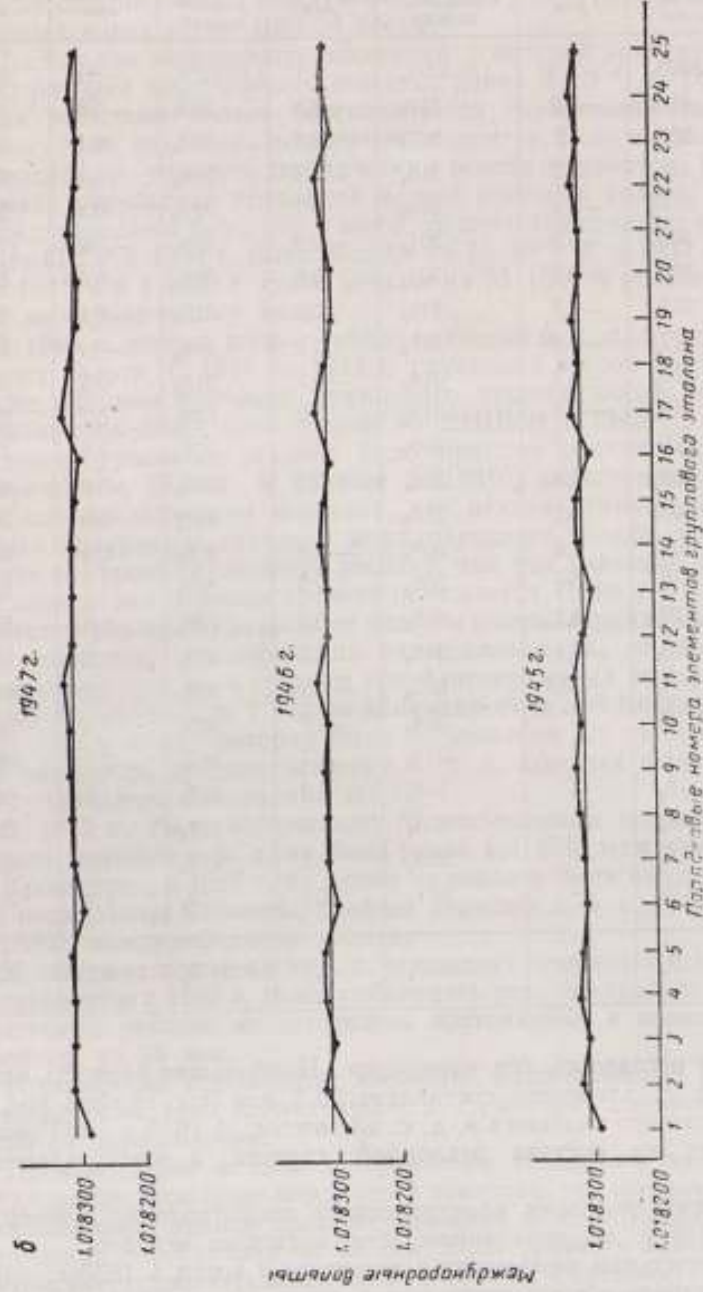
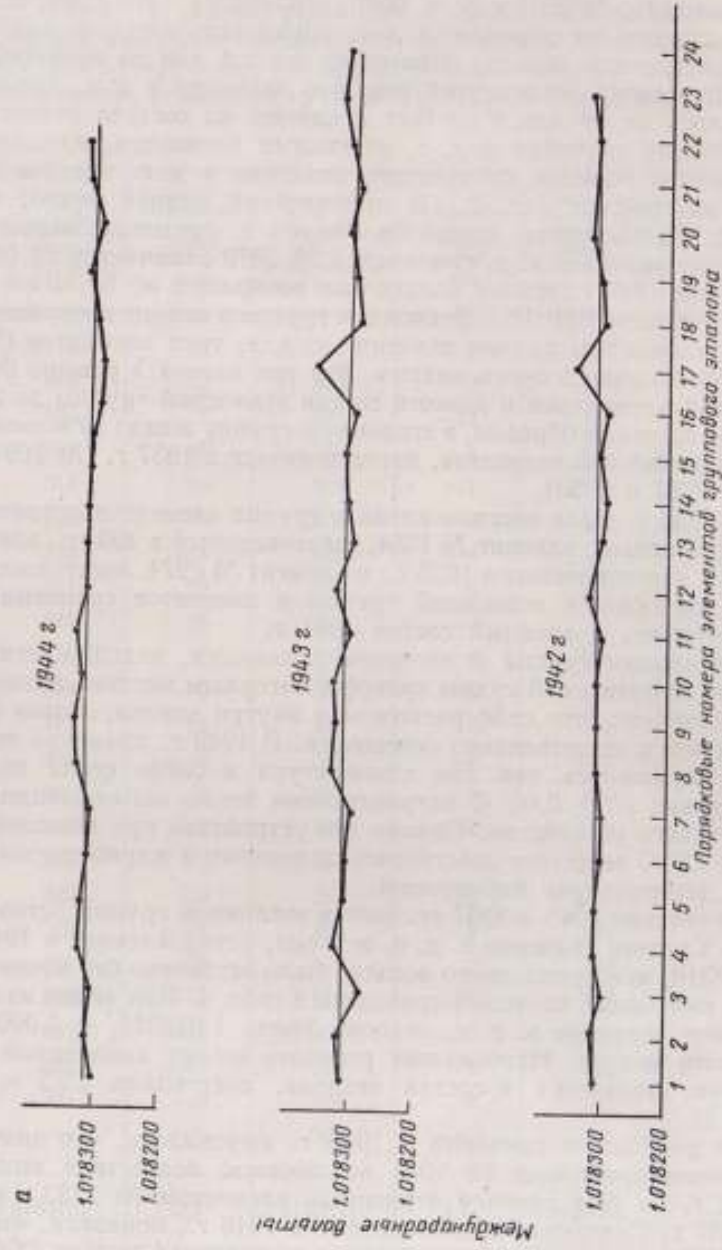


Рис. 2. Отклонения значения э. д. с. элементов от среднего значения эталонной группы:
 а — 1942 — 1944 г.г.; б — 1945 — 1947 г.г.

Таблица 4

№ элемента	Значение э. д. с. при 20° С 1945 г., международные вольты	Изменение э. д. с. 1945—1946 гг., мкв	Значение э. д. с. при 20° С 1946 г., международные вольты	Изменение э. д. с. 1946—1945 гг., мкв	Значение э. д. с. при 20° С 1947 г., международные вольты	Изменение э. д. с. 1947—1946 гг., мкв	Электрическое сопротивление 1946 г., ом
1615	1,018293 ₇	-2,3	1,018292 ₈	-1,1	1,018289 ₂	-3,4	600
2536	314 ₈	-1,2	314 ₀	-0,8	313 ₄	-0,6	620
2689	306 ₇	1,7	307 ₀	0,3	307 ₁	0,1	647
2690	317 ₃	-3,7	316 ₄	-0,9	316 ₅	0,1	795
2691	315 ₂	-3,8	315 ₀	0,7	316 ₂	0,3	595
2695	306 ₁	-5,9	301 ₂	-4,9	295 ₄	-5,8	1190
2697	308 ₀	-0,7	308 ₀	0,6	308 ₀	0,0	640
2699	315 ₂	-2,8	315 ₇	0,5	315 ₈	-0,1	690
2702	317 ₁	-3,9	317 ₂	0,1	316 ₈	-0,4	680
2704	314 ₂	-0,2	314 ₇	-0,1	315 ₂	0,5	690
2707	319 ₀	-2,0	319 ₀	0,0	319 ₁	0,1	590
2710	309 ₇	1,7	309 ₇	0,0	308 ₈	-0,9	700
2739	302 ₇	-5,3	306 ₅	3,8	307 ₂	0,8	400
2740	309 ₇	4,7	310 ₂	0,8	311 ₄	0,9	380
2751	309 ₈	1,8	309 ₂	-0,6	308 ₈	-0,4	540
2872	298 ₈	-0,4	300 ₈	2,2	302 ₀	1,2	620
2874	319 ₂	4,2	319 ₀	0,3	320 ₀	0,5	630
2876	308 ₄	-6,4	311 ₀	3,3	313 ₁	1,2	570
2877	309 ₀	-13,0	302 ₈	-6,2	304 ₆	1,8	640
2694	304 ₇	—	304 ₀	-0,7	305 ₄	1,4	1080
2712	311 ₄	—	313 ₁	1,7	312 ₈	-0,3	660
2714	318 ₄	—	318 ₂	-0,2	317 ₀	-1,2	640
2750	304 ₀	—	303 ₈	-1,0	305 ₀	1,9	510
2757	315 ₀	—	315 ₇	0,2	316 ₀	1,2	400
2758	309 ₀	—	311 ₂	2,2	312 ₂	1,0	310
Среднее значение	1,018310 ₄	0,5	1,018310 ₄	0,0	1,018310 ₄	0,0	633

э. д. с. эталона оставалось без изменения. Наибольшая разность между значениями э. д. с. элементов составляет 38,8 мкв (см. график рис. 2).

Вследствие низкого значения э. д. с. элементов № 1615 и 2695 решено было вывести их из состава эталонной группы, а новых элементов не включать.

В табл. 4 даны значения электрического сопротивления элементов, найденные в 1946 г. на переменном токе мостовым методом.

Восьмая генеральная конференция по мерам и весам в 1933 г. представила Международному комитету мер и весов полномочия установить отношения между международными и абсолютными электрическими единицами.

Консультативный комитет по электричеству в 1939 г. наметил осуществить переход на абсолютную систему практических единиц с 1 января

1940 г. Однако вследствие второй мировой войны Международный комитет мог собраться только в 1946 г. и установил окончательную дату введения абсолютной системы практических единиц (1 января 1948 г.) [5].

Для введения новых абсолютных единиц в СССР были приняты следующие соотношения: 1 международный ом равен 1,00049 абс. ом; 1 международный вольт равен 1,00034 абс. в.

Предельная погрешность измерений, с которой практически сличаются в лаборатории нормальные элементы, равна $5 \cdot 10^{-6}$ в. Точность поддержания величины вольта обеспечивается групповым эталоном э. д. с. и зависит от характера «старения» элементов. Если поправки на старение не вводить, то точность поддержания вольта понизится. Если проанализировать результаты сравнений наших эталонов вольта, произведенных в Международном бюро мер и весов, то значение единицы международного вольта СССР в 1934 г. было больше на $13 \cdot 10^{-6}$ в, в 1937 г. уменьшилось на $6 \cdot 10^{-6}$ в и в 1939 г. стало меньше на $23 \cdot 10^{-6}$ в по отношению к среднему международному вольту.

В 1948 г. возник вопрос, какое значение э. д. с. придать групповому эталону вольта. С 1941 по 1944 г. групповой эталон находился в Свердловске. Первые сличения группового эталона после возвращения его из эвакуации были произведены во ВНИИМ в 1945 г., причем среднее значение группового эталона было принято практически совпадающим со значением 1939 г. и равным 1,018310₄ международного вольта.

Наши исследования показали, что нельзя длительное время поддерживать правильное значение международного вольта, приписывая неизменное значение групповому эталону, так как значение э. д. с. нормальных элементов с течением времени понижается. Скорость понижения э. д. с. элементов различна, зависит от чистоты составляющих веществ, конструкции элементов, спецификации изготовления их, от условий хранения элементов и пр., но в среднем при благоприятных условиях э. д. с. элементов колеблется за 1 год на величину от долей микровольта до 5 мкв.

В 1939 г. в лаборатории было изготовлено 220 насыщенных нормальных элементов, среднее значение э. д. с. которых было равно 1,018324 международного вольта при 20° С.

В 1947 г. было изготовлено 52 насыщенных нормальных элемента; среднее значение э. д. с. их было равно 1,018363 международного вольта.

Кроме того, в 1947 г. на одном из заводов были изготовлены насыщенные нормальные элементы, среднее значение э. д. с. которых было равно 1,018369 международного вольта.

Повышение значения э. д. с. вновь изготовленных в 1947 г. элементов по сравнению с 1939 г. можно объяснить тем, что среднее значение э. д. с. группового эталона не оставалось постоянным, а понизилось за 8 лет, вероятно, на 39 мкв.

Насыщенные нормальные элементы, изготовленные по определенной спецификации, дают одинаковую э. д. с., которая понижается со временем после их изготовления.

Произведенное в 1939 г. сравнение эталонных элементов ВНИИМ в Международном бюро мер и весов показало, что среднее значение э. д. с. этих элементов меньше среднего значения э. д. с. 6 национальных метрологических лабораторий на 23 мкв. Если привести значение э. д. с. элементов, изготовленных во ВНИИМ в 1939 г., к среднему международному значению вольта, то получим $1,018329 - 23 \cdot 10^{-6} = 1,018306$ международного вольта.

Для того, чтобы получить значение э. д. с. вновь изготовленных в 1947 г. элементов в тех же единицах, что для 1939 г., надо вычесть $23 + 39 = 62$ мкв из значения их э. д. с., что даст 1,018301 международ-

ного вольта. Основное требование, которое предъявляется к насыщенным нормальным элементам, заключается в том, что они, будучи изготовлены по строго определенной спецификации, должны давать одинаковую э. д. с. в пределах погрешности изготовления элементов.

Совершенно независимо от вышеприведенных вычислений можно оценивать уменьшение э. д. с. элементов, пользуясь формулой, предложенной Норманом Шоу [6]

$$E_m = A + B \lg(M + \tau).$$

В этой формуле E_m — изменение э. д. с. насыщенных нормальных элементов за m месяцев; A , B и τ — постоянные, которые могут быть определены при изучении нормальных элементов с момента их «вызревания». Для подсчета изменения э. д. с. 15 нормальных элементов, изготовленных в 1937 г. и входящих в групповой эталон 25 элементов, была использована формула

$$E_m = 55 - 39,4 \lg(M + 5).$$

Согласно этой формуле в 1948 г. среднее значение э. д. с. 15 эталонных элементов понизилось на 29,2 мкв. Так как старение было изучено не для всех элементов, а только для 15 из них, а также учитывая, что групповой эталон претерпел эвакуацию в Свердловск и обратное перемещение в Ленинград, то полученное по формуле понижение могло бы быть больше. В результате расчетов, основанных на получении одинаковой э. д. с. элементов, вновь изготовленных по определенной спецификации, было вычислено понижение э. д. с. нормальных элементов с 1939 г. по 1948 г., равное 39 мкв, а по формуле старения 29,2 мкв. Для установления вероятного понижения э. д. с. элементов за 8 лет было принято среднее значение понижения э. д. с., а именно $\frac{39 + 29,2}{2} = 34,1$ мкв.

Для установления окончательного понижения э. д. с. решено было принять еще во внимание, что среднее значение э. д. с. элементов ВНИИМ при международных сравнениях в 1939 г. было меньше на 23,1 мкв по сравнению с эталонами других стран, т. е., что общее изменение должно составить $34,1 + 23,1 = 57,2$ мкв, или с округлением 60 мкв.

Ученый совет ВНИИМ предложил в 1948 г. изменить значение э. д. с. группового эталона в соответствии с установленным в 1946 г. Международным комитетом мер и весов соотношением: 1 международный вольт равен 1,00034 абс. в, но с учетом понижения значения э. д. с. группового эталона ВНИИМ на 60 мкв. Это постановление ученого совета ВНИИМ было утверждено Комитетом по делам мер и измерительных приборов [7].

В соответствии с этим в 1948 г. было установлено новое значение э. д. с. группового эталона вольта, равное 1,018590 абс. в, вместо ранее действовавшего значения, равного 1,018310, международного вольта.

Перед началом сличений 1948 г. из состава группового эталона было выведено два элемента, в составе эталона осталось 23 элемента.

Результаты сличений за три года (1948—1950) показали, что эталонная группа находится в хорошем состоянии; среднее значение э. д. с. оставлено без изменения. Разность между значениями э. д. с. элементов составляла (рис. 3): в 1948 г. — 24 мкв, в 1949 г. — 28 мкв и в 1950 г. — 33,1 мкв. В табл. 5 приведены результаты сличений с 1948 до 1951 г. и изменения значений э. д. с. за эти годы.

В 1951 г. элемент № 2877 вследствие низкого значения э. д. с. был исключен из группового эталона без замены, и в составе группового эталона осталось 22 элемента.

Таблица 5

№ элемента	Значение э. д. с. при 20° С, абс. в							
	1948 г.	изменение э. д. с. 1948—1947 гг., мкв	1949 г.	изменение э. д. с. 1949—1948 гг., мкв	1950 г.	изменение э. д. с. 1950—1949 гг., мкв	1951 г.	изменение э. д. с. 1951—1950 гг., мкв
2536	1,018592 ₄	-1,0	1,018591 ₈	-0,6	1,018592 ₄	0,6	1,018590 ₅	-1,9
2689	87 ₀	-0,1	87 ₂	0,2	88 ₁	0,9	85 ₁	-3,0
2690	96 ₂	-0,3	96 ₁	-0,1	96 ₀	-0,1	95 ₈	-0,2
2691	94 ₈	-1,4	95 ₄	0,8	96 ₀	0,4	94 ₂	-1,8
2697	88 ₀	-0,4	88 ₅	0,1	89 ₄	0,8	87 ₂	-2,2
2699	94 ₄	-1,2	95 ₄	1,0	95 ₂	-0,1	94 ₂	-1,0
2702	95 ₀	-1,5	96 ₀	1,3	95 ₀	-0,7	95 ₀	-0,9
2704	93 ₀	-1,6	95 ₀	1,4	94 ₂	-0,8	93 ₄	-0,8
2707	96 ₈	-2,3	98 ₀	1,2	96 ₈	-1,2	95 ₈	-1,2
2710	88 ₀	-0,3	88 ₇	0,2	89 ₀	0,6	87 ₂	-2,1
2739	87 ₅	0,2	87 ₈	0,1	88 ₇	0,1	87 ₈	-1,2
2740	89 ₀	-1,5	90 ₀	0,1	91 ₀	1,9	90 ₇	-1,2
2751	86 ₁	-2,7	86 ₂	0,1	86 ₀	0,1	84 ₂	-2,1
2872	81 ₈	-0,2	81 ₂	-0,6	82 ₂	1,0	81 ₇	-0,5
2874	96 ₄	-3,6	97 ₂	0,8	98 ₀	0,8	97 ₁	-0,9
2876	92 ₅	-0,6	92 ₇	0,2	93 ₀	1,2	92 ₄	-1,5
2877	72 ₀	-11,8	70 ₀	-2,8	64 ₀	-5,1	—	—
2694	82 ₇	-2,7	81 ₄	-1,3	80 ₀	-0,5	76 ₇	-4,2
2712	92 ₄	-0,4	91 ₀	-0,5	91 ₈	-0,1	90 ₈	-1,2
2714	97 ₈	0,3	96 ₈	-0,5	97 ₅	0,7	95 ₀	-2,5
2750	84 ₄	-0,9	85 ₁	0,5	84 ₂	-0,9	81 ₃	-2,9
2757	94 ₈	-2,1	94 ₈	0,0	94 ₄	-0,4	91 ₃	-2,9
2758	93 ₁	0,9	91 ₃	-1,8	91 ₂	-0,1	88 ₀	-2,4
Среднее значение	1,018590 ₄	-1,5	1,018590 ₄	0,0	1,018590 ₄	0,0	1,018590 ₄	-1,8

Сличения 1951 г. показали, что наибольшая разность между значениями э. д. с. элементов составляет 19 мкв (рис. 3). Среднее значение э. д. с. эталона было сохранено прежним.

В 1952 г. под руководством старшего научного сотрудника С. В. Горбачевича было произведено первое определение значений э. д. с. четырех эталонных элементов сравнения за № 2733, 2291, 2290 и 2974 с помощью новых токовых весов № 2.

По этим четырем элементам были определены значения э. д. с. группы из 22 элементов, причем среднее значение э. д. с. группы оказалось равным 1,018582₀ абс. в. Наибольшая разность между значениями э. д. с. элементов составляет 19,2 мкв (рис. 3). Среднее значение э. д. с. группового эталона уменьшилось на 8,4 мкв по сравнению со значением э. д. с. эталона в 1951 г.

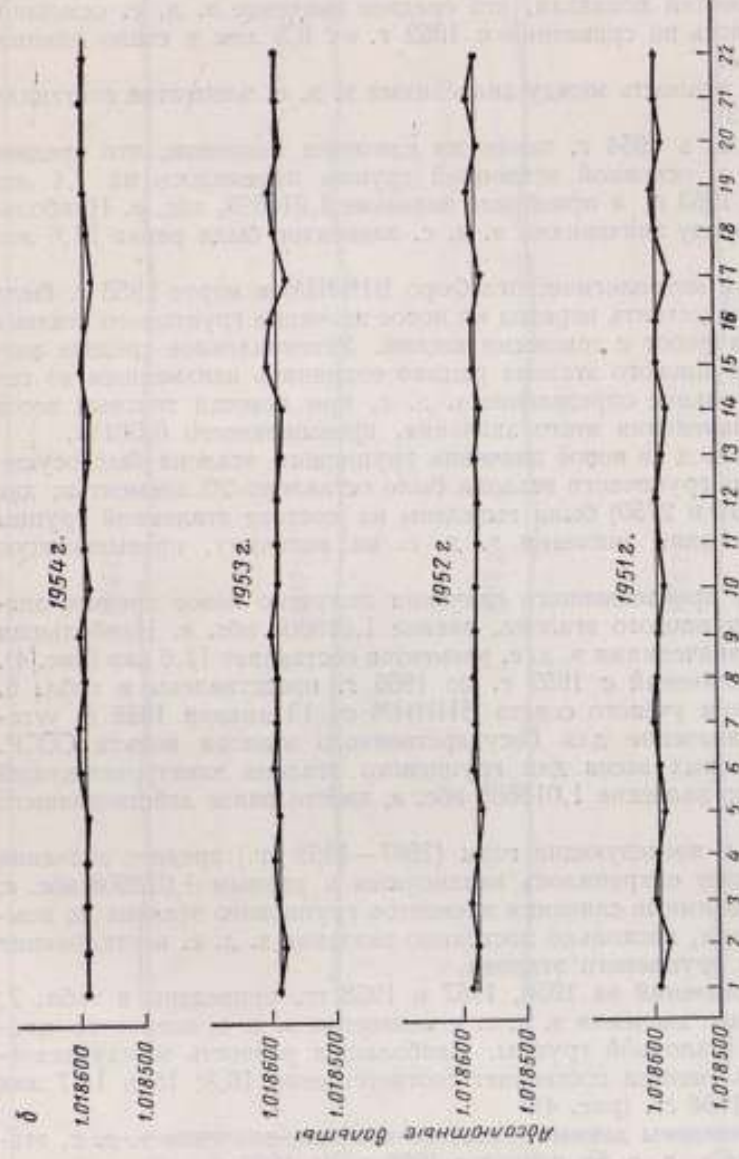
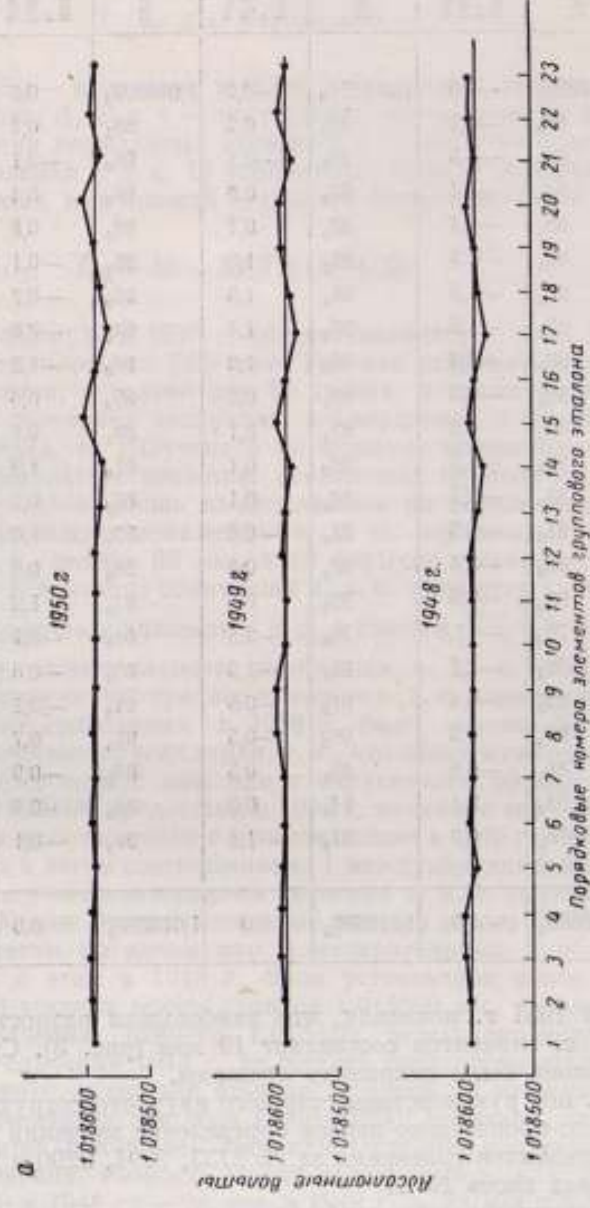


Рис. 3. Отклонения значения э. д. с. элементов от среднего значения эталонной группы:
 а — 1948 — 1950 гг.; б — 1951 — 1954 гг.

На основании результатов определения значений э. д. с. с помощью токовых весов № 2 в 1952 г. два эталонных элемента № 2290 и 2974, э. д. с. которых снизилась на величину, превышающую 10 *мкв*. были заменены элементами № 5643 и 5646, изготовленными в 1951 г. В 1953 г. по эталонным токовым весам и эталонной катушке электрического сопротивления были произведены новые определения э. д. с. эталонных элементов, которые были затем сличены с элементами основной группы. Результаты сличений показали, что среднее значение э. д. с. основной группы изменилось по сравнению с 1952 г. на 9,3 *мкв* и стало равным 1,018591₃ абс. в.

Наибольшая разность между значениями э. д. с. элементов составила 20,4 *мкв* (рис. 3).

Произведенные в 1954 г. такие же сличения показали, что среднее значение э. д. с. основной эталонной группы изменилось на 1,4 *мкв* по сравнению с 1953 г. и приобрело значение 1,018592, абс. в. Наибольшая разность между значениями э. д. с. элементов была равна 21,6 *мкв* (рис. 3).

На совещании метрологического бюро ВНИИМ в марте 1953 г. было постановлено осуществить переход на новое значение группового эталона после окончания работ с токовыми весами. Установленное среднее значение э. д. с. группового эталона решено сохранять неизменным до тех пор, пока контрольное определение э. д. с. при помощи токовых весов не обнаружит изменения этого значения, превышающего 0,001%.

В 1955 г. переход на новое значение группового эталона был осуществлен. В составе группового эталона было оставлено 20 элементов; два элемента (№ 2694 и 2750) были выведены из состава эталонной группы вследствие понижения значения э. д. с. на величину, превышающую 0,001%.

В результате произведенного сличения получено новое среднее значение э. д. с. группового эталона, равное 1,018608 абс. в. Наибольшая разность между значениями э. д. с. элементов составляет 12,6 *мкв* (рис. 4).

Результаты сличений с 1952 г. по 1955 г. представлены в табл. 6. Постановлением ученого совета ВНИИМ от 13 января 1956 г. установлено новое значение для Государственного эталона вольты СССР. Посредством токовых весов для группового эталона электродвижущей силы установлено значение 1,018608 абс. в, вместо ранее действовавшего 1,018593 абс. в.

В 1956 г. и в последующие годы (1957—1958 гг.) среднее значение группового эталона сохранилось неизменным и равным 1,018608 абс. в; произведенные взаимные сличения элементов группового эталона на компенсаторе показали, насколько постоянно значение э. д. с. и отклонение его от значения группового эталона.

Результаты сличений за 1956, 1957 и 1958 гг. приведены в табл. 7, в которой указаны: значения э. д. с. и изменение э. д. с. элементов, входящих в состав эталонной группы. Наибольшая разность между значениями э. д. с. элементов составляет соответственно 16,3; 15 и 14,7 *мкв* за 1956, 1957 и 1958 гг. (рис. 4).

В табл. 8 приведены данные о составе эталона, значение э. д. с. эталона и изменение э. д. с. за период с 1938 г. по 1958 г.

На рис. 5 изображено изменение значения э. д. с. элементов, входящих в состав эталонной группы в период с 1938 г. по 1958 г. Из рис. 5 видно, что вначале (с 1938 г. по 1945 г.) значения э. д. с. некоторых элементов сильно изменялись; это можно объяснить начальным периодом «вызревания», который характеризуется повышением и понижением э. д. с. элементов, а затем нормальные элементы становятся более стабильными.

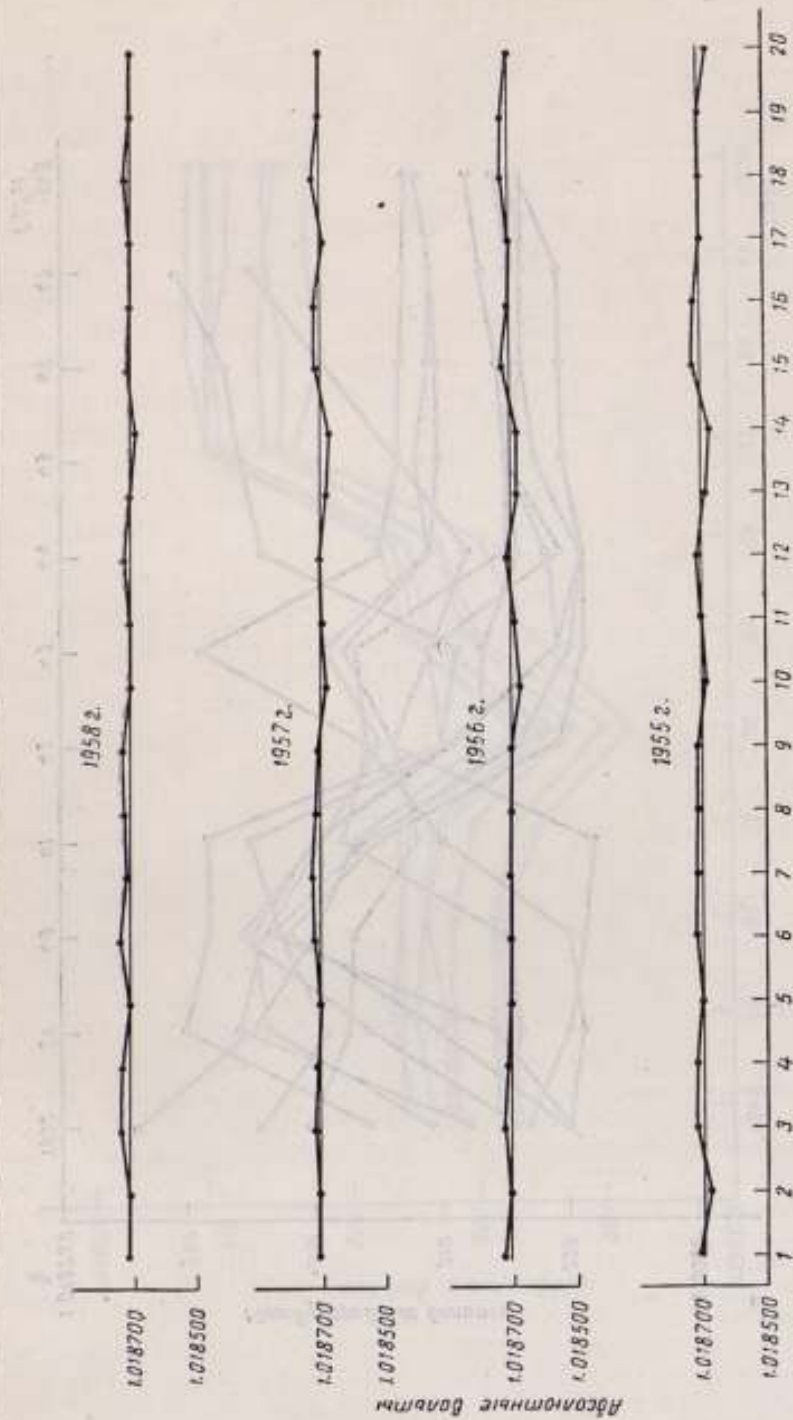


Рис. 4. Отклонения значения 9. д. с. элементов от среднего значения эталонной группы.

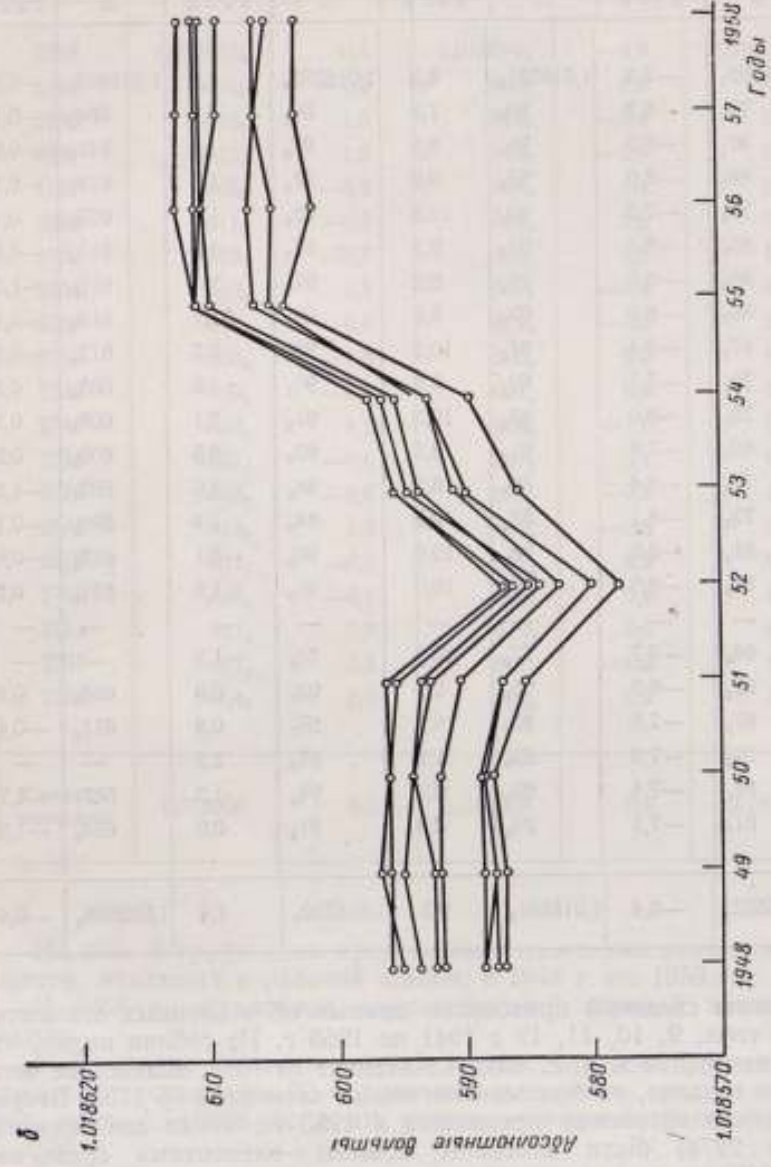
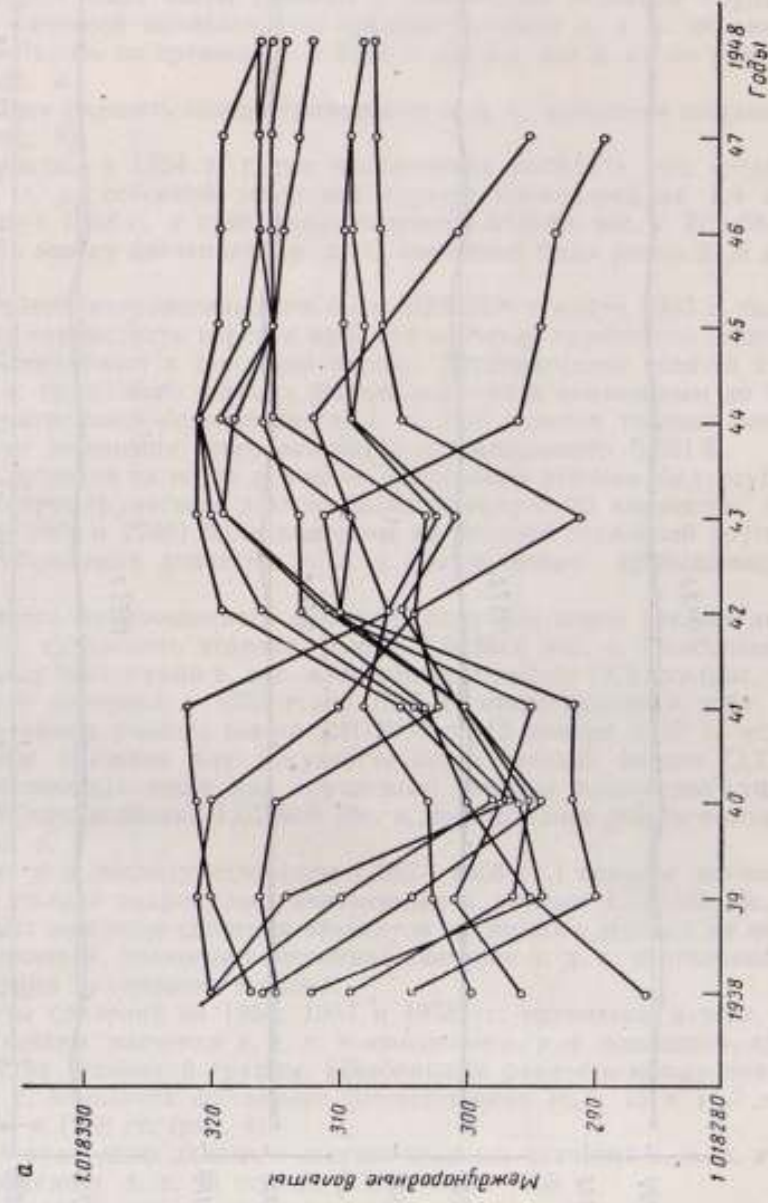


Рис. 5. Состояние группового эталона вольты.
 а — 1938 — 1948 гг.; б — 1948 — 1958 гг.

