

И. П. Захаров
Ю. Ф. Павленко

ЭТАЛОНЫ

В ОБЛАСТИ

ЭЛЕКТРО-
РАДИО-
ИЗМЕРЕНИЙ

Горячая линия-Телеком



**И. П. Захаров
Ю. Ф. Павленко**

**ЭТАЛОНЫ
В ОБЛАСТИ
ЭЛЕКТРО
РАДИО
ИЗМЕРЕНИЙ**

Справочное пособие

Москва
Горячая линия – Телеком
2008

УДК 621.317
ББК 31.221
3-38

Захаров И. П., Павленко Ю. Ф.

3-38 Эталоны в области электрорадиоизмерений. Справочное пособие. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 192 с.: ил.
ISBN 978-5-9912-0032-5.

Дается описание первичных эталонов основных единиц системы СИ. Осуществляется классификация подвидов электрорадиоизмерений. Анализируются возможности построения базовых эталонов на квантовых эффектах и фундаментальных физических константах (ФФК). Приводится система электрических эталонов. Описываются эталоны параметров интенсивности электрических колебаний (от постоянного тока до СВЧ), эталоны параметров цепей (включая цепи с сосредоточенными постоянными), эталоны параметров формы и спектра радиосигналов. Намечаются перспективы развития эталонной базы в области электрорадиоизмерений.

Книга предназначена для широкого круга специалистов, работающих в области электро- и радиотехники, может быть полезна учащимся вузов.

ББК 31.221

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Справочное издание

**Захаров Игорь Петрович
Павленко Юрий Федорович**

ЭТАЛОНЫ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЙ

Справочное пособие

Редактор *В. А. Лазарева*
Обложка художника *В. Г. Ситникова*

Подписано в печать 22.12.07. Формат 60×90/16. Изд. № 832
Гарнитура Times. Усл. печ. л. 12.

ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия–Телеком»

Отпечатано в ООО «Типография Полимаг» 127242. Москва, Дмитровское шоссе. 107. Зак 239

ISBN 978-5-9912-0032-5

© И. П. Захаров, Ю. Ф. Павленко, 2008
© Оформление издательства
«Горячая линия–Телеком», 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Раздел 1	
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭТАЛОНОВ	8
1.1. Международная система единиц.....	8
1.2. Централизованное и децентрализованное воспроизведение размера единиц.....	9
1.3. Нормируемые метрологические характеристики эталонов.....	11
1.3.1. Способы выражения характеристик погрешностей первичного эталона.....	12
1.3.2. Способы выражения характеристик погрешностей вторичных эталонов.....	12
1.3.3. Выражения для вычисления характеристик погрешностей эталонов.....	13
1.3.4. Выражения для вычисления характеристик неопределенностей эталонов.....	15
1.3.5. Взаимный пересчет характеристик погрешности и неопределенности измерений.....	17
1.4. Передача размеров единицы ФВ от эталонов рабочим средствам измерений. Поверочные схемы.....	19
1.5. О фундаментальных физических константах.....	22
Список литературы к разд. 1.....	24
Перечень дополнительных нормативных документов к разд. 1.....	24
Раздел 2	
ЭТАЛОНЫ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ СИ	25
2.1. Эталон единицы времени и частоты.....	25
2.2. Эталон единицы длины.....	33
2.3. Эталон единицы силы электрического тока.....	40
2.4. Эталон единицы температуры.....	46
2.5. Эталон единицы силы света.....	52
2.6. Эталон единицы массы.....	56
2.7. Единица количества вещества.....	59
2.8. Заключение.....	60
Список литературы к разд. 2.....	61
Перечень нормативных документов к разд. 2.....	62
Раздел 3	
СИСТЕМА ЭТАЛОНОВ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЙ. КВАНТОВЫЕ (БАЗОВЫЕ) ЭТАЛОНЫ СИСТЕМЫ	63
3.1. Единицы ФВ, применяемые в электрорадиоизмерениях. Эволюция методологии воспроизведения.....	63
3.2. Квантовые эталоны электрических единиц.....	66
3.3. Система эталонов в области электрорадиоизмерений.....	68
3.4. Эталон вольтга на эффекте Джозефсона.....	71
3.5. Эталон ома на основе квантового эффекта Холла.....	79

3.6. Эталон единицы магнитной индукции на эффекте ядерного магнитного резонанса.....	85
3.7. Заключение.....	92
Список литературы к разд. 3.....	93
Перечень нормативных документов к разд. 3.....	94

Раздел 4

ЭТАЛОНЫ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	95
4.1. Эталон единицы напряжения переменного тока.....	95
4.1.1. Параметры переменного напряжения.....	95
4.1.2. Основные методы точного измерения (воспроизведения) напряжения переменного тока.....	96
4.1.3. Диапазон низких и средних частот.....	97
4.1.4. Диапазон высоких и ультравысоких частот.....	102
4.2. Эталон единицы силы переменного тока.....	108
4.2.1. Диапазон низких и средних частот.....	108
4.2.2. Диапазон высоких частот.....	110
4.3. Эталон единицы мощности переменного тока на промышленной и низких частотах.....	113
4.4. Эталон единицы мощности электромагнитных колебаний ВЧ и СВЧ диапазонов.....	118
4.5. Эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения.....	123
4.6. Эталон единиц напряженности электромагнитного поля.....	127
4.6.1. Эталон напряженности электрического поля на частотах 0,0003...30 МГц.....	130
4.6.2. Эталон напряженности электрического поля в диапазоне 30...1000 МГц.....	133
4.6.3. Эталон напряженности магнитного поля в диапазоне 0,01...30 МГц.....	135
4.7. Заключение.....	137
Список литературы к разд. 4.....	140
Перечень нормативных документов к разд. 4.....	142

Раздел 5

ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПЕЙ И ТРАКТОВ.....	144
5.1. Эталон единицы электрической емкости.....	144
5.2. Эталон единицы индуктивности.....	153
5.3. Эталон единицы параметров цепей с распределенными постоянными.....	155
5.4. Заключение.....	160
Список литературы к разд. 5.....	161
Перечень нормативных документов к разд. 5.....	162

Раздел 6

ЭТАЛОНЫ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ И СПЕКТРА РАДИОСИГНАЛОВ.....	163
6.1. Эталон единицы коэффициента гармоник.....	164
6.1.1. Параметры квазигармонического сигнала.....	164
6.1.2. Принцип построения и основные характеристики эталона единицы КГ.....	166
6.2. Эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции.....	169

6.2.1. Параметры АМ сигнала.....	169
6.2.2. Принцип построения и основные характеристики эталона единицы коэффициента амплитудной модуляции.....	171
6.3. Эталон единицы девиации частоты частотно-модулированных колебаний.....	175
6.3.1. Параметры сигнала с угловой модуляцией.....	175
6.3.2. Принцип построения и основные характеристики эталона единицы девиации частоты.....	177
6.4. О метрологическом обеспечении осциллографов, анализаторов спектра и других многофункциональных средств измерения.....	183
6.5. Заключение.....	185
Список литературы к разд. 6.....	186
Перечень нормативных документов к разд. 6.....	187
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	188
Список литературы к заключению.....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	190
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ.....	191

ВВЕДЕНИЕ

В развитии науки и техники, создании новых технологий, повышении обороноспособности страны, улучшении качества промышленной и сельскохозяйственной продукции чрезвычайно важную роль играет *обеспечение единства измерений*. Под единством измерений понимают их состояние, характеризующееся тем, что результаты измерений выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы¹.

Технической основой системы обеспечения единства измерений в стране является национальная эталонная база, представляющая собой совокупность государственных и исходных эталонов, которые обеспечивают воспроизведение и хранение единиц измерений, а также передачу размеров единиц другим средствам измерительной техники.

Ни одно государство не может существовать без использования эталонной базы. Если оно не имеет своих эталонов, оно вынуждено пользоваться эталонами другой страны. Поэтому состояние и технический уровень эталонной базы в определенной мере отражает уровень научно-технического развития страны.

Россия, безусловно, относится к числу стран, где традиции и исследования в области метрологии, эталонная база и кадровый потенциал находятся на мировом уровне. Эти традиции идут от Д.И. Менделеева и успешно продолжают в настоящее время. В России работает целый ряд метрологических институтов, мы называем лишь те, в которых созданы и хранятся государственные эталоны основных единиц и единиц в области электрорадиоизмерений. К ним относятся:

- Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии (ВНИИМ, г. Санкт-Петербург);
- Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ, пос. Менделеево Московской области);
- Сибирский научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ, г. Новосибирск);

- Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ, г. Москва);
- Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС, г. Москва).

Назовем также два крупных института СНГ, принимающие активное участие в создании эталонной базы и развитии метрологии в области электрорадиоизмерений:

- Харьковский государственный научно-исследовательский институт метрологии (ХГНИИМ, Украина);
- Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ, г. Минск).

В дальнейшем авторами изложено подробнее о вкладе этих институтов в создание государственной эталонной базы России.

Несмотря на существование большого числа книг и публикаций по основам метрологии, отдельным видам измерений и эталонам, нам неизвестно издание, в котором в обобщенном виде был бы рассмотрен весь круг вопросов, касающихся формирования, достигнутых метрологических характеристик и перспектив развития эталонной базы в области электричества и радиоэлектроники.

Попыткой в определенной мере восполнить этот пробел является настоящая книга, в которой излагаются основные принципы построения первичных эталонов основных единиц системы СИ и единиц, применяемых в электрорадиоизмерениях. Акцент делается на рассмотрении физических законов и эффектов, лежащих в основе воспроизведения той или иной единицы, а также особенностях аппаратурной реализации эталона.

В книге анализируются также системные свойства эталонной базы в области электрорадиоизмерений, выделяются базовые эталоны системы, рассматриваются перспективы дальнейшего совершенствования эталонов, а также вопросы международного сотрудничества в этой области метрологии. Рассмотрение ведется в основном на примере России, имеющей одну из наиболее развитых эталонных баз в мире, приводится их сопоставление с мировым уровнем.

¹ РМГ 29-99. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. – 46 с.

Раздел 1

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭТАЛОНОВ

1.1. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ

Вопросам формирования систем единиц физических величин (ФВ) и их развитию посвящено множество публикаций, поэтому в данной книге они не рассматриваются. Действующая в настоящее время Международная система единиц SI (СИ) принята в 1960 году XI Генеральной конференцией по мерам и весам. Действие Международной системы единиц в Российской Федерации закреплено в Законе РФ “Об обеспечении единства измерений” и регламентировано ГОСТ 8.417-2000 [1.1]. Данный стандарт полностью соответствует стандартам ISO31 (0–13) “Величины и единицы”, 1992 г. и ISO1000 “Единицы СИ и рекомендации для использования их дольных, кратных и других единиц”, 1992 г. Система СИ действует и на всем пространстве СНГ. После некоторых видоизменений, принятых в 1967 и 1979 годах, система СИ включает семь *основных единиц* (табл. 1.1).

Производные единицы образуются на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами или на основании принятых определений физических величин.

Воспроизведение основной единицы осуществляется созданием фиксированной по размеру физической величины в соответствии с определением единицы.

Воспроизведение производной единицы физической величины осуществляется на основании измерения других величин, функционально связанных с данной величиной.

Таблица 1.1. Основные единицы Международной системы единиц (СИ)

Физическая величина		Единицы физических величин		
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Длина	L	метр	m	м
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила тока	I	ампер	A	А
Сила света	J	кандела	cd	кд
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль

1.2. ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ РАЗМЕРА ЕДИНИЦ

Воспроизведение единиц осуществляется одним из двух способов, исходя из технико-экономической целесообразности: *централизованно* – с помощью единого для всей страны государственного эталона, или *децентрализованно* – когда требуемая точность воспроизведения может быть обеспечена посредством косвенных измерений, выполняемых в органах метрологической службы.

Централизованно воспроизводят все (кроме моля) основные единицы Международной системы и ряд производных. Главными критериями для централизованного воспроизведения производных единиц являются: широкая распространенность средств измерений, градуируемых в данной единице; большая точность осуществления размера единицы с помощью эталона; техническая возможность передачи размеров единицы от эталонов нижестоящим по поверочной схеме¹ средств измерений; сложность соответствующих косвенных измерений и нецелесообразность их проведения в нескольких органах метрологической службы [1.2].

Эталон – средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке².

Эталоны классифицируются следующим образом [1.3–1.5].

Первичный эталон – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью³.

Вторичный эталон – эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы⁴.

¹ О поверочных схемах речь пойдет ниже.

² Конструкция эталона, его свойства и способ воспроизведения единицы определяются природой данной физической величины и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать, по крайней мере тремя отличительными признаками – неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

³ В случае, когда одним первичным эталоном технически нецелесообразно обслуживать весь диапазон измеряемой величины, создают несколько первичных эталонов, охватывающих части этого диапазона с таким расчетом, чтобы был охвачен весь диапазон. В этом случае проводят согласование размеров единиц, воспроизводимых “соседними” первичными эталонами.

⁴ Вторичный эталон создается обычно для уменьшения износа первичного эталона.

Эталон сравнения – эталон, применяемый для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

Исходный эталон – эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами (в данной лаборатории, организации, на предприятии), от которого передают размер единицы подчиненным эталонам и имеющимся средствам измерений⁵.

Рабочий эталон – эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим средствам измерений⁶.

Государственный первичный эталон (ГПЭ) – первичный эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории государства.

Национальный эталон – эталон, признанный официальным решением применяться в качестве исходного для страны⁷.

Международный эталон – эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых национальными эталонами.

Одиночный эталон – эталон, в составе которого имеется одно средство измерений (мера, измерительный прибор, эталонная установка) для воспроизведения и (или) хранения единицы⁸.

Групповой эталон – эталон, в состав которого входит совокупность средств измерений одного типа, номинального значения или диапазона измерения, применяемых совместно для повышения точности воспроизведения единицы или ее хранения.

Эталонный набор – эталон, состоящий из совокупности средств измерений, позволяющих воспроизводить и (или) хранить

⁵ Исходным эталоном в стране служит первичный эталон, исходным эталоном для республики, региона, министерства (ведомства) или предприятия может быть вторичный или рабочий эталон. Вторичный или рабочий эталон, являющийся исходным для министерства (ведомства) называют *ведомственным эталоном*. Эталоны, стоящие в поверочной схеме ниже исходного, обычно называют *подчиненными эталонами*.

⁶ Термин *рабочий эталон* заменил собой термин *образцовое средство измерений* (ОСИ), что сделано для упорядочения терминологии и приближения ее к международной.

⁷ Термин “национальный” применяют для государственных эталонов в случаях проведения сличения эталонов, принадлежащих отдельным государствам, с международным эталоном или при проведении так называемых круговых сличений эталонов ряда стран.

⁸ Групповые эталоны подразделяются на групповые эталоны постоянного или переменного состава. Размер единицы, воспроизводимый (хранимый) групповым эталоном, определяется как среднее арифметическое размеров одиночных эталонов, входящие в групповой эталон.

единицу в диапазоне, представляющем объединение диапазонов указанных средств⁹.

Транспортируемый эталон – эталон (иногда специальной конструкции), предназначенный для транспортирования к месту поверки (калибровки) средств измерений или сличений эталонов данной единицы.

Созданием и хранением первичных эталонов, а также передачей размеров единиц занимаются, как правило, национальные метрологические центры (институты).

Наиболее развитыми центрами мировой метрологии в настоящее время являются:

- Международное Бюро мер и весов (BIPM, Paris) – межгосударственное научно-исследовательское учреждение, работающее под юрисдикцией Международного Комитета мер и весов;
- Национальный институт стандартов и технологий США (NIST);
- Федеральный физико-технический институт Германии (PTB);
- Национальная физическая лаборатория Англии (NPL);
- Национальное Бюро по метрологии Франции (BNM).

1.3. НОРМИРУЕМЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭТАЛОНОВ

Метрологическими характеристиками средства измерений называются характеристики его свойств, влияющие на результат измерения и на его погрешность. *Нормируемыми метрологическими характеристиками* (НМХ) средства измерения называется совокупность метрологических характеристик, устанавливаемая нормативными документами. Основными НМХ эталонов являются номинальное значение воспроизводимой единицы и характеристики погрешности. Номинальным значением называется значение величины, приписанное эталону при изготовлении. Способы выражения характеристик погрешностей эталонов устанавливает ГОСТ 8.381-80 [1.6].

Погрешность государственных первичных эталонов характеризуется:

- неисключенной систематической погрешностью (НСП);
- случайной погрешностью;
- нестабильностью.

⁹ Создается в случаях, когда необходимо охватить определенную область значений физической величины.

Допускается указывать случайную погрешность воспроизведения единицы с учетом погрешности передачи ее размера или последнюю указывать отдельно. В оценку погрешности передачи размера единицы должны входить как неисключенные систематические, так и случайные погрешности метода и средств измерений. Оценка погрешности эталонов следует указывать либо в абсолютной форме (в единицах измеряемой величины) либо в относительной форме. Если зависимость погрешности от значения воспроизводимой величины сложнее, чем линейная, погрешность может быть указана в виде таблицы по выбранным диапазонам (в абсолютной или относительной форме) или в виде функции зависимости этой погрешности.

1.3.1. СПОСОБЫ ВЫРАЖЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА

Оценку НСП первичного эталона производят на основании экспериментальных исследований эталона, анализа погрешностей метода воспроизведения единицы и погрешностей от действия влияющих величин, а также на основании международных сличений эталона с эталонами других стран. Случайную погрешность первичного эталона оценивают на основании экспериментальных данных, полученных при исследовании эталона, и на основе анализа влияющих величин. Оценку нестабильности первичного эталона, вызываемую влиянием старения его отдельных элементов и другими причинами, производят на основании исследований эталона во времени, а также по данным периодических международных сличений.

Для первичного эталона НСП, лежащая в границах $\pm\Theta$, характеризуется границей Θ без указания знака. Случайная погрешность характеризуется средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерения S при воспроизведении единицы с указанием числа n независимых наблюдений. Нестабильность эталона v следует характеризовать изменением размера единицы за определенный промежуток времени. Погрешность передачи размера единицы характеризуют указанием СКО результата измерений $S_{\epsilon\Sigma}$, обусловленного влиянием случайных и неисключенных систематических погрешностей метода и средств измерений, примененных при передаче размера единицы.

1.3.2. СПОСОБЫ ВЫРАЖЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ ВТОРИЧНЫХ ЭТАЛОНОВ

Оценки погрешности вторичных эталонов должны характеризовать отклонения размеров хранимых ими единиц от размера единицы, воспроизводимой с помощью первичного эталона [1.6].

Для вторичного эталона указывают суммарную погрешность, включающую случайные погрешности сличаемых эталонов и погрешность передачи размера единицы от первичного (или более точного вторичного) эталона, а также нестабильность вторичного эталона.

Допускается суммарную погрешность вторичного эталона определять с учетом его НСП, а также указывать отдельно НСП вторичного эталона и его нестабильность. Нестабильность вторичного эталона должна определяться на основании сличений с первичным эталоном в начале и конце периода, для которого она определяется.

Суммарная погрешность *вторичного эталона* характеризуется СКО результата измерений (S_{Σ}) при его сличении с первичным эталоном или вышестоящим по поверочной схеме вторичным эталоном или же в виде доверительной границы погрешности $t_{\Sigma}S_{\Sigma}$ с доверительной вероятностью 0,99.

При учете НСП через S_{Σ} следует выражать СКО суммы неисключенных систематических и случайных погрешностей эталона. Если НСП и нестабильность вторичного эталона указывают отдельно, то их выражают в виде, принятом для первичного эталона.

1.3.3. ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭТАЛОНОВ

Доверительную вероятность при определении доверительных границ погрешности эталона (как для случайной, так и для неисключенной систематической), принимают обычно равной 0,99.

Границу НСП эталона Θ вычисляют по формуле:

$$\Theta = \begin{cases} \pm \sum_{i=1}^N |\Theta_i|, & \text{при } N \leq 3; \\ \pm 1,4 \sqrt{\sum_{i=1}^N \Theta_i^2}, & \text{при } N \geq 4, \end{cases} \quad (1.1)$$

где Θ_i – граница i -й составляющей НСП эталона¹⁰.