Таблица 6

№ элемента	Значение э. д. с. при 20° С, абс. в							
	1962 г.	изменение в э. д. с. 1962—1961 гг., мкВ	1963 г.	изменение в э. д. с. 1963—1962 гг., мкВ	1964 г.	изменение в э. д. с. 1964—1963 гг., мкВ	1965 г.	изменение в э. д. с. 1965—1964 гг., мкВ
2536	1,018582 ₇	-7,2	1,018591 ₀	8,3	1,018592 ₀	1,9	1,018607 ₁	-0,8
2689	78 ₂	-6,9	86 ₀	7,8	89 ₀	3,6	604 ₂	-0,4
2690	87 ₁	-8,7	95 ₀	8,5	97 ₄	1,8	611 ₀	-0,6
2691	86 ₂	-8,0	95 ₂	9,6	97 ₂	1,5	612 ₁	-0,2
2697	79 ₀	-7,3	90 ₂	10,3	92 ₁	1,9	607 ₅	0,4
2699	85 ₀	-8,4	95 ₂	9,3	97 ₁	1,9	611 ₃	-0,8
2702	86 ₂	-8,8	95 ₄	9,2	97 ₃	2,1	611 ₂	-1,3
2704	85 ₂	-8,2	93 ₇	8,5	95 ₄	1,7	610 ₀	-0,4
2707	87 ₂	-8,4	97 ₄	10,2	98 ₁	0,7	612 ₄	-0,7
2710	79 ₀	-7,7	89 ₁	9,6	90 ₁	1,0	605 ₄	0,3
2739	79 ₀	-8,0	89 ₀	10,1	91 ₂	2,1	606 ₂	0,3
2740	82 ₀	-7,8	91 ₂	8,3	93 ₇	2,5	609 ₂	0,5
2751	77 ₀	-6,4	86 ₂	8,5	88 ₂	2,0	602 ₁	-1,2
2872	73 ₀	-8,1	83 ₄	9,8	84 ₀	1,4	599 ₇	-0,1
2874	88 ₂	-8,8	96 ₂	10,0	98 ₂	-0,1	612 ₄	-0,8
2876	84 ₄	-8,0	94 ₄	10,0	96 ₀	1,6	611 ₂	0,2
2877	—	—	—	—	—	—	—	—
2694	69 ₀	-7,7	77 ₀	10,9	76 ₀	-1,3	—	—
2712	82 ₄	-8,2	92 ₂	9,9	93 ₁	0,8	608 ₀	0,8
2714	87 ₂	-7,8	95 ₀	8,7	96 ₇	0,8	611 ₃	-0,4
2750	74 ₂	-7,0	85 ₀	11,6	87 ₀	2,0	—	—
2757	84 ₁	-7,4	93 ₂	9,1	94 ₄	1,2	607 ₇	-1,7
2758	81 ₇	-7,1	90 ₀	8,8	91 ₄	0,9	604 ₀	-1,5
Среднее значение	1,018582 ₀	-8,4	1,018591 ₂	9,3	1,018592 ₇	1,4	1,018608 ₂	-0,4

Для полноты сведений приводятся данные об эталонных элементах сравнения в табл. 9, 10, 11, 12 с 1941 по 1958 г. Из таблиц видно, что наибольшее изменение э. д. с. показал элемент № 1054, вследствие чего, как уже было сказано, он был заменен новым элементом № 2733. Вторая замена элементов сравнения произошла в 1953 г., когда два элемента (№ 2290 и 2274) были заменены новыми элементами сравнения (№ 5643 и 5646).

На заседании ученого совета ВНИИМ 12. VI. 56 г. были утверждены в качестве рабочих эталонов единиц э. д. с. четыре насыщенных н. э. за № 5637, 5662, 5677 и 5679, изготовленные в 1951 г.

Эти н. э. после изготовления в течение пяти лет изучались для определения стабильности э. д. с. Значение их э. д. с. было определено по новому значению группового эталона.

Таблица 7

№ элемента	Значение э. д. с. при 20° С 1955 г., абс. в	Изменение э. д. с. 1955—1955 гг., мкв	Значение э. д. с. при 20° С 1957 г., абс. в	Изменение э. д. с. 1957—1956 гг., мкв	Значение э. д. с. при 20° С 1958 г., абс. в	Изменение э. д. с. 1958—1957 гг., мкв
2536	1,018607 ₂	0,4	1,018606 ₄	-0,9	1,018606 ₁	-0,3
2689	602 ₂	-1,3	603 ₇	1,2	603 ₃	-0,1
2690	612 ₇	1,3	612 ₃	-0,4	612 ₄	0,1
2691	612 ₈	1,2	612 ₂	-0,6	612 ₁	-0,1
2697	605 ₀	-2,2	606 ₄	1,4	606 ₀	0,2
2699	611 ₀	-0,6	612 ₀	1,0	612 ₁	0,1
2702	610 ₇	-0,7	610 ₀	0,2	610 ₃	-0,1
2704	610 ₄	0,8	609 ₀	-0,9	609 ₃	-0,2
2707	612 ₃	0,7	612 ₀	-0,6	612 ₁	0,1
2710	603 ₃	-1,3	603 ₃	0,0	604 ₀	0,2
2739	603 ₀	-2,5	604 ₄	0,8	604 ₂	0,4
2740	610 ₀	1,2	608 ₃	-1,2	609 ₁	0,3
2751	601 ₄	-0,4	601 ₀	0,1	601 ₇	0,2
2872	598 ₇	-0,6	598 ₃	-0,2	598 ₀	0,4
2874	614 ₀	1,9	613 ₃	-0,5	613 ₃	0,3
2876	611 ₁	-0,2	611 ₄	0,3	611 ₇	-0,3
2712	608 ₃	-0,1	608 ₂	0,2	608 ₄	-0,1
2714	611 ₇	0,8	612 ₀	0,3	611 ₇	-0,3
2757	607 ₂	0,3	607 ₄	-0,3	606 ₀	-0,6
2758	604 ₇	0,1	604 ₀	0,2	603 ₀	-1,0
Среднее значение	1,018608	0,0	1,018608	0,0	1,018608	0,0

На рис. 6 графически представлено изменение значений э. д. с. элементов, входящих в рабочий эталон, с 1948 г. по 1958 г.

В 1955 г. установлен нижеследующий порядок хранения эталона вольта.

1. Хранение единицы вольта осуществляется групповым эталоном вольта, состоящим из 20 нормальных элементов, среднее значение которого равно 1,018608 абс. в, что установлено при посредстве токовых весов в 1955 г.

2. Среднее значение эталона и значение э. д. с. каждого отдельного элемента устанавливается путем взаимных сличений с 4 эталонными элементами сравнения, значения э. д. с. которых определены в 1955 г. при посредстве токовых весов.

Для обеспечения наибольшей достоверности определения э. д. с. элементов на токовых весах измерения производятся в течение месяца, причем э. д. с. каждого элемента сравнения определяется 10 раз.

Таблица 8

Годы	Число элементов группового эталона	Среднее значение группового эталона		Изменение значения группового эталона, мкв
		международные вольты	абс. в	
1938	24	1,018304		6,0
1939	25	1,018310		6,0
1940	25	1,018310 ₄		0,4
1941	25	1,018310 ₄		0,0
1942	23	1,018310 ₉		0,2
1943	24	1,018312 ₃		1,7
1944	22	1,018309 ₉		-2,4
1945	25	1,018310 ₄		0,5
1946	25	1,018310 ₄		0,0
1947	25	1,018310 ₄		0,0
1948	23	1,018310 ₄	1,018590 ₄	—
1949	23		1,018590 ₄	0,0
1950	23		1,018590 ₄	0,0
1951	22		1,018590	0,0
1952	22		1,018582 ₀	-8,4
1953	22		1,018591 ₃	9,3
1954	22		1,018592 ₇	1,4
1955	20		1,018608 ₉	15,6
1956	20		1,018608	-0,3
1957	20		1,018608	0,0
1958	20		1,018608	0,0

Таблица 9

№ эталонного элемента сравнения	Год изготовления	Значение э. д. с. при 20° С, международные вольты						
		1941 г.	1945 г.	изменение э. д. с. 1946—1947 гг., мкв	1948 г.	изменение э. д. с. 1946—1948 гг., мкв	1947 г.	изменение э. д. с. 1947—1948 гг., мкв
		1054	1931	1,018308 ₈	1,018283 ₈	-24,9		
2290	1935	310 ₂	324 ₀	13,8	1,018323 ₃	-0,2	1,018326 ₄	2,7
2291	1935	310 ₁	321 ₆	11,5	320 ₀	-1,6	321 ₀	1,0
2733	1937	—	—	—	321 ₂	—	320 ₃	-0,9
2974	1940	319 ₆	327 ₀	7,4	324 ₇	-2,3	327 ₀	2,8
Среднее значение		1,018312 ₁	1,018314 ₀	—	1,018322 ₄	—	1,018323 ₃	1,4

Таблица 10

№ эталонного элемента сравнения	Год изготовления	Значение э. д. с. при 20° С, абс. в								
		1947 г.	1948 г.	изменение э. д. с. 1948—1947 гг., мкв	1949 г.	изменение э. д. с. 1949—1948 гг., мкв	1950 г.	изменение э. д. с. 1950—1949 гг., мкв	1951 г.	изменение э. д. с. 1951—1950 гг., мкв
2290	1935	1,018606 ₅	1,018600 ₀	-6,5	1,018602 ₂	2,2	1,018603 ₃	1,6	1,018603 ₄	-0,4
2291	1935	601 ₀	600 ₁	-0,9	600 ₀	0,8	600 ₃	-0,1	598 ₉	-1,9
2733	1937	600 ₃	598 ₂	-2,1	597 ₃	-0,9	599 ₈	2,5	592 ₇	-7,1
2974	1940	607 ₅	602 ₉	-5,5	602 ₇	0,7	604 ₃	1,6	603 ₂	-1,1
Среднее значение		1,018603 ₃	1,018600 ₁	-3,7	1,018600 ₃	0,7	1,018602 ₂	1,4	1,018599 ₈	-2,6

Таблица 11

№ эталонного элемента сравнения	Год изготовления	Значение э. д. с. при 20° С, абс. в				
		1952 г.	изменение э. д. с. 1952—1951 гг., мкв	1953 г.	1954 г.	1955 г.
2290	1935	1,018587	-16,4	—	—	—
2291	1935	594	- 4,9	1,018600	1,018600	1,018616
2733	1937	595	2,3	602	602	616
2974	1940	593	-10,2	—	—	—
5643	1951	—	—	605	605	620
5646	1951	—	—	600	600	618
Среднее значение		1,018592 ₂	- 7,3	1,018602	1,018602	1,018618

Таблица 12

№ эталонного элемента	Год изготовления	Значение э. д. с. при 20° С, абс. в				
		1956 г.	1957 г.	изменение э. д. с. 1957—1956 гг., мкв	1958 г.	изменение э. д. с. 1958—1957 гг., мкв
5637	1951	1,018618 ₇	1,018618 ₈	-0,1	1,018618 ₈	0,2
5662	1951	620 ₀	619 ₃	-0,2	619 ₃	0,0
5674	1951	619 ₄	619 ₃	0,1	619 ₅	0,0
5679	1951	617 ₆	617 ₃	-0,1	617 ₅	0,0
Среднее значение		1,018618 ₉	1,018618 ₈	-0,1	1,018618 ₉	0,1

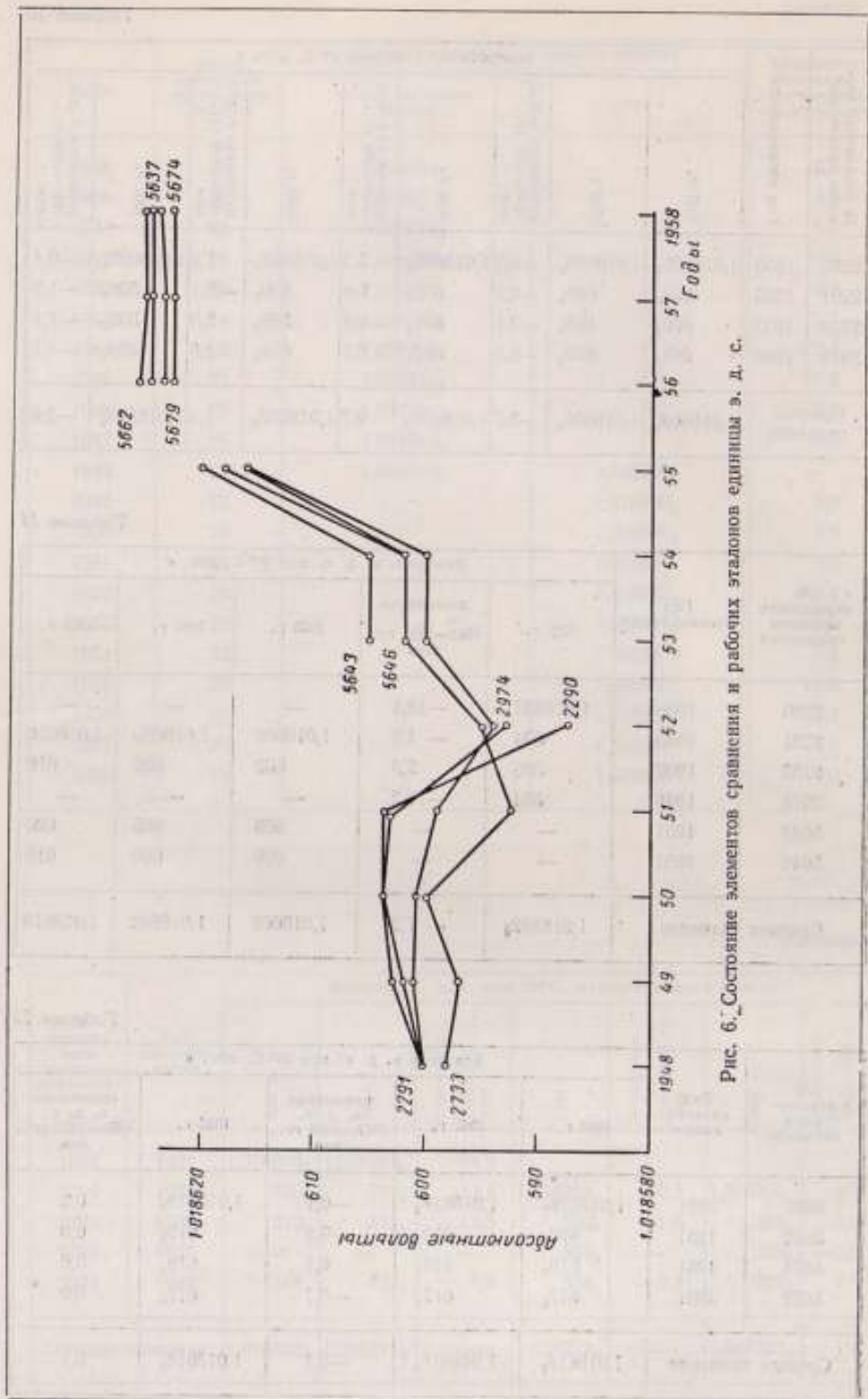


Рис. 6. Состояние элементов сравнения и рабочих эталонов единицы э. д. с.

Самый процесс абсолютных определений э. д. с. эталонных элементов сравнения состоит из следующих этапов:

- а) производится взаимное сличение четырех эталонных элементов сравнения на компенсаторе;
- б) определяется значение э. д. с. элементов на токовых весах;
- в) производится повторное взаимное сличение элементов на компенсаторе.

Полученные значения э. д. с. элементов, выраженные в абсолютных вольтах, являются исходными для передачи значения вольта групповому эталону.

Предельная погрешность определения э. д. с. элементов посредством токовых весов равна 0,001%.

Измерения на токовых весах э. д. с. всех элементов группового эталона нецелесообразны, так как процесс определения э. д. с. является длительным, что неблагоприятно влияет на эксплуатацию токовых весов, а также на сохранность отдельных элементов группового эталона.

3. Для передачи значения вольта от группового эталона образцовым нормальным элементам I-го разряда должны применяться четыре эталонных нормальных элемента, играющих роль рабочего или вторичного эталона вольта.

Для того чтобы найти значение э. д. с. эталонных нормальных элементов в зависимости от среднего значения э. д. с. группового эталона, необходимо произвести сличение каждого элемента рабочего эталона с каждым элементом группового эталона. Сличение производится двумя наблюдателями, независимо друг от друга.

4. В дальнейшем повторные определения э. д. с. элементов посредством токовых весов будут производиться не чаще чем раз в два года. Установленное в 1955 г. значение группового эталона вольта, равное 1,018608 абс. в, будет сохраняться до тех пор, пока повторные определения э. д. с. на токовых весах не обнаружат изменения, превышающего 0,001%.

Для поддержания единства эталонов вольта между различными национальными метрологическими лабораториями в 1948—1957 гг. были осуществлены международные сравнения эталонов вольта СССР в Международном бюро мер и весов [8] и [9].

При сравнении абсолютного вольта в СССР с вольтым Международного бюро разница между ними составляла

в 1948 г.	+21,0·10 ⁻⁶	в 1953 г.	+22,3·10 ⁻⁶
в 1950 г.	+21,0·10 ⁻⁶	в 1955 г.	+ 9,3·10 ⁻⁶
		в 1957 г.	+ 8,4·10 ⁻⁶

Анализируя результаты международных сравнений, можно прийти к выводу, что относительное значение эталона вольта СССР практически не изменялось с 1948 г. по 1957 г. В 1955 г. было изменено абсолютное значение вольта на 15 мкв на основании определения посредством установки токовых весов, но относительная стабильность значения э. д. с. практически оставалась без изменения с 1948 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маликов М. Ф., Временник Главной палаты мер и весов, вып. 1 (13), 1925.
2. Колосов А. К., Труды ВИС, № 127, 1933.
3. Malikov M. F. et Kolossoff A. C., Comptes Rendus des séances de la Septième Conférence générale de Poids et Mesures réunie à Paris en 1927, Paris, 1928.
4. Чураева Е. С., Труды ВНИИМ, вып. 24 (40), Л., 1937.

5. Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures. Coordination des unités électriques au Bureau International des Poids et Mesures, Paris, 1952.
6. A. Norman Shaw, F. R. S. C., Reilley and Clark R. J., Philosophical Transaction of the Royal Society of London, Series A, vol. 229, London, 1930.
7. Положение об электрических и магнитных единицах, Издание Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, М., 1948.
8. Comité consultatif d'Electricité auprès du Comité International des Poids et Mesures Session de 1952. Rapport sur les comparaisons des étalons nationaux de Force électromotrice effectuées en 1950, Paris, 1953.
9. Comité international des Poids et Mesures Procès — Verbaux des séances. Deuxième série, Tome XXV, Session de 1956. Rapport sur les comparaisons des étalons nationaux de Force électromotrice effectuées en 1955, Paris, 1957.

ЕСТЕСТВЕННОЕ СТАРЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Хранение единицы э. д. с. — вольта — осуществляется при помощи группового эталона, который состоит из 20 насыщенных нормальных элементов (н. э.).

Групповой эталон должен хранить единицу э. д. с., воспроизведенную по эталонам ома и ампера. Поэтому при осуществлении группового эталона абсолютными измерениями, произведенными по специальной методике [1], определяют значение э. д. с. каждого н. э., входящего в групповой эталон. Далее значение э. д. с. эталона принимается равным среднему арифметическому из значений э. д. с. всех н. э., составляющих эталон, полученных по упомянутой выше методике.

Такое хранение единицы э. д. с. основано на допущении взаимной компенсации изменений в значении э. д. с. отдельных н. э. за период между абсолютными определениями э. д. с. эталона [2].

Можно полагать, что чем больше мер (н. э.) в групповом эталоне, тем больше и достоверность такого допущения. Метрологическая практика показала, что групповой эталон из 20 н. э. обеспечивает достаточную неизменность E_{cp} для промежутка времени между двумя абсолютными определениями э. д. с. элементов эталона.

Однако отдельные элементы эталона вследствие различных причин могут изменять свою э. д. с. Поэтому задача хранения эталона заключается в оценке изменений э. д. с. отдельных элементов по отношению к E_{cp} и исключению из состава эталона тех элементов, для которых это изменение превысило установленные границы.

Решение этой задачи достигается взаимными сличениями элементов эталона.

Результаты сличений приводят к следующей системе уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} E_1 - E_{cp} = \Delta_1 \\ E_2 - E_{cp} = \Delta_2 \\ \dots \dots \dots \\ E_{19} - E_{cp} = \Delta_{19} \\ E_{cp} - E_{cp} = 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^{20} E_i}{20} - E_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{20} \Delta_i}{20} \end{array} \right\}$$

где $E_{сл}$ — э. д. с. «элемента сличения»;
 $E_1, E_2, E_3, \dots, E_{19}$ — э. д. с. остальных элементов эталона;
 $\frac{\sum_{i=1}^{20} E_i}{20} = E_{ср}$ — э. д. с. эталона, определенная предыдущими абсолютными измерениями.

Из указанной системы уравнений получим

$$E_{сл} - E_{сл}^* = E_{ср} - \frac{\sum_{i=1}^{20} \Delta_i}{20} - E_{сл}^*$$

где $E_{сл}^*$ — э. д. с. этого элемента, полученная абсолютными измерениями.

Далее можно найти такие изменения э. д. с. всех остальных элементов эталона.

Результаты взаимных сличений дают возможность обнаружить тот элемент, значение э. д. с. которого изменилось на величину, превышающую установленный предел, принятый равным 10 мкв.

Однако учесть изменение э. д. с. отдельных элементов и эталона в целом вследствие старения по результатам взаимных сличений не представляется возможным. Эти сличения имеют относительный характер и дают только разности численных значений э. д. с. элементов, а не их абсолютные значения.

В действительности, как это будет показано ниже, среднее значение группового эталона не остается постоянным в силу старения нормальных элементов.

Теория старения нормальных элементов

Термин «старение нормальных элементов» означает совокупность некоторых химических процессов, происходящих в элементах и приводящих к уменьшению их э. д. с. с течением времени.

Вопрос старения н. э. подробно изучен Н. Шоу и его сотрудниками [3]. Обработка обширного материала по определению значения э. д. с. большого количества нормальных элементов привела их к заключению, что обнаруженное экспериментально изменение э. д. с. нормального элемента со временем обусловлено различными электрохимическими процессами, происходящими в нормальном элементе, в соответствии с которыми существование нормального элемента можно разделить на два периода — вызревания и старения.

Период вызревания нормального элемента заключается в установлении динамического равновесия между веществами, входящими в состав электродов нормального элемента, и характеризуется быстрым возрастанием значения э. д. с. элемента. В момент установления указанного равновесия э. д. с. данного элемента принимает максимальное значение, которое и определяет конец периода вызревания.

С этого момента начинается период старения — в силу вступают причины, вызывающие нарушение установившегося равновесия в электродах нормального элемента, что обуславливает процесс старения, следствием которого является понижение э. д. с. элемента. Процесс старения продолжается все дальнейшее время существования нормального элемента.

Наиболее вероятной причиной старения Н. Шоу считает появление в элементе посторонних ионов. Источником этих ионов являются главным образом стеклянные оболочки нормальных элементов. Соли и окислы, входящие в состав стекла, растворяются очень медленно (в течение многих лет) и оказывают влияние на э. д. с. нормального элемента. Н. Шоу допускает, что на старение нормальных элементов может иметь влияние

«какая-нибудь преобразовавшаяся часть ингредиентов нормального элемента». Сюда можно отнести изменение кристаллической структуры амальгамы, ничтожное изменение ее концентрации, появление продуктов гидролиза и окисления сернистой закиси ртути, присутствие CdO в кристаллах $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{1}{3}\text{H}_2\text{O}$ и т. д.

Называя все эти посторонние ионы и преобразовавшиеся части ингредиентов общим термином «примеси», можно дать достаточно удовлетворительный теоретический анализ старения нормального элемента, если предположить, что изменение э. д. с. пропорционально концентрации примесей x . Необходимо отметить, что x является величиной весьма малой и чрезвычайно медленно изменяющейся. Однако в начале периода старения это изменение происходит быстрее, чем в последующее время. Химические изменения, вызванные примесями, слишком малы и поэтому не могут быть определены путем химического анализа.

Однако на изменение значения э. д. с. примеси оказывают заметное влияние, которое поэтому может быть обнаружено по результатам определения э. д. с. н. э. в течение некоторого достаточно длительного времени.

Общая теория основана на следующих двух основных зависимостях:

а) зависимости между э. д. с. элемента E и относительной концентрацией примесей c

$$E = A + B \ln c, \quad (1)$$

в которой A и B — константы;

б) зависимости между скоростью изменения концентрации и самой концентрацией, которая выражается формулой

$$\frac{dx}{dt'} = k(a - x), \quad (2)$$

если концентрацию примесей принять пропорциональной разности предельной концентрации a и концентрации x в данный момент.

Если, как это следует из опытных данных, предположить, что окончанию периода вызревания элемента соответствует некоторая, хотя и малая, но конечная концентрация b и э. д. с. E_0 и что по достижении элементом предельной концентрации примесей a устанавливается предельная э. д. с. E_F , то уравнение (1) надо переписать в виде

$$E = E_0 + B \ln \frac{x}{b} = E_F + B \ln \frac{x}{a}, \quad (3)$$

где x — концентрация примесей в данный момент.

Уравнение (2) дает возможность выразить x в функции от времени t' . Разделяя переменные и интегрируя, получаем

$$\int \frac{dx}{a-x} = kt' + A,$$

или

$$-\ln(a-x) = kt' + A.$$

Далее имеем

$$a-x = A_2 e^{-kt'}.$$

Полагая, что в момент окончания зарядки элемента концентрация примесей равна нулю, имеем начальные условия

$$x = 0 \text{ при } t = 0.$$

Следовательно, последнее уравнение принимает вид

$$a - x = ae^{-kt'}$$

или

$$x = a(1 - e^{-kt'}) \quad (4)$$

Однако удобнее отсчитывать время от момента окончания вызревания элемента; обозначим его через t .

Кроме того, промежуток времени, необходимый для вызревания элемента, обозначим через τ , тогда

$$t = t' - \tau.$$

Если значение τ известно, то из уравнения (4) можно найти величину концентрации примесей b , соответствующую этому моменту, и наоборот

$$b = a(1 - e^{-k\tau}),$$

откуда

$$\tau = \frac{1}{k} \ln \frac{a}{a-b} = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1 - \frac{b}{a}} = -\frac{1}{k} \ln \left(1 - e^{-\frac{E_s - E_F}{B}} \right) \quad (5)$$

Последнее преобразование получено при помощи уравнения (3).

Уравнение (4) при замене t' через $(t + \tau)$ получает вид

$$x = a(1 - e^{-k(t+\tau)}) = a \left(1 - \frac{a-b}{a} e^{-kt} \right) \quad (6)$$

Это уравнение удобно представить в виде зависимости между величинами E , E_0 и E_F , тогда из выражений (3) и (6) получим:

$$E = E_0 + B \ln \frac{1 - e^{-k(t+\tau)}}{1 - e^{-k\tau}} = E_F + B \ln \left(1 - e^{-k(t+\tau)} \right) \quad (7)$$

откуда

$$\frac{dE}{dt} = \frac{Bke^{-k(t+\tau)}}{1 - e^{-k(t+\tau)}}$$

или

$$\frac{dE}{dt} = -Bk \left[\frac{1}{1 - e^{-k(t+\tau)}} - 1 \right] = \frac{Bk}{1 - e^{-k\tau}} \left[\frac{1 - e^{-k\tau}}{1 - e^{-k(t+\tau)}} - (1 - e^{-k\tau}) \right]$$

Далее, воспользовавшись уравнением (7), получаем

$$\frac{dE}{dt} = \frac{-Bk}{e^{\frac{E_0 - E}{B}}} \left[e^{\frac{E_s - E}{B}} - e^{\frac{E_s - E_F}{B}} \right] \quad (8)$$

или, как следует из уравнения (4),

$$\frac{dE}{dt} = Bk \left(\frac{a-x}{x} \right) \quad (9)$$

Уравнения (6), (7), (8) и (9) приводят к следующему заключению:

$$x = b \text{ и } E = E_0 \text{ при } t = 0;$$

$$x = a \text{ и } E = E_F \text{ при } t = \infty,$$

тогда

$$\frac{dE}{dt} = 0 \text{ при } E = E_F \text{ и } t \rightarrow \infty.$$

Если в выражении

$$E = E_0 + B \ln \frac{1 - e^{-k(t+\tau)}}{1 - e^{-k\tau}}$$

числитель под знаком логарифма разложить в ряд по степеням суммы $t + \tau$, а знаменатель — по степеням τ , то получим:

$$E = E_0 + B \ln \left\{ \left(\frac{t+\tau}{\tau} \right) \left[\frac{1 - \frac{k(t+\tau)}{2!} + \dots}{1 - \frac{k\tau}{2!} + \dots} \right] \right\}.$$

Отсюда получаем приближенное значение E_t

$$E_t = E_0 + B \ln \frac{t+\tau}{\tau}. \quad (10)$$

Полагая $t + \tau = 1$ или $t = 1 - \tau$, имеем

$$E_{1-\tau} = E_0 + B \ln \frac{1}{\tau}. \quad (11)$$

Исключая E_0 из уравнений (10) и (11), получим

$$E_t = E_{1-\tau} + B \ln \frac{t+\tau}{1}. \quad (12)$$

Уравнение (11) позволяет получить скорость изменения э. д. с. со временем:

$$\frac{dE}{dt} = B \frac{1}{t+\tau}. \quad (13)$$

Как показывает опыт, уравнение (13) справедливо для не слишком больших значений t .

Для каждого элемента группы в заданный момент на основании уравнения (12) имеем:

$$E_{1, \kappa} = A_1 + B \ln \left(\frac{M+\tau}{1} \right)^*, \quad (14)$$

где через M обозначено время t , выраженное в единицах, кратных месяцам; τ при этом также необходимо выражать в месяцах.

* Здесь A_1 означает э. д. с. в момент, когда $\frac{\tau+M}{1} = 1$. Единицу необходимо ставить для того, чтобы величина $\frac{M+\tau}{1}$ была безразмерной.

Среднее значение э. д. с. всей группы поэтому будет

$$\bar{E}_M = \frac{\sum E_i}{n} = \bar{A} + \frac{B}{n} \ln \left[\left(\frac{M + \tau_1}{1} \right) \left(\frac{M + \tau_2}{1} \right) \dots \left(\frac{M + \tau_n}{1} \right) \right], \quad (15)$$

где

$$\bar{A} = \frac{\sum A_i}{n}.$$

Следует заметить, что если составить уравнение

$$\bar{E}_n = \bar{A} + B \ln (M + \bar{\tau}), \quad (16)$$

то \bar{E}_n не будет выражать среднее значение э. д. с. по той причине, что $\bar{\tau} = \frac{\sum \tau_i}{n}$ в общем случае зависит от M .

Действительно, приравнявая выражения (15) и (16), получаем

$$\ln (M + \bar{\tau}) = \frac{1}{n} \ln [(M + \tau_1)(M + \tau_2) \dots (M + \tau_n)],$$

или

$$\bar{\tau} = [(M + \tau_1)(M + \tau_2) \dots (M + \tau_n)]^{1/n} - M.$$

Разлагая по биному Ньютона выражение в квадратных скобках, получаем, полагая M большим,

$$\bar{\tau} = \frac{\sum \tau_i}{n} + \frac{(\sum \tau_i)^2 - n \sum \tau_i^2}{2n^2} \cdot \frac{1}{M}; \quad (17)$$

для M малых

$$\bar{\tau} = (\tau_1 \tau_2 \dots \tau_n)^{1/n} + \left\{ \frac{(\tau_1 \tau_2 \dots \tau_n)^{1/n}}{n} \left[\sum \frac{1}{\tau_i} \right] - 1 \right\} M. \quad (18)$$

Однако введение величины $\bar{\tau}$ возможно при малых отклонениях значения τ_i от $\bar{\tau}_n$, т. е., когда среднее арифметическое $\sum \frac{\tau_i}{n}$ близко к среднему геометрическому $(\tau_1 \tau_2 \dots \tau_n)^{1/n}$. В этом случае, как легко видеть, оба выражения (17) и (18) дают один и тот же результат, так как первые члены у них почти равны, а остальные — обращаются в ноль. При этом условии можно пользоваться выражением

$$\bar{E}_M = \bar{A} + B \ln \left(\frac{M + \bar{\tau}}{1} \right). \quad (19)$$

Таким образом, «старение» любого нормального элемента определяется тремя присущими ему постоянными τ , A и B .

Их определение возможно только опытным путем и связано с длительным, не меньшим 12—24 месяцев, промежутком времени исследования э. д. с. элемента. Если экспериментально установлены величины τ , E_0 и значение E для некоторого достаточно большого M , то A и B , как следует из выражения (14), можно найти по формуле

$$A = E_0 - \frac{E_0 - E}{\ln \frac{\tau}{M + \tau}} \ln \frac{\tau}{1}; \quad (20)$$

$$B = \frac{E - E_0}{\ln \frac{M + \tau}{\tau}}. \quad (21)$$

Для группы элементов можно определить среднее $\bar{\tau}$, при этом необходимо изъять все элементы, у которых отдельные τ , значительно отличаются от среднего $\bar{\tau}$. Далее, подобно изложенному, можно найти постоянные группы A и B по формулам:

$$\bar{A} = \bar{E}_0 - \frac{\bar{E}_0 - E}{\ln \frac{\bar{\tau}}{\tau}} \ln \frac{\bar{\tau}}{\tau}; \quad (22)$$

$$\bar{B} = \frac{\bar{E}_t - \bar{E}_0}{\ln \frac{M + \bar{\tau}}{\tau}}. \quad (23)$$

Термодинамический анализ процессов, происходящих в элементах, приводит к тем же качественным результатам, которые описаны выше.

Действительно, работа, совершаемая элементом, имеет два источника: энергию процесса химических реакций и теплоту окружающей среды, связь между которыми дает уравнение Гиббса — Гельмгольца

$$A = \bar{Q} + T \frac{dA}{dT},$$

где A — количество работы;

\bar{Q} — » » тепла;

T — абс. температура.

При этом

$$\frac{dA}{dt} = F \frac{dE}{dT},$$

где F — число Фарадея. Поэтому

$$EF = \bar{Q} + TF \frac{dE}{dT}.$$

Если $q = \frac{\bar{Q}}{F}$ — теплота реакции, то уравнение Гиббса — Гельмгольца примет вид

$$E = q + T \frac{dE}{dT}.$$

Для нормального элемента $\frac{dE}{dt} < 0$, следовательно, работа, совершаемая элементом, меньше энергии (выделяющейся в процессе химической реакции), которая частично передается окружающей среде. Следствием этого является постепенное понижение э. д. с. н. э., т. е. процесс старения.

Соответственно понижается и величина $E_{ср}$.

Экспериментальные исследования

Проведенные в лаборатории эталонов электрических единиц опытные исследования показали, что в общем теория Н. Шоу согласуется с опытными результатами, хотя его утверждение о том, что величины B одинаковы для всех элементов, не подтверждается опытными данными.

Изменения э. д. с., наблюдаемые по окончании периода вызревания, можно разделить на случайные и закономерные.

Первые — являются следствием нарушения равновесий в элементе, вызванного причинами, находящимися вне элемента и носящими случайный характер, как то: недостаточное постоянство температуры и вызванные этим гистерезисные явления, неполная компенсация при измерении э. д. с. элемента, случайные погрешности при определении значения э. д. с. и другие второстепенные причины.

Вторые — имеют только отрицательный знак и являются следствием старения н. э., которое вызвано, как указано выше, причинами, кроющимися в самом элементе, как то: появление примесей из стекла оболочек и изменения в ингредиентах н. э. Эти изменения вызывают только понижение э. д. с. Изменение э. д. с. происходит сравнительно быстро в первое время после вызревания элемента, а далее замедляется, продолжаясь, однако, все время существования элемента.

Первые исследования были проведены в 1910—1914 гг. При измерениях э. д. с. при помощи серебряного вольтметра, произведенных в 1910, 1912 и 1914 гг., у н. э., изготовленных в 1910 г., не были обнаружены изменения э. д. с. этих элементов. Произошло это, по-видимому, вследствие недостаточной точности опытов [2].

Измерения, произведенные при помощи серебряного вольтметра в 1932 г., показали, что э. д. с. н. э., изготовленных в 1910 г., понизилась на 132 мкв [4].

Измерения, произведенные при помощи токовых весов в 1955 г., показали, что значение действующего в настоящее время группового эталона, состоящего из нейтральных н. э., изготовленных в 1937 г., равно 1,018608 абс. в [1]. В то же время средняя э. д. с. партии нейтральных элементов, изготовленных в 1950 г., составила 1,018649 абс. в. Таким образом, э. д. с. элементов, изготовленных в 1937 г., за 18 лет понизилась на 41 мкв.

Кроме того, были проведены опытные исследования в период 1951—1954 гг. для оценки скорости старения отдельных элементов. В этих опытах э. д. с. каждого элемента определялась по величине $E_{ср}$ эталона. Следовательно, измерения были относительными.

Исследованию было подвергнуто 45 элементов, из которых 35 были «кислые», а остальные — «нейтральные». Значение э. д. с. всех этих элементов систематически измерялось в течение более двух лет.

Целью исследования являлось определение значений постоянных A и B , входящих в формулу (14), или, точнее, — отклонения значений A и B каждого элемента от значений A и B группового эталона.

Упомянутое предположение Н. Шоу о постоянстве величины $B = 39,4$ не подтвердилось. Значения B , полученные для исследованных элементов, оказались лежащими в пределах, указанных в табл. I.

Из этих данных следует, что величина B колеблется от 3,5 до 11,6 у «кислых» элементов и от 3,8 до 19,0 — у «нейтральных». Однако средние значения имеют примерно одинаковый порядок, близкий к 10, что значительно отличается от величины B , указанной Н. Шоу.

Величина B , как следует из формул (21), пропорциональна изменению значения э. д. с. за период, начиная с момента вызревания до данного момента, т. е. разности E_0 и E_1 , и потому может косвенно характеризовать постоянство э. д. с. элементов.

Среднее значение B исследованных элементов составляет величину 8,6 мкв. Это указывает на то, что величины э. д. с. изготовленных н. э. обладают большей стабильностью, чем у н. э., исследованных Н. Шоу.

Процесс вызревания протекает у большинства н. э. в различные, хотя и близкие по времени сроки и, следовательно, является индивидуальным свойством каждого н. э. Из 45 изученных кислых н. э. период вызревания оказался равным: для 20% всех элементов — 1 мес., для 55% — 1,5 мес., для 20% — 2 мес. и для 5% — более 2 мес.

Из 10 изученных нейтральных элементов период вызревания был следующий: для 20% всех элементов — 1,5 мес., для 20% — 3 мес. и для 60% — 4 мес.

Следовательно, кислые элементы имеют более короткий период вызревания, что является их преимуществом по сравнению с нейтральными.

Таблица 2 иллюстрирует результаты выполненного исследования для кислых н. э., табл. 3 — для нейтральных. В таблицах приведены следующие данные: время вызревания н. э. τ , значение э. д. с. в момент вызревания E_0 , значение э. д. с. E' , определенное экспериментально через различные промежутки времени от изготовления н. э., значение э. д. с. E'' , вычисленное по формуле (14) для тех же сроков, и скорость старения U , вычисленная по формуле (13).

Приведенные данные позволяют сделать заключение, что значение э. д. с. со временем понижается примерно по экспоненциальному закону. Следовательно, формула (14) полностью отражает процесс изменения э. д. с.

Средняя скорость старения изменяется по величине в различные интервалы времени от момента изготовления элемента и характеризуется табл. 4.

Максимальная скорость изменения наблюдается в первые 6 месяцев с момента вызревания и далее постепенно уменьшается в течение примерно 2 лет, а затем становится близкой к постоянной.

Таким образом, кислые и нейтральные н. э. могут применяться в качестве эталонов только через 2 года после изготовления и в качестве образцовых мер 1-го и 2-го разрядов — через 1 год.

Изучение вновь изготовленных н. э. следует начинать в ближайшее дни после их изготовления и проводить путем систематического определения значения э. д. с. этих элементов сличениями изучаемых элементов с образцовыми «состарившимися». В результате обработки полученных данных должны быть найдены период вызревания н. э. и скорость их старения. Для оценки качества элементов может служить также величина B по формуле (21).

Длительность изучения н. э. определяется продолжительностью процесса старения, которое, как указывалось выше, составляет примерно 2 года.

Достаточно «состарившиеся» нормальные элементы имеют постоянную скорость уменьшения э. д. с., составляющую 0,1—0,5 мкв/мес. Такие элементы пригодны для эталонных измерений.

Таблица 1

Тип элементов	Концентрация H_2SO_4	Постоянная B , мкв	Среднее значение постоянной B , мкв
Кислые н. э.	0,02 N	4,7—9,8	7,2
	0,03 N	3,5—11,0	7,2
	0,04 N	7,5—10,6	9,8
	0,05 N	7,7—11,3	9,5
	0,06 N	3,6—11,6	7,6
Нейтральные н. э.	—	3,8—19,0	11,4*

* При вычислении значения B по формуле (21) был принят логарифм при основании 10.

Таблица 2

№ элемент	Концентрация серной кислоты в электролите NH_2SO_4	Постоянные		Период выработки		Период				
		A, в	B, мкс	τ , мес.	E_0 , в	Время от момента			E', в	
						6 мес.		12		
					E', в	E'', в	U, мкс/мес		E', в	
5723	0,02	1,018647	-8,30	1,5	1,018646	1,018637	1,018641	1,38	1,018637	
5726		649	-9,59	2	646	638	641	1,57	639	
5730		647	-4,74	2	646	643	644	0,73	641	
5731		648	-9,80	2	645	638	640	1,63	635	
5634		621	-3,46	1,5	620	617	618	0,58	616	
5636		623	-4,55	1,5	622	619	619	0,76	619	
5638		625	-7,92	1,5	624	618	619	1,32	615	
5639		622	-4,38	1,5	621	617	618	0,73	618	
5644		0,03	625	-6,35	1,5	624	618	620	1,07	619
5654			621	-1,20	2	620	620	618	0,70	617
5665	0,04	626	-5,84	2,5	624	622	622	0,97	620	
5666		629	-10,94	2,5	625	621	621	0,18	613	
5667		628	-8,35	2	626	622	622	1,39	620	
5675		624	-3,63	2	623	621	621	0,60	621	
5701		647	-9,90	1,5	645	636	639	1,65	632	
5702		644	-7,52	2	642	636	639	1,25	632	
5704		646	-10,58	1,5	646	634	640	1,76	634	
5705		646	-9,03	1,5	646	639	641	1,51	634	
5710		634	-9,95	1	634	623	626	1,66	621	
5711		633	-9,65	1	633	622	625	1,61	621	
5713	0,05	634	-10,12	1	634	624	626	1,69	621	
5714		633	-7,72	1	633	625	627	1,29	623	
5716		636	-11,26	1	636	621	627	1,88	623	
5717		636	-9,11	1	636	622	629	1,52	623	
5718		636	-10,85	1	636	622	628	1,60	623	
5680		623	-4,98	1,5	623	620	620	0,83	618	
5681		624	-4,71	1,5	623	619	620	0,79	620	
5684		626	-6,45	1,5	625	620	621	1,08	618	
5685		631	-11,60	1,5	629	619	622	1,93	619	
5688		0,06	631	-8,31	1,5	630	622	625	1,38	623
5689	624		-3,60	1,5	623	621	621	0,60	617	
5692	630		-3,53	1,5	629	621	624	0,42	621	
5694	628		-10,17	1,5	626	617	620	1,69	615	
5695	626		-6,76	1,5	625	619	621	1,13	618	
5696	629		-9,40	1,5	627	618	621	1,65	618	

старения										
изготовления элементов										
мес.		18 мес.			24 мес.			28 мес.		
E', в	U, мкс/мес	E', в	E'', в	U, мкс/мес	E', в	E'', в	U, мкс/мес	E', в	E'', в	U, мкс/мес
1,018638	0,69	1,018642	1,018637	0,46	1,018639	1,018636	0,35	1,018637	1,018635	0,30
639	0,78	642	637	0,53	636	636	0,40	636	635	0,34
642	0,36	645	642	0,24	641	641	0,18	627	641	0,16
637	0,82	640	636	0,54	635	635	0,41	637	634	0,35
617	0,29	615	617	0,19	618	616	0,15	618	616	0,12
618	0,38	616	617	0,25	617	616	0,19	615	616	0,16
617	0,66	615	616	0,44	617	615	0,33	617	614	0,25
617	0,37	615	616	0,24	619	616	0,18	615	616	0,15
618	0,53	616	617	0,36	620	616	0,26	617	616	0,23
617	0,35	615	616	0,23	619	616	0,18	617	615	0,15
620	0,48	617	619	0,32	620	618	0,24	618	618	0,14
613	0,90	615	616	0,60	618	614	0,45	617	613	0,40
619	0,69	617	618	0,46	617	617	0,35	617	616	0,30
620	0,30	619	619	0,20	619	619	0,15	619	619	0,13
636	0,82	635	634	0,55	637	633	0,41	637	633	0,35
636	0,62	639	635	0,42	637	634	0,31	637	633	0,27
637	0,88	637	635	0,58	639	633	0,44	633	639	0,40
638	0,75	639	636	0,50	638	635	0,32	637	635	0,32
623	0,74	623	620	0,55	626	620	0,41	621	620	0,35
623	0,72	623	621	0,54	625	620	0,40	621	619	0,34
623	0,84	623	621	0,56	624	620	0,42	620	619	0,36
625	0,64	625	623	0,43	626	622	0,32	622	622	0,28
624	0,94	626	622	0,62	626	621	0,47	622	620	0,40
626	0,76	636	625	0,51	627	623	0,38	623	623	0,32
624	0,80	626	622	0,60	626	621	0,45	623	620	0,39
619	0,42	618	618	0,27	617	617	0,20	617	617	0,18
619	0,30	617	618	0,26	619	617	0,20	617	617	0,17
619	0,54	619	618	0,35	619	617	0,27	617	617	0,23
619	0,96	616	617	0,64	618	615	0,48	615	614	0,41
623	0,69	621	621	0,46	622	620	0,35	622	619	0,30
620	0,30	620	619	0,20	620	619	0,15	621	618	0,13
621	0,71	621	620	0,47	621	619	0,36	621	618	0,31
619	0,85	617	617	0,60	616	614	0,42	617	613	0,36
619	0,56	619	618	0,38	618	617	0,25	619	616	0,24
618	0,82	617	617	0,55	618	615	0,41	618	615	0,35

Таблица 3

№ элемент	А, а	В, Ахв	Период вызревания т. мес.	L _в , г	Период старения															
					Время от приготовления элементов															
					6 мес.				13 мес.				20 мес.				38 мес.			
					E', а	E'', а	U Мгв/Мгс	U Мгв/Мгс	E', а	E'', а	U Мгв/Мгс	U Мгв/Мгс	E', а	E'', а	U Мгв/Мгс	U Мгв/Мгс	E', а	E'', а	U Мгв/Мгс	
5590	1,018649	— 3,8	4	1,018646	1,018646	1,018646	0,63	1,018647	1,018645	0,29	1,018637	1,018644	0,15	1,018638	1,018643	0,10				
5591	655	— 11,0	4	648	644	646	1,93	648	642	0,89	638	639	0,44	637	637	0,30				
5594	656	— 11,8	4	649	644	647	1,93	648	643	0,91	641	639	0,45	642	637	0,31				
5597	661	— 18,0	4	650	645	647	3,00	641	641	1,46	638	636	0,69	639	633	0,47				
5598	665	— 18,7	3	656	645	650	3,11	650	644	1,51	640	639	0,72	643	635	0,49				
5588	663	— 7,9	4	648	645	647	1,32	647	644	0,61	638	642	0,33	637	641	0,21				
5595	667	— 9,9	4	651	645	649	1,65	647	646	0,76	637	643	0,40	640	641	0,26				
5605	660	— 10,6	3	655	646	652	1,77	651	648	0,81	650	645	0,39	654	643	0,28				
5618	656	— 5,8	1,5	655	649	651	0,97	648	649	0,45	649	648	0,22	652	648	0,15				
5619	665	— 12,5	1,5	662	650	655	2,08	649	651	0,96	646	637	0,48	640	645	0,33				

В настоящее время мы располагаем данными по старению элементов за сроки, не превышающие 20 лет, и для относительно малочисленных групп — 20 элементов. Эти данные подтверждают величину скорости понижения э. д. с., находящуюся в указанных в табл. 4 пределах.

Таблица 4

Кислые н. э.		Нейтральный н. э.	
интервал времени, отсчитанный от изготовления н. э., мес.	средняя скорость старения, мкв/мес.	интервал времени, отсчитанный от изготовления н. э., мес.	средняя скорость старения, мкв/мес.
От вызревания до 6	1,0—1,8	От вызревания до 6	0,6—3,0
• 6 • 12	0,3—0,9	• 6 • 13	0,3—1,5
• 12 • 18	0,2—0,6	• 13 • 26	0,2—0,7
• 18 • 24	0,2—0,5	• 26 • 38	0,1—0,5
• 24 • 28	0,1—0,4		

Упомянутые скорости старения наблюдаются лишь у элементов, хранящихся в нормальных условиях, при температуре, отличающейся только в отдельных случаях от 20° С на 1—2°.

При резких колебаниях температуры, а также при длительном хранении при температуре, значительно отличающейся от нормальной, скорость старения э. д. с. возрастает. Так, группа элементов, изготовленная в 1910 г. и находившаяся в течение двух лет в неотапливаемом помещении, показала среднюю скорость старения э. д. с. в течение 18 лет, равную 7 мкв в год [4]. Очевидно, что часть н. э. из этой группы имела скорости старения, значительно превосходящие указанные выше пределы.

Рекомендации по хранению эталона единицы э. д. с.

1. Групповой эталон должен состоять из н. э., предварительное исследование которых показало, что их скорости старения находятся в пределах $0,1 \div 0,5$ мкв/мес.

2. Абсолютные измерения э. д. с. элементов, составляющих эталон, следует производить 1 раз в 3 года.

3. Взаимные сличения н. э., составляющих эталон, необходимо производить ежегодно и исключать из группы те н. э., изменение э. д. с. которых за год превысит 10 мкв.

4. Погрешность взаимных сличений должна быть не выше 0,2 мкв.

5. В эталон могут входить только н. э., изучение которых начато непосредственно после их изготовления и э. д. с. которых систематически определялась в течение промежутка времени, не меньшего 2,5—3 лет.

6. При хранении эталона единицы э. д. с. необходимо провести исследование, которое позволит найти значение изменения скоростей э. д. с. отдельных элементов и оценить их постоянство. Результаты этих исследований могут позволить вводить поправки в значение $E_{ср}$ в промежуток между абсолютными измерениями этой величины и тем самым повысить надежность и точность хранения единицы э. д. с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачевич С. В., Мюллер В. В., Лукьянов П. Н., Труды ВНИИМ, вып. 31 (91), 1957, стр. 5.
2. Маликов М. Ф., Временник Главной палаты мер и весов, вып. 1 (13), 1925, стр. 130.
3. Norman Show A., F. R. S. C. Reilley H. E. and Clark R. J., Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, v. 229, 1930, p. 125—162.
4. Колосов А. К., Труды ВИМС, № 127, 1933, стр. 82.

Е. Ф. ДОЛИНСКИЙ

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ГРУППОВОГО ЭТАЛОНА Э. Д. С.

Основные допущения

Э. д. с. элемента, входящего в состав группового эталона, может быть представлена в виде суммы структурной и стохастической составляющих, из которых первая состоит из двух слагаемых постоянного и пропорционального времени

$$a_i = f_i(t) + \xi_i = f_i(0) + \left(\frac{df_i}{dt}\right)_0 t + \xi_i. \quad (1)$$

Здесь

a_i — э. д. с. i -го элемента эталона;

t — время, отсчитываемое от момента последнего сличения с элементами сравнения;

$f_i(0)$ — э. д. с. i -го элемента в момент сличения с элементами сравнения;

$f_i(t)$ — э. д. с. i -го элемента в любой момент между очередными соседними сличениями с элементами сравнения;

ξ_i — случайное отклонение э. д. с. i -го элемента от значения $f_i(t)$.

Величины ξ_i как одного элемента, но в различные моменты времени, так и для совокупности элементов в один и тот же момент времени, предполагаются распределенными по симметричному закону с центром в нуле.

Последнее представляет основное допущение, без которого хранение группового эталона теряет смысл.

Второе допущение состоит в том, что величина $\frac{df_i}{dt}$ для промежутка времени между сличениями эталона с элементами сравнения (с токовыми весами или при проверке другим абсолютным методом) достаточно мала.

Э. д. с. элементов сравнения

Э. д. с. четырех элементов сравнения определяют по показаниям токовых весов.

Рассчитанные значения э. д. с. E_1, E_2, E_3, E_4 будут равны

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_{10} + e_1 \\ E_2 &= E_{20} + e_2 \\ E_3 &= E_{30} + e_3 \\ E_4 &= E_{40} + e_4 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $E_{10}, E_{20}, E_{30}, E_{40}$ — истинные значения э. д. с.;

e_1, e_2, e_3, e_4 — погрешности рассчитанных значений, имеющие систематические и случайные составляющие.

Рассчитанные значения E_1, E_2, E_3, E_4 принимают далее за исходные «точные» значения э. д. с. этих элементов и по ним определяют э. д. с. элементов, составляющих групповой эталон. Последнему приписывают погрешность, определяемую только точностью сличений элементов и, таким образом, эталон хранит абсолютную единицу одной точности и условную — другой, значительно более высокой.

Между сличениями элементов сравнения с элементами эталона и поверкой первых по токовым весам проходит некоторый промежуток времени, за который э. д. с. элементов сравнения изменяется, так как $\frac{df_I}{dt}$, хотя и мало, но не равно нулю, и, кроме того, случайные отклонения э. д. с. элементов в этих двух измерениях различны.

Если обозначить эти изменения через $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$, то истинные значения э. д. с. элементов сравнения будут

$$\left. \begin{aligned} E_{11} &= E_{10} - \varepsilon_1 \\ E_{21} &= E_{20} - \varepsilon_2 \\ E_{31} &= E_{30} - \varepsilon_3 \\ E_{41} &= E_{40} - \varepsilon_4 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Соответственно погрешности, которые войдут в расчет э. д. с. элементов эталона, будут

$$\left. \begin{aligned} E_1 - E_{11} &= e_1 + \varepsilon_1 \\ E_2 - E_{21} &= e_2 + \varepsilon_2 \\ E_3 - E_{31} &= e_3 + \varepsilon_3 \\ E_4 - E_{41} &= e_4 + \varepsilon_4 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Эти погрешности в соединении с изменениями э. д. с. эталона во времени $\left(\frac{1}{20} \sum_{t=1}^{20} \frac{df_I}{dt} t \right)$, а также с погрешностями сличений определяют точность воспроизведения единицы э. д. с. в абсолютной мере. Однако условная и переменная во времени (так как $\frac{df_I}{dt} \neq 0$) единица, воспроизводимая эталоном, будет иметь точность, определяемую только погрешностями сличения.

Среднее значение э. д. с. эталона

Здесь полезно рассмотреть два случая. Один основан на допущении, что погрешности метода сличений элементов отсутствуют; другой — когда эти погрешности необходимо учитывать.

Величины $\frac{df_I}{dt}$ (на основании ранее сказанного) ниже не учитываются.

Первый случай. Сличения элементов эталона с элементами сравнения дают

$$\left. \begin{aligned} a'_{10} &= E_{11} + x_{11} = (E_1 + x_{11}) - (e_1 + \varepsilon_1) \\ a''_{10} &= (E_2 + x_{12}) - (e_2 + \varepsilon_2) \\ a'''_{10} &= (E_3 + x_{13}) - (e_3 + \varepsilon_3) \\ a^{(IV)}_{10} &= (E_4 + x_{14}) - (e_4 + \varepsilon_4) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Среднее значение э. д. с. i -го элемента

$$a_{i0} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 [(E_k + x_{ik}) - (e_k + \varepsilon_k)]. \quad (6)$$

Для среднего значения э. д. с. эталона из 20 элементов

$$E_0 = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} a_{i0} = \frac{1}{80} \sum_{i=1}^{20} \sum_{k=1}^4 [(E_k + x_{ik}) - (e_k + \varepsilon_k)]. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что систематическая погрешность рассчитанного значения E_0 составит

$$\Delta(E_0) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (e_k + \varepsilon_k). \quad (8)$$

Эта величина отличает условную единицу от абсолютной при условии, если величинами $\frac{dI}{dt}$ за период между сличениями можно пренебречь.

При дальнейшем хранении эталона составляющие его элементы сличают только друг с другом. Случайные изменения приведут к тому, что э. д. с. i -го элемента к моменту взаимных сличений будет

$$a_{i1} = a_{i0} + \beta_i.$$

Сравнение элементов между собой даст возможность найти разности

$$\beta_i - \beta_j = (a_{i1} - a_{j1}) - (a_{i0} - a_{j0}). \quad (9)$$

Число таких независимых разностей будет равно числу элементов без единицы, т. е. 19, так как выше предполагалось, что погрешности метода отсутствуют. Эти 19 независимых разностей, требующие 19 сличений, позволяют расчетным путем найти все остальные разности, общее число которых равно 190 ($C_{20}^2 = \frac{20 \cdot 19}{2} = 190$).

Полученные разности позволяют найти статистические оценки параметров, характеризующих распределение величин β_i , а также оценки самих величин β_i .

Для β_i получим

$$\frac{1}{19} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{20} [(a_{i1} - a_{j1}) - (a_{i0} - a_{j0})] = \frac{1}{19} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{20} (\beta_i - \beta_j) = \beta_i - \frac{1}{19} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{20} \beta_j \cong \beta_i. \quad (10)$$

Дисперсия погрешностей значений β_i , найденных по формуле (10), будет

$$D(\Delta\beta_i) = D\left(\frac{1}{19} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{20} \beta_j\right) = \frac{D(\beta)}{19}. \quad (11)$$

Оценка S_{β}^2 дисперсии самой величины β найдется по формуле

$$S_{\beta}^2 = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \beta_i^2, \quad (12)$$

так как ранее было принято, что центр распределения величин β_i совпадает с нулем.

Дисперсия средней э. д. с. эталона, зависящая от случайных изменений э. д. с. отдельных элементов, будет

$$D[E_0] = \frac{S_p^2}{20}. \quad (13)$$

Кроме того, и это, по-видимому, главное, наличие оценки дисперсии β по совокупности элементов позволяет обнаружить элементы, которые следует исключить из состава эталона вследствие недопустимо больших случайных отклонений э. д. с. или же вследствие недопустимо больших систематических изменений э. д. с., определяемых величинами $\frac{df_i}{dt}$.

В качестве критерия для исключения можно воспользоваться распределением наибольшего отклонения

$$r = \frac{x_n - \bar{x}}{S}. \quad (14)$$

Можно при этом рекомендовать пятипроцентный уровень значимости. Тогда из состава эталона следует исключать элементы, для которых справедливо неравенство

$$\beta_i \geq 2,6S_p. \quad (15)$$

Второй случай. Учет погрешностей методов сличения приводит к следующим формулам, заменяющим формулы (6), (7), (8) и (9):

$$a'_{i0} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 [(E_k + x_{ik}) - (e_k + \varepsilon_k) - \alpha_{ik}] = a_{i0} - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \alpha_{ik}; \quad (16)$$

$$E'_0 = \frac{1}{80} \sum_{k=1}^{20} \sum_{l=1}^4 [(E_k + x_{lk}) - (e_k + \varepsilon_k) - \alpha_{lk}]; \quad (17)$$

$$\Delta(E'_0) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (e_k + \varepsilon_k) + \frac{1}{80} \sum_{l=1}^{20} \sum_{k=1}^4 \alpha_{lk}; \quad (18)$$

$$(a'_{i0} - a'_{j0}) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 [(E_k + x_{ik}) - (E_k + x_{jk}) - (\alpha_{ik} - \alpha_{jk})]; \quad (19)$$

$$D(a'_{i0} - a'_{j0}) = \frac{2D(\alpha)}{4} = \frac{D(\alpha)}{2}, \quad (20)$$

где $D(\alpha)$ — дисперсия величины α .

Если сличения элементов эталона производят при посредстве единственного «тарного» элемента, то соответствующие уравнения будут

$$a'_{i1} = T + x_{i1} - \alpha_{i1};$$

$$a'_{j1} = T + x_{j1} - \alpha_{j1},$$

откуда

$$a'_{i1} - a'_{j1} = (x_{i1} - x_{j1}) - (\alpha_{i1} - \alpha_{j1}). \quad (21)$$

Приняв во внимание, что

$$a_{i1} = a_{i0} + \beta_i; \quad a_{j1} = a_{j0} + \beta_j,$$

из формул (19) и (21) получим

$$\begin{aligned} (\beta'_i - \beta'_j) &= (a'_{i1} - a'_{j1}) - (a'_{i0} - a'_{j0}) = (\beta_i - \beta_j) - (\alpha_{i1} - \alpha_{j1}) + \\ &+ \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (\alpha_{ik} - \alpha_{jk}). \end{aligned} \quad (22)$$

Поэтому дисперсия найденных разностей $(\beta'_i - \beta'_j)$, определяемая погрешностями сличения, будет

$$D(\beta'_i - \beta'_j) = 2,5 D(\alpha). \quad (23)$$

Если теперь для нахождения значений β , воспользоваться, как и в первом случае, формулой (10), то она примет вид

$$\beta'_i = \frac{1}{19} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{20} \left[(\beta_i - \beta_j) - (\alpha_{iT} - \alpha_{jT}) + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (\alpha_{ik} - \alpha_{jk}) \right], \quad (24)$$

так что дисперсия погрешностей величин β'_i будет равна

$$D(\Delta\beta') = \frac{1}{19} D(\beta) + \frac{2,5}{19} D(\alpha)$$

или

$$D(\Delta\beta') \cong 0,05 [D(\beta) + 2,5 D(\alpha)]. \quad (25)$$

Изложенные рассуждения основаны на предположении, что величины α_{ik} , α_{iT} принадлежат одной и той же генеральной совокупности случайных величин, иначе говоря, метод сличений и аппаратура при сравнении как элементов эталона между собой, так и с элементами сравнения одни и те же.

Формула (25) приводит к заключению, что точность метода и аппаратуры, применяемой для сличения элементов, должна быть достаточно высокой.

Величина $D(\beta)$ определяется физическими свойствами самих элементов и, если оставить в стороне вопрос об изготовлении элементов и повышении их стабильности, не зависит от наблюдателя. Поэтому, чтобы погрешность метода сличения не отражалась на точности нахождения оценок β_i , необходимо, чтобы

$$2,5 D(\alpha) < 0,1 D(\beta)$$

или

$$\left. \begin{aligned} D(\alpha) < 0,04 D(\beta); \\ \sigma_\alpha < 0,2 \sigma_\beta. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Если ориентироваться на данные, приведенные в работе * З. И. Зеликовского, то $\sigma_\beta = 0,3 \text{ мкВ}$; следовательно, σ_α должно быть не выше $0,06 \text{ мкВ}$.

При этом условии дальнейшие рассуждения будут аналогичны тем, которые приведены при рассмотрении первого из указанных случаев получения среднего значения э. д. с. эталона.

Все изложенное справедливо при еще одном дополнительном условии, что э. д. с. T элемента, с которым сличают все элементы эталона, неизменна за весь период сличений. Если это условие не соблюдено, то необходимо принять во внимание дополнительную погрешность γ , которая может иметь как систематическую, так и случайную составляющие. Если при сличениях с i -м и j -м элементами обозначить разность значений э. д. с. T элемента через b_{ij} , то

$$b_{ij} = f(i, j) + \gamma_{ij}$$

где $f(i, j)$ и γ_{ij} — соответственно систематическая и случайная составляющие.

* Исследование и разработка методов и аппаратуры для сравнения мер э. д. с. в метрологической практике, канд. диссертация, ВНИИМ, 1957.

Тогда формула (24) примет вид:

$$i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{20} \left[(\beta_i - \beta_j) - (\alpha_{ij} - \alpha_{ji}) + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (\alpha_{ik} - \alpha_{jk}) + \gamma_{ij} \right] + \\ + \frac{1}{19} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{20} f(i, j).$$

Соответственно дисперсия ($\Delta\beta$) будет:

$$D(\Delta\beta) = \frac{1}{19} D(\beta) + \frac{2,5}{19} D(\alpha) + \frac{D(\gamma)}{19}.$$

Кроме того, каждое из значений β_i будет содержать систематическую погрешность, равную

$$\frac{1}{19} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{20} f(i, j),$$

которая должна быть не выше $0,1\beta$.

Выводы

1. Надежное хранение единицы э. д. с. групповым эталоном возможно только при условии, что абсолютные измерения установили порядок величин $\frac{df_i}{dt}$, входящих в формулу (1).
2. Оценки случайных изменений э. д. с. отдельных элементов эталона следует производить по формуле (10).
3. Возможность применения этой формулы определяется точностью метода сличений элементов между собой. Погрешности этого метода должны удовлетворять условию (26). Если при этом необходимо учитывать изменение э. д. с. элемента T , то дисперсия его случайной составляющей также должна войти в условие (26).
4. Исключение из состава эталона элементов, обнаруживших недопустимые изменения э. д. с., следует производить на основании условия (15).

О ВЛИЯНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СЛИЧЕНИИ НОРМАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При изучении влияния температуры на точность сличения нормальных элементов (н. э.) необходимо учитывать три вида температурных погрешностей: погрешности от различия температур сличаемых н. э., погрешности от различия их температурных коэффициентов и погрешности от температурной инерционности (температурного гистерезиса) э. д. с. н. э. Последний вид погрешности в дальнейшем не рассматривается; при соблюдении определенных требований к температурному режиму сличаемых н. э. этой погрешностью можно пренебречь (в частности, благодаря длительной выдержке их в термостате перед сличениями).

Искомая разность э. д. с. E_X и E_N сличаемых н. э., приведенная к 20°C , находится из следующего соотношения:

$$(E_X - E_N)_{20} = (E_X - E_N)_{t_X, t_N} + \delta_t + \delta_a, \quad (1)$$

где

$(E_X - E_N)_{t_X, t_N}$ — разность э. д. с. сличаемых н. э., измеренная при помощи компаратора, мкв;
 t_X, t_N — температуры сличаемых н. э., $^\circ\text{C}$;
 δ_t — поправка на различие температур сличаемых н. э., мкв;
 δ_a — поправка на различие температурных коэффициентов сличаемых н. э., мкв.

Неточность определения поправок δ_t и δ_a приведет к появлению случайных температурных погрешностей, среднеквадратичные значения которых обозначим соответственно через σ_t и σ_a . Для нахождения указанных погрешностей введем вместо температур t_X и t_N производные величины: отклонение средней температуры поверки t_{cp} от 20°C , т. е.

$$\frac{t_X + t_N}{2} - 20 = t_{cp} - 20,$$

и разность температур сличаемых н. э., т. е.

$$t_X - t_N,$$

и будем рассматривать их как случайные величины. Средние значения этих величин равны нулю (при $t_X = t_N = t_{cp} = 20^\circ \text{C}$), а среднеквадратичные значения равны

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \sqrt{(t_{cp} - 20)^2}; \\ \tau_2 &= \sqrt{(t_X - t_N)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Параметр τ_1 означает среднеквадратичное отклонение средней температуры поверки от нормальной температуры, а параметр τ_2 означает среднеквадратичную разность температур сличаемых н. э. Численные значения τ_1 и τ_2 определяются по экспериментальным данным и могут иметь различные значения для различных лабораторий, термостатов, времен года и т. п. *

Допустимые значения температурных погрешностей

Суммарная температурная погрешность σ при сличении н. э. определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_a^2}. \quad (3)$$

Допустимые значения σ при сличении н. э. разных разрядов и классов точности можно было бы установить, исходя из необходимой точности сличений н. э. Однако в нормативных документах [1, 2] требуемая точность измерений четко не сформулирована. Обычно указывается допустимая вариация v результатов поверки, которая вызвана непостоянством э. д. с. сличаемых н. э. в течение нескольких дней и случайными погрешностями измерительного процесса. Для определения значений σ сделаем предположение, что:

а) среднеквадратичная погрешность результата поверки составляет $\frac{1}{5} \div \frac{1}{6}$ часть допустимой вариации v ;

б) погрешность измерительного процесса и непостоянство э. д. с. сличаемых н. э. в равной степени сказываются на вариации v ;

в) влияние температуры (суммарная температурная погрешность) равно воздействию всех остальных факторов на точность измерительного процесса.