СКО результата *прямых измерений* с многократными наблюдениями S выражают по формуле

$$S = \frac{S_i}{\sqrt{n}}, \quad (1.2)$$

где S_i – СКО результата *наблюдений*, вычисляемое по формуле

¹⁰ При выводе (1.1) сделано предположение о равномерном законе распределения составляющих неисключенной систематической погрешности внутри границ $\pm\Theta$.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (1.3)$$

где X_i – результат i -го наблюдения; \bar{X} – результат измерений, вычисленный как среднее арифметическое результатов наблюдений¹¹.

СКО результатов *косвенных измерений* величины X , являющейся функцией

$$X = F(Y_1, Y_2, \dots, Y_m), \quad (1.4)$$

вычисляют по формуле

$$S = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial F}{\partial Y_k} \right)^2 S_k^2}, \quad (1.5)$$

где S_k – СКО результата измерений величины Y_k ; $k = 1, 2, \dots, m$.

Границу НСП при *косвенном измерении* в зависимости от числа слагаемых определяют по (1.1), в которых

$$\Theta_i = \frac{\partial F}{\partial Y_i} \Delta Y_i, \quad (1.6)$$

где ΔY_i – НСП измерения величины Y_i .

СКО суммы неисключенных систематических и случайных погрешностей S_Σ вычисляют по формуле

$$S_\Sigma = \sqrt{S^2 + S_\Theta^2}, \quad (1.7)$$

где $S_\Theta = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^N \Theta_i^2}$ – СКО суммы НСП.

При определении доверительной границы погрешности $t_\Sigma S_\Sigma$ вторичного эталона коэффициент t_Σ вычисляют по формуле

$$t_\Theta = \frac{\Theta + t_{\bar{X}} S}{S_\Theta + S}, \quad (1.8)$$

где $t_{\bar{X}}$ – коэффициент для нахождения доверительных границ погрешности результата измерений¹².

Погрешность передачи размера единицы состоит из суммы случайных и неисключенных систематических погрешностей метода и средств измерений, применяемых для передачи размера едини-

¹¹ При многократных наблюдениях должна быть обеспечена практическая независимость отдельных наблюдений.

¹² Поскольку за результат измерения принимают среднее арифметическое n наблюдений, в предположении нормального закона их распределения, доверительный коэффициент берется из таблицы распределения Стьюдента, а при числе наблюдений больше 20–30 – из таблицы для нормального распределения, что для вероятности 0,99 составляет значение 2,58.

цы. Оценку суммы неисключенных систематических и случайных погрешностей указывают в виде СКО $S_{e\Sigma}$:

$$S_{e\Sigma} = \sqrt{S_e^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^N \Theta_{e_i}^2}, \quad (1.9)$$

где S_e – СКО случайной погрешности метода и средства передачи размера; $\Theta_{e_i}/\sqrt{3}$ – СКО НСП метода и средства передачи размера единицы.

1.3.4. ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ЭТАЛОНОВ

В международной практике метрологические характеристики эталонов принято оценивать в терминах неопределенности¹³ [1.7–1.9].

Основным количественным выражением неопределенности измерений является *стандартная неопределенность*. Если результат измерений определяют через значения других величин, то основным количественным выражением неопределенности измерений является *суммарная стандартная неопределенность* u_c .

В тех случаях, когда необходимо, вычисляют расширенную неопределенность

$$U = k u_c, \quad (1.10)$$

где k – коэффициент охвата¹⁴.

Оценку y измеряемой величины Y вычисляют, как функцию оценок x_1, \dots, x_m входных величин¹⁵ X_1, \dots, X_m после внесения поправок на все известные источники неопределенности, имеющие систематический характер:

$$y = f(x_1, \dots, x_m), \quad (1.11)$$

где m – число входных величин; f – вид функции.

Порядок вычисления характеристик неопределенности измерения следующий:

1. Вычисляют суммарную стандартную неопределенность по типу А (u_A)¹⁶.

¹³ Под *неопределенностью измерений* понимают параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине.

¹⁴ *Коэффициент охвата* – числовой коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности.

¹⁵ Входные величины – непосредственно измеряемые или другие величины, влияющие на результат измерения.

¹⁶ Вычисление по типу А осуществляется путем статистического анализа результатов многократных измерений.

Исходными данными для вычисления являются результаты многократных измерений: x_{i1}, \dots, x_{in_i} ($i = 1, \dots, m$), где n_i — число измерений i -й входной величины.

1.1. Находят стандартную неопределенность единичного измерения i -й входной величины:

$$u_{A,i} = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}{n_i - 1}}, \quad (1.12)$$

где $\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq}$ — среднее арифметическое результатов измерений i -й входной величины.

1.2. Находят стандартную неопределенность измерения i -й входной величины, при которой результат определяют как среднее арифметическое:

$$u_A(x_i) = \frac{u_{A,i}}{\sqrt{n_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}. \quad (1.13)$$

2. Вычисляют стандартную неопределенность по типу В (u_B)¹⁷.

Находят стандартную неопределенность, определяемую по типу В, для i -й входной величины,

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{2\sqrt{3}}, \quad (1.14)$$

где b_{i+}, b_{i-} — соответственно верхняя и нижняя границы возможных значений i -й величины в предположении равномерного закона их распределения¹⁸.

Для симметричных границ ($\pm b_i$)

$$u_B(x_i) = \frac{b_i}{2\sqrt{3}}. \quad (1.15)$$

3. Вычисляют коэффициент корреляции между парами входных величин, для чего используют согласованные пары измерений (x_{il}, x_{jl}) ($l = 1, \dots, n_{ij}$, где n_{ij} — число согласованных пар результатов измерений):

¹⁷ Вычисление по типу В производят без использования статистического анализа результатов многократных измерений. Исходными данными для вычисления являются данные, основанные на опыте исследователя или общих знаниях о поведении и свойствах соответствующих приборов и материалов; неопределенности констант и справочных данных; данные поверки, калибровки, сведения изготовителя о приборе и др.

¹⁸ В случае других законов распределения формулы для вычисления неопределенности по типу В иные.

$$r(x_i, x_j) = \frac{\sum_{l=1}^{n_{ij}} (x_{il} - \bar{x}_i)(x_{jl} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{l=1}^{n_{ij}} (x_{il} - \bar{x}_i)^2 \sum_{l=1}^{n_{ij}} (x_{jl} - \bar{x}_j)^2}}. \quad (1.16)$$

4. Вычисляют суммарную стандартную неопределенность u_c .

4.1. В случае некоррелированных оценок x_1, \dots, x_m суммарная стандартная неопределенность:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i). \quad (1.17)$$

4.2. Для коррелированных оценок x_1, \dots, x_m суммарная стандартная неопределенность

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} r(x_i, x_j) u(x_i) u(x_j), \quad (1.18)$$

где $r(x_i, x_j)$ — коэффициент корреляции; $u(x_i)$ — стандартная неопределенность i -й входной величины, вычисленная по типу А или В.

5. При необходимости вычисляют расширенную неопределенность по ф-ле (1.10). В общем случае коэффициент охвата выбирают в соответствии с формулой¹⁹:

$$k = t_p(v_{eff}), \quad (1.19)$$

где $t_p(v_{eff})$ — квантиль распределения Стьюдента с эффективным числом степеней свободы v_{eff} и доверительной вероятностью (уровнем доверия) p .

Число степеней свободы

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{u^4(x_i)}{v_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^4}, \quad (1.20)$$

где v_i — число степеней свободы при определении оценки i -ой входной величины:

$v_i = n_i - 1$ — для неопределенности по типу А;

$v_i = \infty$ — для неопределенности по типу В.

1.3.5. ВЗАИМНЫЙ ПЕРЕСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Пересчет от характеристик погрешности к оценкам неопределенности измерений приведен в [1.8].

Исходными данными для расчета неопределенности являются:

¹⁹ Во многих практических случаях при вычислении расширенной неопределенности делают предположение о нормальном законе распределения и полагают $k = 2$ при $p = 0,95$ и $k = 3$ при $p = 0,99$.

- оценка СКО S результата измерения²⁰;
- оценка НСП в виде границ $\theta(p)$ для заданной доверительной вероятности p ;
- число составляющих НСП m .
- количество результатов наблюдений n , взятых для вычисления среднего арифметического в качестве оценки результата измерения.

Используя эти исходные данные, получаем оценки:

- стандартной неопределенности по типу А $\hat{u}_A = S$;
- стандартной неопределенности по типу В $\hat{u}_B = \frac{\theta(p)}{K(p)\sqrt{3}}$, где коэффициент $K(p) = 1,1$ для $p = 0,95$; $K(p) = 1,4$ для $p = 0,99$ и $m > 4$ ²¹;
- суммарной неопределенности $\hat{u}_c = \sqrt{\hat{u}_A^2 + \hat{u}_B^2}$;
- эффективного числа степеней свободы²² $\hat{\nu}_{eff} = (n-1) \left[1 + \frac{\hat{u}_B^2}{\hat{u}_A^2} \right]^2$;
- коэффициента охвата k как коэффициента Стьюдента $t_p(\nu_{eff})$ для заданной вероятности p и полученной оценки числа степеней свободы $\hat{\nu}_{eff}$;
- расширенной неопределенности $\hat{U}_p = k\hat{u}_c$.

Пересчет от неопределенности к характеристикам погрешности измерений приведен в [1.9].

Исходными данными при представлении неопределенности для расчета оценок характеристик погрешности являются:

- расширенная неопределенность U_p ;
- коэффициент охвата k ;
- уровень доверия p .

Дополнительно к перечисленным данным, для расчета всех оценок характеристик погрешностей необходимо иметь:

- количество результатов наблюдений n ;
- эффективное число степеней свободы ν_{eff} .

В этом случае можно получить оценки:

- СКО, характеризующего суммарную погрешность $\hat{S}_\Sigma = \frac{U_p}{k} = u_c$;

²⁰ В качестве результата измерения принимается среднее арифметическое исправленных результатов отдельных наблюдений измеряемой величины.

²¹ При невыполнении этого неравенства следует находить коэффициент $K(p)$ как доверительный коэффициент из композиции равновероятных законов распределения составляющих НСП [1.9].

²² При вычислении числа степеней свободы полученное дробное значение округляется до ближайшего меньшего целого числа.

- СКО случайной погрешности результата измерений $\hat{S} = u_A = \hat{S}_\Sigma \sqrt{(n-1)/\nu_{eff}}$;
- СКО, характеризующего НСП $\hat{S}_\theta = u_B = \sqrt{\hat{S}_\Sigma^2 - \hat{S}^2}$;
- доверительных границ НСП $\hat{\theta}(p) = K_p \sqrt{3} \hat{S}_\theta$, где коэффициент $K(p) = 1,1$ для $p = 0,95$; $K(p) = 1,4$ для $p = 0,99$ и $m > 4$.
- доверительных границ погрешности $\Delta_p = \frac{t_p(n-1)\hat{S} + \hat{\theta}(p)}{\hat{S} + \hat{S}_\theta} \hat{S}_\Sigma$,

где $t_p(n-1)$ – коэффициент Стьюдента для заданной вероятности p и числа степеней свободы $(n-1)$.

1.4. ПЕРЕДАЧА РАЗМЕРОВ ЕДИНИЦЫ ФВ ОТ ЭТАЛОНОВ РАБОЧИМ СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ. ПОВЕРОЧНЫЕ СХЕМЫ

Как уже говорилось, одной из функций эталона является передача размера единицы ФВ рабочим средствам измерений. Передача размера единицы есть приведение размера единицы физической величины, хранимой поверяемым средством измерения, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при их поверке (калибровке)²³.

Для передачи размеров единиц от первичного эталона обширному парку рабочих средств измерений приходится прибегать к многоступенчатой процедуре, схема которой показана на рис. 1.1.

Передача размеров единиц рабочим средствам измерений осуществляется посредством рабочих эталонов (РЭ), которые в зависимости от точности подразделяются на разряды. Находятся РЭ в метрологических институтах или лабораториях государственной метрологической службы.

Для обеспечения правильной передачи информации о размере единиц ФВ во всех звеньях метрологической цепи должен быть установлен определенный порядок. Этот порядок приводится в поверочной схеме [1.3–1.10].

Поверочная схема – нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерений (с указанием методов и погрешности при передаче). В зависимости от об-

²³ Нередко при поверке (калибровке) измеряют одну и ту же физическую величину поверяемым средством измерений и эталоном для установления разности в их показаниях и введения поправки (в показания поверяемого средства измерений). Размер единицы передается “сверху вниз” в соответствии с числом ступеней передачи, установленным поверочной схемой.

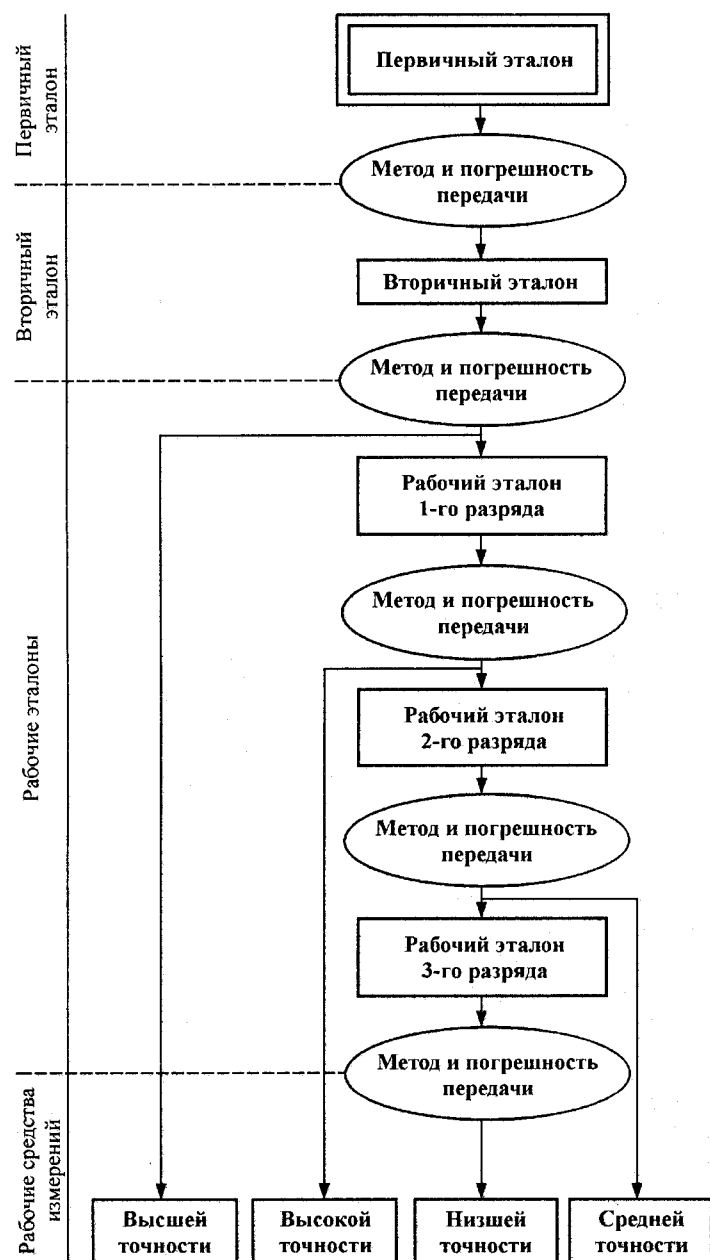


Рис. 1.1. Схема многоступенчатой процедуры передачи размера единицы от эталона к средствам измерений

ласти распространения, поверочные схемы подразделяются на государственные и локальные.

Государственная поверочная схема распространяется на все средства измерений данной физической величины, имеющиеся в стране.

Локальная поверочная схема распространяется на средства измерений данной физической величины, применяемые в регионе, отрасли, ведомстве или на отдельном предприятии (в организации).

Поверочные схемы состоят из текстовой части и чертежа. На чертеже приводятся:

- наименования средств измерений;
- диапазон значения физической величины;
- погрешности средств измерений;
- метод и погрешности передачи размера единицы.

Наименования эталонов и рабочих средств измерений указываются в прямоугольниках, причем первичный эталон заключают в прямоугольник, образованный двойной линией.

Наименования методов передачи размеров единиц помещают в горизонтальные овалы между наименованиями поверяемого рабочего средства измерений и соответствующего РЭ. Погрешность метода поверки указывается в том же овале. Другие вопросы построения и оформления поверочных схем приведены в ГОСТ 8.061-80.

Отметим, что число ступеней поверочной схемы и, соответственно число разрядов рабочих эталонов для разных областей измерений и видов физических величин может быть разным и зависит от количества, видов, уровня точности средств измерений и других факторов [1.11]. Кроме того, в качестве рабочих эталонов одного и того же разряда могут применяться разные средства – все зависит от особенностей конкретной области измерений.

Передача размера единиц может осуществляться следующими методами:

- сличение поверяемого средства измерений с эталонным того же вида с помощью компаратора²⁴;
- непосредственное сличение поверяемого средства измерения с эталонным того же вида;
- прямое измерение поверяемым измерительным прибором величины, воспроизводимой эталонной мерой;

²⁴ Под *сличением* средств измерений понимают нахождение несовпадений их метрологических характеристик.

- прямое измерение эталонным измерительным прибором величины, воспроизводимой поверяемой мерой;
- косвенное измерение размера физической величины, воспроизводимого поверяемой мерой или измерительным прибором.

1.5. О ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ

Говоря об эталонах и системах единиц необходимо сказать о фундаментальных физических константах (ФФК). Это независимые физические постоянные, являющиеся, как правило, характерными коэффициентами фундаментальных физических теорий. Документы [1.12, 1.13] дают такое определение: физическая константа – физическая величина, которая имеет неизменное значение при определенных обстоятельствах в избранной системе единиц. ФФК – такая физическая константа, значение которой, определенное экспериментально в избранной системе единиц, содержит информацию про наиболее общие (фундаментальные) свойства материи и остается неизменным при любых условиях. К числу ФФК относятся скорость света в вакууме c , электрическая (ϵ_0) и магнитная (μ_0) постоянные, постоянная Планка h , элементарный заряд электрона e и т.д. Различают универсальные, электромагнитные, атомные и физико-химические постоянные.

В табл.1.2 приведены значения универсальных и некоторых электромагнитных ФФК, согласованные XV Генеральной ассамблеи CODATA²⁵ в 1986 году [1.12, 1.13].

Как показано ниже, многие первичные эталоны, в частности, некоторых основных и ряда производных единиц (именно в области электричества) воспроизводят единицы, размеры которых выражаются через ФФК. Из одного этого факта следует важность определения точного значения ФФК.

В начале XX в. немецкий физик М. Планк показал, что основные единицы могут быть составлены из фундаментальных физических констант: скорости света c , постоянной Планка h и гравитационной постоянной G . Значения этих констант представлены в виде коэффициентов в уравнениях основных физических теорий – классической и квантовой электродинамике и общей теории относительности. Зная эти константы, можно вычислить единицы длины $l = \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} \approx 10^{-33}$ см, времени $t = \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} \approx 10^{-43}$ с и массы $m = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2 \cdot 10^{-8}$ кг²⁶ [1.3].

²⁵ CODATA – Комитет по численным данным для науки и техники, находящийся под юрисдикцией Международного совета научных обществ. В составе CODATA имеется рабочая группа по фундаментальным константам.

²⁶ В этих выражениях $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Дирака.