Таким образом,

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{5} \div \frac{1}{6} \right) v = \left(\frac{1}{10} \div \frac{1}{12} \right) v. \quad (4)$$

Расчет допустимых значений σ приведен в таблице.

Показатели	Нормальные элементы					
	Эталонные	1-го разряда	2-го разряда	I класса	II класса	III класса
Допустимая вариация v , мкВ	1	3	10	15	30	100
Температурная погрешность $\sigma_{\text{доп}}$, мкВ	0,1	0,3	1	1,5	3	10

Значения вариации взяты для рабочих н. э. в соответствии с инструкцией 176—55 [2], для образцовых н. э. — в соответствии с многолетней практикой лаборатории эталонов электрических единиц ВНИИМ, для

* Наибольшие значения τ_1 , допустимые при поверке рабочих н. э., отражены в ГОСТ 1954—55. Например, поверка н. э. I класса допускается при температуре $18 \div 22^\circ \text{C}$. Обычно принимают, что среднеквадратичное значение равно $1/6$ размаха, следовательно, $\tau_1 = \frac{22-18}{6} = 0,7^\circ \text{C}$.

эталонных н. э. — по результатам трехлетней работы на новом компараторе [3] *.

Что касается значений σ_t и σ_a , то в первом приближении можно принять $\sigma_t \approx \sigma_a \approx 0,7\sigma$.

Погрешность от различия температур сличаемых н. э.

Зависимость э. д. с. н. э. от температуры в диапазоне $0 \div 40^\circ \text{C}$ обычно представляют в виде международной формулы [4]

$$E_t = E_{20} - [40,6(t-20) + 0,95(t-20)^2 - 0,01(t-20)^3] \cdot 10^{-6} \text{ в.} \quad (5)$$

Для расчетов в области температур практического применения н. э. автором была предложена упрощенная формула [1, 2]

$$E_t^* = E_{20} - [40(t-20) + 1 \cdot (t-20)^2] \cdot 10^{-6} \text{ в.}$$

или

$$E_t^* = E_{20} - (t-20)(t+20) \cdot 10^{-6} \text{ в.} \quad (6)$$

Погрешность при использовании упрощенной формулы (6) достаточно мала (рис. 1) и в дальнейшем изложении применяется только эта формула **.

Поправку δ_t можно найти, сопоставив соотношения (1) и (6) и исключив из рассмотрения δ_a . После простых преобразований получим

$$\delta_t = (t_X - t_N)(t_X + t_N). \quad (7)$$

Неточное измерение температур t_X и t_N приведет к появлению погрешности σ_t , численное значение которой найдем из уравнения (7)

$$\sigma_t = \sqrt{\left(\frac{\partial \delta_t}{\partial t_X}\right)^2 \theta_X^2 + \left(\frac{\partial \delta_t}{\partial t_N}\right)^2 \theta_N^2}, \quad (8)$$

где θ_X и θ_N — среднеквадратичные погрешности измерения температур t_X и t_N (предполагается, что поправки в показания термометров введены).

Произведя дифференцирование и приняв $\theta_X \approx \theta_N = \theta$ и $t_X \approx t_N \approx t_{cp}$, получим

$$\sigma_t = 2,8t_{cp} \cdot \theta. \quad (9)$$

Если непосредственно измеряется разность температур $(t_X - t_N)$, например, при помощи дифференциальной термопары, и при этом вносится погрешность θ , то из уравнения (7) следует:

$$\sigma_t = 2t_{cp} \theta. \quad (10)$$

* Приведенные значения σ для эталонных н. э. несколько преувеличены. Действительно наблюдаемая вариация результатов взаимных сличений эталонных н. э. составляет 0,6 мкв.

** Следует отметить, что наилучшее (в смысле принципа наименьших квадратов) приближение к формуле (5) в диапазоне $10-30^\circ \text{C}$ дает квадратичная зависимость вида $E_t = E_{20} - [40(t-20) + 0,95(t-20)^2] \cdot 10^{-6} \text{ в.}$ Однако ее применение нецелесообразно, поскольку дальнейшие выкладки усложняются, а выигрыш в точности аппроксимации несущественен.

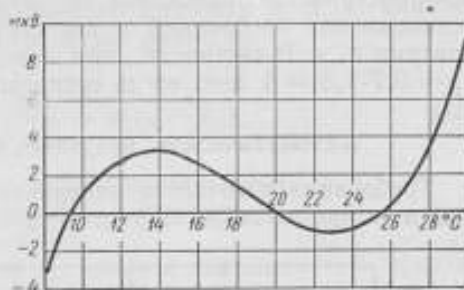


Рис. 1. Дополнительная погрешность, возникающая при использовании упрощенной формулы (6).

Формулы (9) и (10) могут служить также для выбора класса точности прибора для измерения температуры по допускаемому значению σ_t . Часто для упрощения измерений сличаемые н. э. размещают в одном и том же термостате. При этом предполагают, что $t_X = t_N$ и, следовательно, $\delta_t = 0$. В действительности $t_X \neq t_N$, и в измерение вносится погрешность σ_t , вызванная неравномерностью температуры в рабочем пространстве термостата (при условии, что t_X и t_N не измеряются). Эту погрешность можно найти, сопоставив выражения (2) и (7)

$$\sigma_t = 2t_{cp}\tau_2 \quad (11)$$

Здесь τ_2 означает среднеквадратичное неравенство температуры в рабочем пространстве термостата. Формула (11) может быть использована для установления требований к качеству термостата, предназначенного для поверки н. э. В частности, при поверке н. э. I класса можно принять $\sigma_t = 0,7 \cdot 1,5 = 1 \text{ мкВ}$; тогда согласно табл. 1 $\tau_2 = 0,025^\circ \text{C}$.

Автоматическое введение температурной поправки δ_t

Требования к точности измерения температуры при сличении эталонных н. э. чрезвычайно высоки. Для обеспечения $\sigma_t = 0,7 \cdot 0,1 = 0,07 \text{ мкВ}$

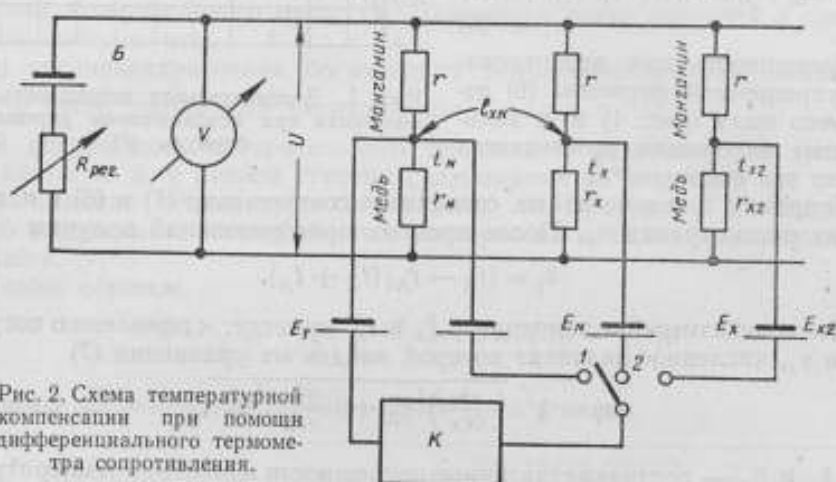


Рис. 2. Схема температурной компенсации при помощи дифференциального термометра сопротивления.

погрешность θ согласно формуле (9) должна быть около $0,001^\circ \text{C}$. Кроме того, желательно осуществлять дистанционное измерение температуры, чтобы не нарушать температурный режим сличаемых н. э. Выполнить указанные требования практически невозможно, поэтому необходимая точность сличения эталонных н. э. обеспечивалась только при условии размещения сличаемых н. э. в одном и том же термостате, причем разность температур $t_X - t_N$ не измерялась. Для решения указанного вопроса, а также для исключения дополнительных измерений и вычислений, связанных с введением поправки δ_t , предлагается метод автоматического учета указанной поправки. Идея метода заключается во введении в цепь сличаемых н. э. напряжения, численно равного δ_t . Создать такое напряжение можно двумя способами: при помощи дифференциального термометра сопротивления, включенного в мостовую схему, и при помощи дифференциальной термопары. При первом способе (рис. 2) термочувствительными элементами служат медные катушки сопротивления r_N , r_X , r_{XZ} и т. д., находящиеся в непосредственной близости от соответствующих

ших н. э. и имеющие их температуру t_N, t_X, t_{X_2} и т. д. Катушки включены в смежные плечи моста, остальными плечами которого служат манганиновые катушки r . При измерении способом замещения [3] имеем:

$$E_X - E_T + e_{XN} = \frac{E_N - E_T - P_1}{P_2} \quad E_X - E_N + e_{XN} = P_2 - P_1, \quad (12)$$

где P_1 и P_2 — показания компаратора K при первом и втором измерениях;

E_T — э. д. с. вспомогательного н. э.;

e_{XN} — напряжение на выходе моста.

Сопоставив выражения (12) и (1), приходим к выводу, что разность показаний компаратора будет равна искомой разности э. д. с. сличаемых н. э., приведенной к 20°C , если e_{XN} будет равно δ_t .

Можно показать, что

$$e_{XN} = \frac{\beta r_0 U (t_X - t_N)}{(r + r_0 + \beta r_0 t_{cp})^2} = \varepsilon (t_X - t_N), \quad (13)$$

где β — температурный коэффициент сопротивления меди;

r_0 — начальное сопротивление медных катушек;

ε — коэффициент пропорциональности.

Следовательно, указанная схема будет вводить поправку δ_t в показания компаратора, если ε сделать численно равным $2t_{cp}$, что не представляет затруднений. Точность компенсации будет определяться точностью подгонки $r_X = r_N$ при $t_X = t_N$ и точностью установки и постоянством напряжения U . Недостатками указанной схемы являются ее относительная сложность, наличие вспомогательного источника питания, необходимость наблюдения за постоянством напряжения U . Положительным свойством схемы является возможность выполнения условия $\varepsilon = 2t_{cp}$ для любых значений t_{cp} путем установки соответствующего значения напряжения U .

Значительно проще схема с дифференциальной термопарой, включаемой в цепь сличаемых н. э. между их общими полюсами (рис. 3а). Спар термопар расположены в непосредственной близости от соответствующих н. э. и воспринимают их температуру. Для исключения паразитных т. э. д. с. непосредственно к н. э. должен подключаться медный термоэлектрод. Материал второго термоэлектрода выбирается таким образом, чтобы разность т. э. д. с. e_{XN} равнялась δ_t . Если обозначить через ε т. э. д. с., развиваемую термопарой на 1°C разности температур t_X и t_N , и пренебречь нелинейностью $e_{XN} = f(t_X - t_N)$ ввиду малости $t_X - t_N$, то

$$e_{XN} = \varepsilon (t_X - t_N). \quad (14)$$

При выполнении условия $\varepsilon = 2t_{cp}$ схема будет автоматически вводить поправку δ_t в показания компаратора. Однако выполнение этого условия возможно лишь для нескольких значений t_{cp} , ибо выбор термоэлектродных материалов сильно ограничен. Для $t_{cp} = 20^\circ \text{C}$ подходит константан $\varepsilon = 40 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$, для $t_{cp} = 23^\circ \text{C}$ подходит копель $\varepsilon = 46 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$.

Погрешность автоматической компенсации для средней температуры поверки 20°C определяется из соотношения

$$\delta_t - e_{XN} = (t_X - t_N) [(t_X + t_N - 40) - (\varepsilon - 40)]. \quad (15)$$

Среднеквадратичное значение σ_t этой погрешности найдем из соотношения (15), введя параметры τ_1 и τ_2 .

$$\sigma_t = \tau_2 \sqrt{4\tau_1^2 + (\varepsilon - 40)^2} \quad (16)$$

Следовательно, погрешность компенсации зависит и от подбора константана и от значений τ_1 и τ_2 . Обычно не представляет затруднений подобрать константан таким образом, чтобы $|40 - \epsilon| < 1 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$. Однако и при $\epsilon = 40 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$ погрешность σ_t не исчезает. Поэтому для достижения необходимого значения σ_t целесообразно сочетать автоматическую компенсацию с термостатированием. При этом требования к термостату снижаются в десятки раз. Например, в термостате для поверки и. э. I класса, как было указано выше, τ_1 составляет $0,7^\circ\text{С}$, а $\sigma_t = 1 \text{ мкВ}$. Приняв

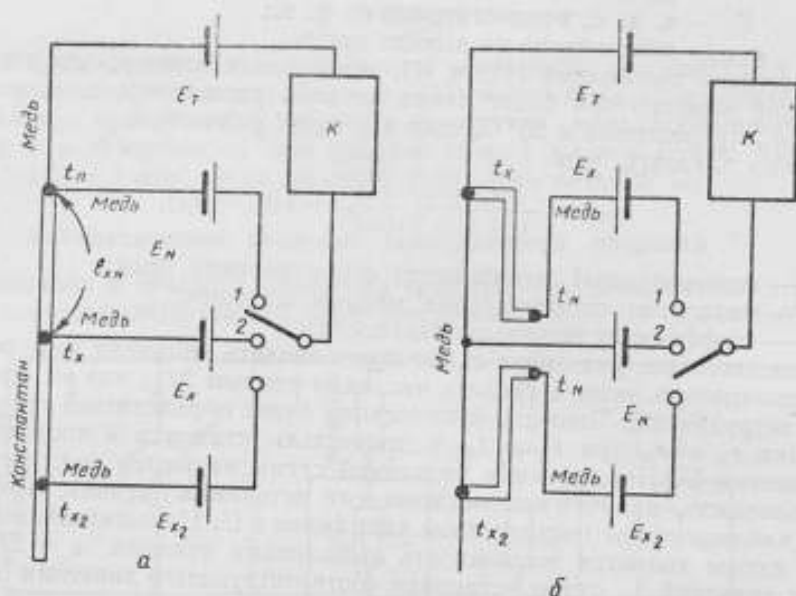


Рис. 3. Схема температурной компенсации при помощи дифференциальной термопары. а — общий полюс и. э. «-»; б — общий полюс и. э. «+».

$40 - \epsilon = 1 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$, получим $\tau_2 = 0,6^\circ\text{С}$, что в 25 раз больше, чем в термостате без автоматической компенсации δ_t .

Температурный режим масляных ванн лаборатории эталонов электрических единиц ВНИИМ, в которых хранятся эталонные и. э., характеризуется значениями $\tau_1 = 0,05^\circ\text{С}$ и $\tau_2 = 0,05^\circ\text{С}$. Подставив в формулу (16) указанные значения и приняв $|40 - \epsilon| = 1 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$, получим $\sigma_t = 0,05 \text{ мкВ}$, что удовлетворяет всем требованиям. Таким образом, применение автоматической температурной компенсации позволило снизить требования к термостатному помещению и к качеству константана невысоки: наибольшая допустимая разность температур между ваннами может составлять $3\tau_2 = 0,15^\circ\text{С}$, а т. э. д. с. применяемого константана в паре с медью должна быть в пределах $39 \pm 41 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$.

Подключение большого числа и. э. к одному константановому проводу (рис. 3а) возможно только при условии, что общим полюсом и. э. является «-». В противном случае схема усложняется (рис. 3б) и требует применения параллельного включения термопар по числу проверяемых и. э. или групп и. э. Поскольку в лаборатории общим полюсом и. э. является «+», то температурная компенсация осуществлена по схеме, приведенной на рис. 3б, а число термопар принято равным числу ванн с и. э. Термопары выполнены из медного и константанового провода диаметром $0,3 \text{ мм}$; при этом $\epsilon = 39,4 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$. Спаи термопар помещены в стеклянный защит-

ный чехол и погружены в масло ванны. Скорость изменения температуры в ванне не превышает $0,005^\circ \text{C}$ в час. При таком постоянстве температуры инерционность э. д. с. н. э., индивидуальная для каждого н. э. [5], и инерционность термопары не сказываются на точности сличений, что подтверждается многочисленными повторными сличениями н. э.

Влияние различия температурных коэффициентов сличаемых н. э.

Исследования н. э. отечественного производства, проведенные лабораторией эталонов электрических единиц ВНИИМ, показали, что зависимость э. д. с. н. э. от температуры у отдельных н. э. отличается от международной формулы (6). Результаты этих исследований послужили основанием для установления допусковых отклонений от этой формулы, помещенных в ГОСТ 1954—55 [1]. Следовательно, формулу (6) приходится рассматривать как характеристику «среднего» н. э.^{*} Поэтому, при сличениях н. э. следует вводить в результат измерения дополнительную поправку δ_a . Аналитическое выражение для этой поправки достаточно громоздко, поэтому примем, что различие температурных формул отдельных н. э. сводится к различию коэффициентов при линейном члене. Это упрощение допустимо при малых значениях τ_1 и τ_2 , имеющих место в реальных условиях поверок. Обозначим отклонение коэффициента данного н. э. от некоторого среднего значения через α , тогда формула (6) примет вид

$$E_t^* = E_{20} - [(40 + \alpha)(t - 20) + 1 \cdot (t - 20)^2]. \quad (17)$$

Из сопоставления формул (1) и (17) следует, что

$$\delta_a = \alpha_X(t_X - 20) - \alpha_N(t_N - 20). \quad (18)$$

Введение поправки δ_a , индивидуальной для каждой пары сличаемых н. э., затруднительно, тем более, что численные значения α для отдельных н. э. обычно неизвестны. Проще указанную погрешность отнести к разряду случайных и ее среднеквадратичное значение σ_a выразить через среднеквадратичное отклонение σ_α температурного коэффициента от среднего значения. Для определенной группы н. э. $\sigma_\alpha = \sqrt{\alpha^2}$. Экспериментальное исследование н. э., входящих в групповой эталон вольта (измерения проводились в 1956 г. при $t_X = t_N = 20,0^\circ \text{C}$ и $t_X = t_N = 21,3^\circ \text{C}$), показало, что $\sigma_\alpha = 0,5 \text{ мкВ}/^\circ \text{C}$. Вводя в формулу (18) σ_α , τ_1 и τ_2 , получим по закону сложения случайных погрешностей

$$\sigma_a = \sigma_\alpha \sqrt{2\tau_1^2 + \frac{1}{2}\tau_2^2}. \quad (19)$$

Подставим в формулу (19) значения σ_α , τ_1 и τ_2 для эталонных н. э., тогда

$$\sigma_a = 0,5 \sqrt{2 \cdot 0,05^2 + \frac{1}{2} 0,05^2} = 0,04 \text{ мкВ},$$

что удовлетворяет всем требованиям. Таким образом, температура при сличениях эталонных н. э. должна находиться в пределах $19,8 - 20,2^\circ \text{C}$.

Значения σ_a для рабочих н. э. можно установить, исходя из предельных значений α , указанных в ГОСТ 1954—55. Предельные отклонения

* Из работ других национальных метрологических лабораторий [6] следует, что и «средний» н. э. имеет формулу, несколько отличную от международной. Так, формула Вигоро имеет следующий вид: $E_t = E_{20} - [39,39(t - 20) + 0,903(t - 20)^2 - 0,0066(t - 20)^3 + 0,00015(t - 20)^4] \cdot 10^{-6}$ в. Однако эти исследования не получили официального признания.

от температурной формулы для н. э. I класса могут составить 10 *мкв* на 2° С и для н. э. II класса 20 *мкв* на 5° С. Перейдя к среднеквадратичным значениям, получим для насыщенных н. э. $\sigma_a = 1,5 \text{ мкв/}^\circ\text{С}$. Используя прежние значения τ_1 и τ_2 , найдем погрешность σ_a , вносимую при сличении н. э. I класса, $\sigma_a = 1,5 \text{ мкв}$. Полученное значение σ_a несколько превышает допустимое (1 *мкв*), поэтому желательнее сличение н. э. I класса производить в более узком диапазоне температур, чем это указано в ГОСТ, а именно при температуре 19 + 21° С.

Формула (19) может служить также для установления требований к термостату для сличения н. э. Как и следовало ожидать, допустимые значения погрешности σ_a предопределяют допустимые значения τ_1 (отклонение средней температуры термостата во времени от нормальной температуры); в то же время допустимые значения погрешности σ_r , как указывалось выше (формула 11), предопределяют допустимые значения τ_2 (неравномерность температуры в рабочем пространстве термостата). Таким образом, температурный режим термостата однозначно определяется допустимыми значениями погрешностей σ_a и σ_r .

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1954—55, «Нормальные элементы — меры э. д. с.»
2. Инструкция 176-55 по поверке нормальных элементов, 1955.
3. Зеликовский З. И., Труды ВНИИМ, вып. 31 (91), 1957.
4. Колосов А. К., Труды ВИС, № 100, 1932.
5. Bender D., Wissenschaftliche Abhandlungen DAMG, v. 6, 1958, S. 17.
6. Vigoureux P., Watts S., Proc. Phys. Soc., v. 45, 1933, p. 172.

И. Н. КРОТКОВ, Т. М. ГУЩИНА

МЕТОД ТОЧНОГО СЛИЧЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ НОМИНАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЕМКОСТЕЙ

Работа посвящена исследованию новой методики точных измерений основных электрических параметров эталонных конденсаторов, имеющих различные номинальные значения емкостей. Данная методика применена во ВНИИМ им. Менделеева при передаче значений единицы емкости разрядным мерам в широком диапазоне частот и номинальных величин.

При измерении параметров конденсаторов, имеющих одинаковые номинальные значения емкостей, уже достигнута метрологическая точность сличений [1]. Однако данный вид измерений является частным случаем. Практически чаще приходится сравнивать между собой конденсаторы, имеющие различные номинальные значения емкостей. Подобного рода измерения легко осуществляются при помощи аппаратуры ограниченной точности, например, при помощи неравноплечных мостов с непосредственной оценкой результата измерения. Анализ этого вопроса в настоящее время уже не представляет большого интереса. Однако разработка и исследование методики точных измерений параметров конденсаторов, номинальные значения емкостей которых различны, представляет существенное практическое значение.

Подобного рода задачи возникают в метрологических институтах, а также в лабораториях при исследовании характеристик новых видов материалов или новой аппаратуры.

Ниже приводится один из способов решения данной задачи, практически осуществленный во ВНИИМ и использованный при воспроизведении значения единицы емкости при различных частотах от десятков герц до сотен килогерц, для номинальных значений от единиц пикофарад до десятков микрофарад.

Теоретическое обоснование метода «декадных сличений»

В основу разработанного метода положен способ калибровки мер. Как известно, под способом калибровки понимают методику определения значений набора мер, осуществляемую путем сравнения их друг с другом в различных комбинациях. Впервые в метрологической практике данная методика использовалась при определении точных значений набора мер массы, т. е. гирь [2].

Применительно к нашей задаче для калибровки выберем набор из шести конденсаторов:

$$K_1, K'_1, K_2, K_3, K_4, K_{10}. \quad (1)$$

номинальные значения емкостей которых находятся в отношении: 1, 2, 3, 4, 10.

Этот набор конденсаторов дает возможность осуществлять их сравнение при различных комбинациях параллельного включения и получать любые целые номинальные значения емкостей в пределах от 1 до 10. Подобное обстоятельство позволяет нам вернуться к сравнению емкостей, имеющих одинаковые номинальные значения, со всеми вытекающими отсюда преимуществами.

Будем считать, что при сравнениях емкостей один из конденсаторов принимается за исходную меру, т. е. его параметры должны быть наперед заданы. Здесь рационально рассмотреть два варианта решения задачи, когда заданы параметры конденсатора K_{10} и конденсатора K_1 .

Решая задачу обобщенно, введем следующий перечень принятых условных обозначений (табл. 1)

Таблица 1

Конденсаторы, входящие в набор	Условные обозначения параметров каждого из конденсаторов набора	
	Емкость C	Тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$
K_1	x_1	y_1
K'_1	x_2	y_2
K_2	x_3	y_3
K_3	x_4	y_4
K_4	x_5	y_5
K_{10}	x_{10}	y_{10}

Тогда задача сводится к определению 10 параметров (x_i, y_i) для пяти конденсаторов, составляющих набор. Следует заметить, что применимость метода не ограничивается выбором какого-либо определенного набора конденсаторов. Задача решается также и для набора конденсаторов, емкости которых находятся в ином отношении, например, $K_1, K'_1, K_2, K'_2, K_3, K_{10}$.

Наш набор имеет преимущества в эксплуатационном и экономическом отношениях. Предварительно отметим допущения, положенные в основу метода декадных сличений.

1. Результаты измерения параметров конденсаторов освобождены искусственным образом от влияния систематических погрешностей.
2. Параметры сравниваемых конденсаторов при их параллельном включении удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_m x_m &= p_{m+1} x_{10} \\ q_1 y_1 + q_2 y_2 + \dots + q_m y_m &= q_{m+1} y_{10} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

- x_1, x_2, \dots, x_m — параметры группы, состоящей из m конденсаторов;
- y_1, y_2, \dots, y_m — эквивалентные, суммарные параметры нового конденсатора, образованного из группы m конденсаторов, соединенных параллельно;
- p_i, q_i — коэффициенты, зависящие от комбинации включения конденсаторов.

Первое из упомянутых допущений обеспечивается за счет применения метода одновременного сравнения емкостей, имеющих одинаковые номинальные значения (метод компарирования емкостей).

Назначение	Порядковый номер (l) уравнений	a_l	b_l	c_l	d_l	f_l	h_l	$\Delta\beta_l$	$k_l\Delta\gamma_l$	v_l
Для емкостей	1	+1	-1	0	0	0	0	$-\Delta\beta_1$	—	v_{1x}
	2	+1	+1	-1	0	0	0	$-\Delta\beta_2$	—	v_{2x}
	3	+1	0	+1	-1	0	0	$-\Delta\beta_3$	—	v_{3x}
	4	0	+1	+1	-1	0	0	$-\Delta\beta_4$	—	v_{4x}
	5	+1	0	0	+1	-1	0	$-\Delta\beta_5$	—	v_{5x}
	6	0	+1	0	+1	-1	0	$-\Delta\beta_6$	—	v_{6x}
	7	+1	0	+1	+1	+1	-1	$-\Delta\beta_7$	—	v_{7x}
	8	0	+1	+1	+1	+1	-1	$-\Delta\beta_8$	—	v_{8x}
Для углов потерь	1	+1	-1	0	0	0	0	—	$-\Delta\gamma_1$	v_{1y}
	2	+1	+1	-2	0	0	0	—	$-2\Delta\gamma_2$	v_{2y}
	3	+1	0	+2	-3	0	0	—	$-3\Delta\gamma_3$	v_{3y}
	4	0	+1	+2	-3	0	0	—	$-3\Delta\gamma_4$	v_{4y}
	5	+1	0	0	+3	-4	0	—	$-4\Delta\gamma_5$	v_{5y}
	6	0	+1	0	+3	-4	0	—	$-4\Delta\gamma_6$	v_{6y}
	7	+1	0	+2	+3	+4	-10	—	$-10\Delta\gamma_7$	v_{7y}
	8	0	+1	+2	+3	+4	-10	—	$-10\Delta\gamma_8$	v_{8y}

Второе допущение, как это следует из теории цепей и многочисленных экспериментальных исследований, является справедливым в пределах погрешностей 10^{-6} для диапазона звуковых и низких частот при различных номинальных значениях емкостей (от 1 пф до 10 мкф).

Допустим теперь, что имеется некоторая измерительная схема, дающая возможность осуществить процесс одновременного сравнения двух конденсаторов с одинаковыми номинальными значениями емкостей. Напомним, что сравниваемые конденсаторы в ряде случаев являются группами параллельно включенных емкостей из принятого нами набора.

Можно показать, что условия равновесия измерительной схемы, записанные в комплексной форме, при одновременном сравнении объектов измерения приводятся к системам n алгебраических линейных уравнений [3]. После разделения вещественных и мнимых составляющих эти уравнения принимают следующий вид:

$$\begin{cases}
 a_1x_1 + b_1x_2 + c_1x_3 + d_1x_4 + f_1x_5 + h_1x_{10} - \Delta\beta_1 + v_{1x} = 0 \\
 \dots \\
 a_lx_1 + b_lx_2 + c_lx_3 + d_lx_4 + f_lx_5 + h_lx_{10} - \Delta\beta_l + v_{lx} = 0 \\
 \dots \\
 a_nx_1 + b_nx_2 + c_nx_3 + d_nx_4 + f_nx_5 + h_nx_{10} - \Delta\beta_n + v_{nx} = 0
 \end{cases} \quad (3a)$$

и

$$\begin{cases}
 a_1y_1 + b_1y_2 + c_1y_3 + d_1y_4 + f_1y_5 + h_1y_{10} - k_1\Delta\gamma_1 + v_{1y} = 0 \\
 \dots \\
 a_ly_1 + b_ly_2 + c_ly_3 + d_ly_4 + f_ly_5 + h_ly_{10} - k_l\Delta\gamma_l + v_{ly} = 0 \\
 a_ny_1 + b_ny_2 + c_ny_3 + d_ny_4 + f_ny_5 + h_ny_{10} - k_n\Delta\gamma_n + v_{ny} = 0
 \end{cases} \quad (36)$$

В этих системах уравнений:

x_1, \dots, x_{10} — наиболее достоверные значения условных параметров конденсаторов набора (см. табл. 1);

y_1, \dots, y_{10} — целые числа (см. табл. 2), различные для уравнений

$(3a)$ и (36) ; численные значения (a_l, \dots, h_l) зависят от комбинации и последовательности включения отдельных сравниваемых конденсаторов;

$\Delta \beta_i, \Delta \gamma_i$ — величины, получаемые практически по отсчетным устройствам регулируемых элементов измерительной установки;
 k_1, \dots, k_n — целые числа, различные в зависимости от комбинации включения конденсаторов набора;
 v_{ix}, \dots, v_{iy} — остаточные погрешности каждого из условных уравнений (3а, 3б), возникающие за счет электромагнитных помех схемы.

Задача сводится к совместному решению системы (3а и 3б) из n уравнений с m неизвестными. Для набора, выбранного ранее (считая параметры одного из конденсаторов заданными), будет:

$$n < 10;$$

$$m = 5,$$

т. е. число уравнений превышает число неизвестных. Поэтому условия задачи становятся неопределенными и требуют уточнения.

В соответствии с изложенным ранее, вновь рассмотрим два варианта при заданных значениях следующих параметров:

а) конденсатора K_{10} (C_{10} и $\text{tg } \delta_{10}$),

б) конденсатора K_1 (C_1 и $\text{tg } \delta_1$).

В обоих случаях для устранения неопределенности задачи, согласно методу Лежандра — Гаусса [4], дополнительно запишем:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n v_{ix}^2 &= \min \\ \sum_{i=1}^n v_{iy}^2 &= \min \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

или на основании уравнений (3а) и (3б) для обоих вариантов получим

$$\left. \begin{aligned} \sum_1^n \frac{\partial v_{ix}}{\partial x_1} v_{ix} = 0; \quad \sum_1^n \frac{\partial v_{ix}}{\partial x_2} v_{ix} = 0; \quad \dots; \quad \sum_1^n \frac{\partial v_{ix}}{\partial x_5} v_{ix} = 0 \\ \sum_1^n \frac{\partial v_{iy}}{\partial y_1} v_{iy} = 0; \quad \sum_1^n \frac{\partial v_{iy}}{\partial y_2} v_{iy} = 0; \quad \dots; \quad \sum_1^n \frac{\partial v_{iy}}{\partial y_5} v_{iy} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4а)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_1^n \frac{\partial v_{ix}}{\partial x_2} v_{ix} = 0; \quad \sum_1^n \frac{\partial v_{ix}}{\partial x_3} v_{ix} = 0; \quad \dots; \quad \sum_1^n \frac{\partial v_{ix}}{\partial x_{10}} v_{ix} = 0 \\ \sum_1^n \frac{\partial v_{iy}}{\partial y_2} v_{iy} = 0; \quad \sum_1^n \frac{\partial v_{iy}}{\partial y_3} v_{iy} = 0; \quad \dots; \quad \sum_1^n \frac{\partial v_{iy}}{\partial y_{10}} v_{iy} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4б)$$

Подставим в уравнения (4а) и (4б) значения остаточных погрешностей уравнений (3а) и (3б)

$$v_{ix} = \Delta \beta_i - (a_i x_1 + b_i x_2 + c_i x_3 + d_i x_4 + f_i x_5 + h_i x_{10})$$

$$v_{iy} = k_i \Delta \gamma_i - (a_i y_1 + b_i y_2 + c_i y_3 + d_i y_4 + f_i y_5 + h_i y_{10}).$$

а также их частных производных по каждому из параметров конденсаторов набора. После простейших алгебраических преобразований получим уравнения вида (5а) и (5б):

$$\left. \begin{aligned} [aa] x_1 + [ab] x_2 + [ac] x_3 + [ad] x_4 + [af] x_5 + [ah] x_{10} - [a\Delta\beta] &= 0 \\ [ab] x_1 + [bb] x_2 + [bc] x_3 + [bd] x_4 + [bf] x_5 + [bh] x_{10} - [b\Delta\beta] &= 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ [af] x_1 + [bf] x_2 + [cf] x_3 + [df] x_4 + [ff] x_5 + [fh] x_{10} - [f\Delta\beta] &= 0 \\ [ah] x_1 + [bh] x_2 + [ch] x_3 + [dh] x_4 + [fh] x_5 + [hh] x_{10} - [h\Delta\beta] &= 0 \end{aligned} \right\} (5а)$$

и

$$\left. \begin{aligned} [aa] y_1 + [ab] y_2 + [ac] y_3 + [ad] y_4 + [af] y_5 + [ah] y_{10} - [ak\Delta\gamma] &= 0 \\ [ab] y_1 + [bb] y_2 + [bc] y_3 + [bd] y_4 + [bf] y_5 + [bh] y_{10} - [bk\Delta\gamma] &= 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ [af] y_1 + [bf] y_2 + [cf] y_3 + [df] y_4 + [ff] y_5 + [fh] y_{10} - [fk\Delta\gamma] &= 0 \\ [ah] y_1 + [bh] y_2 + [ch] y_3 + [dh] y_4 + [fh] y_5 + [hh] y_{10} - [hk\Delta\gamma] &= 0 \end{aligned} \right\} (5б)$$

где

$$[aa] = \sum_1^n a_i a_i; [ab] = \sum_1^n a_i b_i; \dots; [ah] = \sum_1^n a_i h_i$$

$$[a\Delta\beta] = \sum_1^n a_i \Delta\beta_i, \dots, [hk\Delta\gamma] = \sum_1^n h_i k_i \Delta\gamma_i.$$

Эти коэффициенты различны для уравнений (5а) и (5б), их величина зависит от числа и вида комбинаций сличений конденсаторов набора.

Следует заметить, что уравнения (5а) и (5б) принято называть нормальными уравнениями, их число равно числу неизвестных. В нашем случае задача сводится к определению 5 неизвестных параметров. По этой причине в уравнениях (5а) и (5б) будет отсутствовать по одной строке. Так, например, при заданных параметрах конденсатора K_{10} в уравнениях (5а) и (5б) будут отсутствовать последние строки. При заданных параметрах конденсатора K_1 в уравнениях (5а) и (5б) следует вычеркнуть первые строки.

Решая эти уравнения любым из принятых в алгебре методов, получим следующие обобщенные выражения искомым значений параметров конденсаторов набора:

$$\left. \begin{aligned} x_1 = C_1 = \frac{1}{10} C_{10} + \varphi_1(\Delta\beta); \quad \operatorname{tg} \delta_1 = \operatorname{tg} \delta_{10} + \psi_1(\Delta\gamma) &= y_1 \\ x_2 = C_1' = \frac{1}{10} C_{10} + \varphi_1'(\Delta\beta); \quad \operatorname{tg} \delta_1' = \operatorname{tg} \delta_{10} + \psi_1'(\Delta\gamma) &= y_2 \\ x_3 = C_2 = \frac{2}{10} C_{10} + \varphi_2(\Delta\beta); \quad \operatorname{tg} \delta_2 = \operatorname{tg} \delta_{10} + \psi_2(\Delta\gamma) &= y_3 \\ x_4 = C_3 = \frac{3}{10} C_{10} + \varphi_3(\Delta\beta); \quad \operatorname{tg} \delta_3 = \operatorname{tg} \delta_{10} + \psi_3(\Delta\gamma) &= y_4 \\ x_5 = C_4 = \frac{4}{10} C_{10} + \varphi_4(\Delta\beta); \quad \operatorname{tg} \delta_4 = \operatorname{tg} \delta_{10} + \psi_4(\Delta\gamma) &= y_5 \end{aligned} \right\} (6а)$$

или

$$\left. \begin{aligned} x_2 = C_1' = C_1 + \sigma_1(\Delta\beta); \quad \operatorname{tg} \delta_1' = \operatorname{tg} \delta_1 + \tau_1(\Delta\gamma) &= y_2 \\ x_3 = C_2 = 2C_1 + \sigma_2(\Delta\beta); \quad \operatorname{tg} \delta_2 = \operatorname{tg} \delta_1 + \tau_2(\Delta\gamma) &= y_3 \\ x_4 = C_3 = 3C_1 + \sigma_3(\Delta\beta); \quad \operatorname{tg} \delta_3 = \operatorname{tg} \delta_1 + \tau_3(\Delta\gamma) &= y_4 \\ x_5 = C_4 = 4C_1 + \sigma_4(\Delta\beta); \quad \operatorname{tg} \delta_4 = \operatorname{tg} \delta_1 + \tau_4(\Delta\gamma) &= y_5 \\ x_{10} = C_{10} = 10C_1 + \sigma_{10}(\Delta\beta); \quad \operatorname{tg} \delta_{10} = \operatorname{tg} \delta_1 + \tau_{10}(\Delta\gamma) &= y_{10} \end{aligned} \right\} (6б)$$

Таблица 3

Вид функции	Для емкостей		Вид функции	Для углов потерь	
	При заданном C_{14}			При заданном $tg \delta_{14}$	
$\varphi_1 (\Delta\beta)$	$+ 0,22 [a\Delta\beta] + 0,02 [b\Delta\beta] - 0,06 [c\Delta\beta] - 0,04 [d\Delta\beta] + 0,03 [f\Delta\beta]$		$\varphi_1 (\Delta\gamma)$	$+ 0,22 [ak\Delta\gamma] + 0,02 [bk\Delta\gamma] - 0,03 [ck\Delta\gamma] - 0,013 [dk\Delta\gamma] + 0,0075 [fk\Delta\gamma]$	
$\varphi'_1 (\Delta\beta)$	$+ 0,02 [a\Delta\beta] + 0,22 [b\Delta\beta] - 0,06 [c\Delta\beta] - 0,04 [d\Delta\beta] + 0,03 [f\Delta\beta]$		$\varphi'_1 (\Delta\gamma)$	$+ 0,02 [ak\Delta\gamma] + 0,22 [bk\Delta\gamma] - 0,03 [ck\Delta\gamma] - 0,013 [dk\Delta\gamma] + 0,0075 [fk\Delta\gamma]$	
$\varphi_2 (\Delta\beta)$	$- 0,06 [a\Delta\beta] - 0,06 [b\Delta\beta] + 0,28 [c\Delta\beta] + 0,02 [d\Delta\beta] - 0,14 [f\Delta\beta]$		$\varphi_2 (\Delta\gamma)$	$- 0,03 [ak\Delta\gamma] - 0,03 [bk\Delta\gamma] + 0,07 [ck\Delta\gamma] + 0,003 [dk\Delta\gamma] - 0,0175 [fk\Delta\gamma]$	
$\varphi_3 (\Delta\beta)$	$- 0,04 [a\Delta\beta] - 0,04 [b\Delta\beta] + 0,02 [c\Delta\beta] + 0,18 [d\Delta\beta] - 0,01 [f\Delta\beta]$		$\varphi_3 (\Delta\gamma)$	$- 0,013 [ak\Delta\gamma] - 0,013 [bk\Delta\gamma] + 0,0033 [ck\Delta\gamma] + 0,02 [dk\Delta\gamma] - 0,0008 [fk\Delta\gamma]$	
$\varphi_4 (\Delta\beta)$	$+ 0,03 [a\Delta\beta] + 0,03 [b\Delta\beta] - 0,14 [c\Delta\beta] - 0,01 [d\Delta\beta] + 0,32 [f\Delta\beta]$		$\varphi_4 (\Delta\gamma)$	$+ 0,0075 [ak\Delta\gamma] + 0,0075 [bk\Delta\gamma] - 0,0175 [ck\Delta\gamma] - 0,00083 [dk\Delta\gamma] + 0,02 [fk\Delta\gamma]$	
Вид функции	При заданном C_1		Вид функции	При заданном $tg \delta_1$	
$\sigma_1 (\Delta\beta)$	$+ 0,4 [b\Delta\beta] + 0,4 [c\Delta\beta] + 0,6 [d\Delta\beta] + 0,8 [f\Delta\beta] + 2 [h\Delta\beta]$		$\tau_1 (\Delta\gamma)$	$+ 0,4 [bk\Delta\gamma] + 0,2 [ck\Delta\gamma] + 0,2 [dk\Delta\gamma] + 0,2 [fk\Delta\gamma] + 0,2 [hk\Delta\gamma]$	
$\sigma_2 (\Delta\beta)$	$+ 0,4 [b\Delta\beta] + 1,4 [c\Delta\beta] + 1,6 [d\Delta\beta] + 1,8 [f\Delta\beta] + 5 [h\Delta\beta]$		$\tau_2 (\Delta\gamma)$	$+ 0,2 [bk\Delta\gamma] + 0,35 [ck\Delta\gamma] + 0,266 [dk\Delta\gamma] + 0,225 [fk\Delta\gamma] + 0,25 [hk\Delta\gamma]$	
$\sigma_3 (\Delta\beta)$	$+ 0,6 [b\Delta\beta] + 1,6 [c\Delta\beta] + 2,4 [d\Delta\beta] + 2,7 [f\Delta\beta] + 7 [h\Delta\beta]$		$\tau_3 (\Delta\gamma)$	$+ 0,2 [bk\Delta\gamma] + 0,267 [ck\Delta\gamma] + 0,267 [dk\Delta\gamma] + 0,225 [fk\Delta\gamma] + 0,233 [hk\Delta\gamma]$	
$\sigma_4 (\Delta\beta)$	$+ 0,8 [b\Delta\beta] + 1,8 [c\Delta\beta] + 2,7 [d\Delta\beta] + 3,6 [f\Delta\beta] + 8,5 [h\Delta\beta]$		$\tau_4 (\Delta\gamma)$	$+ 0,2 [bk\Delta\gamma] + 0,225 [ck\Delta\gamma] + 0,225 [dk\Delta\gamma] + 0,225 [fk\Delta\gamma] + 0,2125 [hk\Delta\gamma]$	
$\sigma_{10} (\Delta\beta)$	$+ 2 [b\Delta\beta] + 5 [c\Delta\beta] + 7 [d\Delta\beta] + 8,5 [f\Delta\beta] + 22 [h\Delta\beta]$		$\tau_{10} (\Delta\gamma)$	$+ 0,2 [bk\Delta\gamma] + 0,25 [ck\Delta\gamma] + 0,233 [dk\Delta\gamma] + 0,2125 [fk\Delta\gamma] + 0,22 [hk\Delta\gamma]$	

В первом случае (6а) считались известными значения параметров (C_{10} и $\text{tg } \delta_{10}$) конденсатора K_{10} ; во втором (6б) — параметры конденсатора K_1 (C_1 и $\text{tg } \delta_1$).

Функции $\varphi_1(\Delta\beta) \dots \varphi_4(\Delta\beta)$, $\sigma_1(\Delta\beta) \dots \sigma_{10}(\Delta\beta)$, а также $\psi_1(\Delta\gamma) \dots \psi_4(\Delta\gamma)$, $\tau_1(\Delta\gamma) \dots \tau_{10}(\Delta\gamma)$ зависят от всех величин, получаемых по отсчетным устройствам (см. табл. 3), а также от комбинаций, в которых сравниваются компарирующей схемой конденсаторы набора (табл. 4).

Таблица 4

Порядковый номер уравнений 3а и 3б при сравнении конденсаторов	Последовательность включения конденсаторов набора при сличении их параметров компаратором	
	1-е измерение	2-е измерение
1	K_1	K'_1
2	$K_1 \parallel K'_1$	K_2
3	$K_1 \parallel K_2$	K_3
4	$K'_1 \parallel K_2$	K_3
5	$K_1 \parallel K_3$	K_4
6	$K'_1 \parallel K_3$	K_4
7	$K_1 \parallel K_2 \parallel K_3 \parallel K_4$	K_{10}
8	$K'_1 \parallel K_2 \parallel K_3 \parallel K_4$	K_{10}

Погрешности измерения параметров конденсаторов набора при помощи метода «декадных» сличений

В соответствии с изложенным ранее, погрешности измерения параметров конденсаторов набора возникают за счет:

- а) погрешности аттестации параметров исходной меры (K_{10} или K_1);
- б) погрешностей отсчетных устройств регулируемых элементов измерительной установки, т. е.

$$\Delta(\Delta\beta_i) = \nabla\beta_i \quad \text{и} \quad \Delta(\Delta\gamma_i) = \nabla\gamma_i;$$

в) погрешностей каждого из условных уравнений (3а и 3б) за счет действия различных электромагнитных помех самой компарирующей схемы (Δv_{ix} , Δv_{iy}).

При вычислении погрешностей (пп. а и б) воспользуемся соотношениями (4а) и (4б) и законом накопления ошибок косвенных измерений [5].

Предварительно перепишем уравнения (6а) и (6б) применительно к некоторому v -ому конденсатору:

$$\left. \begin{aligned} C_v &= AC_{10} + \varphi_v(\Delta\beta) \\ \text{tg } \delta_v &= \text{tg } \delta_{10} + \psi_v(\Delta\gamma) \end{aligned} \right\} \quad (7а)$$

аналогично будет

$$\left. \begin{aligned} C_v &= BC_1 + \sigma_v(\Delta\beta) \\ \text{tg } \delta_v &= \text{tg } \delta_1 + \tau_v(\Delta\gamma) \end{aligned} \right\} \quad (7б)$$

где A и B — числа, зависящие от комбинаций сравнения конденсаторов набора.

Отсюда погрешности из-за неточностей аттестации исходных мер и ошибок отсчета соответственно имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\Delta C_v}{C_v} \right) &\cong \sqrt{\left(\frac{\Delta C_0}{C_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \varphi_v}{AC_0} \right)^2} \\ \left(\frac{\Delta C_v}{C_v} \right) &\cong \sqrt{\left(\frac{\Delta C_1}{C_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \sigma_v}{BC_1} \right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} (\Delta \operatorname{tg} \delta_v) &= \sqrt{\Delta \operatorname{tg} \delta_0^2 + \Delta \phi_v^2} \\ (\Delta \operatorname{tg} \delta_v) &= \sqrt{\Delta \operatorname{tg} \delta_0^2 + \Delta \tau_v^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varphi_v &= \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \left| \frac{\partial \varphi_v}{\partial (\Delta \beta_i)} \nabla \beta_i \right|^2}; \quad \Delta \phi_v = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \left| \frac{\partial \phi_v}{\partial (\Delta \gamma_i)} \nabla \gamma_i \right|^2}; \\ \Delta \sigma_v &= \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \left| \frac{\partial \sigma_v}{\partial (\Delta \beta_i)} \nabla \beta_i \right|^2}; \quad \Delta \tau_v = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \left| \frac{\partial \tau_v}{\partial (\Delta \gamma_i)} \nabla \gamma_i \right|^2}. \end{aligned} \right\} \quad (10a)$$

Погрешности определения параметров конденсаторов набора за счет электромагнитных помех компаратора получают вид:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\Delta C_v}{C_v} \right) &= \sqrt{\frac{\sum v_{ix}^2}{(n-m)} \cdot \frac{1}{V P_{C_v}} \cdot \frac{1}{C_v}} \\ (\Delta \operatorname{tg} \delta_v) &= \sqrt{\frac{\sum v_{iy}^2}{(n-m)} \cdot \frac{1}{V P_{\operatorname{tg} \delta_v}}} \end{aligned} \right\} \quad (10b)$$

где n — количество уравнений вида (3a) и (3б);

i — порядковый номер уравнений ($1 < i < n$);

m — число неизвестных (x_v, y_v);

v — порядковый номер неизвестных ($1 < v < m$).

Поэтому окончательно полная погрешность определения искомым параметров конденсаторов набора рассчитывается следующим образом:

емкости

$$\left(\frac{\Delta C_v}{C_v} \right) \cong \sqrt{\left(\frac{\Delta C_0}{C_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \varphi_v}{AC_0} \right)^2 + \frac{1}{n-m} \cdot \frac{1}{P_{x_v}} \cdot \left(\frac{\sum v_{ix}}{AC_0} \right)^2} \quad (11a)$$

и

$$\left(\frac{\Delta C_v}{C_v} \right) \cong \sqrt{\left(\frac{\Delta C_0}{C_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \sigma_v}{BC_0} \right)^2 + \frac{1}{n-m} \cdot \frac{1}{P_{y_v}} \cdot \left(\frac{\sum v_{iy}}{BC_0} \right)^2} \quad (11b)$$

углы потерь

$$\Delta \operatorname{tg} \delta_v \cong \sqrt{\Delta \operatorname{tg} \delta_0^2 + \Delta \phi_v^2 + \left[\frac{1}{n-m} \cdot \frac{1}{P_{y_v}} \right] \sum v_{iy}^2} \quad (12a)$$

и

$$\Delta \operatorname{tg} \delta_v \cong \sqrt{\Delta \operatorname{tg} \delta_0^2 + \Delta \tau_v^2 + \left[\frac{1}{n-m} \cdot \frac{1}{P_{x_v}} \right] \sum v_{ix}^2} \quad (12b)$$

Соотношения (11a) и (12a) применимы в тех случаях, когда заданы значения параметров конденсатора K_{10} .

Аналогично соотношения (11b) и (12b) выведены в предположении, что значения параметров конденсатора K_1 известны.

Определение функций $\varphi_v(\Delta \beta)$, $\sigma_v(\Delta \beta)$, $\phi_v(\Delta \gamma)$, $\tau_v(\Delta \gamma)$ в уравнениях (6a) и (6б) при заданном n

Вид функций $\varphi_v(\Delta \beta) \dots \tau_v(\Delta \gamma)$, входящих в расчетные соотношения для искомым параметров конденсаторов, зависит от комбинаций включений объектов сличения и числа самих сличений n . Из соотношений (11a... 12b) можно видеть, что погрешность определения значений отдельных

Таблица 5

Условные обозначения (ур. 6а)	При заданном C_1 , для емкостей	Условные обозначения (ур. 6а)	При заданном $\lg \delta_1$, для углов потерь
— $[a\Delta\beta]$	— $\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2 - \Delta\beta_3 - \Delta\beta_4 - \Delta\beta_5 - \Delta\beta_7$	— $[ak\Delta\gamma]$	— $\Delta\gamma_1 - 2\Delta\gamma_2 - 3\Delta\gamma_3 - 4\Delta\gamma_4 - 4\Delta\gamma_5 - 10\Delta\gamma_7$
— $[b\Delta\beta]$	+ $\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2 - \Delta\beta_3 - \Delta\beta_4 - \Delta\beta_5$	— $[bk\Delta\gamma]$	+ $\Delta\gamma_1 - 2\Delta\gamma_2 - 3\Delta\gamma_4 - 4\Delta\gamma_6 - 10\Delta\gamma_8$
— $[c\Delta\beta]$	+ $\Delta\beta_2 - \Delta\beta_3 - \Delta\beta_4 - \Delta\beta_7 - \Delta\beta_8$	— $[ck\Delta\gamma]$	+ $4\Delta\gamma_2 + 6\Delta\gamma_3 - 6\Delta\gamma_4 - 20\Delta\gamma_7 - 20\Delta\gamma_8$
— $[d\Delta\beta]$	+ $\Delta\beta_3 + \Delta\beta_4 - \Delta\beta_5 - \Delta\beta_6 - \Delta\beta_7 - \Delta\beta_8$	— $[dk\Delta\gamma]$	+ $9\Delta\gamma_3 + 9\Delta\gamma_4 - 12\Delta\gamma_5 - 12\Delta\gamma_6 - 30\Delta\gamma_7 - 30\Delta\gamma_8$
— $[f\Delta\beta]$	+ $\Delta\beta_3 + \Delta\beta_4 - \Delta\beta_7 - \Delta\beta_8$	— $[fk\Delta\gamma]$	+ $16\Delta\gamma_6 + 16\Delta\gamma_8 - 40\Delta\gamma_7 - 40\Delta\gamma_8$
Условные обозначения (ур. 6б)	При заданном C_1 , для емкостей	Условные обозначения (ур. 6б)	При заданном $\lg \delta_1$, для углов потерь
— $[b\Delta\beta]$	+ $\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2 - \Delta\beta_3 - \Delta\beta_4 - \Delta\beta_6 - \Delta\beta_8$	— $[bk\Delta\gamma]$	+ $\Delta\gamma_1 - 2\Delta\gamma_2 - 3\Delta\gamma_4 - 4\Delta\gamma_6 - 10\Delta\gamma_8$
— $[c\Delta\beta]$	+ $\Delta\beta_2 - \Delta\beta_3 - \Delta\beta_4 - \Delta\beta_7 - \Delta\beta_8$	— $[ck\Delta\gamma]$	+ $4\Delta\gamma_2 - 6\Delta\gamma_3 - 6\Delta\gamma_4 - 20\Delta\gamma_7 - 20\Delta\gamma_8$
— $[d\Delta\beta]$	+ $\Delta\beta_3 + \Delta\beta_4 - \Delta\beta_5 - \Delta\beta_6 - \Delta\beta_7 - \Delta\beta_8$	— $[dk\Delta\gamma]$	+ $9\Delta\gamma_3 + 9\Delta\gamma_4 - 12\Delta\gamma_5 - 12\Delta\gamma_6 - 30\Delta\gamma_7 - 30\Delta\gamma_8$
— $[f\Delta\beta]$	+ $\Delta\beta_3 + \Delta\beta_4 - \Delta\beta_7 - \Delta\beta_8$	— $[fk\Delta\gamma]$	+ $16\Delta\gamma_6 + 16\Delta\gamma_8 - 40\Delta\gamma_7 - 40\Delta\gamma_8$
— $[h\Delta\beta]$	+ $\Delta\beta_7 + \Delta\beta_8$	— $[hk\Delta\gamma]$	100 $\Delta\gamma_7 + 100\Delta\gamma_8$

параметров конденсаторов набора уменьшается с увеличением числа уравнений n . С возрастанием этого числа должна увеличиваться разрешающая способность самого компаратора. Однако при сличении конденсаторов с малым номинальным значением емкости последнее не всегда достигается. Опыт и расчеты показывают, что в нашем случае достаточно при сравнении конденсаторов ограничиться значением $n = 8$.

Для определения вида искомых функций необходимо, как это отмечалось, условиться еще о порядке последовательности сравнений конденсаторов набора. Нами выбрана последовательность сравнений конденсаторов, указанная в табл. 4.

Из этой таблицы видно, что не использованные для расчетов уравнения

$$K_1 || K_4 \rightarrow K_2 || K_3$$

$$K'_1 || K_4 \rightarrow K_2 || K_3$$

могут быть применены в качестве контрольных уравнений.

Для сокращения записи все этапы вычислений, связанных с определением вида искомых функций, сведены в табл. 5—7. Окончательный результат расчетов приведен в табл. 7.

Таблица 6

Коэффициенты нормальных уравнений (5а)						При заданном C_{2n} для емкостей					При заданном $\lg t_{2n}$ для углов потерь						
[aa]	[ab]	[ac]	[ad]	[af]	[ah]	5	0	1	1	0	-1	5	0	2	3	0	-10
[ab]	[bb]	[bc]	[bd]	[bf]	[bh]	0	5	1	1	0	-1	0	5	2	3	0	-10
[ac]	[bc]	[cc]	[cd]	[cf]	[ch]	1	1	5	0	2	-2	2	2	20	0	16	-40
[ad]	[bd]	[cd]	[dd]	[df]	[dh]	1	1	0	6	0	-2	3	3	0	54	0	-60
[af]	[bf]	[cf]	[df]	[ff]	[fh]	0	0	2	0	4	-2	0	0	16	0	64	-80

Продолжение табл. 6

Коэффициенты нормальных уравнений (5б)						При заданном C_1 для емкостей					При заданном $\lg t_1$ для углов потерь						
[ab]	[bb]	[bc]	[bd]	[bf]	[bh]	0	5	1	1	0	-1	0	5	2	3	0	-10
[ac]	[bc]	[cc]	[cd]	[cf]	[ch]	1	1	5	0	2	-2	2	2	20	0	16	-40
[ad]	[bd]	[cd]	[dd]	[df]	[dh]	1	1	0	6	0	-2	3	3	0	54	0	-60
[af]	[bf]	[cf]	[df]	[ff]	[fh]	0	0	2	0	4	-2	0	0	16	0	64	-80
[ah]	[bh]	[ch]	[dh]	[fh]	[hh]	-1	-1	-2	-2	-2	+2	-10	-10	-40	-60	-80	200

Таблица 7

Вид функции (ур. 68)	Для емкостей		Вид функции (ур. 69)	Для углов потерь	
	При заданном C_{1s}			При заданном $tg \delta_{1s}$	
$-\varphi_1(\Delta\beta)$	$-0,2 \Delta\beta_1 - 0,3 \Delta\beta_2 - 0,2 \Delta\beta_3 - 0,15 \Delta\beta_4 + 0,05 \Delta\beta_5 - 0,15 \Delta\beta_6 + 0,05 \Delta\beta_7$	$-0,2 \Delta\gamma_1 - 0,6 \Delta\gamma_2 - 0,5 \Delta\gamma_3 - 0,6 \Delta\gamma_4 + 0,2 \Delta\gamma_5 - 1,5 \Delta\gamma_6 + 0,5 \Delta\gamma_7$	$-\psi_1(\Delta\gamma)$	$-0,2 \Delta\gamma_1 - 0,6 \Delta\gamma_2 - 0,5 \Delta\gamma_3 - 0,6 \Delta\gamma_4 + 0,2 \Delta\gamma_5 - 1,5 \Delta\gamma_6 + 0,5 \Delta\gamma_7$	
$-\varphi_2^*(\Delta\beta)$	$+0,2 \Delta\beta_1 - 0,3 \Delta\beta_2 - 0,2 \Delta\beta_3 + 0,05 \Delta\beta_4 - 0,15 \Delta\beta_5 + 0,05 \Delta\beta_6 + 0,05 \Delta\beta_7 - 0,15 \Delta\beta_8$	$+0,2 \Delta\gamma_1 - 0,6 \Delta\gamma_2 - 0,5 \Delta\gamma_3 - 0,6 \Delta\gamma_4 + 0,2 \Delta\gamma_5 - 1,5 \Delta\gamma_6 + 0,5 \Delta\gamma_7$	$-\psi_2^*(\Delta\gamma)$	$+0,2 \Delta\gamma_1 - 0,6 \Delta\gamma_2 - 0,5 \Delta\gamma_3 - 0,6 \Delta\gamma_4 + 0,2 \Delta\gamma_5 - 1,5 \Delta\gamma_6 + 0,5 \Delta\gamma_7$	
$-\varphi_2(\Delta\beta)$	$+0,4 \Delta\beta_2 - 0,2 \Delta\beta_3 - 0,1 \Delta\beta_4 - 0,1 \Delta\beta_5 - 0,1 \Delta\beta_6 - 0,1 \Delta\beta_7 - 0,1 \Delta\beta_8$	$+0,4 \Delta\gamma_6 - 0,3 \Delta\gamma_7 - 0,3 \Delta\gamma_8 - 0,2 \Delta\gamma_9 - 0,2 \Delta\gamma_{10} - 0,5 \Delta\gamma_{11} - 0,5 \Delta\gamma_{12}$	$-\psi_2(\Delta\gamma)$	$+0,4 \Delta\gamma_6 - 0,3 \Delta\gamma_7 - 0,3 \Delta\gamma_8 - 0,2 \Delta\gamma_9 - 0,2 \Delta\gamma_{10} - 0,5 \Delta\gamma_{11} - 0,5 \Delta\gamma_{12}$	
$-\varphi_3(\Delta\beta)$	$+0,1 \Delta\beta_2 + 0,2 \Delta\beta_3 + 0,2 \Delta\beta_4 - 0,15 \Delta\beta_5 - 0,15 \Delta\beta_6 - 0,15 \Delta\beta_7 - 0,15 \Delta\beta_8$	$+0,065 \Delta\gamma_2 + 0,2 \Delta\gamma_3 + 0,2 \Delta\gamma_4 - 0,2 \Delta\gamma_5 - 0,2 \Delta\gamma_6 - 0,5 \Delta\gamma_7 - 0,5 \Delta\gamma_8$	$-\psi_3(\Delta\gamma)$	$+0,065 \Delta\gamma_2 + 0,2 \Delta\gamma_3 + 0,2 \Delta\gamma_4 - 0,2 \Delta\gamma_5 - 0,2 \Delta\gamma_6 - 0,5 \Delta\gamma_7 - 0,5 \Delta\gamma_8$	
$-\varphi_4(\Delta\beta)$	$-0,2 \Delta\beta_2 + 0,1 \Delta\beta_3 + 0,1 \Delta\beta_4 + 0,3 \Delta\beta_5 + 0,3 \Delta\beta_6 - 0,2 \Delta\beta_7 - 0,2 \Delta\beta_8$	$-0,1 \Delta\gamma_2 + 0,075 \Delta\gamma_3 + 0,075 \Delta\gamma_4 + 0,3 \Delta\gamma_5 + 0,3 \Delta\gamma_6 - 0,5 \Delta\gamma_7 - 0,5 \Delta\gamma_8$	$-\psi_4(\Delta\gamma)$	$-0,1 \Delta\gamma_2 + 0,075 \Delta\gamma_3 + 0,075 \Delta\gamma_4 + 0,3 \Delta\gamma_5 + 0,3 \Delta\gamma_6 - 0,5 \Delta\gamma_7 - 0,5 \Delta\gamma_8$	
Вид функции (ур. 80)	При заданном C_{1s}		При заданном $tg \delta_{1s}$		
$-\sigma_1(\Delta\beta)$	$+0,4 \Delta\beta_1 + 0,2 \Delta\beta_2 - 0,2 \Delta\beta_3 + 0,2 \Delta\beta_4 + 0,2 \Delta\beta_5 - 0,2 \Delta\beta_6 + 0,2 \Delta\beta_7 - 0,2 \Delta\beta_8$	$+0,4 \Delta\gamma_1 + 0,6 \Delta\gamma_2 - 0,6 \Delta\gamma_3 + 0,8 \Delta\gamma_4 + 0,8 \Delta\gamma_5 - 0,8 \Delta\gamma_6 + 2 \Delta\gamma_7 - 2 \Delta\gamma_8$	$-\tau_1(\Delta\gamma)$	$+0,4 \Delta\gamma_1 + 0,6 \Delta\gamma_2 - 0,6 \Delta\gamma_3 + 0,8 \Delta\gamma_4 + 0,8 \Delta\gamma_5 - 0,8 \Delta\gamma_6 + 2 \Delta\gamma_7 - 2 \Delta\gamma_8$	
$-\sigma_2(\Delta\beta)$	$+0,4 \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + 0,2 \Delta\beta_3 - 0,2 \Delta\beta_4 + 0,2 \Delta\beta_5 - 0,2 \Delta\beta_6 + 0,2 \Delta\beta_7 - 0,2 \Delta\beta_8$	$+0,2 \Delta\gamma_1 + \Delta\gamma_2 + 0,3 \Delta\gamma_3 - 0,3 \Delta\gamma_4 + 0,4 \Delta\gamma_5 - 0,4 \Delta\gamma_6 + \Delta\gamma_7 - \Delta\gamma_8$	$-\tau_2(\Delta\gamma)$	$+0,2 \Delta\gamma_1 + \Delta\gamma_2 + 0,3 \Delta\gamma_3 - 0,3 \Delta\gamma_4 + 0,4 \Delta\gamma_5 - 0,4 \Delta\gamma_6 + \Delta\gamma_7 - \Delta\gamma_8$	
$-\sigma_3(\Delta\beta)$	$+0,6 \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + 0,8 \Delta\beta_3 + 0,2 \Delta\beta_4 + 0,3 \Delta\beta_5 - 0,3 \Delta\beta_6 + 0,3 \Delta\beta_7 - 0,3 \Delta\beta_8$	$+0,2 \Delta\gamma_1 + 0,667 \Delta\gamma_2 + 0,8 \Delta\gamma_3 + 0,2 \Delta\gamma_4 + 0,2 \Delta\gamma_5 - 0,4 \Delta\gamma_6 + \Delta\gamma_7 - \Delta\gamma_8$	$-\tau_3(\Delta\gamma)$	$+0,2 \Delta\gamma_1 + 0,667 \Delta\gamma_2 + 0,8 \Delta\gamma_3 + 0,2 \Delta\gamma_4 + 0,2 \Delta\gamma_5 - 0,4 \Delta\gamma_6 + \Delta\gamma_7 - \Delta\gamma_8$	
$-\sigma_4(\Delta\beta)$	$+0,8 \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + 0,9 \Delta\beta_3 + 0,1 \Delta\beta_4 + 0,9 \Delta\beta_5 + 0,1 \Delta\beta_6 + 0,4 \Delta\beta_7 - 0,4 \Delta\beta_8$	$+0,2 \Delta\gamma_1 + 0,5 \Delta\gamma_2 + 0,675 \Delta\gamma_3 + 0,075 \Delta\gamma_4 + 0,075 \Delta\gamma_5 + 0,9 \Delta\gamma_6 + 0,9 \Delta\gamma_7 + 0,1 \Delta\gamma_8 - \Delta\gamma_9$	$-\tau_4(\Delta\gamma)$	$+0,2 \Delta\gamma_1 + 0,5 \Delta\gamma_2 + 0,675 \Delta\gamma_3 + 0,075 \Delta\gamma_4 + 0,075 \Delta\gamma_5 + 0,9 \Delta\gamma_6 + 0,9 \Delta\gamma_7 + 0,1 \Delta\gamma_8 - \Delta\gamma_9$	
$-\sigma_{10}(\Delta\beta)$	$+2 \Delta\beta_1 + 3 \Delta\beta_2 + 2 \Delta\beta_3 + 1,5 \Delta\beta_4 - 0,5 \Delta\beta_5 + 1,5 \Delta\beta_6 - 0,5 \Delta\beta_7 - 0,5 \Delta\beta_8$	$+0,2 \Delta\gamma_1 + 0,6 \Delta\gamma_2 + 0,6 \Delta\gamma_3 + 0,6 \Delta\gamma_4 + 0,6 \Delta\gamma_5 - 0,2 \Delta\gamma_6 + 1,5 \Delta\gamma_7 - 0,5 \Delta\gamma_8$	$-\tau_{10}(\Delta\gamma)$	$+0,2 \Delta\gamma_1 + 0,6 \Delta\gamma_2 + 0,6 \Delta\gamma_3 + 0,6 \Delta\gamma_4 + 0,6 \Delta\gamma_5 - 0,2 \Delta\gamma_6 + 1,5 \Delta\gamma_7 - 0,5 \Delta\gamma_8$	

Выводы

1. Предложенная нами методика сличения параметров конденсаторов, номинальные значения емкостей которых находятся в отношении целых чисел 1, 2, 3, 4, 10, применима для широкого диапазона частот и величин самих параметров.

В пределах каждой декады номинальных значений емкостей калибруемых конденсаторов выведены обобщенные расчетные соотношения (6а, 6б) и установлен определенный порядок сличения самих мер (табл. 4).

Расчетные соотношения и последовательность сличения мер сохраняются неизменными для всех номинальных значений емкостей калибруемых конденсаторов.

Как показал опыт работ во ВНИИМ им. Менделеева, обобщенная форма расчетных соотношений обеспечивает весьма существенную экономию во времени (порядка 5—10 раз), затрачиваемом на весь процесс калибровки конденсаторов (от 1 *пф* до 10 *мкф*).

2. Калибруя конденсаторы при различных частотах, нужно выбирать соответствующую исходную меру. В диапазоне низких частот, а также при частотах радиовещания для уменьшения погрешностей измерения рационально выбирать исходной мерой конденсатор K_1 . Для звуковых частот, наоборот, целесообразно принять известными параметры конденсатора K_{10} .

3. Погрешность воспроизведения отдельных значений параметров калибруемых конденсаторов определяется в общем виде по соотношениям (11а—12б). Она зависит от ряда факторов, в том числе от номинального значения емкости самих мер и от диапазона частот.

Как показал опыт, при частоте 1000 *гц* во всем диапазоне номинальных значений емкостей погрешности изменяются по емкости на $3 \div 15 \cdot 10^{-3}\%$, по углу потерь на $3 \div 5 \cdot 10^{-5}$ *рад*.

При изменении частоты от значения 1000 *гц* погрешности воспроизведения параметров калибруемых конденсаторов возрастают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кротков И. Н., Труды ВНИИМ, вып. 31 (91), 1958, стр. 36.
2. Benoit J. R., Travaux et Mémoires de Bureau International des Poids et Mesures, t. XIII, 1907, p. 31.
3. Кротков И. Н., «Электричество», № 10, 1952.
4. Gauss Ch. Fr., Méthode de moindres carrés, 1885.
5. Маликов М. Ф., Основы метрологии, М., 1949.

И. Н. КРОТКОВ, Т. М. ГУЩИНА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРОВ МЕТОДОМ ДЕКАДНЫХ СЛИЧЕНИЙ

В настоящей статье рассматриваются экспериментальные данные, полученные по методике декадных сличений при точных измерениях параметров конденсаторов, образующих набор рабочих эталонов емкости ВНИИМ. Кроме того, приводятся результаты обработки этих данных для конденсаторов с емкостью от 1 до 10^6 пф при различных дискретных частотах (60, 1000 и 10^6 гц), а также исследуются источники систематических погрешностей, ограничивающие частотные пределы, в которых возможно использование измерительной аппаратуры.

При передаче значения емкости (фарады) от первичного эталона рядным образцовым мерам используются рабочие эталоны различных (кратных 10) номинальных значений — от 1 до 10^6 пф. Требуется определить экспериментальным путем точные значения параметров каждого из рабочих эталонов. Во ВНИИМ им. Менделеева такого рода задача решается путем использования метода декадных сличений*.