Таблица 1.2. Значения некоторых ФФК

Наименование величины	Обозначение	Исходное уравнение	Значение величины	Относительная погрешность 10^{-6}
Универсальные постоянные				
Скорость света в вакууме	c	–	299792458 м/с	точно
Магнитная постоянная	μ_0	–	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м = $= 12,566370614 \cdot 10^{-7}$ Гн/м	точно
Электрическая постоянная	ϵ_0	$(\mu_0 c^2)^{-1}$	$8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м	точно
Гравитационная постоянная	G		$(6,67259 \pm 0,00085) \cdot 10^{-11}$ м ³ кг ⁻¹ с ⁻²	128
Постоянная Планка	h		$(6,6260755 \pm 0,000040) \cdot 10^{-34}$ Дж·с	0,60
Планковская масса	m_p	$(\hbar c/2\pi G)^{1/2}$	$(2,17671 \pm 0,00014) \cdot 10^{-8}$ кг	64
Электромагнитные постоянные				
Элементарный заряд	e	–	$(1,60217733 \pm 0,00000049) \cdot 10^{-19}$ Кл	0,30
Квант магнитного потока	Φ_0	$h/2e$	$(2,06783461 \pm 0,00000061) \cdot 10^{-15}$ Вб	0,30
Постоянная Джозефсона	$K_{Дж}$	$2e/h$	$(4,8359767 \pm 0,0000014) \cdot 10^{14}$	0,30
Постоянная Клитцинга	R_K	h/e^2	$25812,8056 \pm 0,0012$ Ом	0,043
Гиромагнитное отношение протона	γ_p	–	$(26752,2128 \pm 0,0081) \cdot 10^4$ с ⁻¹ Тл ⁻¹	0,30

Однако планковские единицы находятся очень далеко от используемых на практике диапазонов. Кроме того, значение гравитационной постоянной, как и постоянной Планка, до сих пор известно с недостаточной точностью. Но самым главным недостатком планковских единиц является то, что они не воспроизводятся с помощью реальных физических объектов. Именно поэтому планковские единицы до сих пор не используют в метрологии.

В дальнейшем будет показана чрезвычайная важность ФФК для метрологии и, в частности для создания естественных эталонов, опирающихся на квантовые эффекты и ФФК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗД.1

- 1.1. ГОСТ 8.417-2002. ГСИ. Единицы величин. М.: Изд-во стандартов. – 2003. – 31 с.
- 1.2. Проненко В.И., Якирин Р.В. Метрология в промышленности. – К.: Техника, 1979. – 223 с.
- 1.3. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология: Учебник для вузов. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 492 с.
- 1.4. Кузнецов В.А., Ялушнина Г.В. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы): Учебн. пособие. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 336 с.
- 1.5. РМГ 29-99. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 2000. – 46 с.
- 1.6. ГОСТ 8.381-80 ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей. – М.: Изд-во стандартов. – 1981. – 9 с.
- 1.7. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993. – 101 p.
- 1.8. РМГ 43-2001. ГСИ. Применение “Руководства ИСО по выражению неопределенности измерений”. – 2003.
- 1.9. Захаров И.П., Кукуш В.Д. Теория неопределенности в измерениях. – Харьков: Консум, 2002. – 256 с.
- 1.10. ГОСТ 8.061-80. ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 8 с.
- 1.11. МИ 83-76. ГСИ. Методика определения параметров поверочных схем / Разработка ВНИИМ им.Д.И. Менделеева. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 68 с.
- 1.12. The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants / A report of the CODATA Taste Group on Fundamental Constants // CODATA Bulletin. – November, 1986. – № 63.
- 1.13. ГСССД 1-87. Фундаментальные физические константы.

ПЕРЕЧЕНЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К РАЗД.1

1. ГОСТ 8.057-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны единиц физических величин. Основные положения, М.: Изд-во стандартов, 1981. – 8 с.
2. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. ГСИ. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть I. Основные положения и определения. М.: Изд-во стандартов, 2002. – 24 с.
3. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 1988. – 132 с.
4. ГОСТ 8.395-80. ГСИ. Нормальные условия измерений при проверке. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1986. – 3 с.
5. РМГ 51-2002. ГСИ. Документы на методики поверки средств измерений. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 2003.
6. МИ 2630-2000. ГСИ. Рекомендация. Метрология. Физические величины и их единицы. – С.-Петербург: Изд-во стандартов, 2002. – 211 с.
7. МИ 1832-88. ГСИ. Методические указания. Сличения групп средств поверки одинакового уровня точности. Основные правила. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 16 с.

Раздел 2

ЭТАЛОНЫ ОСНОВНЫХ ЕДИНИЦ СИ

В данной главе, несколько выходящей за рамки названия книги, дается краткое описание принципов построения и аппаратных решений первичных эталонов основных единиц СИ. Их рассмотрению посвящено множество статей и монографий, поэтому с более подробным описанием этих эталонов и их метрологических особенностей читатель может ознакомиться в специальной литературе.

2.1. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

Отметим, что поиски наилучшего эталона времени, удовлетворяющего требованиям необходимой точности, воспроизводимости и доступности, имеют большую историю [2.1, 2.2]. Еще в древности счет времени основывался на периоде обращения Земли вокруг своей оси. До недавнего времени секунду определяли как $1/86400$ часть средних солнечных суток, т.е. эталоном времени являлась “вращающаяся вокруг своей оси Земля”. Позднее было обнаружено, что вращение Земли вокруг своей оси происходит неравномерно. Относительная погрешность определения единицы времени в соответствии с этим определением составляла около 10^{-7} , что было недостаточно для ряда практических применений и научных исследований. Поэтому в основу определения единицы времени положили период вращения Земли вокруг Солнца – тропический год (т.е. интервал между двумя весенними равноденствиями). Размер секунды был определен как $1/31556925,9744$ часть тропического года. Поскольку тропический год также изменяется (около 5 с за 1000 лет), то за основу был взят тропический год, отнесенный к 12 ч эфемеридного времени (равномерно текущее время, определяемое астрономическим путем) 0 января 1900 года, что соответствует 12 ч 31 декабря 1899 года. Это определение секунды было зафиксировано в Международной системе единиц 1960 г. Данное определение позволило на три порядка (в 1000 раз) снизить погрешность определения единицы времени, а эталоном времени стала “Земля, вращающаяся вокруг Солнца” [2.1].

Нетрудно видеть, что при такой формулировке секунда приобрела достаточную определенность, точность, однако утратила воспроизводимость (так как была привязана к определенному году) и не стала более доступной. Поэтому поиски наилучшего эталона времени, а также конструкции часов, с помощью которых можно было бы хранить единицу и шкалу времени, продолжались. Извест-

ны песочные, водяные, огненные часы древних, колесные более близкого к нам времени. Из механических конструкций наилучшего результата удалось добиться с помощью маятниковых часов. В 50-х годах прошлого века советский инженер Ф.М. Федченко (ВНИИФТРИ) усовершенствованием и термокомпенсацией подвеса маятника получил рекордные для маятниковых часов цифры по стабильности: суточная вариация их хода составляла $(2...3) \cdot 10^{-4}$ с.

Значительным успехом в дальнейшем совершенствовании часов была разработка в 1927 году Моррисоном¹ и Хорстоном (США) кварцевых часов. В наиболее совершенных конструкциях этих часов (генераторов) суточная нестабильность составляет $(1...2) \cdot 10^{-6}$ с.

Однако к настоящему “прорыву” в создании эталона времени привели успехи атомной и квантовой физики, которые позволили использовать частоту излучения или поглощения молекулами и атомами при энергетических переходах для определения размера единицы времени.

Первым шагом в этом направлении было использование электромагнитного излучения молекул и создание молекулярных аммиачных часов (1953, Г. Лиокс), нестабильность хода которых составляла около $1 \cdot 10^{-7}$. Все дальнейшие усилия не позволили снизить нестабильность менее $1 \cdot 10^{-8}$, но была установлена причина, ограничивающая возможности молекулярного генератора — хаотичное тепловое движение частиц газа (так называемый продольный эффект Доплера). Дальнейшие исследования позволили в значительной мере преодолеть влияние этого эффекта.

В начале шестидесятых годов группа ученых из NBS, США (ныне NIST) создала квантовый генератор на основе цезия, в котором удалось почти полностью избежать продольного эффекта Доплера. В первых моделях цезиевого генератора нестабильность составила около $1 \cdot 10^{-9}$, но в дальнейшем ее удалось существенно снизить. Лучшие современные цезиевые генераторы (стандарты частоты) имеют нестабильность на уровне 10^{-14} при воспроизводимости частоты порядка $5 \cdot 10^{-14}$.

Примерно в эти же годы были созданы первые водородные квантовые стандарты, которые в настоящее время, после серии усовершенствований по ряду параметров не уступают цезиевому, в частности, по стабильности. Считается, что цезиевые генераторы превосходят все другие по воспроизводимости, определяющей систематическую погрешность эталона, а водородные являются наилучшими по стабильности. Именно поэтому теперь определение и воспроизведение единицы времени осуществляется через период излу-

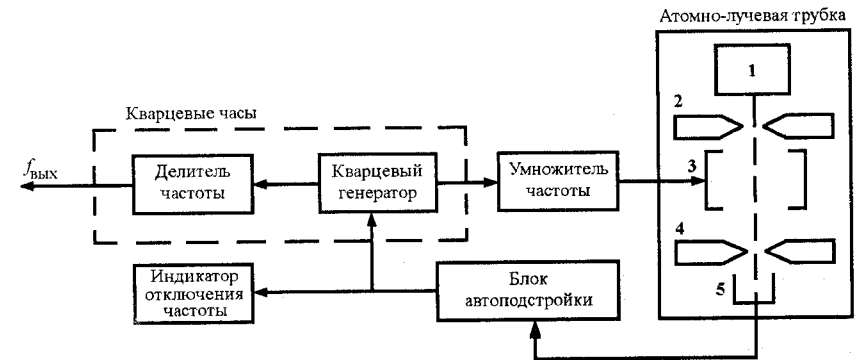


Рис. 2.1. Структурная схема цезиевого репера:

1 — источник атомов цезия-133; 2, 4 — магниты; 3 — резонатор; 5 — детектор

чения атомов цезия, а ее хранение реализуется с использованием водородных генераторов.

XIII Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ) в 1967 году приняла новое определение единицы времени — секунды: **“Секунда — это время, равное 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133”**. Выбор числа колебаний произведен таким образом, чтобы привязать “цезиевую” секунду к “тропической”.

В соответствии с определением единицы времени воспроизведение ее осуществляется цезиевым репером (рис. 2.1). Сущность работы репера заключается в стабилизации частоты кварцевого генератора по частоте излучения атомов цезия. Основой эталона является атомно-лучевая трубка. Атомы цезия-133 испускаются нагретым до температуры $100...150$ °С источником 1 (цезиевая печь). Пучок этих атомов попадает в область неоднородного магнитного поля, создаваемого магнитом 2. Угол отклонения атомов в таком магнитном поле определяется их магнитным моментом. Поэтому неоднородное магнитное поле позволяет выделить из пучка атомы, находящиеся на определенном энергетическом уровне. Эти атомы направляются в объемный резонатор 3, пролетая через который взаимодействуют с переменным электромагнитным полем СВЧ. Частота электромагнитных колебаний может регулироваться в небольших пределах.

При совпадении частоты электромагнитного поля с частотой квантовых переходов происходит поглощение энергии СВЧ поля, и атомы переходят в основное состояние. В магнитной системе 4 осуществляется вторичная сепарация, в результате чего атомы, находящиеся в соответствующем состоянии, направляются в детек-

¹ Morrison.

тор 5. Ток детектора при настройке резонатора на частоту квантовых переходов оказывается максимальным. Это является основой стабилизации частоты в цезиевом репере, в котором электромагнитные колебания кварцевого генератора (обычно 5 МГц) умножаются до частоты спектральной линии цезия, принятой за рабочую.

Системы с использованием атомно-лучевой трубки на цезии обычно строятся по пассивной схеме, когда КСЧ играет роль квантового дискриминатора, т.е. энергия СВЧ колебаний поглощается атомами цезия (см. рис. 2.1).

При отклонении частоты кварцевого генератора от номинального значения интенсивность переходов атомов и, следовательно, плотность атомного пучка на выходе трубки резко сокращается. Блок автоподстройки, связанный с трубкой, вырабатывает сигнал ошибки, возвращающий частоту кварцевого генератора к номинальному значению. Делитель частоты, находящийся в кварцевых часах, позволяет получить на их выходе требуемые частоты и временные интервалы (в том числе и частоту 1 Гц).

Воспроизведение единиц времени и частоты с помощью метрологического цезиевого репера классического пучкового типа МЦР-102 (ВНИИФТРИ) осуществляется с НСП около $3 \cdot 10^{-14}$ (рис. 2.2).

Отметим, что в последние годы создан цезиевый репер новой конструкции, получивший название “цезиевого фонтана” и работающий в настоящее время в эталонах Англии, Германии и США (рис. 2.3). Свое название он получил потому, что охлажденные до температуры около 1 мкК атомы цезия в определенном квантовом состоянии запускаются вверх в вакууме, а затем, под действием силы



Рис. 2.2. Цезиевый репер частоты (ВНИИФТРИ)

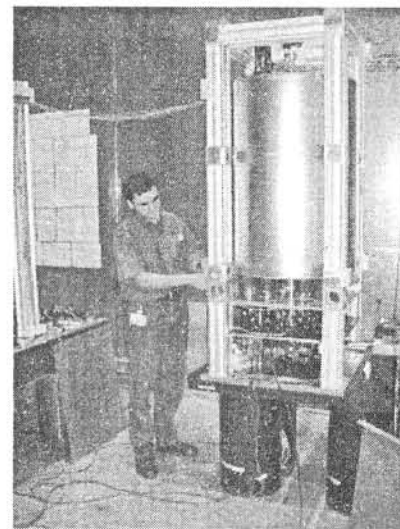
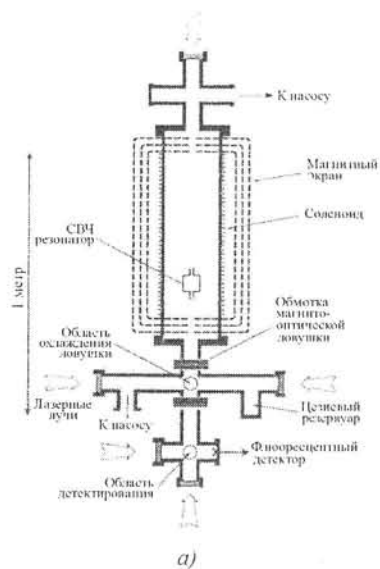


Рис. 2.3. Цезиевый фонтан NPL: структурная схема (а) и внешний вид (б)

тяжести опускаются вниз и в баллистическом полете проходят через резонатор, где взаимодействуют с магнитным полем, под действием которого переходят в другое состояние. По данным зарубежной прессы он позволяет снизить нестабильность частоты до нескольких единиц пятнадцатого знака за счет снижения практически до нуля тепловых скоростей атомов. Работы по “цезиевому фонтану” ведутся и в России. В частности, во ВНИИФТРИ с 1999 года совместно с Институтом лазерной физики РАН и ВНИИМС проводятся исследования по глубокому охлаждению для снижения погрешности воспроизведения частоты до $1 \cdot 10^{-15}$. Отработаны макеты ряда основных узлов нового эталона, проведены эксперименты по удержанию, охлаждению и детектированию атомов цезия-133. Достигнут эффект охлаждения атомов до ~ 10 мкК, в результате чего скорость движения атомов была понижена с сотен метров в секунду до единиц сантиметров в секунду.

Как было сказано, основным хранителем единиц времени и частоты является водородный генератор (рис. 2.4). В баллоне 1 под действием высокочастотного электрического разряда происходит диссоциация молекул водорода. Пучок атомов водорода через коллиматор 2, обеспечивающий его направленность, попадает в неоднородное магнитное поле многополюсного осевого магнита 3, где претерпевает пространственную сортировку (сепарацию). В резуль-

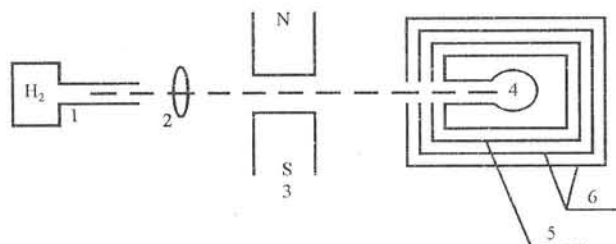


Рис. 2.4. Структурная схема водородного генератора:

1 – баллон с водородом; 2 – коллиматор; 3 – осевой магнит;
4 – накопительная ячейка; 5 – резонатор; 6 – многослойный экран

тате последней на вход накопительной ячейки 4, расположенной в объемном резонаторе 5, попадают лишь атомы водорода, находящиеся на необходимом энергетическом уровне. Находящийся внутри многослойного экрана 6 высокочастотный резонатор настроен на частоту используемого квантового перехода. Взаимодействие возбужденных атомов с высокочастотным полем резонатора (в течение примерно 1 с) приводит к их переходу на нижний энергетический уровень с одновременным излучением квантов энергии на резонансной частоте 1420405751,8 Гц. Это вызывает самовозбуждение генератора, частота которого обладает высокой стабильностью.

Водородный стандарт частоты обычно является активным устройством, т.е. играет роль квантового генератора, по частоте которого через систему синтеза частот и фазовой автоподстройки частоты подстраивается частота кварцевого генератора (рис. 2.5, 2.6) [2.3].

В состав первичного эталона времени и частоты развитых стран (включая Россию) обычно входят ряд систем, обеспечивающих выполнение его основных функций:

- аппаратура воспроизведения и хранения единиц времени и частоты, основными элементами которой являются цезиевый репер и водородные стандарты частоты;



Рис. 2.5. Структурная схема водородного стандарта частоты

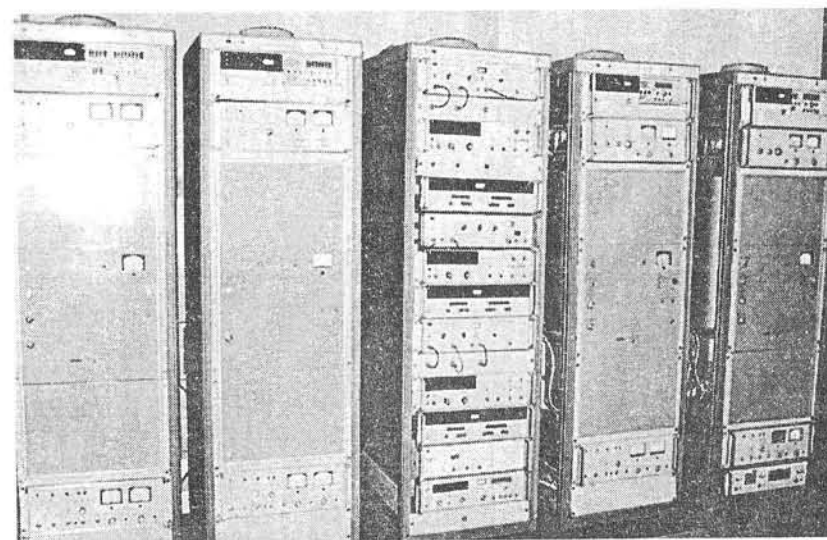


Рис. 2.6. Внешний вид водородных стандартов частоты

- аппаратура формирования и хранения шкал атомного и координированного времени;
- система внутренних сличений для проведения взаимных сличений частот и сигналов времени различных хранителей и проведения их корректировки (фазовые и частотные компараторы, измерители характеристик сигналов и др.);
- система внешних сличений, обеспечивающая передачу размеров единиц и шкалы времени вторичным и рабочим эталонам, а также сличение национальной шкалы со шкалами времени других стран. Это могут быть специальные устройства для сличения с помощью навигационных систем, телевизионная аппаратура, радиометеорологическая система, аппаратура фазовых сличений, переносимые квантовые часы.

Кроме того, в состав первичных эталонов некоторых стран (в том числе, России) входит комплекс аппаратуры радиооптического частотного моста (РОЧМ), представляющий собой систему переноса стабильных частот из радиочастотного в оптический диапазон (рис. 2.7). Это важно для многих областей науки и техники, в частности для создания единого эталона времени-частоты-длины, о чем будет сказано ниже [2.2, 2.5].

Приведем метрологические характеристики ГПЭ времени и частоты России² [2.4]:

² ГЭТ 1-98.

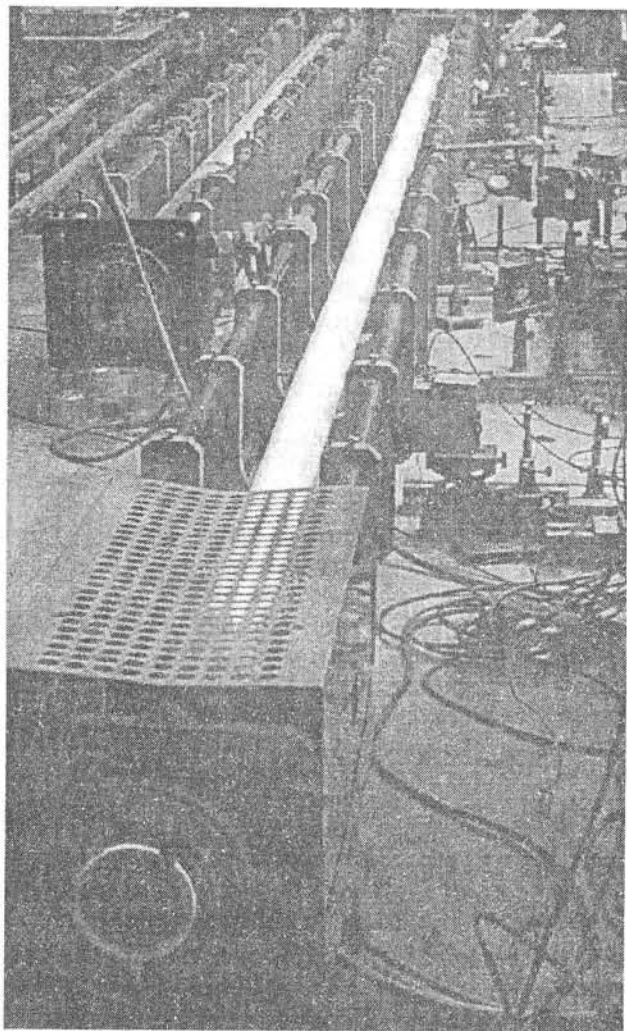


Рис. 2.7. Радиооптический частотный мост

- диапазон воспроизводимых значений интервалов времени составляет от $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^8$ с, частоты от 1 до 10^{14} Гц;
- СКО воспроизведения единиц не более $1 \cdot 10^{-14}$; с использованием РОЧМ (в диапазоне от 10^{10} – 10^{14} Гц) – $1 \cdot 10^{-12}$;
- НСП воспроизведения – не более $5 \cdot 10^{-14}$.

Эти характеристики соответствуют мировому уровню в данной области измерений.

2.2. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ

В конце XVIII в., в период введения метрической системы мер, Национальное собрание Франции приняло одну десятимиллионную часть четверти Парижского меридиана в качестве единицы длины – метра. В 1799 г., на основе геодезических измерений (триангуляций) части дуги меридиана от Дюнкерка до Барселоны экспедициями ученых во главе с Мешеном и Деламбером³, был изготовлен эталон метра в виде платиновой концевой меры, переданной на хранение в национальный Архив Франции и получившей название “метра Архива”. Метр Архива представляет собой платиновую линейку шириной около 25 мм, толщиной около 4 мм с расстоянием между концами, равным 1 м (рис. 2.8, а) [2.5].

Повторные измерения длины дуги меридиана, выполненные в XIX в., показали, что длина принятого метра несколько короче подлинного “естественного”. Так как в дальнейшем при более точных измерениях, вероятно, можно было получать различные значения основной единицы длины, Международная комиссия по прототипам метрической системы, созданная по инициативе Петербургской академии наук, в 1872 г. решила отказаться от естественного эталона метра и принять в качестве исходной меры длину метра Архива. В соответствии с решением этой комиссии был изготовлен 31 эталон метра в виде штриховой меры из сплава платины и иридия. Из них метр номер 6 при 0 °С оказался равным метру Архива и был принят в качестве международного прототипа метра. Остальные 30 эталонов были распределены между различными государствами.

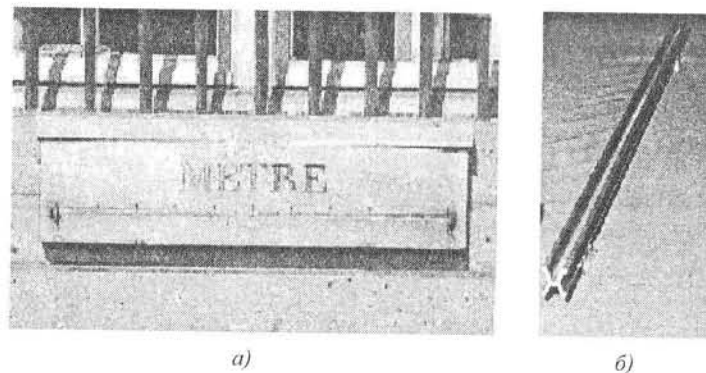


Рис. 2.8. Платиновая концевая мера длины (метр Архива) (а) и платино-иридиевый штриховой эталон метра (б), хранящиеся в архиве Франции

³ P.-F. Mechain, J.-D. Joseph Delambrer.

Эталон метра представляет собой платино-иридиевый брусок длиной 102 см, имеющий в поперечном сечении форму X, как бы вписанную в воображаемый квадрат, сторона которого равна 20 мм (рис. 2.8, б).

Платино-иридиевый эталон метра номер 28, полученный Россией в 1889 году, был в последующем утвержден в качестве Государственного эталона. Единица длины — метр определяется расстоянием между осями двух средних штрихов, нанесенных на брусок, при 0 °С. Хотя эталон был изготовлен из сплава иридия и платины, отличающегося значительной твердостью и устойчивостью к окислению, не было полной уверенности в том, что длина эталона с течением времени не изменится. Это объясняется тем, что металлические стержни, подвергшиеся ранее термической и механической обработкам, получают внутренние упругие напряжения, которые вызывают медленные микроструктурные изменения их структуры. При периодических сличениях национальных эталонов с международным прототипом невозможно обнаружить малых изменений их длины, так как все эталоны изготовлены из одного и того же сплава и, следовательно, претерпевают одни и те же изменения. Кроме того, штрихи, нанесенные на бруски, имеют некоторую ширину, что ограничивает погрешность сличения на уровне 10^{-7} м.

Поэтому необходимо было ввести новый естественный эталон метра. В 1895 г. II Генеральная конференция по мерам и весам признала, что естественным носителем размера метра может являться длина волны монохроматического света. После изучения спектральных линий ряда элементов было определено, что наибольшую точность воспроизведения единицы длины обеспечивает оранжевая линия изотопа криптона-86. XI Генеральная конференция по мерам и весам (1960 г.) приняла выражение размера метра в следующем виде: “Метр — длина, равная 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86”. Как известно, квант световой энергии излучается или поглощается атомом при переходе из одного энергетического состояния в другое. Частота излучения (поглощения) пропорциональна разности энергий состояний:

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

где E_1 и E_2 — уровни энергий; h — постоянная Планка.

Если $E_2 > E_1$, происходит излучение электромагнитных волн, если $E_2 < E_1$ — поглощение. При распространении излучения в вакууме со скоростью c , длина волны монохроматического света

$$\lambda = \frac{ch}{E_2 - E_1}.$$

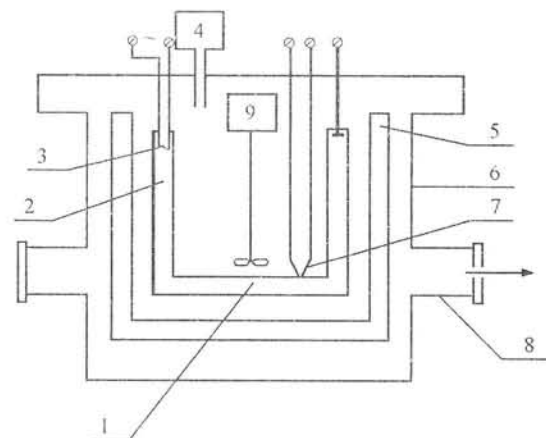


Рис. 2.9. Схема криптонового эталона метра:

- 1 — капилляр; 2 — газоразрядная трубка с криптоном;
- 3 — накаленный катод; 4 — манометр;
- 5 — сосуд Дьюара с жидким азотом;
- 6 — герметически закрывающаяся камера;
- 7 — терморубашка; 8 — окуляр;
- 9 — мотор с лопаткой для перемешивания жидкого азота

При исследовании спектров различных веществ было обнаружено, что элементы с четным номером в таблице Менделеева и четной атомной массой (так называемые четно-четные элементы) имеют линии спектра с простым контуром. Наиболее тонкие и симметричные линии излучения соответствуют переходу между вышеупомянутыми уровнями атома криптона-86. Метр в длинах световых волн воспроизводится интерференционным методом на специальной установке с помощью лампы, заполненной изотопом криптона-86. Схема лампы с криптоном приведена на рис. 2.9.

Для получения необходимых условий излучения линии криптон заключают в капилляр и охлаждают жидким азотом до 50–60 К. Возбуждение атомов криптона производят пропусканием через него электрического тока при напряжении порядка 1500 В. При этом капилляр, в котором происходит свечение возбужденных атомов, имеет оптический выход на интерференционный компаратор (рис. 2.10), с помощью которого определяется число длин волн, укладывающихся между штрихами меры (линейки), т.е. длина.

Применение этого метода позволило снизить погрешность воспроизведения метра примерно до $4 \cdot 10^{-9}$ м (СКО). Однако и этой точности оказалось недостаточно для решения ряда научно-технических задач. Поиски лучшего эталона продолжались.

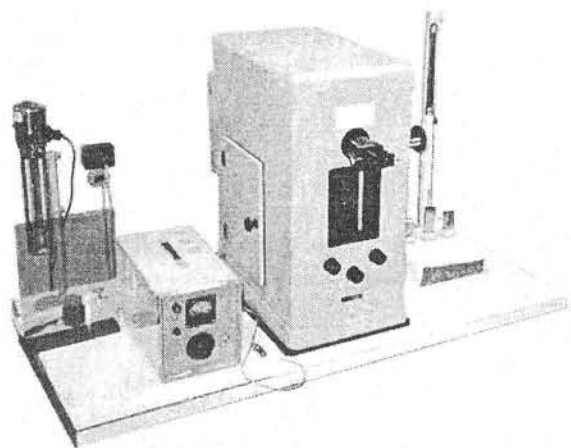


Рис. 2.10. Криптоновый эталон метра

В 1983 г. XVII Генеральная конференция по мерам и весам приняла следующее определение метра: “**Метр – единица длины, равная пути, проходимому в вакууме светом за $1/299792458$ долю секунды**”. При таком определении скорость света постулируется равной 299292458 м/с (точно), а метр определяется из соотношения

$$L = Vt, \quad (2.1)$$

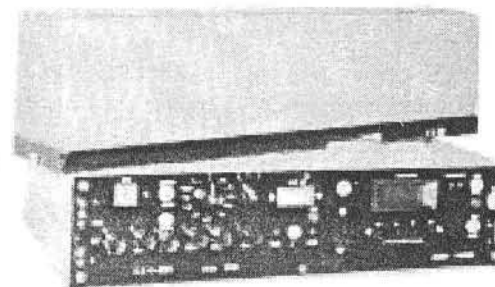
где $V = c$ – скорость света; $t = \frac{1}{299792458}$ с.

Данное определение принципиально отличается от определения 1960 г.: новый метр опирается на эталон времени и известное значение скорости света (константу), что создает предпосылки для создания единого эталона времени-частоты-длины.

Нетрудно видеть, что для реализации эталона длины в соответствии с этим определением необходимо решить следующие задачи:

- создать высокостабильный (по частоте) источник светового излучения;
- измерить частоту f этого излучения для определения длины его волны λ из соотношения $\lambda = c/f$;
- передать размер единицы длины из диапазона длин световых волн (микрометры) в диапазон практического использования (вблизи метра).

Таким образом, классическая структура эталона единицы длины включает в себя эталонный источник колебаний в видимой области спектра; систему стабилизации и измерения частоты; систему передачи размера единицы длины от “волнового метра” к его материальным носителям – штриховым и концевым мерам, измерителям и преобразователям [2.2].

Рис. 2.11. He – Ne/J₂ лазер

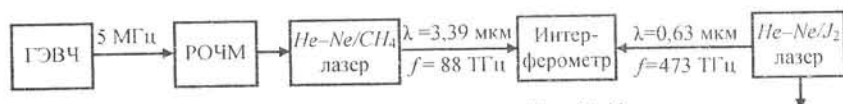
В состав эталонного источника излучения Государственного первичного эталона России в соответствии с рекомендацией ВIRM входит группа He – Ne/J₂ лазеров (рис. 2.11), стабилизированных с использованием эффекта насыщенного поглощения в йоде-127 (длина волны $\lambda = 0,633$ мкм, частота 473613 ГГц). Данный групповой источник имеет нестабильность $7 \cdot 10^{-12}$, СКО $S_0 = 1,4 \cdot 10^{-11}$, НСП $\theta = 5,5$ кГц ($\theta_0 \approx 10^{-11}$).

Точное измерение частоты лазерного источника осуществляется с помощью упомянутого выше радиооптического частотного моста, представляющего собой сложный измерительный комплекс, позволяющий измерить очень высокие частоты лазерного излучения относительно более низкой частоты (5 МГц) Государственного эталона времени и частоты, с погрешностью, близкой к эталонной. Основу РОЧМ составляют умножители частоты, СВЧ генераторы, лазеры, нелинейные элементы, обеспечивающие преобразование и синтез частот, системы фазовой автоподстройки частоты.

Однако напрямую измерить с помощью РОЧМ частоту He – Ne/J₂ лазера (около 473 ТГц) – чрезвычайно сложная задача, которую решили лишь несколько стран (США, Англия, Франция). В России эти измерения провели на частоте He – Ne/CH₄ лазера – 88 ТГц, в Украине – до 27 ТГц. Дальнейшие измерения (повышение измеряемой частоты) производят с помощью интерференционных методов, осуществляющих сравнение длин волн лазеров. В России таким методом проведены измерения частоты He – Ne/J₂ лазера при $\lambda = 0,633$ мкм определением отношений $\lambda_x/\lambda_{CH_4} = f_{CH_4}/f_x$ по измеренной напрямую частоте He – Ne/CH₄ лазера.

Структурная схема измерения частоты He – Ne/J₂ лазера представлена на рис. 2.12.

Следующая задача – передача размера единицы “волнового” метра от He – Ne/J₂ лазера к штриховым и концевым мерам длины осуществляется с помощью того же интерференционного метода под-

Рис. 2.12. Схема измерения частоты $He - Ne/J_2$ лазера

счетом числа $N + \delta$ полуволн $\lambda/2$, укладываемых на измеряемой длине $L = \frac{\lambda}{2}N + \delta$, где δ – дробная часть порядка интерференции (измеряется модуляционным методом).

Для проведения этих измерений в составе эталонов России и Украины имеется специальный интерференционный компаратор с лазерным интерференционным рефрактометром [2.2, 2.7] (рис. 2.13).

Заметим, что для высокоточных измерений длины с помощью интерферометров необходимо обеспечивать стабильные параметры окружающей среды, с высокой точностью измерять температуру, влажность, учитывать показатель преломления среды и т.д. Все это требует создания специальных термостатированных помещений и достаточно сложного дополнительного оборудования. В эталоне единицы длины России вся соответствующая аппаратура размещена в специальной термобарокамере, а процесс измерения и обработки результатов автоматизирован [2.13].

Приведем метрологические характеристики ГПЭ единицы длины России [2.4]:

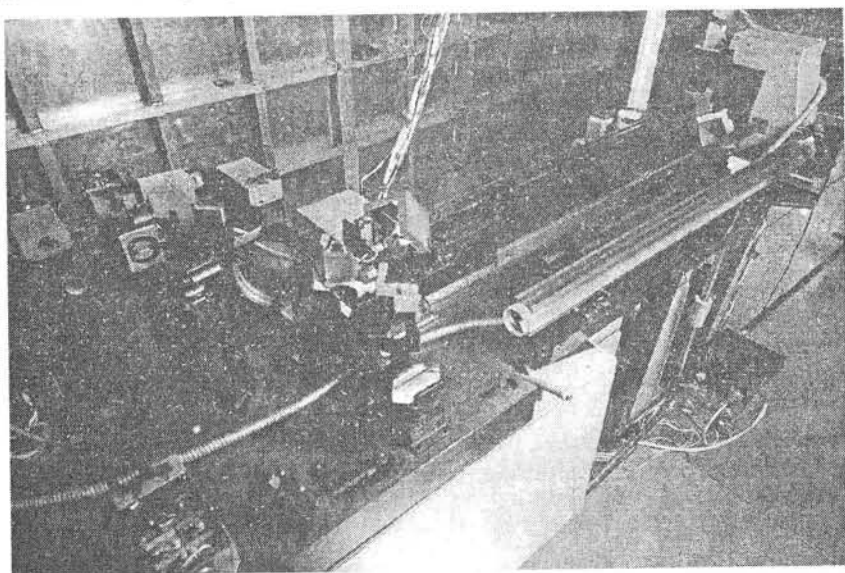


Рис. 2.13. Интерференционный компаратор (внутри термостата) ВНИИМ

- диапазон измерений, м 0–1,0;
- случайная погрешность (СКО) $2 \cdot 10^{-11}$;
- неисключенная систематическая погрешность $1,2 \cdot 10^{-11}$.

Эталон обеспечивает передачу размера единицы длины вещественным мерам длины, измерителям и преобразователям линейных перемещений в следующих поддиапазонах: $1 \cdot 10^{-3}$ –1,0 м; $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ м; $5 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ м.

Как было сказано, принятие нового определения метра привело к прямой связи единиц времени (частоты) и длины. Таким образом, в совокупности государственный эталон времени-частоты, система переноса частоты в оптический диапазон – РОЧМ, система стабилизированных лазеров и интерферометрический компаратор, формирующий и передающий размер метра его материальным носителям – штриховым и концевым мерам, составляют эталон единиц времени, частоты и длины [2.4, 2.6]. При этом в основе этого эталона лежат две константы: скорость света в вакууме и частота перехода атома цезия-133, числовые значения которых приняты по международному соглашению. Структура российского государственного эталона времени, длины и частоты приведена на рис. 2.14.

Особенностью этого эталона является то, что эталон времени и частоты и РОЧМ находится во ВНИИФТРИ (Московская область), а остальная аппаратура – во ВНИИМ им. Менделеева (г. С.-Петербург). Территориальная разобщенность этих институтов потребовала введения в состав эталона перевозимого $He - Ne/CH_4$ лазера, длина волны которого устанавливается по выходному лазеру РОЧМ и используется для точного измерения длины волны $He - Ne/J_2$ лазера, входящего в состав интерферометра.

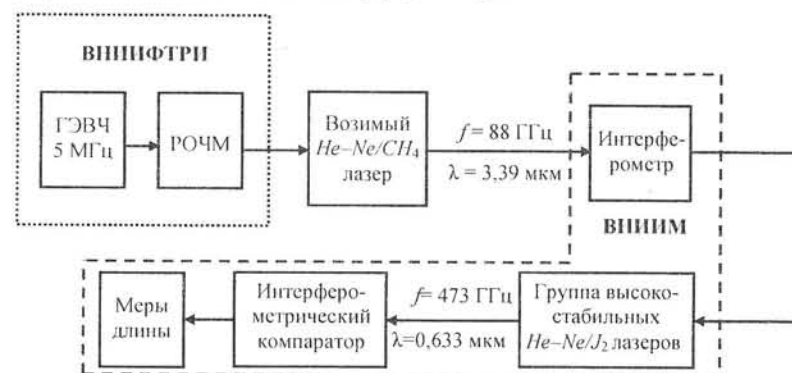


Рис. 2.14. Структура российского государственного эталона времени, частоты и длины

2.3. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ СИЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Из определения силы тока как физической величины видно, что единица силы тока равна количеству электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени. Поэтому естественно было бы принять за основную электрическую единицу некоторый заряд, например равный заряду электрона или определенного числа электронов. Однако в настоящее время невозможно создать с достаточной точностью эталон, опирающийся на такое определение. Вследствие этого пришлось отказаться от единицы количества электричества как основной электрической единицы и принять в качестве таковой единицу силы тока – ампер. Размер ампера можно было бы воспроизводить по следующим действиям, которые оказывает ток в окружающей среде:

- выделению теплоты при прохождении по проводнику;
- осаждению вещества на электродах при прохождении тока через электролит;
- пондеромоторным (механическим) действиям тока на магнит или проводник с током.