На первом этапе передачи значений один из рабочих эталонов, емкостью в 10^5 пф, сравнивается при частоте 1000 гц с группой конденсаторов, воспроизводящих первичный эталон фарады. Полученные значения принимаются за исходные величины (C_0 , $\operatorname{tg} \delta_0$). Они используются при последующих сличениях конденсаторов, образующих набор рабочих эталонов емкости. Рабочие эталоны воспроизводятся конденсаторами, номинальные значения емкости которых различны и выражаются числами 10^n , где n — целые числа в пределах от 0 до 6.

Метод декадных сличений при соблюдении определенных условий может быть использован в широких пределах частот, обеспечивая метрологическую точность передачи значения единицы емкости.

Конденсаторы и измерительная установка

Объектом исследования являлись 26 конденсаторов различных типов и номинальных значений от 1 до 10^6 пф, которые по конструктивным признакам следует разделить на две группы: конденсаторы с воздушно-кварцевым диэлектриком и конденсаторы со слюдяным диэлектриком.

Конденсаторы с воздушно-кварцевым диэлектриком воспроизводят меры емкости малых и средних номинальных значений (от 1 до 10^4 пф).

* См. статью настоящего сборника, стр. 93.

С точки зрения электрической схемы они представляют собой трехполюсники. Два полюса являются выводами от пластин, а третий — электрическим экраном. Конденсаторы со слюдяным диэлектриком воспроизводят меры емкости средних и больших номинальных значений (от 10^4 до 10^6 пф). В электрическом отношении они являются двухполюсниками. В одном полюсе соединяются вывод от одной группы пластин и электрический экран, в другом — выводы от второй группы пластин конденсатора (рис. 1). Задача состоит в том, чтобы определить точные значения пара-

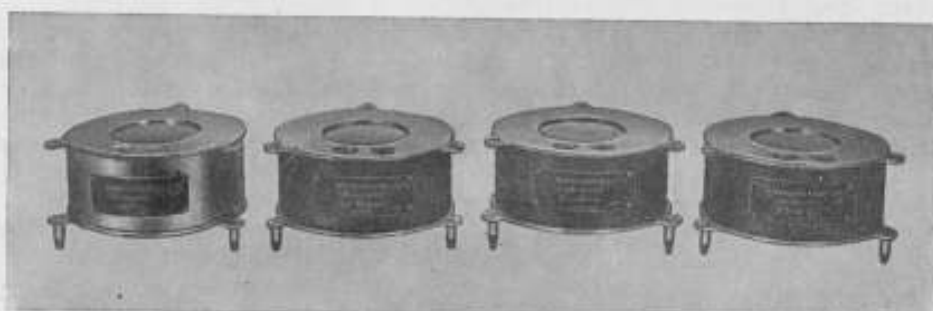


Рис. 1. Общий вид конденсаторов со слюдяным диэлектриком.

метров (емкость, угол потерь) всех перечисленных выше конденсаторов, имеющих различные номинальные значения емкости. Предварительно необходимо разделить объекты исследования на ряд наборов, образующих «декады». В табл. 1 приведено принятое нами разделение конденсаторов, соответствующее исходным положениям методики сличения*.

Таблица 1

Порядковый номер декады	Номинальные значения емкостей в пределах декады пф	Номинальные значения емкостей отдельных конденсаторов, входящих в декаду, пф
I	10^5-10^6	$\Sigma_1, 10^5, 2 \cdot 10^5, 3 \cdot 10^5, 4 \cdot 10^5, 10^6$
II	10^4-10^5	$\Sigma_2, 10^4, 2 \cdot 10^4, 3 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^4, 10^5$
III	10^3-10^4	$\Sigma_3, 10^3, 2 \cdot 10^3, 3 \cdot 10^3, 4 \cdot 10^3, 10^4$
IV	10^2-10^3	$\Sigma_4, 10^2, 2 \cdot 10^2, 3 \cdot 10^2, 4 \cdot 10^2, 10^3$
V	10^1-10	$\Sigma_5, 10, 20, 30, 40, 10^2$
VI	$10-1$	$1', 1, 2, 3, 4, 10$

Каждую декаду образуют конденсаторы: $K_1, K'_1, K_2, K_3, K_4, K_{10}$, номинальные значения емкостей которых находятся в отношении 1, 2, 3, 4, 10. Однако для сокращения количества мер, необходимых для осуществления методики измерения, емкости K'_1 во всех декадах, кроме последней (т. е. VI), образуются путем параллельного соединения мер последующей по порядку декады. Номинальные значения емкостей этих конденсаторов обозначены через $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \Sigma_4, \Sigma_5$; например, емкость Σ_1 образуется путем параллельного соединения конденсаторов с емкостями $(1 + 2 + 3 + 4) \cdot 10^4$ пф.

* См. статью настоящего сборника, стр. 94.

В пределах каждой декады сохраняется определенная и неизменная последовательность сравнения всех конденсаторов данного набора, указанная в табл. 2. Унифицированной является также система обработки результатов сравнения этих конденсаторов. При измерениях в диапазоне частот от единиц герц до мегагерц использовалась установка типа ME-9 (рис. 2), разработанная лабораторией при участии КБ ВНИИМ. Установка представляет собой мост вида $\left(\frac{C}{C}\right)_{R||C}$. Принципиальная схема этой установки изображена на рис. 3.

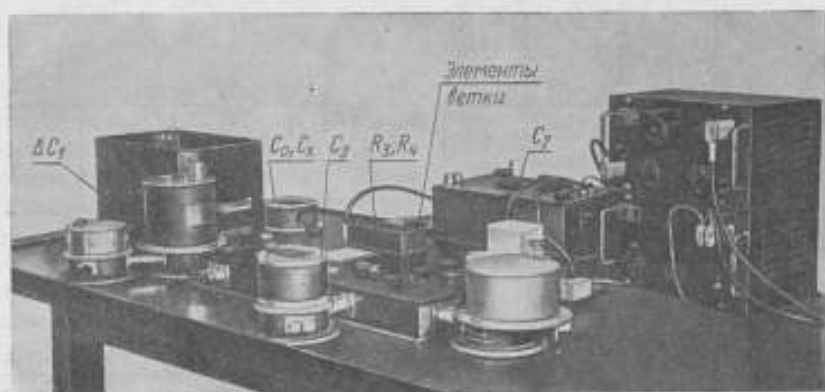


Рис. 2. Общий вид установки ME-9

При равновесии схемы моста, достигаемом путем изменения емкостей конденсаторов C_1 и C_3 , имеют место следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{R_{33}}{R_{43}} \frac{C_2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{43})}{[1 + \operatorname{tg} \varphi_{43} \operatorname{tg} \varphi_{33} - \operatorname{tg} \delta_2 (\operatorname{tg} \varphi_{33} - \operatorname{tg} \varphi_{43})]} \\ \operatorname{tg} \delta_1 &= \frac{\operatorname{tg} \delta_2 + \operatorname{tg} \varphi_{33} - \operatorname{tg} \varphi_{43} + \operatorname{tg} \delta_2 \operatorname{tg} \varphi_{43} \operatorname{tg} \varphi_{33}}{[1 + \operatorname{tg} \varphi_{43} \operatorname{tg} \varphi_{33} - \operatorname{tg} \delta_2 (\operatorname{tg} \varphi_{33} - \operatorname{tg} \varphi_{43})]} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R_{33} , R_{43} — эквивалентные сопротивления плеч моста, зависящие от «остаточных» параметров плеч;

φ_{33} , φ_{43} — эквивалентные фазовые сдвиги между токами и напряжениями в плечах моста;

δ_2 — эквивалентный угол потерь конденсатора C_2 .

Соотношения (1) ввиду их сложности не пригодны для точных расчетов параметров конденсатора, являющегося объектом измерения. По этой причине необходимо было видоизменить методику измерений и применить способ одновременного сравнения объектов.

Согласно этой методике в первое плечо моста (C_1 в схеме на рис. 3) поочередно включаются сравниваемые конденсаторы, называемые условно C_0 и C_x .

Решая совместно уравнения вида (1) и пренебрегая величинами второго порядка, можно получить следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} C_x - C_0 &= \pm \Delta C_1 \\ \operatorname{tg} \delta_x - \operatorname{tg} \delta_0 &= \pm \omega R_3 \Delta C_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

* Кротков И. Н., Классификация мостовых схем постоянного и переменного тока, «Электричество», № 10, 1952.

Таблица 2

№ установки	Сравниваемые конденсаторы		Отсчеты по конденсатору (С) № 1386				Отсчеты по конденсатору № 700, № 630				Примечание
	C_0	C_x	β_{10} дел.	β_{1x} дел.	$\Delta\beta_1$ дел.	$\Delta\beta_1$ мф	C_{30} дел.	C_{3x} дел.	ΔC_3 дел.	ΔC_3 мф	
1	K_1	K_1	70,0 69,9 70,0	59,7 59,9 59,7	+10,3 +10,4 +10,3	+5,18	48,0 48,2 48,0	27,4 27,7 28,6	-20,6 -20,5 -19,6	-2,04	-2,04
2	$K_1 \parallel K'_1$	K_2	55,8 55,7 55,8	36,2 36,2 36,1	+20,6 +20,5	+9,99	31,2 31,3 31,3	31,3 31,3 31,3	+0,1 0 0	0	0
3	$K_1 \parallel K_2$	K_2	91,7 91,7 91,6	87,9 87,9 87,7	+3,8 +3,8 +3,9	+5,92	97,6 97,6 97,6	96,1 96,1 96,0	-1,5 -1,5 -1,6	-0,75	-0,47
4	$K'_1 \parallel K_2$	K_3	88,1 88,1 88,1	87,8 87,7 87,8	+0,3 +0,4 +0,3	+0,51	95,4 95,3 95,3	96,1 96,1 96,0	+0,7 +0,8 +0,7	0,36	+0,02
5	$K_1 \parallel K_3$	K_4	91,7 91,6 91,6	87,5 87,4 87,4	+4,2 +4,2 +4,2	+6,46	93,7 93,7 93,8	92,9 92,9 93,0	-0,8 -0,8 -0,8	-0,39	-0,25
6	$K'_1 \parallel K_3$	K_4	87,8 87,8 87,8	87,2 87,2 87,2	+0,6 +0,6 +0,7	+0,97	92,1 92,0 92,0	92,9 92,9 92,8	+0,8 +0,9 +0,8	+0,41	+0,26
7	$K_1 \parallel K_2 \parallel K_3 \parallel K_4$	K_{10}	70,5 70,4 69,9	33,8 33,8 33,2	36,7 36,6 36,7	+18,92	39,8 39,8 38,9	36,7 36,2 38,4	-2,1 -2,6 -0,5	-0,14	-0,10
8	$K'_1 \parallel K_2 \parallel K_3 \parallel K_4$	K_{10}	61,9 61,9 61,7	33,9 33,8 33,8	28,0 28,1 27,9	+13,62	36,2 36,5 36,4	38,7 38,0 38,0	+2,5 +1,2 +1,6	0,21	+0,21

В табл. 2 приведены экспериментальные данные слезяной конденсаторов, образующих вторую декаду (конденсатори емкостью 10^6-10^8 пф).

Дата: 28/III 1958 г.
Наблюдатели: Кузнецова, Разумовский
Температура воздуха 22,1°С
Частота источника питания
 $f = 1000$ гц
Напряжение на мосте
 $U = 10$ в
Емкость тары: магазин емкостей
МЕ-4, № 21
Сопротивления плеч моста
 $R_3 = R_4 \cong 10^4$ ом

Эти соотношения более просты и могут быть использованы при определении значений емкостей и углов потерь конденсаторов набора по методу декадных сличений.

Сопоставляя соотношения (2) с уравнениями (3а) и (3б), приведенными в статье «Метод точного сличения конденсаторов имеющих различные номинальные значения емкостей»*, легко заметить их соответствие, если положить

$$\left. \begin{aligned} \Delta \beta_i &= \pm \Delta C_{1i} \\ \Delta \gamma_{1i} &= \pm \omega R_3 \Delta C_{2i} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Действительные значения параметров конденсаторов, полученные в результате вычислений по формулам (6а) и (6б)**, приведены в табл. 3.

Подобным образом во ВНИИМ в течение ряда лет производятся сличения конденсаторов и определение действительных значений параметров конденсаторов, представляющих собой рабочие эталоны емкости и образцовые меры емкости 1-го разряда.

В табл. 4 приведены данные о стабильности конденсаторов рабочего эталона емкости ВНИИМ.

Сличения конденсаторов, выполненные при частотах, отличных от 1000 гц, позволили получить частотные характеристики образцовых конденсаторов. Кривые зависимостей емкостей конденсаторов различных типов в широких пределах номинальных значений и частот приведены на рис. 4, 5, 6 и 7.

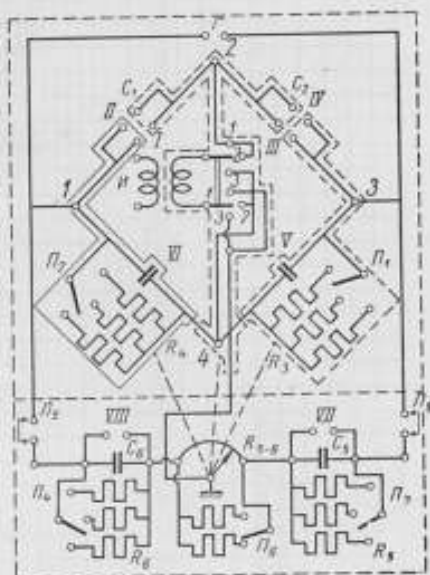


Рис. 3. Принципиальная схема емкостного

$$\text{моста вида } \left(\frac{C}{C} \right) \frac{R \parallel C^*}{R \parallel C}$$

Таблица 3

Обозначение конденсаторов	Номинальные значения емкостей, пф	Действительные значения параметров конденсаторов 2-й декады	
		C, пф	tg δ, рад
K ₁	10 000	9 997,7	1,9 · 10 ⁻⁴
K ₁ '	10 000	10 003,0	5 · 10 ⁻⁵
K ₂	20 000	20 010,7	0,8 · 10 ⁻⁴
K ₃	30 000	30 014,3	0,6 · 10 ⁻⁴
K ₄	40 000	40 018,4	0,7 · 10 ⁻⁴
K ₁₀	100 000	100 060	0,75 · 10 ⁻⁴
		задано	

* См. статью настоящего сборника, стр. 93.

** См. статью настоящего сборника, стр. 97.

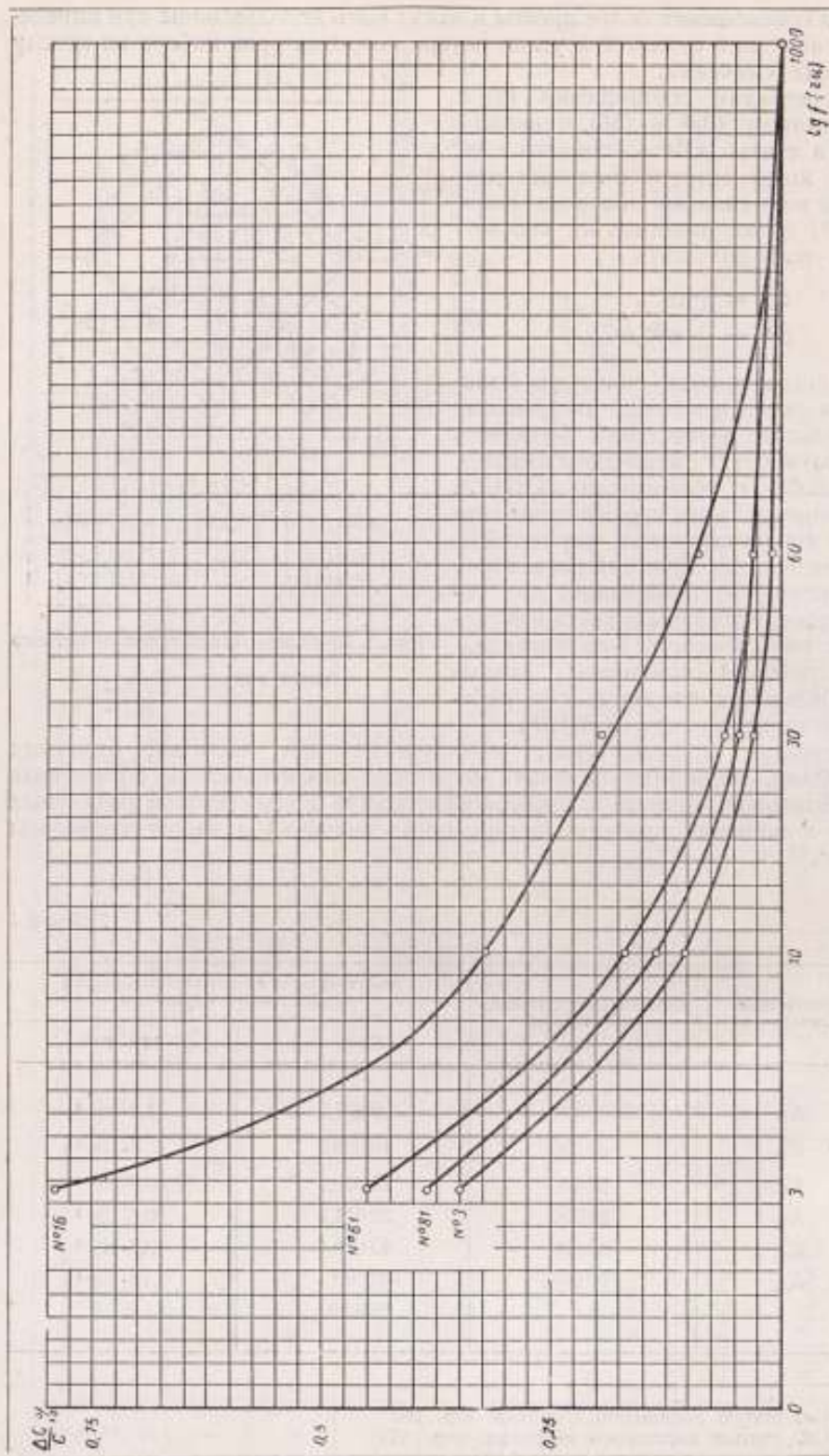


Рис. 4. Зависимость емкости конденсаторов от частоты. Конденсаторы со слюдяным диэлектриком. № 16 — [1000] пф; № 81 — [2000] пф; № 81 — [4000] пф; № 3 — [3000] пф.

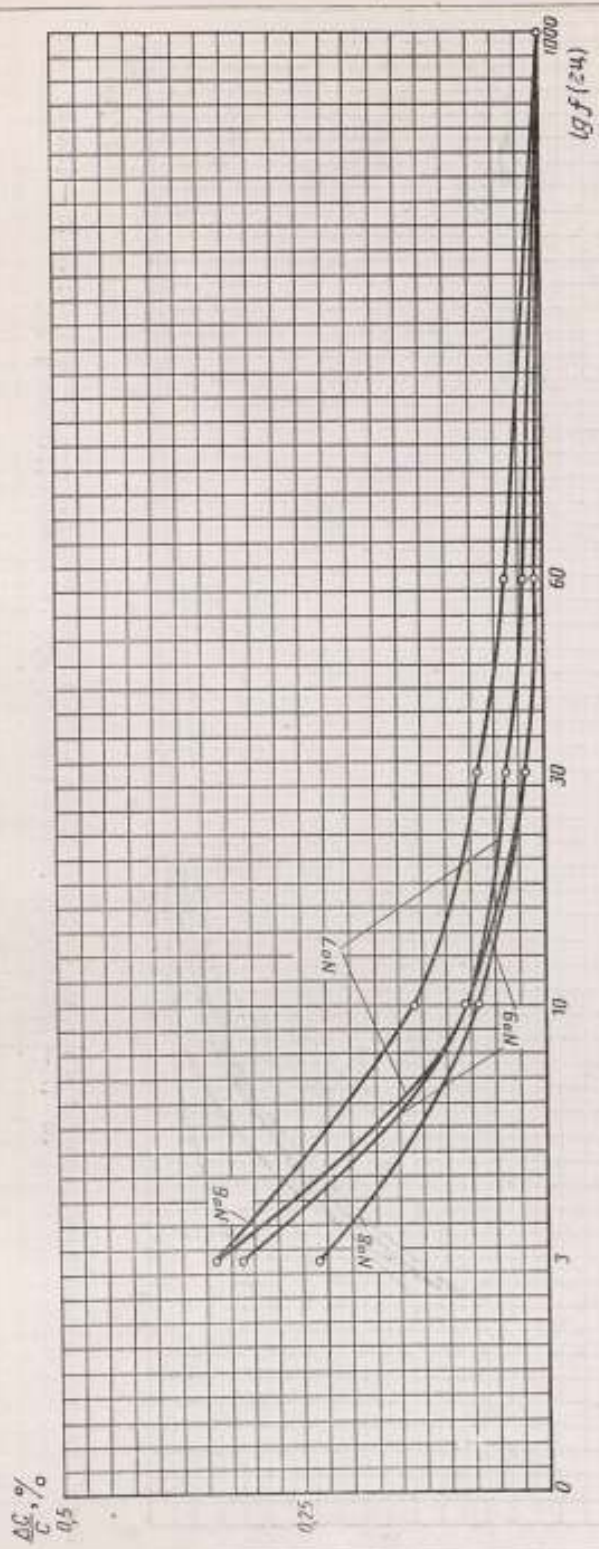


Рис. 5. Зависимость емкости конденсаторов от частоты. Конденсаторы со следующими диэлектриками: № 6 — [10 000] пф; № 7 — [20 000] пф; № 8 — [30 000] пф; № 9 — [40 000] пф.

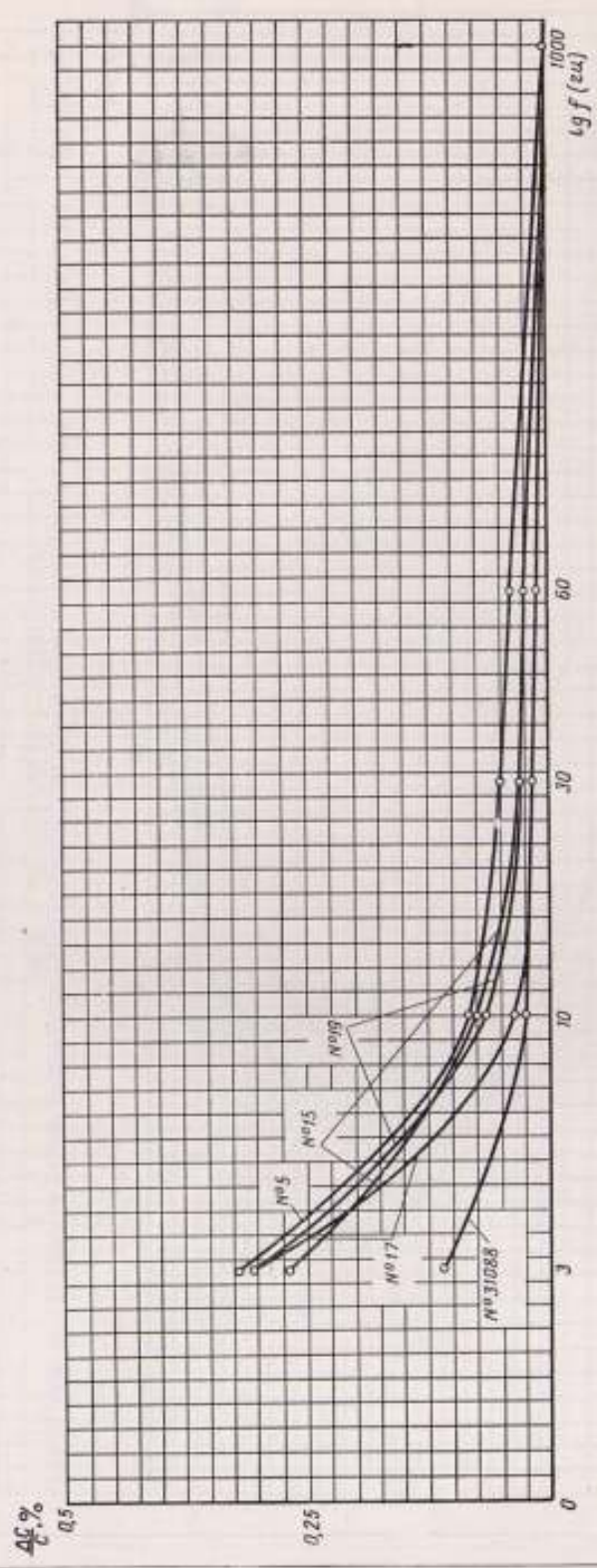


Рис. 6. Зависимость емкости конденсаторов от частоты. Конденсаторы со слюдяным диэлектриком: № 5 — [100 000] пф; № 15 — [200 000] пф; № 17 — [300 000] пф; № 19 — [400 000] пф; № 31088 — [1 000 000] пф.

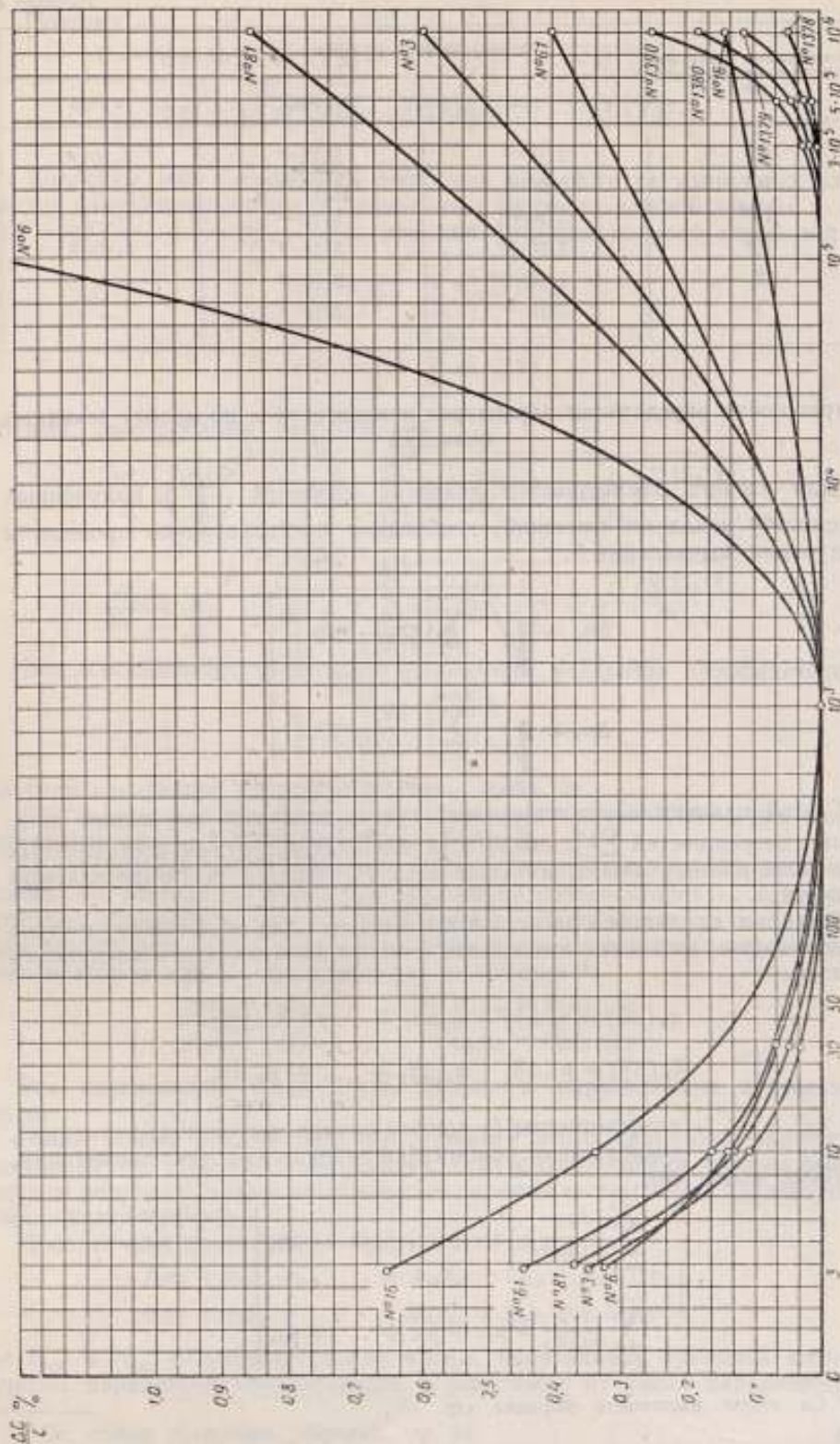


Рис. 7. Зависимость емкости слюдяных и воздушных конденсаторов от частоты. Конденсаторы со слюдяным диэлектриком: № 6 — [10 000] пф; № 81 — [4000] пф; № 3 — [3000] пф; № 61 — [2000] пф; № 16 — [1000] пф. Конденсаторы с воздушно-кварцевым диэлектриком: № 1390 — [4000] пф; № 1380 — [3000] пф; № 1379 — [2000] пф; № 1378 — [1000] пф.

Номинальное значение емкости конденсаторов, пф	Изменение емкости конденсаторов во времени, %		
	1 год	2 года	4 года
10^5	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
10^4	$1 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
10^3	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	—
10^2	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
10	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	—
1	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	—

Погрешности определения параметров конденсаторов по методу декадных сличений

Для расчета погрешностей значений емкостей $\left(\frac{\Delta C_i}{C_i}\right)$, полученных по способу декадных сличений, необходимо предварительно произвести следующие вычисления*:

$$\Delta \varphi_v = \sqrt{\sum_{i=1}^{l-n} \left[\frac{\partial \varphi_v}{\partial (\Delta \beta_i)} \nabla \beta_i \right]^2}$$

$$\Delta \sigma_v = \sqrt{\sum_{i=1}^{l-n} \left[\frac{\partial \sigma_v}{\partial (\Delta \beta_i)} \nabla \beta_i \right]^2}$$

С этой целью следует определить суммы квадратов случайных остаточных погрешностей $\sum V_{ix}^2$ каждого из условных уравнений, составленных на основе данных опыта, а также веса P_{x_v} каждой из определяемых емкостей.

Функции, входящие в расчетные соотношения для искомых параметров конденсаторов, являются линейными и могут быть записаны следующим образом:

$$\varphi_v(\Delta \beta) = x_1 \Delta \beta_1 + x_2 \Delta \beta_2 + \dots + x_n \Delta \beta_n;$$

$$\sigma_v(\Delta \beta) = \mu_1 \Delta \beta_1 + \mu_2 \Delta \beta_2 + \dots + \mu_n \Delta \beta_n,$$

где x_{iv} и μ_{iv} — коэффициенты (в данном случае постоянные величины), зависящие от комбинаций включения объектов сличения.

Тогда ясно, что:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{l-n} \frac{\partial \varphi_v}{\partial (\Delta \beta_i)} &= x_1 + x_2 + \dots + x_n, \\ \sum_{i=1}^{l-n} \frac{\partial \sigma_v}{\partial (\Delta \beta_i)} &= \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n. \end{aligned} \right\}$$

* См. статью настоящего сборника, стр. 100.

Поэтому

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varphi_v &= \sqrt{x_{1v}^2 \nabla \beta_1^2 + x_{2v}^2 \nabla \beta_2^2 + \dots + x_{8v}^2 \nabla \beta_8^2} \\ \Delta \sigma_v &= \sqrt{\mu_{1v}^2 \nabla \beta_1^2 + \mu_{2v}^2 \nabla \beta_2^2 + \dots + \mu_{8v}^2 \nabla \beta_8^2} \end{aligned} \right\}$$

Допустим, что погрешности отсчетных устройств регулируемых элементов измерительного моста одинаковы в пределах каждой декады, т. е. $\nabla \beta_1 = \nabla \beta_2 = \dots = \nabla \beta_8$. Тогда искомые функции получают такой вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varphi_v &= \sqrt{\sum_{l=1}^{l=8} x_{lv}^2 \nabla \beta_l^2} \\ \Delta \sigma_v &= \sqrt{\sum_{l=1}^{l=8} \mu_{lv}^2 \nabla \beta_l^2} \end{aligned} \right\}$$

Отсюда, для искоемых погрешностей

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta C_v}{C_v} &< \sqrt{\left(\frac{\Delta C_{10}}{C_{10}}\right)^2 + \sum_{l=1}^{l=2} x_{lv}^2 \left(\frac{\nabla \beta_l}{AC_{10}}\right)^2 + \frac{1}{3} \frac{1}{P_{x_v}} \left(\sum V_{lx}\right)^2} \\ \frac{\Delta C_v}{C_v} &< \sqrt{\left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + \sum_{l=1}^{l=8} \mu_{lv}^2 \left(\frac{\nabla \beta_l}{BC_1}\right)^2 + \frac{1}{3} \frac{1}{P_{x_v}} \left(\sum V_{lx}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Воспользовавшись численными значениями квадратов коэффициентов

$$\left. \begin{aligned} x_{1v}^2 \dots x_{8v}^2; \\ \mu_{1v}^2 \dots \mu_{8v}^2 \end{aligned} \right\}$$

получим следующие расчетные формулы (табл. 5).

Результаты расчетов по этим формулам при частоте 1000 гц для конденсаторов набора ВНИИМ сведены в табл. 6.

При теоретическом обосновании метода декадных сличений предполагалось, что результаты измерения параметров конденсаторов x_l , y_l искусственным образом освобождены от влияния систематических погрешностей. Для рассмотрения этого вопроса вернемся к закону сложения параметров конденсаторов при их параллельном включении*:

$$\left. \begin{aligned} p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_m x_m &= p_{(m+1)} x_{\Sigma} \\ q_1 y_1 + q_2 y_2 + \dots + q_m y_m &= q_{(m+1)} y_{\Sigma} \end{aligned} \right\}$$

Эти соотношения справедливы только в определенном диапазоне частот.

Наши опыты показывают, что границей этого диапазона является частота 10^6 гц. При более высоких частотах в соотношения должны быть внесены поправки, возникающие за счет влияния «остаточных» параметров самих конденсаторов.

Дополненные соотношения будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_m x_m + \xi_{mx} &= p_{(m+1)} x_{\Sigma} \\ q_1 y_1 + q_2 y_2 + \dots + q_m y_m + \xi_{my} &= q_{(m+1)} y_{\Sigma} \end{aligned} \right\}$$

где ξ_{mx} и ξ_{my} — дополнительные члены, являющиеся функцией «остаточных» параметров конденсаторов и зависящие от числа параллельно

* См. статью настоящего сборника, стр. 94.