В 1893 г. Международный конгресс электриков в Чикаго принял первый эталон силы электрического тока, установив так называемый международный ампер. Ампер воспроизводился с помощью серебряного вольтметра и имел следующее определение: международный ампер – неизменяющийся ток, который, проходя через водный раствор азотнокислого серебра при соблюдении приложенной спецификации, выделяет 0,001118 г серебра в 1 с.

IX Генеральная конференция по мерам и весам в 1948 году приняла следующее определение ампера: “Ампер – сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади круглого поперечного сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывал бы между этими проводниками силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины”. Это определение действует и сегодня.

Приведенная формулировка содержит понятие бесконечно тонких и бесконечно длинных проводников, которые на практике осуществить невозможно. Однако на основе законов электродинамики можно рассчитать с высокой степенью точности силу взаимодействия токов, протекающих по проводникам конечных размеров.

Для реализации эталона ампера в ряде стран были сконструированы специальные “токовые весы” (рис. 2.15), представляющие собой рычажные равноплечие весы, в которых подвижная с одной стороны катушка уравнивается грузом, положенным на чашку с противоположной стороны весов [2.8].



Рис. 2.15. Схема токовых весов NPL

Подвижная катушка входит во вторую неподвижную соосно расположенную катушку. При прохождении по этим последовательно соединенным катушкам постоянного электрического тока возникает сила взаимодействия, подвижная катушка опускается, поэтому для уравнивания на чашку весов следует положить дополнительный груз. В соответствии с законом Ампера сила взаимодействия токов в катушках

$$F_1 = kI_1I_2 = kI^2,$$

где $I_1 = I_2 = I$ – сила тока в катушках; k – коэффициент пропорциональности, зависящий от формы и размеров катушек, принятого значения относительной магнитной проницаемости среды и др.

С другой стороны весов, в соответствии со вторым законом Ньютона, действует сила

$$F_2 = mg,$$

где m – масса уравнивающего груза; g – ускорение свободного падения в месте расположения весов.

При равновесии весов $F_1 = F_2$ расчетная формула для силы тока имеет вид

$$I = \sqrt{mg/k}.$$

Государственный первичный эталон ампера, созданный в СССР в 1975 г. во ВНИИМ им. Менделеева, представлял собой комплекс измерительных средств в следующем составе:

- токовые весы с гирей массой 8,16044 г и с дистанционным управлением;
- аппаратура для передачи размера единицы, в которую входит катушка сопротивления P342, получившая свое значение от первичного эталона ома.

При воспроизведении размера единицы тока этим эталоном НСП составляет около $1 \cdot 10^{-5}$, СКО – $4 \cdot 10^{-6}$.

Точности этого эталона, однако, было явно недостаточно для развития электрических измерений, а технические возможности ее повышения были фактически исчерпаны [2.5, 2.6].

Кроме того, даже такая точность была малодоступной для широкого круга потребителей, так как измерения по воспроизведению ампера с помощью токовых весов настолько трудоемки, что проводятся один раз в 5...10 лет [2.8].

В связи с успехами квантовой метрологии появилась возможность воспроизводить единицу силы тока более точно с помощью косвенных измерений в соответствии с законом Ома: $I = U/R$. При этом размеры единиц электрического напряжения U и сопротивления R воспроизводятся на основе квантовых эффектов Джозефсона (п. 3.5) и Холла (п. 3.6) соответственно.

Такой эталон в статусе национального создали некоторые страны, в том числе Россия. Отметим также, что мнения разных стран относительно статуса аппаратуры, воспроизводящей ампер через вольт и ом, расходятся. Ведущие в метрологическом отношении страны (США, Англия, Германия) не склонны считать такую аппаратуру первичным эталоном ампера и квалифицируют ее на уровне поверочной установки. И следует признать, что в этом есть своя логика. Дело в том, что теоретически предсказан и экспериментально проверен квантовый эффект “одноэлектронного туннелирования” или эффект Лихарева (у истоков эффекта стоял российский ученый Лихарев, ныне работающий за рубежом). Этот эффект проявляется в возникновении ступеней на оси тока вольтамперных характеристик сверхпроводящих джозефсоновских переходов малой емкости при их облучении СВЧ полем (в отличие от классического джозефсоновского эффекта, где эти ступени имеют место на оси напряжения). При этом расстояние между ступеньками (т.е. значение силы тока) зависит лишь от частоты электромагнитного поля f и константы – заряда электрона e : $I = 2ef$. Это открывает путь к построению независимого эталона ампера на основе этого эффекта. Поскольку квантовые эталоны вольта и ома уже существуют, создание квантового эталона ампера позволит замкнуть так называемый “треугольник квантовых эталонов” (рис. 2.16), что может стать серьезным импульсом к дальнейшему развитию метрологии в электричестве [2.9].

Экспериментально наблюдались ступени тока на вольтамперных характеристиках сверхпроводящих гранулированных пленок из олова на частотах порядка 90 ГГц. По данным ПТБ, в этом случае удалось воспроизвести ток порядка 1 нА на частоте облучения 4,7 ГГц (погрешность не приводится). Экспериментальные данные,

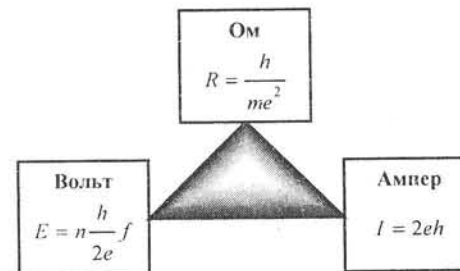


Рис. 2.16. “Треугольник” квантовых эталонов

тем не менее, пока весьма скромные и не позволяют рассматривать вопрос о практическом построении эталона. Однако ведущие центры метрологии в мире, включая Россию, продолжают работы в этом направлении.

Внешний вид экспериментальных устройств, реализующих эффект одноэлектронного туннелирования, приведен на рис. 2.17.

Рассмотрим созданный в России государственный первичный эталон ампера на основе косвенных измерений. Эталон состоит из двух комплексов средств измерений, один из которых включает аппаратуру для воспроизведения тока на основе квантовых эффектов, другой – получения малых значений силы тока на основе методов электрометрии [2.10, 2.11].

Комплекс для воспроизведения тока на основе квантовых эффектов состоит из меры напряжения на базе эффекта Джозефсона, набора криогенных равнономальных резисторов, коммутируемых сверхпроводящим переключателем, четырех эталонных мер

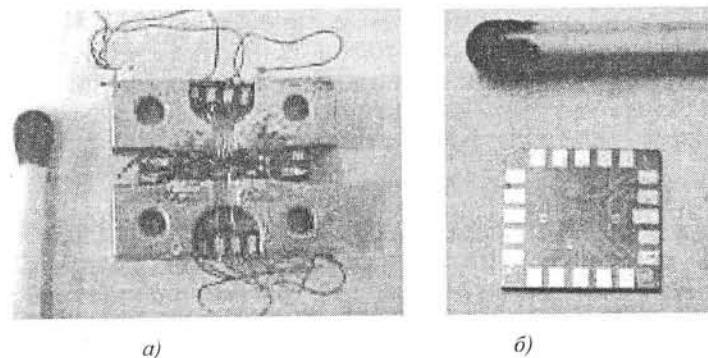


Рис. 2.17. Гетероструктура GaAs/GaAlAs, разработанная в Кембриджском университете (а) и электронная микросхема, содержащая четыре транзистора, изготовленная в РТВ (б)

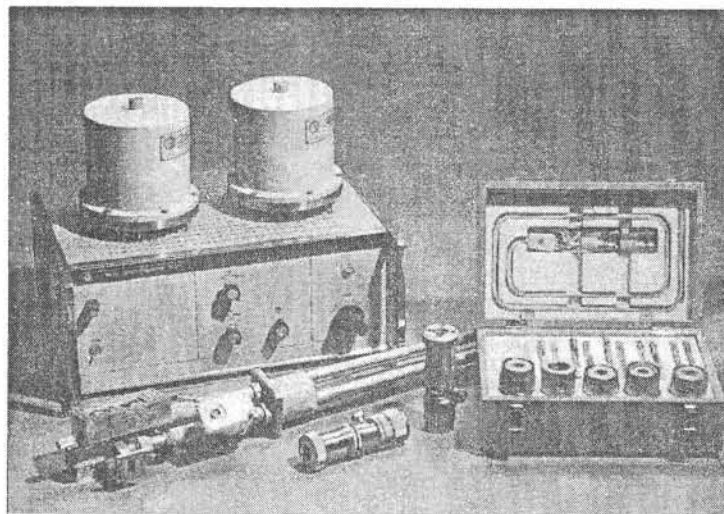


Рис. 2.18. Набор эталонных преобразователей

электрического сопротивления 1 Ом (рис. 2.18), аттестованных с помощью эталона на квантовом эффекте Холла (КЭХ), криогенного токового компаратора с нуль-индикатором на СКВИД⁴ (рис. 2.19, а). Комплекс представляет собой многозначную меру постоянного тока с номинальными значениями 1 мА и 1 А.

Значение воспроизводимого тока определяется из соотношения:

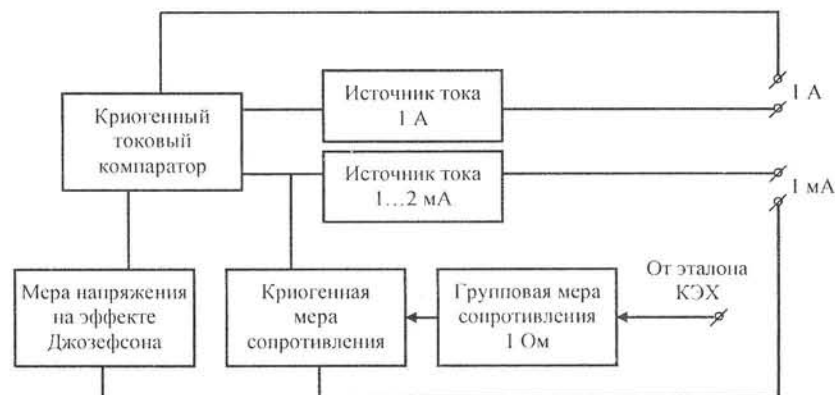
$$I = mnfK_{\text{Дж}}^{-1}R_{\text{К}}^{-1}$$

где n , m — целые числа; f — частота облучения; $K_{\text{Дж}}$ и $R_{\text{К}}$ — константы Джозефсона и Клитцинга, соответственно.

Основными элементами второго комплекса (рис. 2.19, б), воспроизводящего силу постоянного тока в диапазоне $10^{-16} \dots 10^{-9}$ А, является мера емкости C_0 , мера линейно изменяющегося напряжения, измерители напряжения U_d и времени T_d , компаратор. В режиме воспроизведения выходной ток $I_0 = U_d \frac{C_0}{T_d}$.

В режиме компарирования происходит компенсация заряда, создаваемого на одной из пластин конденсатора измеряемым током I_x , зарядом, создаваемым на другой пластине конденсатора известным током I_0 , т.е. осуществляется встречное включение многозначной меры тока I_0 и аттестуемого источника I_x . Тогда $I_x = I_0$.

⁴ СКВИД — сверхпроводящий квантовый интерференционный детектор — высокочувствительный прибор на одной из разновидностей эффекта Джозефсона.



а)



б)

Рис. 2.19. Структурная схема государственного эталона силы тока России

Метрологические характеристики эталона приведены в табл. 2.1.

В качестве рабочих эталонов постоянного тока 1-го разряда в России используются резистивно-емкостные установки (УМПТ-5), резистивные меры тока (ПЗ20, ПЗ21, МП3001).

Таблица 2.1. Метрологические характеристики эталона силы тока

Диапазон тока, А	СКО	НСП
1.0; $1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$
$1 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$
$1 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$(1 \dots 1.5) \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$

2.4. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура⁵ окружающей среды, предметов, несмотря на осязательную доступность, является *показателем активности*, т.е. качественной характеристикой. Это вносит существенные особенности в ее измерения, так как обычно определение активной величины основано на взаимодействии каких-либо процессов.

Особенность термодинамической температуры состоит также в том, что она является неаддитивной (не суммируемой) величиной. Поэтому, если для эталонов длины, массы и других аддитивных величин можно опираться на воспроизведение одного размера единицы (метра, килограмма), то для температуры воспроизведение одной эталонной точки не позволит точно установить другие температурные точки. Таким образом, измерение температуры требует осуществить точное воспроизведение многих температурных точек, совокупность которых образует температурную шкалу.

Измерения температуры T с момента изобретения термометра основывались на применении того или иного термометрического вещества, изменяющего свой объем или давление при изменении температуры. Отсчет температуры в этих случаях осуществляется по равномерной шкале

$$T = T_0 + (\theta - \theta_0) \frac{T_1 - T_0}{\theta_1 - \theta_0},$$

где θ , θ_0 , θ_1 — соответственно отсчет по шкале термометра и положения реперных точек T_0 , T_1 . В качестве реперных (опорных) точек выбирали точки, соответствовавшие температурам перехода термометрического вещества из одного агрегатного состояния в другое (температуры плавления и кипения). В этих точках температура вещества постоянна, пока осуществляется переход.

В 1641 г. был создан первый спиртовой термометр, а в 1655 г. — ртутный. В 1665 г. Христиан Гюйгенс⁶ и Роберт Гук⁷ предложили точки плавления льда и кипения воды в качестве основных для термометра. Позднее были предложены температурные шкалы. Все они основывались на равномерном делении интервала между реперными точками на определенное число единиц (градусов).

В 1710 г. немецкий физик Габриель Даниель Фаренгейт⁸ создал первый практически пригодный спиртовой, а в 1714 году — ртутный термометры, в которых за 0 градусов была взята самая низкая тем-

⁵ От латинского *temperatura* — нормальное состояние, физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

⁶ Huygens.

⁷ Hook.

⁸ Fahrenheit.

пература зимой 1709 г., а за 12 градусов — температура тела здорового человека. Впоследствии эта шкала была трижды последовательно разделена пополам, в результате чего в 1724 году Фаренгейт предложил для построения термодинамической шкалы две точки: температуру смеси льда с солью и нашатырем, которую он обозначил 0, и температуру тела здорового человека — числом 96. За единицу температуры — градус — было принято 1/180 интервала между точкой плавления льда (32 °F) и точкой кипения воды (212 °F) по этой шкале.

Шкала, предложенная французским ученым Рене Антуаном Реомюром⁹ (1730 г.), имеет две постоянные точки, более удобные для воспроизведения: точку таяния льда 0 градусов и точку кипения воды 80 градусов.

Шкала, предложенная в 1742 году шведским астрономом Андерсом Цельсием¹⁰, имеет те же реперные точки, что и шкала Реомюра, только интервал между ними делится на 100 градусов.

Показания термометров зависели от рода термометрического вещества и условий его теплового расширения (рис. 2.20).

Исследования показали, что в природе не существует физических свойств, связанных линейно с температурой. Поэтому указанным методом можно построить столько шкал, сколько выбрано термометрических веществ. Совпадая в основных реперных точках T_0 , T_1 эти шкалы давали расходящиеся значения температур как внутри диапазона $[T_0, T_1]$, так и вне его.

Английский ученый У. Томсон (Кельвин)¹¹ показал, что можно установить температурную шкалу, которая не зависит от рода термометрического вещества. Единственной реперной точкой в ней предлагалось тройная точка воды (точка равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах).

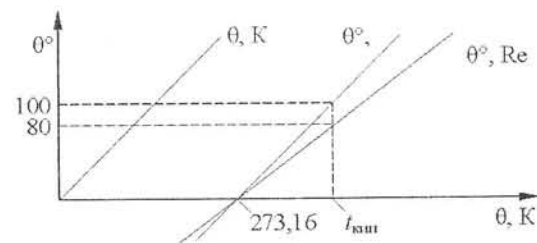


Рис. 2.20. Температурные шкалы

⁹ Reaumur.

¹⁰ Celsius.

¹¹ Thomson (Kelvin).

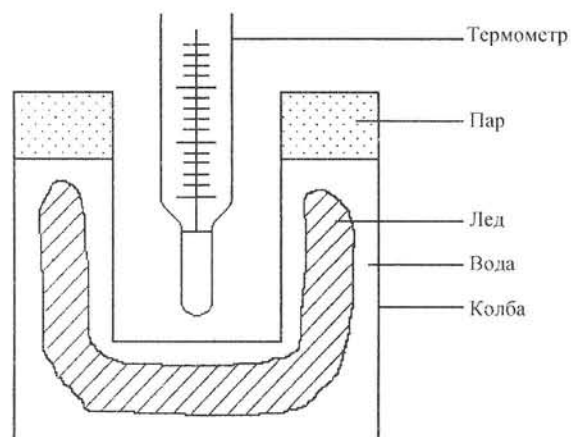


Рис. 2.21. Схема сосуда, воспроизводящего тройную точку воды

С 1960 г. (с уточнением 1967 г.) ГКМВ единицей термодинамической температуры принят **Кельвин** – $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Допустимо выражение термодинамической температуры в градусах Цельсия.

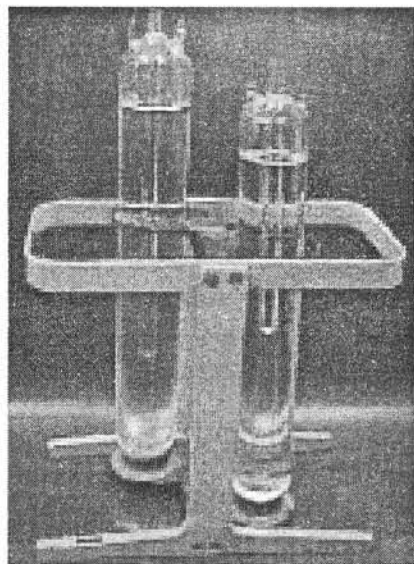


Рис. 2.22. Ячейка, воспроизводящая тройную точку воды (ВНИИМ)

Тройная точка воды может быть воспроизведена с точностью $0,0001\text{ }^\circ\text{C}^{12}$. Схема сосуда, воспроизводящего тройную точку воды, изображена на рис. 2.21, а его внешний вид – на рис. 2.22. Он изготовлен из кварца и заполнен водой высшей степени очистки. За температуру реперной точки была принята температура $273,16\text{ К}$ точно. Остальная шкала должна была строиться на основании формулы

$$T_2 = T_1 Q_2 / Q_1,$$

где Q_1 – количество тепла, получаемого от нагревателя любым

¹² Погрешность воспроизведения температурных точек таяния льда и кипения воды на порядок больше, чем погрешность воспроизведения тройной точки воды.

Таблица 2.2. Основные реперные точки МТШ-90

Состояние фазового равновесия	Вещество	Значение по МТШ-90	
		$^\circ\text{C}$	К
Давление насыщенных паров гелия	^3He	-272,50	0,65
	^4He	-268,15	5
Тройная точка водорода	H	-259,346	13,803
Тройная точка неона	Ne	-248,593	24,556
Тройная точка кислорода	O	-218,791	54,358
Тройная точка аргона	Ar	-189,344	83,805
Тройная точка ртути	Hg	-38,834	234,315
Тройная точка воды	H_2O	+0,01	273,16
Точка плавления галлия	Ga	+29,764	302,914
Точка плавления индия	In	+156,598	429,748
Точка плавления скандия	Sc	+231,928	505,078
Точка плавления цинка	Zn	+419,527	692,677
Точка плавления алюминия	Al	+660,323	933,473
Точка плавления серебра	Ag	+961,78	1234,93
Точка плавления золота	Au	+1064,18	1337,33
Точка плавления меди	Cu	+1084,62	1357,77

телом; Q_2 – количество тепла, отдаваемого телом охладителю при обратимом цикле Карно; T_1 и T_2 – температуры нагревателя и охладителя, причем температуре T_2 придается значение тройной точки воды. В этом случае для определения температуры T_1 необходимо знать лишь отношение количеств теплоты.

Воспроизведение термодинамической шкалы температур представляет большую трудность. Поэтому IX Генеральная конференция по мерам и весам в 1948 г. установила **практическую** температурную шкалу, воспроизводимую по определенным постоянным реперным точкам (табл. 2.2). Температура в реперных точках определяется газовым термометром, использующим соотношение между объемом, давлением и температурой идеального газа (рис. 2.23). В газовом термометре ртутный манометр 5 измеряет давление постоянного объема газа в баллоне 1.

Преимущество газового термометра по сравнению с ртутным заключается в том, что расширение газа в 20 раз больше, чем ртути, и тем самым влияние температурного расширения стекла (одного из основных источников погрешности ртутного термометра) сводится к минимуму. Экстраполяция зависимости давления газа от температуры дает при нулевом давлении (и объеме) идеального газа значение абсолютного нуля $-273,15\text{ }^\circ\text{C}^{13}$ (рис. 2.24).

¹³ Температура точки таяния льда, взятой за $0\text{ }^\circ\text{C}$ в шкале Цельсия, меньше температуры тройной точки воды на $0,01\text{ }^\circ\text{C}$.

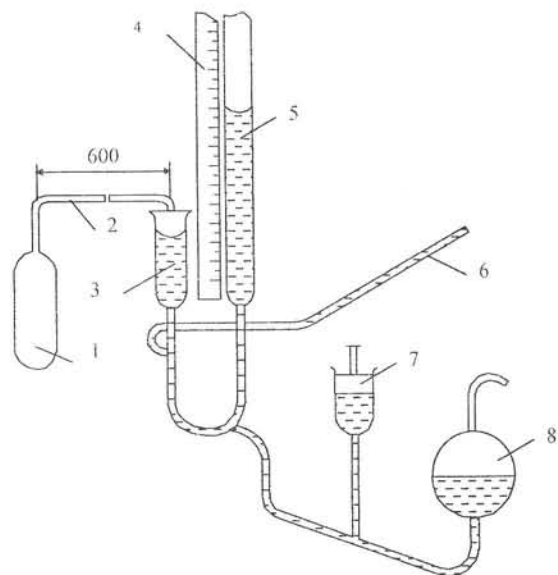


Рис. 2.23. Принципиальная схема газового термометра:

- 1 – рабочий резервуар; 2 – капилляр; 3 – короткое колено манометра;
 4 – шкала; 5 – длинное колено манометра;
 6 – трубка для заполнения системы ртутью;
 7 – поршень; 8 – резервуар с ртутью

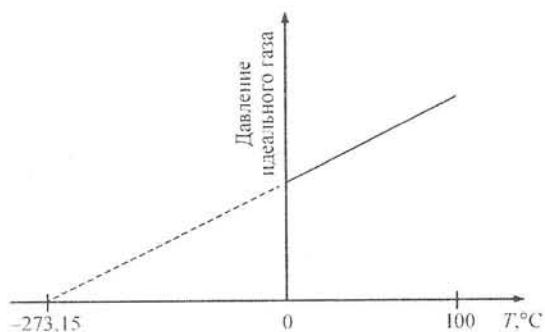


Рис. 2.24. Шкала газового термометра

Это наиболее точные, но очень трудоемкие измерения, выполняемые лишь в немногих ведущих метрологических лабораториях мира. Основная сложность их состоит в учете несоответствия реального газа идеальному.

Таким образом, в общем случае, эталон состоит из устройств, реализующих приведенные в таблице реперные точки, а также пла-

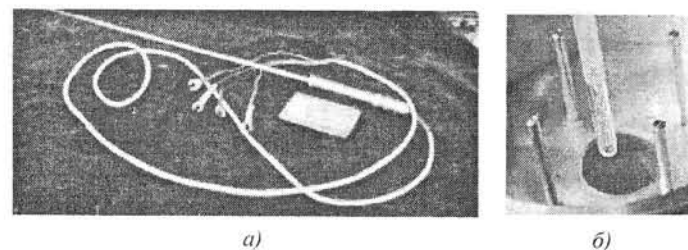


Рис. 2.25. Платиновые термометры сопротивления ВНИИМ (ЭТС-100) (а) и ВНМ (б)

тинового термометра сопротивления (рис. 2.25). Последний играет роль интерполяционного прибора, осуществляющего привязку всей шкалы температур к этим реперным точкам.

В России температурная шкала МТШ-90 поддерживается двумя государственными эталонами. Первый, созданный во ВНИИМ, имеет диапазон измерений $0 \dots 2500 \text{ }^\circ\text{C}$ и представляет собой комплекс аппаратуры, включающий [2.4]:

- эталон Кельвина (сосуд тройной точки воды);
- установку для воспроизведения реперных точек плавления галлия, затвердевания индия, олова, алюминия, цинка, серебра, золота;
- группу из трех температурных ламп, аттестованных при температурах затвердевания золота, серебра и меди;
- платиновые термометры в диапазонах $0 \dots 1064,18 \text{ }^\circ\text{C}$;
- фотоэлектрическую аппаратуру, используемую для построения температурной шкалы оптическими методами (рис. 2.26);
- аппаратуру для точного измерения электрического сопротивления (мост-компаратор).

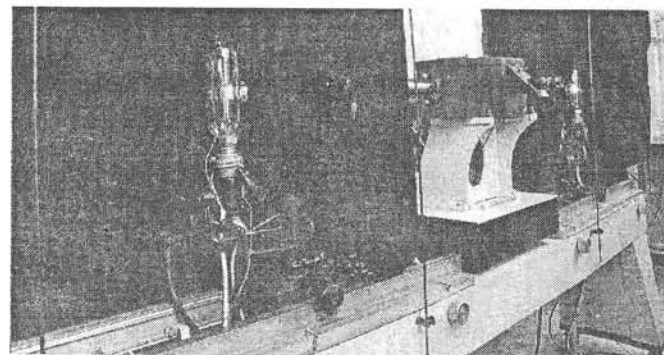


Рис. 2.26. Спектрокомпаратор из состава фотоэлектрической аппаратуры для построения температурной шкалы оптическим методом

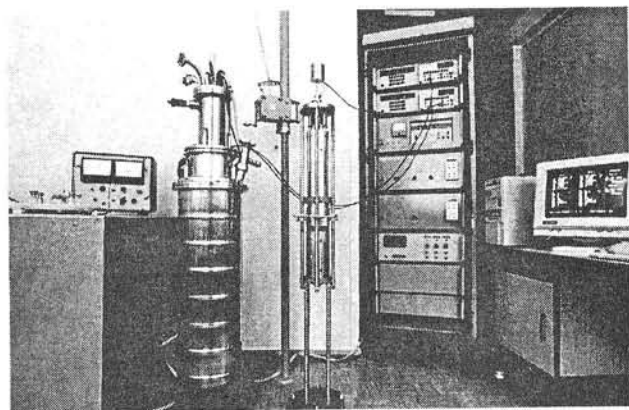


Рис. 2.27. Эталон единицы температуры в диапазоне 13,8...273,16 К (ХГНИИМ, Украина)

Для эталона НСП составляет от $5 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$, СКО – от $5 \cdot 10^{-5}$ до $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Второй эталон в диапазоне температур 0,8...303 К создан и хранится во ВНИИФТРИ. Он включает в себя группу установок для воспроизведения реперных точек в этом диапазоне, платиновые термометры сопротивления, а также НСП эталона находится в интервале от $1 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ К, СКО – от $5 \cdot 10^{-4}$ до 1 К [2.5].

Государственный эталон Украины работает в диапазоне 13,8...2800 К (рис. 2.27). Его НСП составляет от $2 \cdot 10^{-4}$ до 0,5 К, СКО – от $5 \cdot 10^{-4}$ до 1 К [2.12].

Необходимо также отметить, что и во ВНИИМ и во ВНИИФТРИ в составе эталонной базы в области температурных измерений имеется и газовый термометр – уникальное средство, обеспечивающее возможность абсолютных измерений термодинамической температуры с точностью, недостижимой в настоящее время другими методами. Подобный по назначению и возможностям комплекс имеется только в самых крупных метрологических центрах мира [2.13].

2.5. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ СИЛЫ СВЕТА

Сила света источника видимого излучения определяется световым потоком, воспринимаемым глазом человека, с учетом его чувствительности к различным участкам частотного спектра. Единица силы света и ее эталоны прошли большую эволюцию. В Германии с 1869 г. использовалась парафиновая свеча диаметром 20 мм и высотой пламени 50 мм. В 1893 г. Международным конгрессом элек-

триков за эталон единицы силы света была принята амилацетатная лампа с высотой пламени 40 мм при его ширине 8 мм [2.5].

С 1924 г. по решению Международной комиссии по освещенности основным световым эталоном (эталон яркости) был признан полный излучатель (или “абсолютно черное тело”), выполняемый по особой спецификации.

В 1948 году ГКМВ приняла новое название для единицы силы света – кандела (поскольку на французском языке свеча – chandelle). Определение канделы также неоднократно уточнялось. В 1979 г. было принято ныне действующее определение: **кандела – сила света в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.**

Это определение устанавливает связь световых и энергетических величин, которая определяется функцией световой эффективности

$$K_v(\lambda) = \frac{\Phi_v(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} = K_m V(\lambda),$$

где $V(\lambda)$ – функция, описывающая усредненную спектральную характеристику человеческого глаза (относительную световую эффективность); K_m – значение максимальной световой эффективности; $\Phi_v(\lambda)$ – световой поток в люменах; $\Phi_e(\lambda)$ – поток излучения в ваттах.

Максимальная световая эффективность, как обратная величина электрической силы света $\left(\frac{1}{683} \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}\right)$, была принята в качестве метрологической константы, равной 683 лм/Вт на частоте излучения $540 \cdot 10^{12}$ Гц, соответствующей максимальной чувствительности человеческого глаза (зеленая область видимого света).

С помощью упомянутого выше абсолютно черного тела кандела может воспроизводиться следующим образом (рис. 2.28).

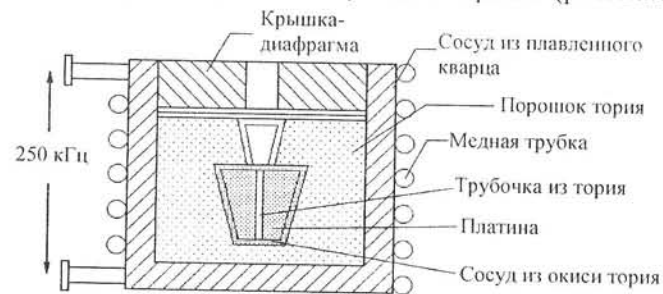


Рис. 2.28. Полный излучатель

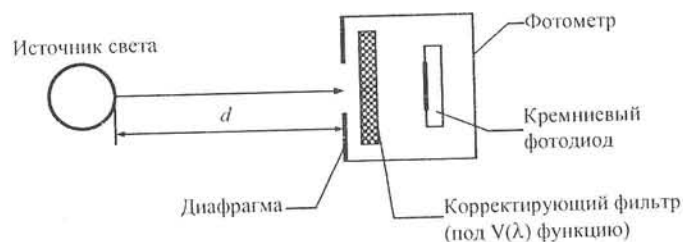


Рис. 2.29. Криогенный приемник-радиометр

Полный излучатель представляет собой небольшую трубочку из окиси тория диаметром около 2,5 мм, погруженную в чистую платину. Платина, в свою очередь, находится в сосуде, спрессованном из порошка плавленной окиси тория, окруженном порошком из окиси тория. Все это помещено во внешний сосуд из плавленного кварца. Внешний сосуд окружен небольшим числом витков медной охлаждаемой водой трубки. По трубке пропускается ток высокой частоты (около 250 кГц), который нагревает платину до ее плавления. Вместе с платиной нагревается и трубочка из тория. Свет излучается из полости трубочки через отверстие в верхней ее части. Яркость полного излучения при температуре затвердевания платины с помощью фотометра сравнивается с яркостью особых ламп накаливания, используемых в качестве вторичных эталонов. Частота монохроматического излучения полного излучателя находится в зеленой области видимого света и соответствует максимальной чувствительности человеческого глаза.

Другие световые единицы, такие как люмен (единица светового потока) и люкс (единица освещенности) воспроизводятся на основе кандели.

Новое (1979 г.) определение кандели позволяет ее реализовать кандели не только на базе черного тела, но и “абсолютно чувствительных” (криогенных) приемников (метод эталонного измерителя).

В настоящее время некоторые национальные метрологические центры создали эталоны кандели на базе таких криогенных приемников – радиометров (рис. 2.29).

Криогенный радиометр охлаждается жидким гелием при температуре 5 К и работает на принципе электрического замещения. Сначала определяется абсолютная спектральная чувствительность $s(\lambda)$ (А/Вт) на основе шкалы абсолютной спектральной чувствительности и измеряется площадь апертуры A . Световая эффективность S_λ (А/лк) определяется из выражения

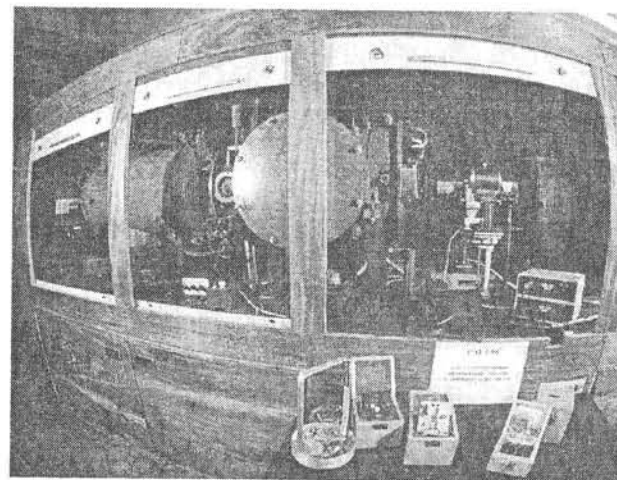


Рис. 2.30. Государственный первичный эталон единицы силы света (ВНИИОФИ)

$$S_\lambda = \frac{A \int S(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{K_m \int S(\lambda) V(\lambda) d\lambda},$$

где $S(\lambda)$ – распределение измеряемой спектральной мощности света.

Сила света (кд) определяется по формуле

$$J_v = \frac{d^2}{\Omega_0} \frac{i}{S_\lambda},$$

где d – расстояние от источника света до плоскости диафрагмы (в метрах); Ω_0 – телесный угол (в стерadianах); i – выходной ток (в амперах) фотометра.

Шкала спектральной чувствительности в современных эталонах воспроизводится специальными приемниками-ловушками (трап-детекторами) на кремниевых фотодиодах (более подробно этот вопрос здесь не рассматривается).

Государственный первичный эталон единицы силы света России создан во ВНИИОФИ на основе абсолютно черного тела и включает (рис. 2.30) [2.4]:

- первичный фотометр;
- высокотемпературную модель абсолютно черного тела;
- систему определения характеристик излучения;
- систему определения спектрального коэффициента пропускания светофильтра;
- систему для передачи размера единицы.

Диапазон измерений составляет 30...15000 кд, НСП находится на уровне $0,2 \cdot 10^{-2}$, СКО – $1 \cdot 10^{-3}$.

На Украине создан свой государственный эталон на основе криогенного радиометра и получены близкие метрологические характеристики [2.16]. Следует полагать, что дальнейшая практика эксплуатации и развития эталонов выявит предпочтительность того или иного метода построения эталона.

2.6. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ МАССЫ

Определение единицы массы – килограмма было принято III Генеральной конференцией по мерам и весам 1901 г. в следующем виде: **“Килограмм – единица массы представлен массой международного прототипа килограмма”**.

При установлении метрической системы мер в качестве единицы массы была принята масса 1 кг, равная массе 1 дм³ чистой воды при температуре ее наибольшей плотности (4 °С). В этот период проводились точные измерения массы известного объема воды последовательным взвешиванием в воздухе и воде пустого бронзового цилиндра с тщательно определенными размерами.

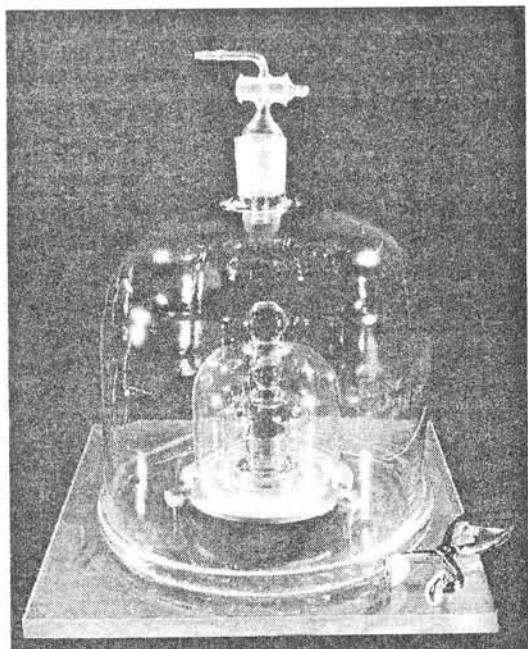


Рис. 2.31. Прототип килограмма, хранящийся в архиве Франции

Изготовленный на основе этих взвешиваний первый прототип килограмма представлял собой платиновую цилиндрическую гирю высотой 39 мм, равной его диаметру и был передан на хранение в Национальный Архив Франции (рис. 2.31).

В XIX в. было произведено повторное тщательное измерение массы 1 дм³ воды, при этом было установлено, что эта масса немного (приблизительно на 0,28 г) меньше массы прототипа Архива.

Для того, чтобы при дальнейших, более точных взвешиваниях, не менять значения единицы массы, Международной комиссией по эталонам метрической системы в 1872 г. было решено за единицу массы принять массу прототипа килограмма Архива.

В 1883 г. были изготовлены 42 прототипа килограмма из платино-иридиевого сплава (90% платины и 10% иридия) фирмой “Джонсон, Маттей и К^о”. Копии № 12 и № 26 получены по жребию Россией в 1889 г. согласно Метрической конвенции. Копия № 12 стала государственным эталоном России. Эталон хранится на кварцевой подставке под двумя стеклянными колпаками в стальном шкафу особого сейфа, находящегося в термостатированном помещении ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, г. С.-Петербург.

В настоящее время в состав государственного первичного эталона единицы массы России входят оба прототипа килограмма № 12 и № 26, набор эталонных гирь от 1 до 500 г из платино-иридиевого сплава, эталонные весы номер 1 (Рупрехта) и номер 2

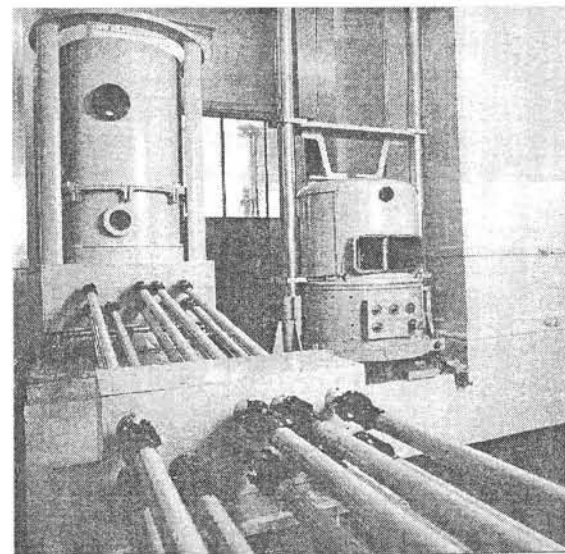


Рис. 2.32. Эталонные весы с наибольшим пределом взвешивания 1 кг

(ВНИИМ) с дистанционным управлением, предназначенные для передачи размера единицы массы от первичного эталона вторичным и рабочим эталонам (рис. 2.32). Эталонные весы имеют предел взвешивания 1 кг, 200, 25 и 3 г.

Погрешность воспроизведения массы эталоном килограмма (СКО) не превышает $2 \cdot 10^{-9}$ [2.4]. Несмотря на все предосторожности, как показывают результаты международных сличений, за 90 лет масса эталонной гири увеличилась на 0,02 мг. Объясняется это адсорбцией молекул из окружающей среды, оседанием пыли на поверхность гири и образованием тонкой коррозионной пленки. С учетом сказанного, а также из-за значительных практических неудобств работы с прототипами признано целесообразным искать пути создания естественного эталона килограмма. В настоящее время такие работы ведутся в крупнейших метрологических центрах мира [2.15].