Таблица 5

$\frac{\Delta C_v}{C_v}$	Вид формул для абсолютная погрешностей		$\frac{\Delta C_v}{C_v}$
	при заданном C_{10}	при заданном C_1	
$\frac{\Delta C_1}{C_1}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta C_{10}}{C_{10}}\right)^2 + 22\left(\frac{\nabla \beta}{C_{10}}\right)^2 + 7,4\left(\frac{\sum V_{ix}}{C_{10}}\right)^2}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + 0,4\left(\frac{\nabla \beta}{C_1}\right)^2 + 0,13\left(\frac{\sum V_{ix}}{C_1}\right)^2}$	$\frac{\Delta C_1}{C_1}$
$\frac{\Delta C_2}{C_2}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta C_{10}}{C_{10}}\right)^2 + 22\left(\frac{\nabla \beta}{C_{10}}\right)^2 + 7,4\left(\frac{\sum V_{ix}}{C_{10}}\right)^2}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + 0,35\left(\frac{\nabla \beta}{C_1}\right)^2 + 0,16\left(\frac{\sum V_{ix}}{C_1}\right)^2}$	$\frac{\Delta C_2}{C_2}$
$\frac{\Delta C_3}{C_3}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta C_{10}}{C_{10}}\right)^2 + 7\left(\frac{\nabla \beta}{C_{10}}\right)^2 + 2,3\left(\frac{\sum V_{ix}}{C_{10}}\right)^2}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + 0,27\left(\frac{\nabla \beta}{C_1}\right)^2 + 0,1\left(\frac{\sum V_{ix}}{C_1}\right)^2}$	$\frac{\Delta C_3}{C_3}$
$\frac{\Delta C_4}{C_4}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta C_{10}}{C_{10}}\right)^2 + 2\left(\frac{\nabla \beta}{C_{10}}\right)^2 + 0,7\left(\frac{\sum V_{ix}}{C_{10}}\right)^2}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + 0,23\left(\frac{\nabla \beta}{C_1}\right)^2 + 0,07\left(\frac{\sum V_{ix}}{C_1}\right)^2}$	$\frac{\Delta C_4}{C_4}$
$\frac{\Delta C_4}{C_4}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta C_{10}}{C_{10}}\right)^2 + 2\left(\frac{\nabla \beta}{C_{10}}\right)^2 + 0,7\left(\frac{\sum V_{ix}}{C_{10}}\right)^2}$	$\sqrt{\left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + 0,02\left(\frac{\nabla \beta}{C_1}\right)^2 + 0,007\left(\frac{\sum V_{ix}}{C_1}\right)^2}$	$\frac{\Delta C_{10}}{C_{10}}$

Таблица 6

C_v номинал, лф	$\Delta C_{10}, \Delta C_{100}$ лф	$\nabla \delta_{10}, \text{ лф}$	$\sum v_{ix}^2$	$\sum \mu_v^2 \cdot \sum x_v^2$	P_v	$\frac{\Delta C_v}{C_v}, \%$
10·10 ⁵ 4·10 ⁵ 3·10 ⁵ 2·10 ⁵ 1·10 ⁵	2	1	13,3	2,2 3,6 2,4 1,4 0,4	0,046 0,28 0,42 0,72 2,50	2,2·10 ⁻³ 2,3·10 ⁻³ 2,3·10 ⁻³ 2,5·10 ⁻³ 2,5·10 ⁻³
1·10 ⁴ 4·10 ⁴ 3·10 ⁴ 2·10 ⁴ 1·10 ⁴	2	0,5	0,025	— 3,13 0,18 0,28 0,22	— 3,13 5,60 3,57 4,54	2,0·10 ⁻³ 2,05·10 ⁻³ 2,05·10 ⁻³ 2,2·10 ⁻³ 2,5·10 ⁻³
1·10 ³ 4·10 ³ 3·10 ³ 2·10 ³ 1·10 ³	0,25	0,03	0,007	0,22 0,32 0,18 0,28 0,22	4,54 3,13 5,60 3,57 4,54	2,5·10 ⁻³ 2,6·10 ⁻³ 2,6·10 ⁻³ 2,8·10 ⁻³ 3,8·10 ⁻³
1·10 ² 4·10 ² 3·10 ² 2·10 ² 1·10 ²	0,039	0,005	0,0002	0,22 0,32 0,18 0,28 0,22	4,54 3,13 5,60 3,37 4,54	3,8·10 ⁻³ 3,9·10 ⁻³ 3,9·10 ⁻³ 4,0·10 ⁻³ 4,4·10 ⁻³
1·10 ² 40 30 20 10	0,0044	0,001	3·10 ⁻⁶	0,22 0,32 0,18 0,28 0,22	4,54 3,13 5,60 3,57 4,54	4,4·10 ⁻³ 4,6·10 ⁻³ 4,6·10 ⁻³ 5,1·10 ⁻³ 6,4·10 ⁻³
10 4 3 2 1	0,00064	0,0005	7·10 ⁻⁶	0,22 0,32 0,18 0,28 0,22	4,54 3,13 5,60 3,57 4,54	6,4·10 ⁻³ 0,9·10 ⁻² 0,95·10 ⁻² 1,2·10 ⁻² 2,4·10 ⁻²

Таблица 7

Порядковый номер урав- нений n	$\xi, \text{ лф}$	$\xi, \text{ рад}$
1	0	0
2	+1,45	0,16·10 ⁻⁴
3	+2,1	0,22·10 ⁻⁴
4	+3,3	0,22·10 ⁻⁴
5	+4,1	0,28·10 ⁻⁴
6	+4,5	0,28·10 ⁻⁴
7	~100	~6·10 ⁻⁴
8	~100	~6·10 ⁻⁴

подключаемых конденсаторов, а также от номинальных значений их емкостей.

В качестве примера в табл. 7 приведены значения поправочных членов $\xi_{мх}$, $\xi_{мy}$ при частоте 1 Мгц для конденсаторов со слюдяным диэлектриком, образующим третью декаду (т. е. от 10^4 до 10^9 пф).

Заключение

Метод декадных сличений применяется во ВНИИМ при измерении параметров конденсаторов в диапазоне частот от 3 гц до сотен килогерц.

Для практического осуществления методики измерения в какой-либо лаборатории не требуется изготовления специальной аппаратуры и достаточно ограничиться приборами и мерами, изготавливаемыми отечественной промышленностью.

А. Я. БЕЗИКОВИЧ, Д. И. ЗОРИН

МНОГОПРЕДЕЛЬНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

В течение ряда последних лет в лаборатории электрических измерений ВНИИМ разрабатывались методы и создавалась аппаратура для точного измерения тока, напряжения и мощности в звуковом диапазоне частот [1, 2, 3, 4, 5 и 6]. В основе разработанной аппаратуры лежит термоэлектрический метод компарирования, в котором измерение величин переменного тока сводится к измерению постоянного тока, эквивалентного ему по тепловому действию. Погрешность измерения величин переменного тока при этом не превосходит 0,1% в диапазоне частот $50 \div 1000$ гц и 0,2% в диапазоне частот $1000 \div 20\,000$ гц. Такая высокая точность измерения с помощью разработанной аппаратуры является безусловным достоинством, позволяющим применять аппаратуру для поверочных целей и лабораторных исследований. Необходимость иметь для каждого измеряемого значения переменного тока эквивалентное значение постоянного тока и производить при каждом измерении их сравнение делает этот метод громоздким и неприемлемым для рабочих условий. Для этой цели наиболее пригодными были бы приборы термоэлектрической системы непосредственной оценки. Однако в таких приборах известных конструкций имеются недостатки, которые не позволяют сделать их приборами с малыми погрешностями. К числу наиболее существенных недостатков этих приборов следует отнести резкую зависимость их показаний от внешней температуры, от непостоянства вольтамперных характеристик и невозможность смены термопреобразователей без нарушения градуировки прибора.

В настоящее время разработана группа приборов термоэлектрической системы: амперметров, вольтметров и ваттметров, в которых перечисленные погрешности и недостатки сводятся к пренебрежимому минимуму. Достигается это созданием схемы, позволяющей несложными операциями подготовить прибор к измерению таким образом, чтобы исключить перечисленные выше недостатки [7, 8, 9].

Контроль правильности показаний прибора

Какова бы ни была конкретная схема прибора, способ подготовки его к измерению остается неизменным и заключается в следующем.

Если по нагревателю термопреобразователя проходит ток I , то соответствующая этому току в нагревателе э. д. с. термопары e_0 вызовет ток

через прибор, включенный в ее цепь, а следовательно, и его отклонение, пропорциональное э. д. с. e_0 . Очевидно, что нарушению зависимости между током в нагревателе и э. д. с. термопары, вызванному любыми причинами, будет соответствовать изменение показания прибора, т. е. нарушение его градуировки. Для того, чтобы градуировка не нарушалась, нужно либо иметь такие термопреобразователи, характеристики которых очень стабильны, — этот случай не представляет интереса как нереальный при данном состоянии техники, либо применять искусственный прием, который позволит, несмотря на нестабильность самих вольт-амперных характеристик, получать неизменной градуировку прибора.

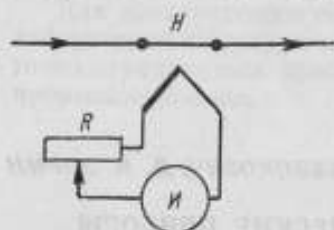


Рис. 1. Принципиальная схема термозлектрического миллиамперметра.

Схема термозлектрического миллиамперметра приведена на рис. 1. Очевидно, что при неизменном токе в нагревателе, но изменяющихся т. э. д. с., показание магнитозлектрического прибора можно сохранить неизменным, регулируя сопротивление цепи, на которую он замкнут. Изменяя это сопротивление до тех пор, пока заданному значению тока через нагреватель не будет соответствовать заданное показание прибора, восстанавливают как бы первоначальную градуировку или получают термозлектрический прибор, свободный от погрешности, вызванной неустойчивостью вольт-амперной характеристики и температурной погрешности.

В качестве контролируемого тока в нагревателе удобнее всего выбирать номинальный для него ток. Параметры схемы следует выбирать таким образом, чтобы этому току в нагревателе соответствовало максимальное показание измерительного прибора I_n . Установив, что заданному значению соответствует определенное показание прибора, необходимо быть уверенным, что и для всех меньших значений тока воспроизводится свое правильное показание прибора, т. е. что восстановленной в одной точке правильной градуировке прибора соответствует правильная градуировка и в остальных точках шкалы. Для того, чтобы облегчить задачу, можно пользоваться созданием пересчетной шкалы, которая может быть получена на следующем основании. Э. д. с. термопары e связана с током в нагревателе i_n определенной функциональной зависимостью

$$e = k i_n^\gamma,$$

где γ может принимать различные значения для одной и той же термопары в зависимости от условий эксплуатации. Зная зависимость между током и э. д. с., можно по величине номинального тока I_n рассчитать любые точки шкалы прибора. При дробных значениях γ такой расчет, однако, затруднителен. Если же $\gamma = 2$, что соответствует квадратичному участку вольт-амперной характеристики, то такой расчет не представляет труда, так как в этом случае любое значение шкалы прибора может быть получено из выражения

$$I = I_n \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_n}},$$

где I и I_n — соответственно искомый и номинальный токи;

α и α_n — соответствующие этим токам отклонения указателя прибора.

Можно показать, что при малых разностях температур между горячими и холодными концами термопары, когда пренебрежимо малы потери на лучеиспускание и изменение коэффициента теплопередачи от нагре-

вателя в воздух при нагревателе из материала с малым температурным коэффициентом сопротивления, вольт-амперные характеристики термопреобразователя очень близки к квадратичным. Однако получающаяся при этом э. д. с. единичной термопары очень мала, порядка десятых долей милливольт, что требует применения измерительного прибора высокой чувствительности. Требованию такой высокой чувствительности при малой погрешности могли удовлетворить фотокомпенсационные микровольтметры, но отсутствие их в серийном производстве заставило применить в разработанных приборах многоэлементные термопреобразователи специальной

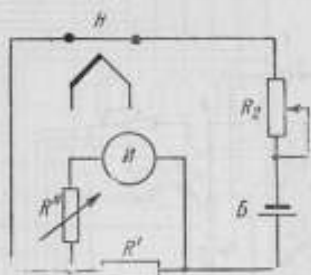


Рис. 2. Схема установки и контроля калибровочного тока.

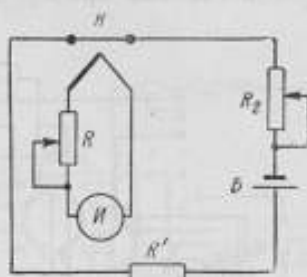


Рис. 3. Схема калибровки прибора.

конструкции [5], обеспечивающие квадратичность вольт-амперной характеристики.

Использование в схеме приборов термопреобразователей с квадратичными характеристиками имеет еще и то преимущество, что это допускает смену термопреобразователей без необходимости менять градуировку прибора, так как при квадратичных вольт-амперных характеристиках шкалы приборов с различными термопарами могут быть совмещены с помощью изменения уже рассмотренного регулируемого сопротивления, включаемого последовательно с измерителем.

Все необходимые операции по контролю неизменности показания термоэлектрического прибора, как видно из рассмотренного, сводятся к установлению определенного тока (калибровочного) через нагреватель и изменению показания прибора, включенного в цепь термопары, до заданного значения.

Для установки калибровочного тока в приборе используется тот же измеритель I (рис. 2). При этом измеритель с добавочным сопротивлением R'' включается параллельно шунту R' , соединенному последовательно с нагревателем, источником питания и регулируемым сопротивлением R_2 .

Предварительной подгонкой элементов схемы (R' и R'') при изготовлении прибора добиваются того, чтобы при номинальном токе i_n в нагревателе показание прибора соответствовало верхней точке шкалы прибора. Установив далее, уже в процессе работы, с помощью сопротивления R_2 это же верхнее показание прибора, тем самым устанавливают номинальный ток через нагреватель. В дальнейшем эта операция называется установкой калибровочного тока.

Далее, не нарушая последовательной схемы, но отключив прибор от шунта, включают его в цепь термопары по схеме рис. 3. Из этой схемы видно, что, несмотря на отключение прибора, ток через нагреватель, установленный предыдущей операцией, остается неизменным, так как сопро-

тивление прибора и добавочного сопротивления во много раз больше сопротивления шунта. Для получения заданного отклонения прибора изменяют сопротивление R . В дальнейшем эта операция называется калировкой прибора.

Термовольметр

Наиболее близким по режиму работы рассмотренного миллиамперметра является термовольметр (рис. 4), с которого и начнем знакомство с конкретными схемами приборов.

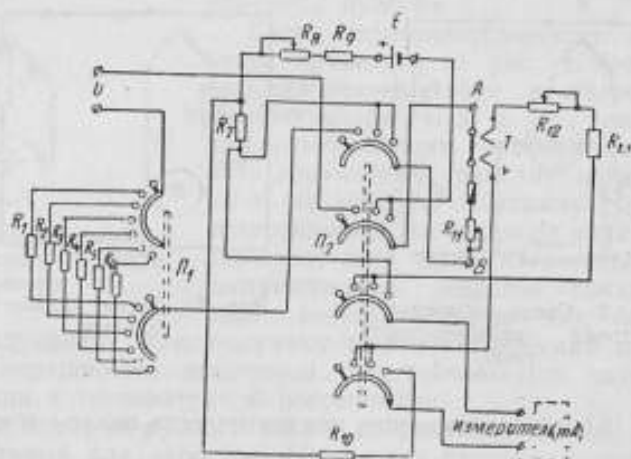


Рис. 4. Схема многопредельного термоэлектрического вольтметра типа ВТЭ-1.

В схеме вольтметра имеются два переключателя Π_1 и Π_2 , первый из которых служит для изменения величины добавочного сопротивления, включаемого последовательно с нагревателем термопреобразователя в зависимости от предела измерения вольтметра. Второй переключатель осуществляет включение элементов схемы непосредственно для измерения, когда переключатель находится в первом положении, и для контроля, когда переключатель Π_2 находится во втором и третьем положениях.

В вольтметре нет необходимости контролировать в процессе работы неизменность сопротивления нагревателя, включаемого последовательно с добавочным сопротивлением из материала с малым температурным коэффициентом, превосходящим по величине во много раз сопротивление нагревателя. Однако при сменах термопреобразователей или предохранителей сопротивление цепи AB может изменяться примерно на 1—1,2 ом, что вызовет соответствующее изменение сопротивления всей цепи вольтметра и несколько нарушит его градуировку. Для избежания этого предусмотрена возможность восстанавливать значение сопротивления цепи AB с помощью имеющегося в ней регулируемого сопротивления R . Для этой цели нет надобности производить вскрытие прибора, а достаточно только присоединить к выведенным в доступное место зажимам AB прибор для измерения сопротивления и, установив на нем расчетное значение сопротивления цепи AB , изменяя сопротивление R , получить нулевое отклонение указателя равновесия моста или компенсатора, что и будет свидетельствовать о равенстве сопротивления цепи AB расчетному значению.

Термоамперметр

В термоамперметре (рис. 5) переключатель Π_1 служит для изменения его пределов измерения, Π_2 — переключатель, осуществляющий включение элементов схемы для измерения [1] и для контроля [2, 3, 4].

Расширение пределов измерения достигнуто с помощью шунтов, включаемых параллельно нагревателю термопреобразователя, неизменность сопротивления последнего определяет точность измерения тока. В связи

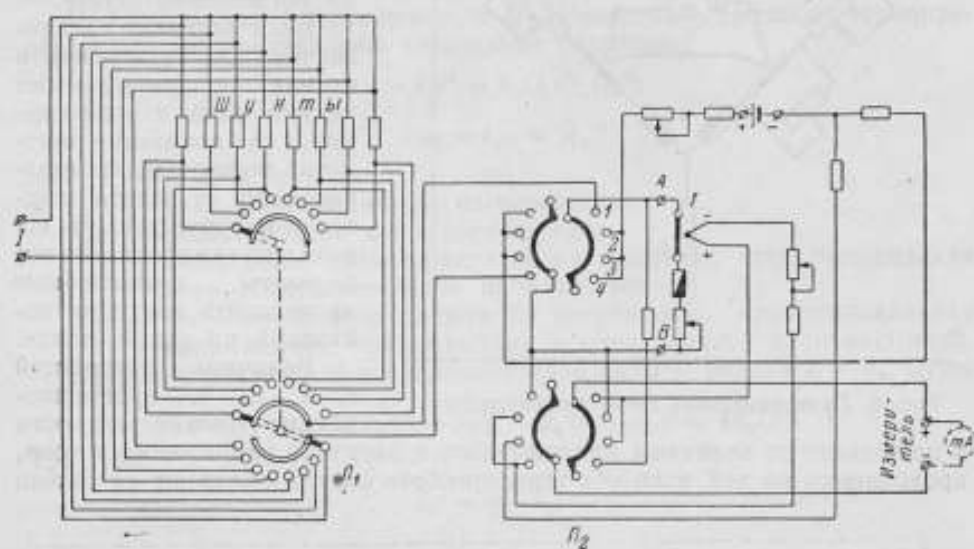


Рис. 5. Схема многопредельного термоэлектрического амперметра типа АТЭ-1.

с этим схема амперметра несколько более сложна, чем схема вольтметра, так как в ней предусмотрена возможность как контролировать в процессе работы сопротивление цепи нагревателя, так и восстанавливать его до требуемого расчетного значения. Из схемы видно, что в положении 4 переключателя Π_2 измерительный прибор, соединенный последовательно с большим добавочным сопротивлением, включается параллельно цепи нагревателя термопреобразователя. Параметры схемы рассчитаны и подогнаны при изготовлении прибора таким образом, чтобы при калибровочном токе и расчетном значении сопротивления цепи AB показание прибора, включенного таким образом, соответствовало максимальному отклонению. Нарушение сопротивления цепи AB , вызванное прохождением тока по нагревателю термопреобразователя, при неизменности калибровочного тока вызовет перераспределение токов в параллельных цепях и изменение показания прибора. Для восстановления расчетного значения сопротивления цепи AB предусмотрено переменное сопротивление R , включенное последовательно с нагревателем и предохранителем, изменяя которое восстанавливают максимальное показание прибора, что и свидетельствует о равенстве сопротивления цепи AB расчетному значению.

Термоваттметр

В термоваттметре необходимо иметь два термопреобразователя. Оба термопреобразователя (рис. 6) должны иметь здесь строго квадратичные и идентичные характеристики.

Можно показать, что разностная т. э. д. с. e_0 , равная

$$e_0 = \frac{kR_m}{(R_m + R_2)(2R + R_2)} \left(2UI + I^2 \frac{R_m R_2}{R_m + R_2} \right)$$

(где обозначения соответствуют принятым на чертеже), пропорциональна не только величине мощности, но содержит еще

член, учитывающий потери в шунте. Зная сопротивления R_m , R_2 и ток I , можно ввести поправку на потребление шунта.

Если ваттметр предназначен для измерения в схемах с отдельными цепями тока и напряжения, то показания ваттметра можно сделать независимыми от потерь мощности в шунте (рис. 7). На этом рисунке приведены все элементы, позволяющие производить контроль показаний по одной точке.

Величина разностной т. э. д. с. пропорциональна только мощности

и не зависит от величины приложенного к нагрузке напряжения и тока, проходящего по ней, если оба термопреобразователя обладают не только

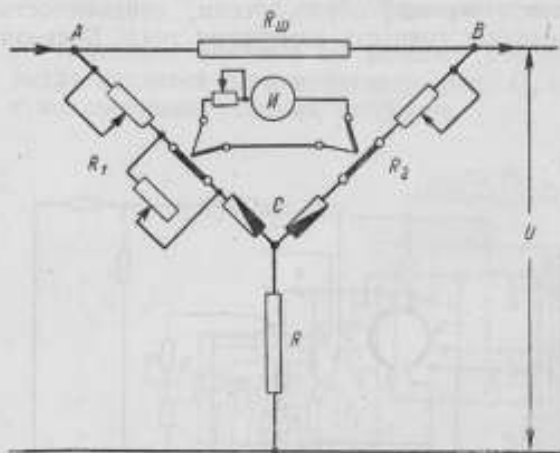


Рис. 6. Принципиальная схема термоваттметра.

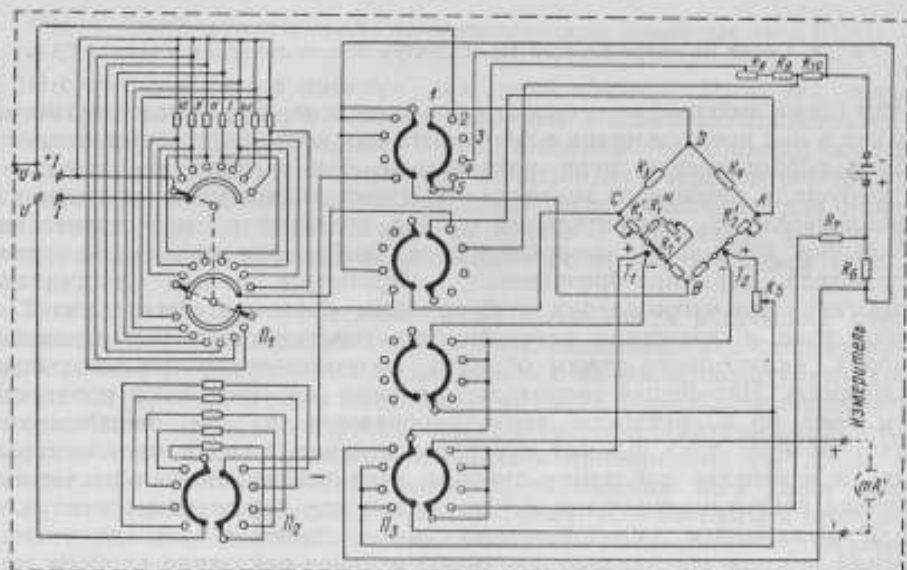


Рис. 7. Схема многопредельного термоваттметра типа ВТМ-2.

квадратичными, но и одинаковыми характеристиками. Если характеристики обоих термопреобразователей квадратичны, то они могут быть легко совмещены или схема может быть асимметрирована с помощью линейных регулируемых сопротивлений R'_1 и R'_2 [3, 5].

Ток, проходящий по нагревателям термопреобразователей при симметрировании, получают от встроенного внутрь прибора источника постоянного тока — сухой батареи, когда переключатель Π_1 находится соответственно во втором и третьем положениях.

Произведя симметрирование по току и напряжению, т. е. добившись одинаковости характеристик термопреобразователей, можно контролировать неизменность показаний термоваттметра способом, аналогичным указанному для амперметра и вольтметра.

Важной особенностью ваттметра является возможность его контроля не по величине мощности, а по величине тока или напряжения.

При положении I переключателя Π_2 «Измерение» для обоих термопреобразователей справедливы следующие равенства:

$$e = k_0 i^2 = k_0 (i_1 \pm i_U)^2;$$

$$r_{AB} = r_{BC} = R_n,$$

где e — т. э. д. с.;

i — ток, проходящий по нагревателям;

R_n — сопротивление цепи нагревателя;

i_1 — часть тока, проходящего по нагревателю, пропорциональная току последовательной цепи ваттметра;

i_U — часть тока, проходящего по нагревателю, пропорциональная напряжению, приложенному к параллельной цепи ваттметра.

Величина разностной электродвижущей силы e , равная $e_1 - e_2$, будет

$$e = e_1 - e_2 = k_0 (i_1 + i_U)^2 - k_0 (i_1 - i_U)^2 = 4k_0 i_1 i_U.$$

Так как

$$i_U = \frac{U_n}{R + R_n}$$

и

$$i_1 = I_n \frac{R}{R + R_n},$$

то

$$e = 4k_0 P_n \frac{R}{(R + R_n)^2}$$

Из приведенного выражения видно, что разностная т. э. д. с. пропорциональна величине номинальной мощности и постоянному коэффициенту, зависящему от параметров термопреобразователя и сопротивлений плеч моста.

Если терморезисторы переключать со встречного включения на согласное и при этом разомкнуть последовательную цепь, оставив включенным напряжение, то т. э. д. с. e' будет равна

$$e' = k_0 i_U^2 + k_0 i_U^2 = 2k_0 i_U^2 = 2k_0 \frac{U_k^2}{(R + R_n)^2}.$$

Значения т. э. д. с., полученные при встречном и согласном включении, должны быть одинаковыми. При этом

$$4k_0 P_n \frac{R}{(R + R_n)^2} = 2k_0 \frac{U_k^2}{(R + R_n)^2},$$

откуда

$$U_k = \sqrt{2P_n R}.$$

Последнее выражение показывает, что между напряжением, приложенным к параллельной цепи ваттметра, и номинальной мощностью существует определенная, довольно простая зависимость, которая дает возможность произвести калибровку прибора не по мощности, а по напряжению, величина которого вычисляется по параметрам прибора.

Можно производить калибровку также и током. В этом случае

$$e = 2k_0 I_k^2 = 4k_0 P_n \frac{R}{(R + R_n)^2},$$

откуда

$$I_k = \frac{1}{R + R_n} \sqrt{2P_n R}.$$

Так как удобнее измерять ток одновременно в обоих нагревателях, то

$$I_k = 2 \frac{\sqrt{2P_n R}}{R + R_n}.$$

В разработанном во ВНИИМ приборе в качестве калибровочной величины выбран ток I_k . Как видно из приведенной формулы, этот ток остается неизменным при заданных параметрах схемы.

Изменения пределов измерения термоваттметра по току и напряжению не могут вызвать изменения величины калибровочного тока I_k , так как величина номинальной мощности остается постоянной для любых заданных пределов измерения.

Конструктивное выполнение приборов

В соответствии с описанными схемами были изготовлены приборы, каждый из которых выполнен в виде двух самостоятельных блоков, так называемой термоприставки и измерительного прибора. В качестве последнего используется выпускаемый серийно прибор магнитоэлектрической системы типа М95 класса точности 1,0.

Термоэлектрическая приставка представляет собой конструктивное объединение всех элементов схем, за исключением измерителя.

Термовольтметр выполнен с 6 пределами измерения. Изменение последних достигается изменением встроенного внутрь прибора добавочного сопротивления.

Модификация термоамперметра (тип АТЭ-1) представляет собой многопределный прибор, пределы измерения которого изменяются с помощью переключения вмонтированных внутрь приставки шунтов. Вторая модификация прибора (тип АТЭ-2), предназначенного для специальной цели включения в комплектную установку для поверки амперметров с большими пределами измерения методом сличения, выполнена на один предел измерения 5 а. В этом приборе термоприставка и собственно измеритель конструктивно объединены в одном корпусе.

Пределы измерения ваттметра по току 0,1 ÷ 10 а, по напряжению — 5 ÷ 200 в. Ваттметр выполнен для номинального коэффициента мощности, равного 0,2, так как он предназначается для целей измерения потерь в стали. Прибор выполнен в связи с этим с разделенными цепями тока и напряжения и, следовательно, не требует введения поправок на потребление последовательной цепи.

В измерителях всех приборов сохраняется неизменной равномерная шкала. Так как в амперметрах и вольтметрах шкалы приборов имеют строго квадратичный характер, то для получения различных точек шкалы необходимо либо вычислять их по приведенной ранее формуле, либо иметь

линейку с двумя рядами делений, один из которых повторяет равномерные деления шкалы, а другой нанесен по строго квадратичному закону. Можно эту линейку снабдить движком, который облегчит получение требуемого отсчета.

В ваттметрах шкала прибора остается равномерной.

Результаты исследования

Для оценки точности, которую можно достичь с помощью разработанных приборов, последние были подвергнуты исследованию. Определение погрешности амперметров и вольтметров было произведено на упомянутой в начале статьи образцовой аппаратуре ВНИИМ, предназначенной для аттестации приборов в диапазоне частот $50 \div 20\,000$ гц.

В табл. 1 приведены данные частотных погрешностей трех амперметров одной модификации (тип АТЭ-1) и одного однопредельного амперметра второй модификации (типа АТЭ-2) для частоты $20\,000$ гц. Эта таблица показывает, что частотные погрешности амперметров в диапазоне частот $50 \div 20\,000$ гц отсутствуют, так как они ни для одного из приборов по всем пределам измерения не превосходят величины $\pm 0,1\%$ — величины, определяющей точность аттестации.

Таблица 1

Тип прибора	Пределы измерения, а	Показания прибора, дел.	Приведенная частотная погрешность, %			
			июнь 1958 г.		март 1959 г.	
			номера приборов			
			1	2	3	3
АТЭ-1	0,05	100	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
	0,1	100	$\pm 0,1$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
	0,25	100	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
	0,5	100	$\pm 0,1$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
	1,0	100	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
	2,5	100	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
	5,0	100	$\pm 0,1$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
	10,0	100	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
АТЭ-2	5		$\pm 0,0$		$\pm 0,1$	

В табл. 2 приведены данные частотной погрешности вольтметра типа ВТЭ-1 для частоты $20\,000$ гц. Для вольтметров погрешности также соизмеримы с точностью аттестации.

Таблица 2

Пределы измерения, а	Показания прибора, дел.	Приведенная частотная погрешность, %	
		март 1959 г.	июнь 1959 г.
5	100	+0,2	+0,1
10	100	+0,2	+0,1
20	100	+0,0	+0,1
50	100	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
100	100	$\pm 0,2$	+0,2
200	100	+0,1	+0,2

Принимая во внимание эти результаты, и при условии, что погрешность приборов разработанной конструкции, обусловленная нестабильностью вольт-амперных характеристик термопреобразователей и температурной погрешностью, устраняется предварительной подготовкой прибора к измерению, можно считать, что погрешность измерения с их помощью обуславливается погрешностью измерительного прибора постоянного тока. В связи с тем, что использованный нами прибор — микроамперметр типа М95 — имеет класс точности 1,0, суммарная погрешность не может быть менее 1% и, следовательно, приборы с измерителем типа М95 не могут быть более высокого класса точности, чем 1,0.

Использование измерителя более высокого класса точности позволит повысить и класс термоэлектрических приборов.



Рис. 8. Кривые приведенных погрешностей градуировки шкал термоэлектрических приборов.

Из-за особенности схемы образцовой установки, не предназначенной для аттестации ваттметров, имеющих общую точку между цепями тока и напряжения, комплектная аттестация разработанного термоваттметра не могла быть проведена на ней. Его погрешности устанавливались на основании раздельного определения их составляющих с последующим их суммированием. Составляющие этих погрешностей, обусловленные в основном остаточными реактивностями элементов схемы, приводящими к появлению угловой погрешности, не превосходят 0,1—0,2%. Аттестация термоваттметра, проведенная на постоянном токе, показала, что погрешности его меньше 1,0%, следовательно, на переменном токе во всем диапазоне частот до 20 000 кГц погрешности его не превосходят допустимых для приборов классов точности 1,5.

Для суждения о правильности последнего заключения показания термоэлектрического ваттметра были проконтролированы с помощью калориметрического метода. К сожалению, погрешность последнего составляет величину порядка 2%. Тем не менее совпадение результатов измерения мощности обоими методами лежит в пределах 1—2%, что служит подтверждением приписываемой термоваттметру точности, равной 1,5%.

Суждение о том, что в разработанных приборах класс точности амперметров и вольтметров определяется классом точности измерительного прибора, в равной мере относится и к ваттметрам. Если использовать в качестве измерителя вновь осваиваемый промышленностью микроамперметр кл. 0,5, то соответственно повысится и класс точности ваттметра до 1,0.

Насколько точно воспроизводится квадратичный закон изменения шкалы прибора, т. е. насколько закономерна рекомендация получения пересчетной шкалы, можно судить по данным кривых рис. 8, где кривая I относится к вольтметрам, а кривая II — к амперметрам. Из этих кривых

видно, что заметное отсутствие — порядка 0,1% — имеет место только для двух первых числовых отметок шкалы, что должно объясняться снижением чувствительности и недостаточной точностью установления действительных значений в этих точках.

В ваттметрах закон изменения шкалы — линейный, что подтверждается экспериментально. Данные этих исследований показывают целесообразность пользования расчетными значениями точек шкалы.

Заключение

Разработанные приборы обладают следующими положительными качествами:

а) показания их не зависят от устойчивости вольт-амперных характеристик термопреобразователей;

б) погрешность, обусловленная влиянием внешней температуры, имеющей специфическое значение в приборах термоэлектрической системы, снижена до величин, присущих приборам магнитоэлектрической системы;

в) отсутствует необходимость предварительной градуировки, а следовательно, и поверки как амперметра, вольтметра и ваттметра;

г) поверка приборов может быть заменена поверкой на постоянном токе самого измерителя и измерительных сопротивлений (шунтов и добавочных) термоприставки;

д) при отсутствии приборов более высоких классов разработанные приборы могут быть использованы в качестве образцовых при поверках на переменном токе в звуковом диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рождественская Т. Б., Методы и приборы для точных измерений на переменном токе повышенной частоты, Научно-технич. совещ. работ. промышл., деятелей науки и техники, вып. 87, 1951.
2. Каяндер М. С., «Вестник электропромышленности», № 1, 1952, стр. 10.
3. Безикович А. Я., Труды ВНИИМ, вып. 24 (84), 1954, стр. 57.
4. Широков К. П., там же, стр. 24.
5. Безикович А. Я. и Зорин Д. И., Труды ВНИИМ, № 28 (88), 1956, стр. 20.
6. Рождественская Т. Б., там же, стр. 62.
7. Nettash F. L. a. Williams E. S., Journal of Research of NBS, v. 52, № 5, 1954, p. 227—234.
8. Безикович А. Я., Зорин Д. И., Информационный листок ВНИИК, № 233, Э VI-45, М., 1957.
9. Безикович А. Я., Зорин Д. И., Информационный листок ВНИИК, № 360, Э VI-78, М., 1957.

А. Я. БЕЗИКОВИЧ, В. С. ПОПОВ

МЕТОД И АППАРАТУРА ДЛЯ ПОВЕРКИ ВАТТМЕТРОВ В ДИАПАЗОНЕ ЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ

В 1952—1956 гг. во ВНИИМ под руководством А. Я. Безикович и Д. И. Зорина была разработана установка для точного измерения мощности, тока и напряжения в широком диапазоне частот [1, 2]. Измерения на установке производят при помощи специального термоэлектрического компаратора методом разновременного сравнения. Благодаря этому на результат измерения не влияют погрешности от нестабильности элементов компаратора. Применением соответствующей регулировки устранены погрешности от неидентичности характеристик термопреобразователей [2].

Многоэлементные термопреобразователи, работающие в условиях сравнительно низких разностей температур между холодными и горячими концами термопар, обладают практически квадратичными вольт-амперными характеристиками, показатели степени которых отличаются от 2 менее чем на 0,1%. При этом погрешность компарирования мощности получается меньше 0,01% при $\cos \varphi = 1$, если напряжения в цепях постоянного и переменного токов стиличаются не более чем на $\pm 5\%$.