Одним из направлений исследований является идея использования в качестве эталона массы нейтрона [2.6]. Другое предложение основано на воспроизведении единицы массы через счетное число атомов какого-нибудь химического элемента, например изотопа кремния-28. Для этого необходимо точно определять число Авогадро через объем и молярную массу кремниевого артефакта, для чего применяются, соответственно оптико-рентгеновский интерферометр и специальные химические операции и масс-спектрометрические измерения [2.14]. Достигнутая неопределенность составляет $3 \cdot 10^{-7}$. В работах [2.14, 2.15] приведены результаты экспериментов по воспроизведению единицы массы с помощью фундаментальных констант на основе так называемых *ваттовых весов*. Оборудование, используемое в эксперименте, первоначально предназначалось для определения электрического ватта, но оказалось подходящим для определения постоянной Планка. Это оборудование включает в себя равноплечие весы, к одному плечу которых присоединена катушка, помещенная во внешнее магнитное поле, а другое — нагружено эталоном массы 1 кг. После уравнивания весов катушка перемещается на некоторое расстояние от положения равновесия с постоянной скоростью, измеряемой лазерным интерферометром. В этом режиме измеряется наведенное напряжение в единицах, воспроизводимых на основе эффекта Джозефсона. Достигнутая неопределенность воспроизведения массы этим способом не превышает $8 \cdot 10^{-8}$. Перспективными считаются работы по созданию эталона массы на основе метода “левитирующей” массы [2.14, 2.15] (достигнутая неопределенность $10^{-5} \dots 10^{-6}$). В РТВ ведутся работы по воспроизведению единицы массы посредством накопления ионов золота [2.15].

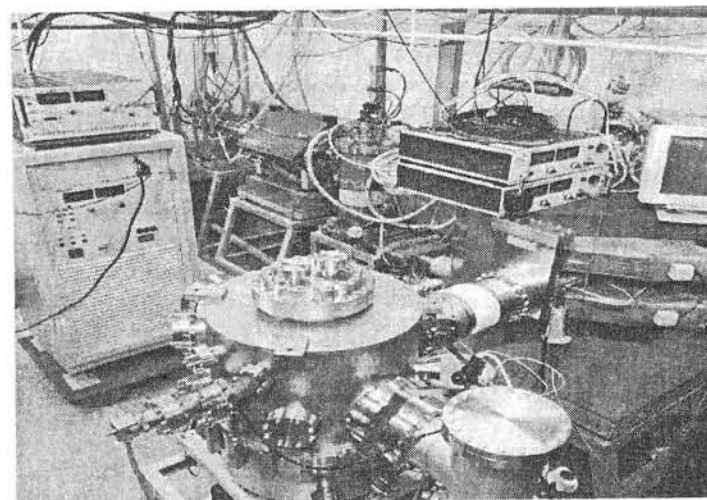


Рис. 2.33. Устройство для накопления ионов золота (РТВ)

Экспериментальное оборудование состоит из источника ионов, сепаратора массы, накопителя ионов (рис. 2.33) и массокомпаратора. Достигнутая неопределенность этого метода составляет 10^{-3} . К сожалению, результаты перечисленных исследований пока далеки от реального использования в качестве эталона.

2.7. ЕДИНИЦА КОЛИЧЕСТВА ВЕЩЕСТВА

Моль равен количеству вещества, содержащему столько же структурных элементов (атомов, молекул или других частиц), сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода-12.

В указанной массе изотопа углерода-12 содержится $6,022 \cdot 10^{23}$ атомов. Это число называется числом Авогадро (A). Если число структурных элементов, составляющих вещество (N), известно, то деление его на число Авогадро дает количество вещества в молях $X_{\text{моль}} = N/A$. Можно при необходимости воспроизвести 1 моль любого вещества как $6,022 \cdot 10^{23}$ его структурных элементов. Масса 1 моля водорода составляет 2 г, кислорода 32 г, воды 18 г и т.д. Поскольку для определения количества вещества достаточно знать массу вещества и число содержащихся в нем структурных элементов, то в эталоне моля нет необходимости, важно точно знать число Авогадро. В настоящее время относительное среднеквадратическое отклонение определения числа Авогадро составляет $4 \cdot 10^{-7}$ [2.5].

2.8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С момента сравнительно недавнего образования системы СИ эталоны основных единиц претерпели существенные изменения. Это связано с растущими потребностями в развитии науки, техники, совершенствовании технологий производства. Благодаря открытию новых макроскопических квантовых эффектов единицы таких производных величин как напряжение и сопротивление стали воспроизводиться существенно более точно по сравнению с ампером, квантовый эффект для воспроизведения которого находится в стадии разработки. С научно-технической точки зрения вместо изме-

нения системы единиц целесообразно было создать эталон ампера на базе эталонов вольта и ома. Это привело к парадоксальной ситуации, когда основная единица не только воспроизводится через производные, но и имеет по сравнению с ними большую погрешность воспроизведения. Остается надеяться, что бурное развитие науки и современных технологий не только устранил этот перекося, но и коренным образом изменит воспроизведение наиболее консервативной единицы системы СИ – килограмма. Состояние эталонов основных единиц России иллюстрируется табл. 2.3.

Таблица 2.3. Основные сведения об эталонах основных единиц России

Основная единица СИ	Принцип воспроизведения	Формула эталона	ФФК, используемая в эталоне	Основная аппаратура	Погрешности	
					НСП	СКО
Секунда, с	Квантовый переход в CS_{133}	$c = 919263170 \times T_{CS133}$		Цезиевый репер	$5 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$
Метр, м	Длина световой волны при $c = \text{const}$	$\lambda = \frac{299792458}{f}$	Скорость света c	He-Ne/J ₂ лазер, система интерферометров	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$
Килограмм, кг	Международный прототип			Эталонные гири и веса		$2 \cdot 10^{-9}$
Кельвин, К	Тройная точка воды Т _{ТТВ} , МТШ-90	$K = \frac{1}{273,16} T_{ТТВ}$		Ампула ТТВ, реперные точки МТШ-90	$(5 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-1})^\circ\text{C}$	$(5 \cdot 10^{-5} \dots 1)^\circ\text{C}$
Кандела, кд	Законы светового излучения		Максимальная световая эффективность K_m	Абсолютно черное тело (криогенный радиометр)	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Ампер, А	Косвенно через вольт и ом	$I = \frac{n}{m} f K_{Дж}^{-1} R_K$	Константа Джозефсона $K_{Дж}^{-1} = \frac{h}{2e}$ Константа Клитцинга $R_K = \frac{h}{e^2}$	Криогенная компенсационная установка	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Моль	Рассчитывается через число Авогадро N_A	$V_{\text{молей}} = \frac{z}{N_A}$	Число Авогадро N_A		$6 \cdot 10^{-7}$	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗД. 2

- 2.1. Завельский Ф.С. Время и его измерение. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
- 2.2. Актуальные проблемы метрологии в радиоэлектронике. / Под ред. В.К. Коробкова. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 296 с.
- 2.3. Аппаратура для частотных и временных измерений. / Под ред. А.П. Горшкова – М.: Сов. радио, 1971. – 336 с.
- 2.4. Государственные эталоны России: Каталог / Под общей ред. В.Н. Крутикова. – М.: Андреевский флаг, 2000. – 184 с.
- 2.5. Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы): Учеб. пособие. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 336 с.
- 2.6. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология: Учебник для вузов. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 492 с.
- 2.7. Зимокосов Г.А., Мачехин Ю.П., Оголюк В.П. и др. Государственный первичный эталон единицы длины. // Украинский метрологический журнал. 2001. – Вып. 4. – С. 39–45.
- 2.8. Квантовая метрология и фундаментальные константы. Сб. статей: пер. с англ. – М.: Изд-во Мир, 1981. – 368 с.
- 2.9. Braun E., Nimeyer J., Blick L. Quantennormale für die elektrischen Einheiten // PTB – Mitteilungen. 104, 5/94. 323–329.
- 2.10. Катков А.С., Павлов О.М., Галахова О.П. и др. Государственный первичный эталон единицы силы постоянного тока // Измерительная техника. 1995. № 1. с. 3–4.
- 2.11. Катков А.С., Короткова И.В., Павлов О.М. и др. Современное состояние метрологической базы в области измерения силы постоянного тока // Научные труды III Международной научно-технической конференции “Метрология в радиоэлектронике” – 2000, Харьков, с. 51–53.
- 2.12. Назаренко Л.А. Температурная метрология в ХГНИИМ // Украинский метрологический журнал. – 1996. – Вып. 4. – С. 33–37.
- 2.13. Эталонная база России // Измерительная техника. 1999. – № 10. – С. 3–8.
- 2.14. Колозинская И.А., Красовский В.Д., Янушкевич Э.П. Некоторые вопросы измерения массы и силы. // Украинский метрологический журнал. 2001. Вып. 3. – С. 29–33.
- 2.15. Кохзих М. Национальные метрологические институты на пути в новое тысячелетие. // Украинский метрологический журнал. – 2000. – Вып. 3. – С. 5–9.
- 2.16. Назаренко Л.А. Эталонная фотометрия (эволюция единиц и метрическая конвенция) // Украинский метрологический журнал. – 2000. – Вып.1. – С. 29–35.

ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К РАЗД. 2

1. ГОСТ 8.021-84. ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения массы. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 10 с.
2. ГОСТ 8.022-91. ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений силы постоянного электрического тока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-16}$ до 30 А. — М.: Изд-во стандартов, 1992. — 8 с.
3. ГОСТ 8.023-86. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений световых величин. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
4. ГОСТ 8.106-2001. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений энергетической яркости и силы излучения тепловых источников с температурой от 220 до 1360 К. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 7 с.
5. ГОСТ 8.129-99. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты. — М.: Изд-во стандартов, 1999. — 6 с.
6. ГОСТ 8.157-75. ГСИ. Шкалы температурные практические. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 27 с.
7. ГОСТ 8.168-75. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений температуры плазмы в инфракрасной области спектра в диапазоне от 5000 до 15000 К. — М.: Изд-во стандартов, 1975.
8. ГОСТ 8.515-84. ГСИ. Эталонные сигналы частоты и времени, излучаемые специализированными радиостанциями Государственной службы времени и частоты СССР. Временной код. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 12 с.
9. ГОСТ 8.558-93. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры. — М.: Изд-во стандартов, 1993.
10. ГОСТ Р 8.566-96. ГСИ. Излучатели эталонные (образцовые) в виде моделей абсолютно черного тела для диапазона температур от минус 50 °С до плюс 2500 °С. Методика аттестации и поверки. — М.: Изд-во стандартов, 1996. — 24 с.
11. ГОСТ Р 8.571-98. ГСИ. Термометры сопротивления платиновые эталонные 1-го и 2-го разрядов. Методика поверки — М.: Изд-во стандартов, 1998. — 21 с.
12. ГОСТ 30679-99/ГОСТ Р 51233-98. Термометры сопротивления платиновые эталонные 1-го и 2-го разрядов. Общие технические требования. — Минск: Изд-во стандартов, 2001. — 5 с.

Раздел 3

СИСТЕМА ЭТАЛОНОВ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЙ. КВАНТОВЫЕ (БАЗОВЫЕ) ЭТАЛОНЫ СИСТЕМЫ

3.1. ЕДИНИЦЫ ФВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОРАДИО- ИЗМЕРЕНИЯХ. ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Как было сказано, основной единицей СИ для электричества является ампер. В электрорадиотехнике (ЭРТ) применяется также большое число производных единиц (более 50). Однако далеко не все эти единицы воспроизводятся с помощью эталонов, т.е. централизованно. Существует определенная система критериев — научно-технических, экономических, организационных, в соответствии с которыми принимается решение о создании эталона той или иной единицы. В области ЭРТ в разных странах централизованно воспроизводятся от 12 до 15 единиц. Наиболее употребительные производные единицы СИ в области электрорадиоизмерений, их обозначения и выражения через другие единицы приведены в табл. 3.1.

Приведем некоторые данные из истории воспроизведения единиц на базе статьи А. Кука в [3.1]. Первый шаг состоял в реализации ампера исходя из определения в СИ через механическую силу (*ампер-весы*), пример которой описан выше (аппаратные решения разных стран отличаются лишь техническими деталями). Имея реализованный таким образом ампер можно было бы в принципе получить вольт, выразив его через работу, производимую теплом, возникающим при прохождении тока.

Фактически таким образом в 1948 году на IX Генеральной конференции по мерам и весам чбыл определен ом — через мощность, рассеиваемую на некотором резисторе при прохождении через него тока силой 1 А. На практике, однако, этот путь оказался неудовлетворительным, так как механические измерения мощности не могли быть проведены с относительной погрешностью даже на уровне $1 \cdot 10^{-6}$.

Заметим, что вместо ампера можно воспроизвести вольт с помощью *вольт-весов*, представляющих собой конденсатор, в котором перемещение пластин под действием электрического поля уравновешивается силой их тяжести. При этом изменение энергии электрического поля $\Delta W = \frac{1}{2} U^2 \Delta C$ равно изменению механической

Таблица 3.1 Наиболее употребительные производные единицы СИ в области электрорадиоизмерений

Производная величина		Единица ФВ		Выражение производной единицы	
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	Через другие единицы СИ	Через основные единицы СИ
Количество электричества (электрический заряд)	Q	кулон	Кл (C)	—	$C \cdot A$
Электрическое напряжение, электродвижущая сила (ЭДС)	U	вольт	В (V)	Вт/А	$M^2 \cdot KГ \cdot C^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическое сопротивление	R	ом	Ом (Ω)	В/А	$M^2 \cdot KГ \cdot C^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая емкость	C	фарад	Ф (F)	Кл/В	$M^{-2} \cdot KГ^{-1} \cdot C^4 \cdot A^2$
Индуктивность	L	генри	Гн (H)	Вб/А	$M^2 \cdot KГ \cdot C^{-2} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	G	сименс	См (S)	А/В	$M^{-2} \cdot KГ^{-1} \cdot C^3 \cdot A^2$
Частота	f	герц	Гц (Hz)	—	C^{-1}
Мощность	P	ватт	Вт (W)	Дж/с	$M^2 \cdot KГ \cdot C^{-3}$
Магнитный поток	Φ	вебер	Вб (Wb)	В·с	$M^2 \cdot KГ \cdot C^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнитная индукция	B	тесла	Тл (T)	Вб/м ²	$KГ \cdot C^{-2} \cdot A^{-1}$
Напряженность электрического поля	E			В/м	$M \cdot KГ \cdot C^{-3} \cdot A^{-1}$
Напряженность магнитного поля	H			—	$M^{-1} \cdot A$

энергии системы $\Delta W_m = mg\Delta s$. Отсюда можно определить электрическое напряжение U , приложенное к пластинам $U = \sqrt{2mg \frac{\Delta s}{\Delta C}}$. По данным головного метрологического центра Германии (РТВ), воспроизведение вольта может быть осуществлено с погрешностью $0,5 \cdot 10^{-6}$. Однако этот путь также не позволяет снизить погрешность определения ома меньше $1 \cdot 10^{-6}$.

Альтернативное решение было в нахождении импеданса с помощью геометрических измерений: таким образом можно было бы определить индуктивность и емкость. Затем с помощью моста переменного тока можно сравнивать значение индуктивности (емкости) на данной частоте с сопротивлением эталонного резистора. Вначале использовалась индуктивность, которую можно рассчитать с помощью интеграла Неймана. Для этого необходимо было изготовить цилиндрический каркас, предпочтительно из кварцевого

стекла, со спиральной канавкой на поверхности, а затем намотать на него проволоку с точно известным значением диаметра, строго постоянным по всей ее длине. Операции по изготовлению такой катушки и сами измерения весьма сложны и трудоемки, и необходимо было приложить много усилий, чтобы реализовать некую индуктивность с погрешностью на уровне $1 \cdot 10^{-6}$. Несмотря на эти технические трудности в течение многих лет пользовались именно этим способом реализации импеданса. Однако в 1956 году была найдена конфигурация, для которой стало возможным провести точный расчет емкости. Это так называемый расчетный конденсатор Томпсона–Лампарда¹ с перекрестными емкостями [3.1, 5.2]. Преимущество этого конденсатора состоит в том, что для определения значения емкости требуется только одно измерение длины, которое может быть выполнено с высокой точностью и значительно проще, чем измерения при определении индуктивности (подробнее о расчетном конденсаторе речь пойдет ниже).

Такие конденсаторы были сконструированы в ряде стран, включая Россию. Погрешность воспроизведения единицы емкости таким конденсатором составила в разных странах от $2 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-7}$.

С помощью расчетного конденсатора и моста переменного тока можно более точно, чем в случае расчетной индуктивности, установить сопротивление резистора. Реализовав таким образом эталон сопротивления, можно установить ЭДС некоторого гальванического элемента (в качестве таковых обычно применялись насыщенные нормальные элементы (ННЭ)) через значение тока, создающего такую же разность потенциалов, при прохождении через резистор с известным сопротивлением. Сила тока при этом измеряется на токовых весах, а ННЭ являются эталонами ЭДС (рис. 3.1).

Нетрудно видеть, насколько длительную и утомительную процедуру представляла собой реализация электрических единиц по данной схеме, не говоря уже о высоком экспериментальном мастерстве, которого она требует. В частности, абсолютное определение силы тока в ампер-весах по этим причинам осуществлялись лишь один раз в 10–15 лет (!) [3.1]. Кроме того, практические операции с токовыми весами ограничиваются силой тока порядка 1 А, другими словами, невозможно даже ставить вопрос о широком применении токовых весов в метрологической практике. К этому следует добавить, что для хранения единиц напряжения и сопротивления в промежутках между абсолютными измерениями силы тока и импедансов необходимо было бы иметь большое число ННЭ и эталонных резисторов, содержать их в специальных условиях и сличать их между собой через определенные интервалы времени.

¹ Thompson, Lampard.

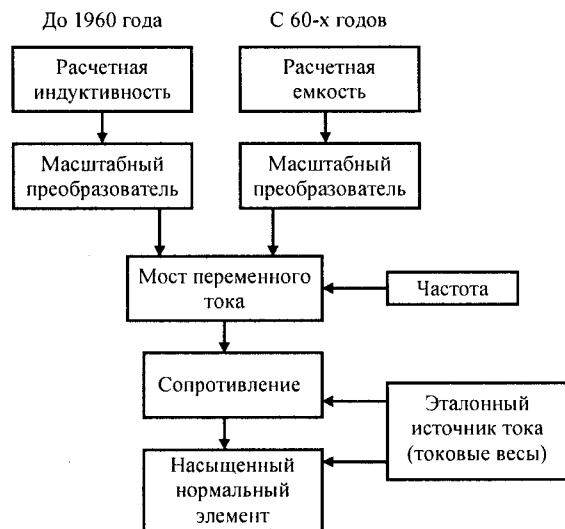


Рис. 3.1. Схема реализации электрических единиц

Таким образом, сложилась ситуация, когда несовершенство электрических эталонов начало тормозить развитие ряда областей науки и техники, ибо относительные измерения с помощью электронных приборов можно было бы проводить значительно точнее, чем абсолютные с помощью существующих эталонов. Возникла настоятельная потребность в создании новой системы электрических эталонов.

Ситуация существенно изменилась с открытием ряда квантовых эффектов, а главное, с осознанием возможности создания принципиально новых естественных электрических эталонов, опирающихся на эти эффекты и фундаментальные физические константы [3.2].

3.2. КВАНТОВЫЕ ЭТАЛОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ

Открытие квантовых эффектов (в порядке хронологии): ядерного магнитного резонанса (ЯМР) (Блох, Парсель², 1946 г.), Джозефсона³ (1962 г.), Холла (Клитцинг⁴, 1980 г.) произвело без преувеличения революцию в метрологии в области электричества. Появилась реальная возможность воспроизведения ряда электрических единиц с существенно более высокой точностью.

² Bloch, Purcell.

³ Josephson.

⁴ Klitzing.