С уменьшением коэффициента мощности отступление вольт-амперных характеристик от квадратичных приводит к заметным погрешностям. Кроме того, с уменьшением коэффициента мощности падает чувствительность компаратора, повысить которую можно было бы, увеличив потребление последнего. Однако с увеличением подогревного тока зависимость между э. д. с. термопары и током в нагревателе отстает от квадратичной и, следовательно, возрастает погрешность компарирования.

Погрешность от неквадратичности характеристик термопреобразователей можно устранить при помощи нового способа измерения мощности* — способа равных температур [3].

Сущность этого способа состоит в следующем.

Как известно, количество тепла, выделенное в нагревателе термопреобразователя, прямо пропорционально квадрату тока, проходящего по нагревателю. В обычном термоэлектрическом ваттметре э. д. с. первого термопреобразователя равна:

$$E_1 = F(aP_1) = F \left[a \frac{p_1 i_1}{s_1 T} \int_0^T (i_U + i_I)^2 dt \right];$$

* См. авторское свидетельство В. С. Попова № 111359, 1957 г.

э. д. с. второго термопреобразователя составляет:

$$E_2 = F(bP_2) = F \left[b \frac{\rho_2 l_2}{s_2 T} \int_0^T (i_U - i_I)^2 dt \right],$$

где P_1 и P_2 — мощности, выделенные в нагревателях термопреобразователей;

aP_1 и bP_2 — мощности, выделенные в их рабочих частях;

ρ — удельное сопротивление материала нагревателя;

l — длина нагревателя;

s — сечение нагревателя;

i_U — слагающая тока, пропорциональная измеряемому напряжению;

i_I — слагающая тока, пропорциональная измеряемому току.

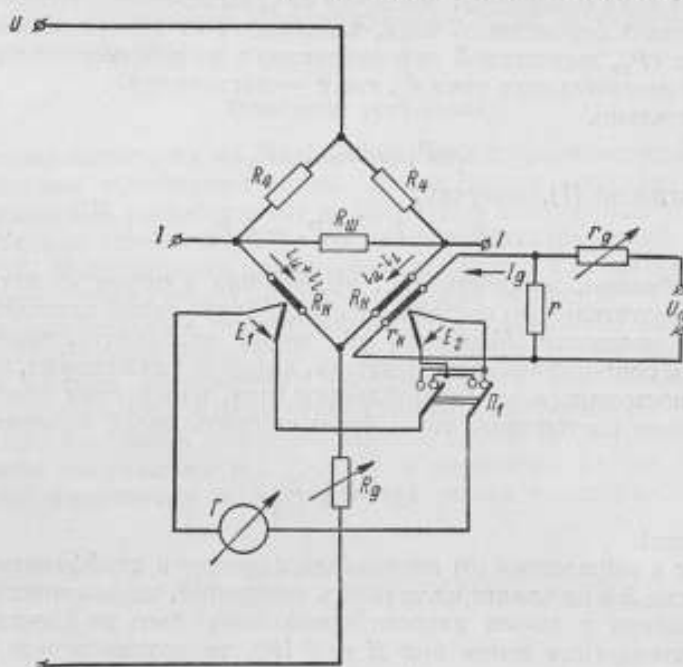


Рис. 1.

Шунтируя один из нагревателей, уменьшают подогревный ток в k раз, чтобы обеспечить условие:

$$a \frac{\rho_1 l_1}{s_1} k^2 = b \frac{\rho_2 l_2}{s_2}.$$

В этом случае имеем

$$aP_1 - bP_2 = b \frac{\rho_2 l_2}{s_2 T} \int_0^T i_U i_I dt = k_i P_x, \quad (1)$$

где $k_i = \text{const}$.

Полученное выражение не зависит от вида характеристик термопреобразователей, а следовательно, от их конструкции, свойств, состава окружающей среды и т. д.

Разность мощностей $aP_1 - bP_2$ может быть сведена к нулю. Для этого у термопреобразователя, нагреватель которого в процессе измерения имеет меньшую температуру, должен быть предусмотрен второй нагреватель, расположенный рядом. Оба нагревателя не должны иметь электрического контакта. Через этот дополнительный нагреватель термопреобразователя надо пропускать вспомогательный постоянный ток I_d до тех пор, пока э. д. с. на выходе обоих термопреобразователей не станут равными ($E_1 = E_2$). Схема включения термопреобразователей при измерении мощности представлена на рис. 1. При равенстве э. д. с. обоих термопреобразователей должны быть равны и температуры их нагревателей, т. е. мощность, выделенная в нагревателе одного термопреобразователя, должна быть равна суммарной мощности, выделенной в обоих нагревателях другого.

Мощность, выделенная в нагревателях второго термопреобразователя, равна сумме двух мощностей: мощности bP_2 , выделенной при прохождении по нагревателю переменного тока, зависящего от измеряемой величины, и мощности cP_d , выделенной при протекании по дополнительному нагревателю вспомогательного тока I_d , где c — постоянная.

Следовательно,

$$aP_1 = bP_2 + cP_d.$$

Отсюда, согласно (1), получим:

$$cP_d = aP_1 - bP_2 = k_1 P_x. \quad (2)$$

Таким образом, мощность cP_d , выделенная в одном из нагревателей за счет вспомогательного постоянного тока, будет прямо пропорциональна измеряемой мощности. Мощность cP_d можно определить, зная постоянный ток I_d и сопротивление нагревателя, которое, как правило, неизменно. Величина постоянного вспомогательного тока, измеренная прибором или компенсатором постоянного тока, будет служить мерой измеряемой мощности:

$$I_d = k \sqrt{P_x}, \quad (3)$$

где $k = \text{const}$.

Так как в выражении (3) постоянная c входит в коэффициент пропорциональности k и не влияет на точность измерения, характеристики термопреобразователя с двумя нагревателями могут быть не идентичны: если одна характеристика имеет вид $E = F(P)$, то другая может иметь вид $E = F(cP)$. По этой причине шунт и добавочное сопротивление к дополнительному нагревателю не требуются.

Основное преимущество предлагаемого метода измерения мощности заключается в независимости показаний ваттметра от вида характеристик термопреобразователей. Это позволяет использовать широкий неквадратичный участок характеристики термопреобразователя, т. е. увеличить его рабочую температуру и повысить выходную мощность. При этом возрастает точность измерений. Применение простого, но чувствительного индикатора, в сочетании с более высокой мощностью на выходе термопреобразователей, позволяет значительно упростить конструкцию последних и уменьшить число термовар в термобатарее.

Колебания температуры окружающей среды не влияют на результат измерения. Действительно, мощность, выделенная в нагревателях термопреобразователей, не зависит от температуры окружающей среды, а сами термовары в момент измерения уравновешены, поэтому некоторое изменение их температуры не нарушает равновесия нуль-индикатора и не изменяет результата измерения.

На основе способа равных температур был разработан компаратор для точного измерения мощности в широком диапазоне частот. В нем сохранены все достоинства компаратора ВНИИМ — преимущества метода одновременного сравнения — и одновременно повышена чувствительность и точность измерения при низком коэффициенте мощности.

Методика измерений на компараторе, который работает на принципе равных температур, заключается в следующем.

На компараторе уравнивают (измеряют) искомую мощность переменного тока; затем, не меняя ток во вспомогательном нагревателе, вместо измеряемой мощности на установку подают постоянное напряжение и ток и регулируют их величины до тех пор, пока мощность постоянного тока не будет уравновешена за счет мощности, выделенной во вспомогательном нагревателе (рис. 1). Поскольку мощность переменного тока и мощность постоянного тока порознь уравновешены при помощи одного и того же тока во вспомогательном нагревателе, то они равны между собой. Величина мощности постоянного тока может быть точно определена компенсатором постоянного тока.

Описание установки

Установка выполнена на базе компаратора с уравновешенными термоэлектрическими преобразователями. За ее основу принята универсальная установка УВ, разработанная во ВНИИМ, в которой подвергнут модернизации только центральный ее узел — термоэлектрический компаратор типа ТЭКМ. Модернизация компаратора коснулась в основном его схемы.

Видоизмененная схема ТЭКМ представлена на рис. 2.

Двухнагревательный термопреобразователь выполнен на базе многоэлементного термопреобразователя и отличается от последнего только наличием второго нагревателя, расположенного под спаями термопар и жестко скрепленного с ними через слюдяную прокладку.

Если при измерении мощности выразить токи i_U и i_I через значения измеряемого напряжения u_x , тока i_x и параметры схемы, то разность мощностей, выделенных в нагревателях обоих термопреобразователей, составит:

$$P_1 - P_2 = \frac{4R_n}{T} \int_0^T i_U i_I dt = \frac{4R_n}{T} \int_0^T \frac{R_4 R_m u_x i_x dt}{[R_m R_4 + R_n (R_m + 2R_4)] (2R_d + R_4 + R_n)}$$

Из-за тепловой инерции сопротивление нагревателя определяется действующим, а не мгновенным значением тока и для установившегося режима является величиной постоянной.

Следовательно:

$$P_1 - P_2 = \frac{4R_n R_4 R_m P_x}{[R_m R_4 + R_n (R_m + 2R_4)] (2R_d + R_4 + R_n)}, \quad (4)$$

где P_x — среднее значение измеряемой мощности.

Мощность P_d , выделенная в дополнительном нагревателе второго термопреобразователя, равна:

$$P_d = I_d^2 r_n = \left[\frac{r}{r_n (r_d + r) + r_n r} \right]^2 r_n U_d^2, \quad (5)$$

где I_d — постоянный ток, протекающий по дополнительному нагревателю;

r_n — сопротивление дополнительного нагревателя.

Обозначим:

$$\frac{(2R_d + R_4 + R_u) [R_m R_4 + R_u (R_m + 2R_4)]}{4R_u R_m R_4} = A, \quad (6)$$

$$r_u \left(\frac{r}{r_u r_d + r r_d + r_u r} \right)^2 = B. \quad (7)$$

Из уравнений (4), (5), (6) и (7) следует, что

$$P_x = A (P_1 - P_2) = A I_A^2 r_u = A B U_A^2. \quad (8)$$

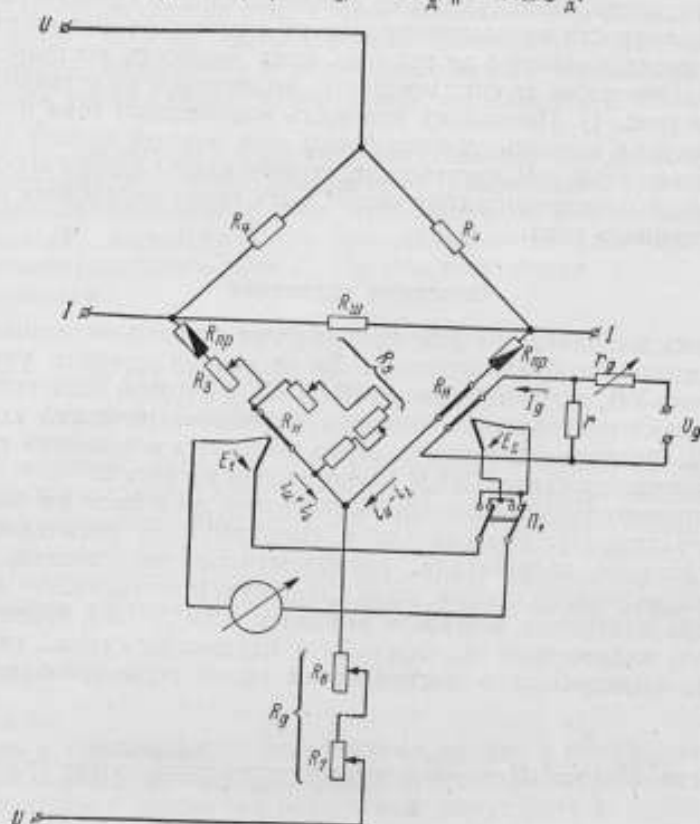


Рис. 2.

Следовательно, ток, протекающий по дополнительному нагревателю в момент равновесия схемы, будет функцией измеряемой мощности и функцией сопротивлений компаратора.

Анализ чувствительности компаратора

При проектировании установки были заданы следующие технические условия:

1. При номинальной мощности слагающая тока, пропорциональная напряжению, $I_U = 10 \text{ ма}$.
2. Шунты рассчитаны на номинальное напряжение $0,5 \text{ в}$ ($U_i = 0,5 \text{ в}$). Очевидно, что слагающая тока I_U , протекающего по нагревателям, и напряжение U_i , приложенное к нагревателям, практически не зависит от сопротивлений нагревателей:

$$U_i = \text{const}, \quad I_U = \text{const}.$$

Отсюда количество тепла, выделенное в основных нагревателях и предохранителях, составит:

$$q_1 = c \left(\frac{U_i}{R_n} + i_U \right)^2 R_n;$$

$$q_2 = c \left(\frac{U_i}{R_n} - i_U \right)^2 R_n,$$

где c — постоянная, R_n — сопротивление нагревателя.

Добавочное сопротивление R_3 и шунт R_5 предназначены для регулировки характеристик термопреобразователей (рис. 2). Обычно $R_n \gg R_3$, а $R_5 \gg R_n$, поэтому сопротивления R_3 и R_5 не влияют на чувствительность измерения и при расчете их можно не учитывать.

Количество тепла q' , выделенного в рабочей части основного нагревателя l' , т. е. в той части нагревателя, которая непосредственно нагревает термобатарейку, составляет:

для первого термопреобразователя

$$q'_1 = q_1 \frac{R'_n}{R_n + R'_n};$$

для второго термопреобразователя

$$q'_2 = q_2 \frac{R'_n}{R_n + R'_n},$$

где R'_n — сопротивление рабочей части нагревателя;

R_n — сопротивление предохранителя.

Температура рабочей части нагревателей прямо пропорциональна количеству выделенного тепла Q' и обратно пропорциональна теплоотдаче нагревателей; последняя пропорциональна длине рабочей части нагревателей l' . При установившемся режиме благодаря мощности, выделенной в дополнительном нагревателе, разность температур подогревных сопротивлений равна нулю. Следовательно:

$$t_1 - t_2 = k_1 \frac{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} q'_1 d\tau - \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} q'_2 d\tau}{l'} - \theta = \frac{k_2 P}{l'} \frac{R'_n}{R_n + R'_n} - \theta = 0, \quad (9)$$

где t_1 и t_2 — температуры горячих спаев термопреобразователей;

k_1 и k_2 — постоянные;

P — измеряемая мощность;

θ — прирост температуры второго подогревного сопротивления за счет мощности, выделенной в дополнительном нагревателе.

Мощность, выделенная в гальванометре, равна:

$$P_r = \frac{(E_1 - E_2)^2 R_r}{(2nl'R_r + R_r)^2},$$

где R_r — сопротивление гальванометра;

R_r — сопротивление одной термодпары;

n — число термодпар, приходящееся на единицу длины нагревателя.

Учитывая, что

$$E_1 - E_2 = (t_1 - t_2) l' n,$$

имеем:

$$P_r = \frac{n^2 (t_1 - t_2)^2 l'^2 R_r}{(2nl'R_r + R_r)^2}.$$

Подставляя в полученное выражение значение $t_1 - t_2$ из уравнения (9), найдем чувствительность измерения по мощности при условии, что ток в дополнительном нагревателе постоянен, т. е. $\theta = \text{const}$:

$$S_P = \frac{P_T}{\Delta P} = \frac{cn^2 \Delta P R_T}{(2nl'R_T + R_T)^2} \left(\frac{R'_n}{R_n + R_n} \right)^2,$$

где ΔP — приращение измеряемой величины;
 $c = k_2^2 k_3^2 = \text{const}$.

Допустим, что внешнее критическое сопротивление гальванометра $R_{кр}$ в m раз превосходит его внутреннее сопротивление. Полагая, что

$$2nl'R_T = R_{кр} = mR_T, \quad (10)$$

имеем

$$S = \frac{2cn^2 \Delta P}{R_T (1+m)^2} \left(\frac{R'_n}{R_n + R_n} \right)^2.$$

Подставляя в полученное выражение значение R_T из выражения (10), после преобразований получим:

$$S_P = \frac{2cn^2 \Delta P l'}{2R_T l'^2 \left(1 + \frac{1}{m}\right)^2 \left(1 + \frac{R_n}{R_n}\right)^2}.$$

Условие (10) можно удовлетворить в первом приближении выбором гальванометра с соответствующим критическим сопротивлением и более точно за счет изменения числа термопар на единицу длины, что обычно сопровождается изменением диаметра термопар. В результате, при увеличении n одновременно возрастет R_T , и наоборот.

Если учесть, что $l - l' = \text{const}$, то очевидно, что для получения максимальной чувствительности необходимо, чтобы сопротивление рабочей части нагревателя было вдвое меньше суммы сопротивлений нагревателя и предохранителя, причем отношение сопротивления предохранителя к сопротивлению нагревателя должно быть минимальным.

Чувствительность по мощности в первом приближении не зависит от диаметра нагревателя и его удельного сопротивления. Ее величина обратно пропорциональна сопротивлению термопар и прямо пропорциональна числу термопар на единицу длины.

Нагреватели подогревных сопротивлений можно изготавливать из нихрома или константана. Из соображений механической прочности диаметр нагревателя должен быть не менее 10 мк; из соображений инерционности — не более 40 мк.

Анализ погрешностей компаратора

Для суждения о причинах появления погрешностей компаратора обратимся к формуле (8), логарифмируя и дифференцируя которую, получим:

$$\frac{dP_x}{P_x} = \frac{dA}{A} + \frac{dB}{B} + 2 \frac{dU_A}{U_A}.$$

Переходя от бесконечно малых величин к конечным приращениям, найдем:

$$\gamma = \frac{\delta P_x}{P_x} = \frac{\delta A}{A} + \frac{\delta B}{B} + 2 \frac{\delta U_A}{U_A},$$

где γ — относительная погрешность измерения.

Из полученного выражения следует, что погрешность измерения зависит от двух причин: 1) стабильности источника вспомогательного напря-

жения; 2) стабильности сопротивлений установки и сопротивлений нагревателей термопреобразователей, под которой также понимается неизменность сопротивления с изменением частоты.

Стабильность вспомогательного источника питания может быть сделана достаточно высокой, если в качестве источника использовать обычную аккумуляторную батарею.

Допустимую погрешность γ_p примем равной 0,05%. Стабильность источника питания в процессе измерения, т. е. в течение 1—2 мин, можно считать равной 0,001%; таким образом, погрешностью от изменения напряжения можно пренебречь.

Стабильность сопротивлений установки в процессе измерения при соответствующем их выполнении будет весьма высокой, во всяком случае во много десятков раз выше стабильности сопротивления нагревателей. Это объясняется тем, что температура нагревателей заметно изменяется в процессе работы, а температурный коэффициент нихрома или константана, из которого обычно изготавливают нагреватели, составляет для нихрома $\alpha = 0,015\%/град$ и для константана $\alpha_1 = 0,004\%/град$.

Рассмотрим погрешность от изменения сопротивлений нагревателей.

Сопротивление нагревателей в течение промежутка времени между двумя измерениями, т. е. в течение 1—2 мин, может практически измениться только за счет изменения их температуры.

Температурная погрешность обусловлена двумя причинами:

1) изменением общего тока, протекающего по нагревателям $I_U + I_s$, при включении компаратора в цепь постоянного и переменного токов; эта температурная погрешность по-разному сказывается для случая неравенства напряжений постоянного и переменного токов и для случая коэффициента мощности, не равного единице;

2) изменением температуры окружающей среды.

Определим соотношение между погрешностью измерений и изменением температуры нагревателей. Рассмотрим, как изменяются сомножители A и B при изменении сопротивлений нагревателей (R_n и r_n). Допустим, что температура всех нагревателей изменилась на одну и ту же величину, т. е.

$$\frac{\delta R_n}{R_n} = \frac{\delta r_n}{r_n}.$$

(В момент измерения температура всех нагревателей будет одинакова и будет равна температуре нагревателя первого термопреобразователя, что следует из самого метода измерения.)

Логарифмируя и дифференцируя (6) по R_n , получим:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dR_n}{2R_x + R_4 + R_n} + \frac{(R_m + 2R_4) dR_n}{R_m R_4 + R_n (R_m + 2R_4)} - \frac{dR_n}{R_n}.$$

Учитывая, что $R_x \gg R_n$; $2R_4 \gg R_m$ и $2R_n > R_m$, полученное выражение можно привести к виду:

$$\frac{dA}{A} \approx \left(\frac{R_n}{2R_x + R_4} - \frac{R_m}{2R_n} \right) \frac{dR_n}{R_n}. \quad (11)$$

Рассмотрим, как изменится сомножитель B при изменении температуры, т. е. при изменении сопротивления нагревателя r_n .

Логарифмируя и дифференцируя (7) по r_n , получим:

$$\frac{dB}{B} = \frac{r r_n - r_n r_n - r_n r}{r r_n + r_n r_n + r_n r} \cdot \frac{dr_n}{r_n}. \quad (12)$$

Сопротивление r выберем равным r_n . В этом случае выражение (12) примет вид:

$$\frac{dB}{B} = - \frac{1}{1 + 2 \frac{r_d}{r_n}} \frac{dr_n}{r_n}.$$

Таким образом, относительная погрешность измерения составит:

$$\gamma \cong \left(\frac{R_n}{2R_d + R_4} - \frac{R_m}{2R_n} - \frac{1}{1 + 2 \frac{r_d}{r_n}} \right) \frac{\delta R_n}{R_n}. \quad (13)$$

Проанализируем полученное уравнение в соответствии с техническими условиями, заданными при проектировании установки.

Примем $R_4 = 100$ ом. Величина добавочного сопротивления для $U_{\min} = 30$ в составит 1450 ом, максимальная его величина — около 15 000 ом (так как $U_{\max} = 300$ в).

Рабочую длину нагревателя подогревного сопротивления, т. е. ту часть нагревателя, над которой расположена терморпара, нежелательно делать менее 2,5—3 мм, так как в противном случае отношение рабочей длины нагревателя ко всей его длине будет слишком мало. Поэтому при расчетах примем общую длину нагревателя равной 4 мм.

Сопротивление нагревателей в зависимости от материала и конструкции может изменяться в широком диапазоне. При расчете примем, что сопротивление нагревателей из нихрома лежит в пределах 10 ÷ 30 ом, а сопротивление нагревателей из константана — в пределах 5 ÷ 15 ом.

Шунты в компараторе рассчитаны на токи от 100 ма до 10 а. Сопротивление шунтов лежит в пределах 5 ÷ 0,05 ом. Если в качестве источника вспомогательного напряжения использовать батарею с напряжением 4 в, то обычно $r_d \gg 10r_n$.

При этих условиях максимальная погрешность при применении нихромовых нагревателей составит $\gamma_1 = -0,30 \frac{\delta R_n}{R_n}$, а при применении константановых нагревателей $\gamma_2 = -0,55 \frac{\delta R_n}{R_n}$.

Так как температурный коэффициент сопротивления нихрома $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, максимально допустимое изменение температуры нагревателя в процессе измерения составляет $13^{\circ}/\gamma_{\text{доп}} = 5 \cdot 10^{-4}$. Температурный коэффициент сопротивления константана составляет $\alpha = 4 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Отсюда максимальное допустимое изменение температуры константанового нагревателя в процессе измерения составляет 22°C .

Как было указано выше, температурная погрешность возникает при изменении измеряемого напряжения, при коэффициенте мощности, не равном единице, и при изменении температуры окружающей среды.

Погрешность от изменения напряжения. В процессе компарирования измеряемые мощности переменного и постоянного токов равны.

Полагая $\cos \varphi = 1,0$, имеем

$$I_U I_I = I'_U I'_I,$$

где I_U и I_I — составляющие постоянного тока в нагревателе, пропорциональные соответственно измеряемому напряжению и току;

I'_U и I'_I — аналогичные составляющие переменного тока в нагревателе.

В момент измерения температуры всех нагревателей равны. При изменении мощности переменного тока температура нагревателей составляет:

$$t' = c(I_U'^2 + I_i'^2 + 2I_U'I_i'),$$

где c — постоянная.

При измерении мощности постоянного тока имеем:

$$t = c(I_U^2 + I_i^2 + 2I_U I_i).$$

Введя обозначения

$$\frac{I_U'}{I_U} = \frac{I_i'}{I_i} = 1 + \delta \text{ и } \frac{I_i}{I_U} = k,$$

получим:

$$\begin{aligned} t' - t &= c(I_U'^2 + I_i'^2 - I_U^2 - I_i^2) \simeq c(2\delta I_U^2 - 2\delta I_i^2) = \\ &= 2\delta c I_U^2 (1 - k^2). \end{aligned} \quad (14)$$

Постоянную c определяют из характеристики сопротивления в нагревателе.

Из полученного уравнения следует, что температурная погрешность, обусловленная изменением напряжения, будет минимальна, если составляющие тока I_U и I_i равны друг другу.

Погрешность от изменения $\cos \varphi$. Полагая $I_U' = I_U$, имеем:

$$\begin{aligned} I_U' I_i' \cos \varphi &= I_U I_i; \\ t' &= c(I_U'^2 + I_i'^2 + 2I_U' I_i' \cos \varphi); \\ t &= c(I_U^2 + I_i^2 + 2I_U I_i), \end{aligned}$$

откуда

$$t' - t = c I_i^2 (1 - \cos^2 \varphi). \quad (15)$$

Погрешность от изменения $\cos \varphi$ пропорциональна квадрату слагающей тока I_i и максимальна при $\cos \varphi \rightarrow 0$.

В качестве примеров определим погрешность измерения от изменения; а) напряжения и б) $\cos \varphi$ при применении нихромовых нагревателей диаметром 20 мк, длиной $l = 4$ мм.

а) Для номинального значения измеряемой мощности при $\cos \varphi = 1,0$, $I_U = 10,0$ ма, $U = 0,5$ в, $R_n = 14,0$ ом получаем:

$$I_i = \frac{U}{2(R_n + R_{np})} = 14,5 \text{ ма},$$

где R_{np} — сопротивление предохранителя;

$$R_{np} = 1/5 R_n, \quad k = \frac{I_i}{I_U} = 1,45.$$

Для нихромового нагревателя диаметром 20 мк при $l = 10$ ма $c l^2 \simeq 6^\circ$.

Согласно (14), при $\delta = \pm 0,1$ изменение температуры нагревателя составит:

$$t' - t = 2\delta c I_U^2 (1 - k^2) = \pm 2 \cdot 0,1 \cdot 6 (1 - 2,1) = \mp 1,3^\circ.$$

б) Имеем $\cos \varphi \rightarrow 0$, $I_U = 10$ ма, $I_i = 14,5$ ма.

Для нихромового нагревателя диаметром 20 мк при $I = 14,5$ ма

$$cI^2 \approx 12^\circ.$$

Изменение температуры при этом будет

$$t' - t = cI^2(1 - \cos \varphi) = 12^\circ.$$

Благодаря массивному латунному колпаку, уменьшающему влияние резких изменений температуры окружающей среды, температура подогревного сопротивления за промежуток времени между двумя измерениями, равный 1 мин, изменится не более чем на $0,1^\circ$.

Максимальное изменение температуры нихромового нагревателя в процессе измерения составляет 12° , что соответствует относительному изменению сопротивления нагревателя $\frac{\Delta R_n}{R_n} = 0,16\%$ и относительной погрешности измерения $\gamma = 0,05\%$.

Исходя из допустимой погрешности измерения, согласно расчету, диаметр нихромового нагревателя длиной $l = 3 \div 5$ мм не должен превышать 16—20 мк, а диаметр константанового нагревателя той же длины не должен превышать 25 ÷ 30 мк.

Следует рекомендовать изготовление нагревателей из нихрома диаметром 10—20 мк, длиной 3 ÷ 5 мм или из константана диаметром 20 ÷ 30 мк той же длины. Нихромовый нагреватель предпочтительнее ввиду большей перегрузочной способности.

Результаты исследования

Приведенный выше анализ погрешностей показывает, что систематические погрешности измерения термоэлектрического компаратора могут быть сделаны малыми.

Для суждения о справедливости этих, полученных теоретическим путем заключений лучше всего было подвергнуть вновь разработанную аппаратуру комплектной поверке. Однако для этой цели следовало иметь метод более высокой точности, чем аттестуемый. Ввиду отсутствия такового комплектная поверка заменяется поэлементной, позволяющей определить различные составляющие погрешности и установить в конечном счете достижимую точность измерения мощности при повышенной частоте и $\cos \varphi < 1$, чувствительность метода и сходимость результатов измерения мощности.

В связи с тем, что наибольшую погрешность измерения мощности обуславливают остаточные реактивности элементов схемы, приводящие к угловой погрешности термокомпаратора, основное внимание было обращено на их определение.

В результате испытания установлено, что по абсолютной величине постоянная времени параллельной цепи компаратора не превосходит $1 \cdot 10^{-8}$ сек.

Измерение постоянной времени последовательной цепи компаратора показало, что при некоторых шунтах она достигает величин порядка $20,0 \cdot 10^{-8}$ сек. Такие значения постоянных времени не могли быть допущены и требовали снижения. Так как постоянные времени шунтов носят индуктивный характер, то для их уменьшения параллельно каждому шунту был включен конденсатор. Таким способом во всех шунтах были подогнаны постоянные времени, которые не превосходили $5 \cdot 10^{-8}$ сек. Этим постоянным времени был придан емкостной характер, с тем, чтобы уменьшить абсолютную величину разности постоянных времени последо-

вательной и параллельной цепей и тем самым снизить погрешность измерения мощности.

Кроме угловой погрешности, точность поверки с помощью разработанной аппаратуры могла быть ограничена также недостаточной ее чувствительностью. В связи с тем, что чувствительность компаратора есть величина неизменная при включении в цепи переменного и постоянного токов, она определялась на постоянном токе с помощью компенсатора большой точности.

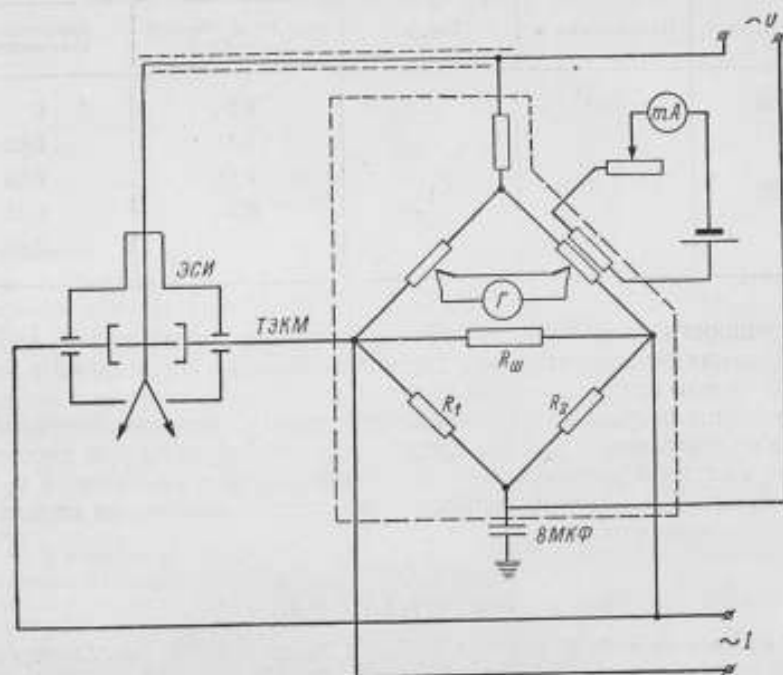


Рис. 3.

Чувствительность компаратора подбором определенных шунтов и добавочных сопротивлений может сохраняться для разных пределов измерения неизменной, поэтому достаточно определить ее на одном пределе измерения по току и по напряжению в наихудших условиях — при минимальном коэффициенте мощности. В этих условиях при $\cos \varphi = 0,05$ она оказалась равной 100 мВ/1\% .

Для суждения о величине полной погрешности, присущей данному методу, решено было сравнить модернизированный термоэлектрический компаратор с электростатическим измерителем мощности, разработанным ранее во ВНИИМ К. П. Широковым [4]. Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность К. П. Широкову, принявшему непосредственное участие в проведении эксперимента.

Особенности схем каждого из этих устройств не допускали простого последовательно-параллельного их включения, и выход из этого положения был найден в том, что в термоэлектрическом компараторе и электростатическом измерителе мощности использовался один и тот же шунт (рис. 3). При такой схеме включения электростатический измеритель мощности (ЭСИ) измеряет по сравнению с термоэлектрическим компаратором меньшую мощность на величину, пропорциональную падению напряжения на одном сопротивлений R_1 или R_2 , образующих на шунте среднюю точку.

Если одну и ту же мощность измерить обоими устройствами и ввести соответствующую поправку в показания электростатического измерителя мощности, то при отсутствии погрешности показания их должны совпасть.

Сравнение было произведено для различных частот до 2000 гц и при различных коэффициентах мощности от 0,2 и ниже (см. таблицу).

Результаты сравнения термоэлектрического и электростатического методов измерения мощности

Частота, гц	Напряжение, в	Ток, а	cos φ (индуктивный сдвиг фаз)	Погрешность сравнения, %
500	100	1	0,2	0
			0,1	0,02
2000	100	1	0,05	0,03
			0,2	0,01
			0	0,03

Погрешность сравнения порядка нескольких сотых долей процента, обусловленная остаточными реактивностями схемы, соизмерима с погрешностью каждого из сравниваемых методов.

Совпадение результатов измерения на двух установках, в основе которых лежат два принципиально различающихся метода, является экспериментальным подтверждением возможности применения описанного в статье метода для поверки ваттметров, особенно существенного при малых коэффициентах мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безикович А. Я. и Зорин Д. И., Труды ВНИИМ, вып. 28 (88), 1956.
2. Безикович А. Я., Труды ВНИИМ, вып. 24 (84), 1954.
3. Попов В. С., «Электричество», № 9, 1958.
4. Широков К. П., Труды ВНИИМ, вып. 28 (88), 1956, стр. 5.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
С. В. Горбацевич, А. Н. Индрик, А. И. Петунова. Состояние эталонов единицы электрического сопротивления	5
С. В. Горбацевич. О систематических погрешностях при сравнении сопротивлений компенсационным методом	12
Е. К. Вессо-Адо. Влияние нагрузки током на величину электрического сопротивления при точных измерениях	17
А. К. Колосов, Е. А. Чалова. Состояние государственного эталона вольты СССР	39
В. В. Мюллер. Естественное старение нормальных элементов	65
Е. Ф. Долгиский. Оценка погрешности группового эталона э. д. с.	79
З. И. Зеликовский. О влиянии температуры при сличении нормальных элементов	85
И. Н. Кротков, Т. М. Гушина. Метод точного сличения конденсаторов, имеющих различные номинальные значения емкостей	93
И. Н. Кротков, Т. М. Гушина. Определение параметров конденсаторов методом декадных сличений	105
А. Я. Безикович, Д. И. Зорин. Многопредельные термоэлектрические приборы повышенной точности для звукового диапазона частот	119
А. Я. Безикович, В. С. Попов. Метод и аппаратура для поверки ваттметров в диапазоне звуковых частот	130

Техред *О. А. Соколов*

Корректор *А. И. Исакова*

Подписано к печати 20/1 1960 г.
Печ. л. 9

М.29526.

Уч.-изд. л. 11,73.

Тираж 3 000 экз.

Формат бумаги 70×108¹/₁₆.

Заказ 713.

Типография № 6 УПП Ленсовнархоза, Ленинград, ул. Моисеенко, 10

Цена 8 р. 20 к.