Эффект ЯМР позволяет определить индукцию магнитного поля B измерением частоты прецессии f системы атомных ядер в образце вещества, помещенного в магнитное поле [3.2–3.4]:

$$B_{\text{ЯМР}} = \frac{2\pi f}{\gamma}$$

Наиболее широко для измерения используются ядра водорода – протоны и их гиромагнитное отношение γ_p , являющееся одной из ФФК.

Эффект Джозефсона позволяет воспроизводить значение постоянного напряжения $U_{\text{Дж}}$ путем облучения специальной сверхпроводящей структуры, находящейся в криогенной среде, СВЧ сигналом частотой f_0 в соответствии с выражением [3.5]

$$U_{\text{Дж}} = n \frac{hf_0}{2e},$$

где $2e/h = K_{\text{Дж}}$ – константа Джозефсона, $n = 1, 2, 3, \dots$ – целое число.

Наконец, квантовый эффект Холла, также реализуемый с помощью сверхпроводящей структуры, помещенной в магнитное поле, позволяет воспроизводить фиксированные значения электрического сопротивления [3.6]

$$R_X = \frac{h}{ne^2},$$

где $h/e^2 = R_K$ – константа Клитцинга.

Подробнее об эффектах и реализованных на их основе эталонах речь пойдет ниже, а здесь рассмотрим принципиальные особенности эталонов, опирающихся на ФФК. Как известно, несводимость электрических и магнитных явлений к механическим привела к необходимости (независимо от системы) присоединить к трем основным механическим единицам (метру, килограмму, секунде) четвертую электрическую или магнитную единицу, которой как в системе СГСМ, так и в системе СИ фактически стала магнитная постоянная μ_0 (в системе СГСМ в неявном виде, путем приравнивания единице). В системе СИ μ_0 постулирована равной $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м и вошла в определение ампера, что обеспечило идентичность электрических и механических единиц энергии и мощности. Если для определения теслы и вольта использовать эффекты ЯМР и Джозефсона, то измеряемыми являются: в первом случае магнитная индукция B и частота прецессии, во втором – напряжение и частота облучения. Это не позволяет применять оба явления для перехода от электрических величин к механическим, т.е. нарушает связь между электрическими и механическими единицами. Хотя точность воспроизведения единиц при этом существенно возрастает, но, строго говоря, это уже будут другие единицы, а не единицы СИ.

Если же в системе СИ перейти к теоретическому определению, например, вольта через эффект Джозефсона, теслы – через эффект ЯМР, а через нее – и ампера, то величина μ_0 больше не будет иметь точно постулированного значения $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, а будет определяться экспериментально с числом знаков, зависящим от точности измерений. Во все практически важные в электродинамике расчеты войдет неудобный коэффициент, определяемый экспериментально, другими словами, нарушится современная система единиц, установленная в международном масштабе усилиями многих ученых.

Рассмотрим как совмещаются несомненные преимущества квантовых эталонов с принципиальными достоинствами международной системы СИ. Прежде всего, оставлено неизменным теоретическое определение ампера в системе СИ через механические явления, сохраняющее значение $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (а также значение ϵ_0 и соотношение $\mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot c^2 = 1$). Рекомендовано (на уровне МКМВ) воспроизведение вольта, ома осуществляться в национальных эталонах на основе квантовых эффектов с применением единых для всех стран значений ФФК, устанавливаемых CODATA. При этом погрешности ФФК, как правило, не учитываются. Поэтому не случайно в “высшей” метрологической практике применяют понятия единиц СИ ($V_{[СИ]}$, $\Omega_{[СИ]}$) и единиц ФФК ($V_{[Дж]}$, $\Omega_{[Холл]}$), указывая тем самым на способ их установления.

3.3. СИСТЕМА ЭТАЛОНОВ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЙ

Эталонные базы разных стран имеют свои особенности, однако анализ общего уровня развития методов воспроизведения единиц измерений и опыта развитых стран позволяет говорить о некоторых закономерностях построения оптимальной эталонной базы в рассматриваемой области:

- эталонная база в области электричества представляет собой не просто совокупность эталонов, а систему с достаточно развитыми связями как между отдельными эталонами, так и с эталонами других областей измерений;
- радиотехнические эталоны являются составной частью этой системы. Поскольку электрические единицы, как правило, воспроизводятся с наивысшей точностью на постоянном токе или низкой частоте, а затем “переносятся” в радиодиапазон, можно считать, что электрические эталоны являются метрологической основой радиотехнических эталонов;
- при общем числе единиц, применяемых в электрорадиоизмерениях (ЭРИ), более пятидесяти, централизованно, т.е. с

помощью эталонов, воспроизводятся в разных странах 10–15 единиц;

- поскольку частотный и динамический диапазоны применения многих единиц весьма широки, в ряде случаев для воспроизведения одной и той же единицы создается несколько эталонов (пример: эталоны вольта на постоянном токе, в НЧ диапазоне, в ВЧ диапазоне, для высоких напряжений постоянного и переменного тока);
- в электрорадиоизмерениях, как ни в какой другой области, возможно использование ряда квантовых эффектов и ФФК для создания эталонов;
- рассмотрение методологии воспроизведения единиц и связей между эталонами позволяет считать квантовые эталоны “базовыми” эталонами системы.

Система основополагающих эталонов и связи между ними в области электрорадиоизмерений может быть представлена в виде схемы, приведенной на рис. 3.2.

Можно заметить, что этой системе выделены базовые эталоны, в которые вошли:

- эталон единицы времени (частоты), основанный на атомном переходе в изотопе цезия Cs^{133} (см. 2.1);
- эталон единицы электродвижущей силы (ЭДС) и постоянного напряжения – вольта, основанный на эффекте Джозефсона;
- эталон единицы электрического сопротивления, основанный на квантовом эффекте Холла;
- эталон единицы магнитной индукции – теслы, основанный на явлении ядерного магнитного резонанса.

Другими подсистемами являются эталоны параметров: интенсивности, цепей и трактов, а также формы и спектра сигналов.

Сравнение данной схемы с реальной системой эталонов, созданных в России, странах СНГ и других странах, позволяет выделить некоторые дискуссионные вопросы. Одним из таких вопросов является отнесение к базовым эталона теслы на эффекте ЯМР. Известно, в частности, что применение эффекта ЯМР для воспроизведения малых значений магнитной индукции (менее 10^{-2} Тл) проблематично, поэтому государственный первичный эталон России воспроизводит теслу через ток в расчетной эталонной катушке и метр, а эффект ЯМР применен в двух специальных эталонах в диапазоне магнитной индукции от $5 \cdot 10^{-2}$ до 10 Тл. Однако сложность реализации эталонной токовой катушки, с одной стороны, и логика развития исследований в этой области, с другой, позволяют считать метод ЯМР основополагающим для воспроизведения теслы.

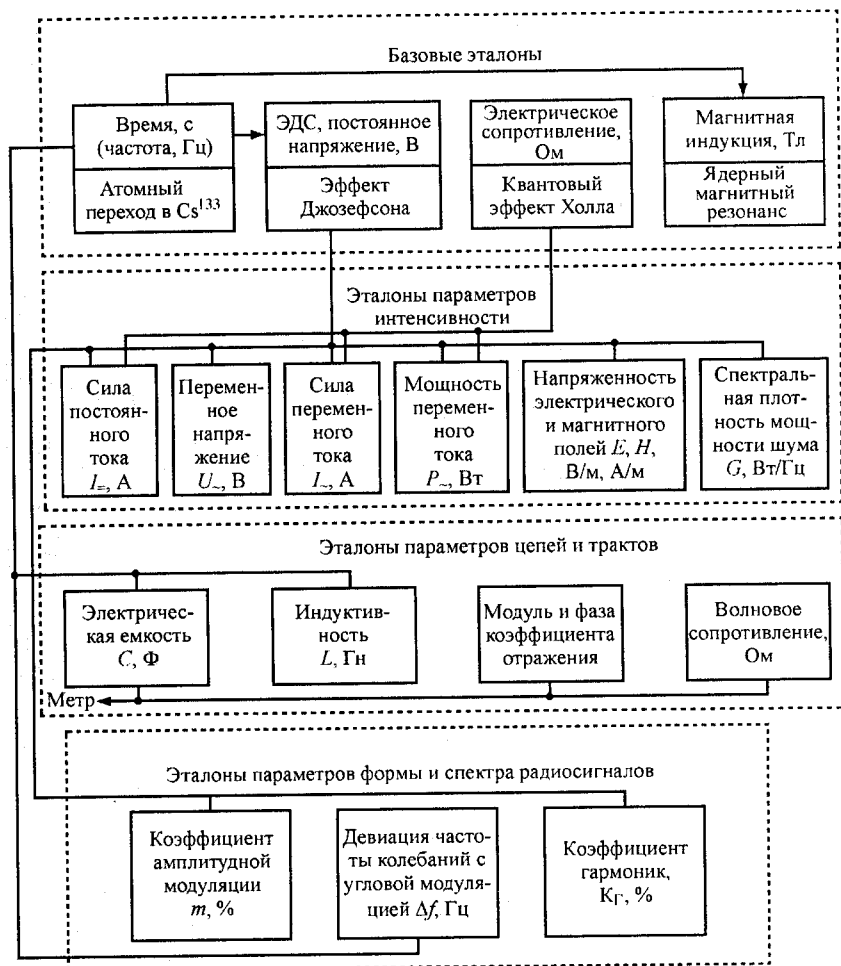


Рис. 3.2. Система эталонов в области электрорадиоизмерений

Второй вопрос может вызвать не включение в число базовых эталона основной единицы — ампера. Однако в настоящее время ампер воспроизводится косвенно — через вольт и ом. В случае практической реализации квантового эталона ампера на базе упомянутого выше эффекта одноэлектронного туннелирования, этот эталон, безусловно войдет в число базовых.

Третьим дискуссионным вопросом является включение в систему группы эталонов параметров формы и спектра радиосигналов. Такие эталоны в статусе государственных были созданы в СССР и теперь успешно работают в СНГ. За рубежом подобные эталоны в

статусе национальных отсутствуют, но существуют аналогичные эталоны крупных приборостроительных фирм (Hewlett-Packard, Marconi, Rohde & Schwartz). По своему статусу они являются калибрационным оборудованием, т.е. ближе к рабочим эталонам, что, однако, в техническом плане существа дела не меняет.

Отметим также, что в систему не включены некоторые созданные в свое время в СССР эталоны в области антенных измерений, коэффициента масштабного преобразования синусоидального тока, добротности и другие, целесообразность создания которых в статусе государственных также носит дискуссионный характер. Кроме того, включение в систему электрорадиоэталона эталона временнечастоты следует понимать условно, поскольку данный эталон возглавляет самостоятельную одноименную область измерений и используется для воспроизведения единиц во многих видах измерений. Перейдем к рассмотрению квантовых (базовых) эталонов системы.

3.4. ЭТАЛОН ВОЛЬТА НА ЭФФЕКТЕ ДЖОЗЕФСОНА

Эффект Джозефсона основан на явлении сверхпроводимости, возникающем в контактах двух проводников, разделенных тонким слоем диэлектрика (рис. 3.3) [3.5]. Эффект получил название по имени открывшего его в 1962 году английского ученого Б. Джозефсона.

Строгое описание этого эффекта выходит за рамки данной книги, поэтому рассмотрим лишь его физическую сторону. Известно, что при температуре ниже определенной критической $T_{кр}$, свойственной данному материалу или сплаву, последний переходит в особое сверхпроводящее состояние, в котором электрические и магнитные свойства принципиально отличаются от тех, которые металл (сплав) имеет при обычных температурах. Возникновение сверхпроводящего состояния объясняется появлением особого рода носителей электрического заряда — связанных электронных (куперовских) пар, образуемых при $T < T_{кр}$.

Приведем следующий пример (рис. 3.4). Если постоянное напряжение E приложить к сверхпроводнику S , в цепи потечет электрический ток I , а падение напряжения на сверхпроводнике будет

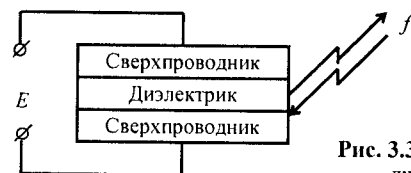


Рис. 3.3. Схематическое изображение джозефсоновского перехода

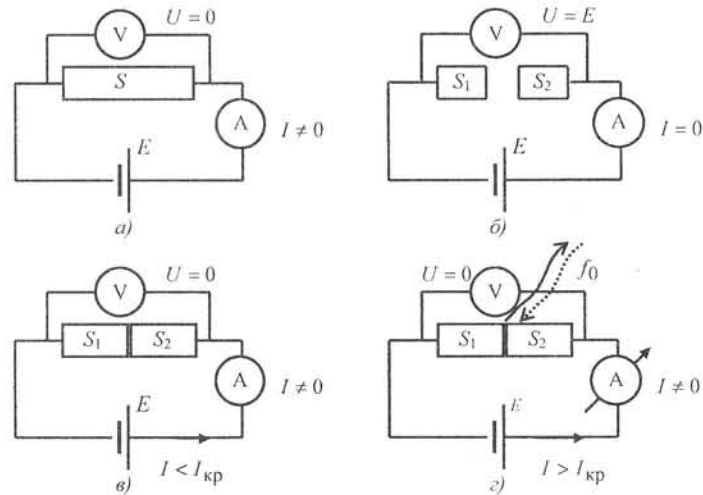


Рис. 3.4. К пояснению физической сути эффекта Джозефсона

равно нулю (рис. 3.4, а). Если теперь сверхпроводник разделить на две части с большим расстоянием между ними (более 1 см), ток не потечет, а вольтметр покажет напряжение источника (рис. 3.4, б).

При уменьшении расстояния между двумя сверхпроводниками до некоторого значения (порядка единиц нанометров), имеет место переход электронов из одного сверхпроводника в другой (туннелирование куперовских пар электронов), т.е. в цепи потечет ток, хотя падения напряжения между сверхпроводниками не будет (рис. 3.4, в). Это явление получило название стационарного эффекта Джозефсона.

При увеличении тока больше некоторого критического значения избыток энергии излучается в виде кванта света – фотона с энергией $2eU$, т.е. цепь начинает генерировать ВЧ напряжение (рис. 3.4, г). Частота f_0 этого излучения определяется законом сохранения энергии:

$$hf_0 = 2eU.$$

Это явление называется нестационарным эффектом Джозефсона. Оно обратимо, т.е. если облучать джозефсоновский переход излучением с частотой f , то при совпадении этой частоты с характерной для данного напряжения U частотой f_0 , возникает резонансное взаимодействие. Такой же резонанс наступает при $f = f_0/n$, где n – любое целое число, в результате чего на вольт-амперной характеристике (ВАХ) перехода появляются особенности (рис. 3.5) в виде ступенек при напряжениях

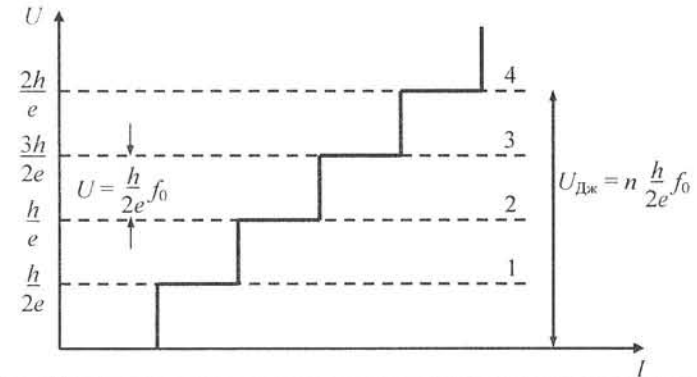


Рис. 3.5. Вольтамперная характеристика джозефсоновского перехода

$$U_{Дж} = n \frac{h}{2e} f_0,$$

где n – номер ступеньки.

Величина $h/2e$ называется квантом магнитного потока, обратная $2e/h$ – константой Джозефсона.

Поскольку в настоящее время частота является наиболее точно измеряемой величиной, теоретически достижимая точность воспроизведения напряжения с помощью эффекта Джозефсона при корректной аппаратурной реализации ограничивается точностью определения $h/2e$.

На основании эффекта Джозефсона выполнены эталоны единиц постоянного напряжения – вольты во многих промышленно развитых странах (рис. 3.6). В состав первых эталонов обычно входили несколько контактов, возбуждаемых СВЧ излучением на частоте 8...10 ГГц. Значение квантованного напряжения составляло при этом 4...10 мВ.

Такое низкое значение воспроизводимого напряжения вызывало необходимость включать в состав эталона масштабные преобразователи напряжения различной конструкции (делители) для связи с калибруемыми мерами (например, нормальными эле-



Рис. 3.6. Экспериментальная установка для наблюдения квантового эффекта Джозефсона (BNM)

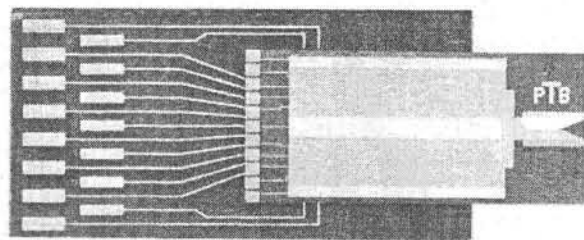


Рис. 3.7. Внешний вид матрицы Джозефсона

ментами), приводящие к потере точности. Однако в дальнейшем были созданы интегральные схемы (матрицы), включающие в себя несколько тысяч последовательно соединенных контактов Джозефсона и позволяющие воспроизводить напряжение непосредственно в 1 В и выше (до 10 В). Наилучшие результаты в настоящее время получены с контактами типа SIS (сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник) Nb/Al₂O₃/Nb [3.7], хотя работы по их совершенствованию продолжают. Технология изготовления таких интегральных схем весьма сложна, ею обладают весьма немногие страны (особенно это касается 10-вольтовых матриц). Внешний вид матрицы приведен на рис. 3.7.

Структура современного источника Джозефсоновского напряжения в 1 В приведена на рис. 3.8.

Кризонд с матрицей контактов Джозефсона помещается в криогенную среду (жидкий гелий), создаваемую обычно в сосуде Дьюара. Генератор СВЧ с частотой порядка 70 ГГц облучает матрицу КД. Частота этого генератора синхронизируется источником эталонной частоты f_3 с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и измеряется электронносчетным частотомером (ЭСЧ).

Характернограф с осциллографическим индикатором предназначен для регистрации ступенчатой вольт-амперной характери-

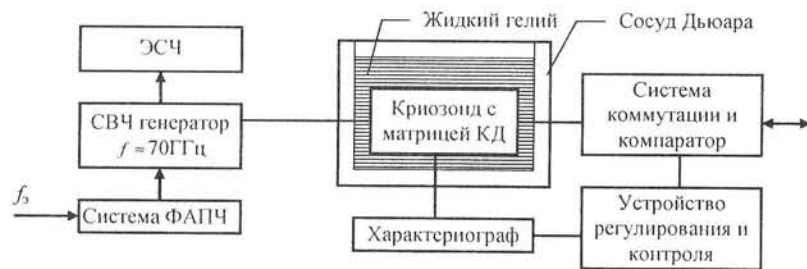


Рис. 3.8. Источник джозефсоновского напряжения

ки джозефсоновского источника, т.е. наличия факта резонансного взаимодействия и эффекта Джозефсона.

Устройство регулировки и контроля используется для установки необходимых режимов и предварительного (грубого) контроля воспроизводимого напряжения (ЭДС), в частности, точного контроля номера ступеньки ВАХ матрицы с помощью цифрового вольтметра.

Система коммутации и компарирования необходима для минимизации термо-ЭДС, возникающей при переходе от гелиевой (4,2 К) к комнатной (290 К) температуре, а также передачи значения ЭДС, воспроизведенной джозефсоновским источником, системе хранения эталона.

Помимо источника джозефсоновского напряжения эталон должен включать в себя также упомянутую выше систему хранения единицы и ее передачи. Эта система состоит из мер ЭДС и компараторов. Обычно в качестве мер ЭДС используются насыщенные нормальные элементы (группа от 10 до 20 штук в специальном термостате), хотя в ряде стран в последнее время предпочтение отдается твердотельным мерам ЭДС на прецизионных стабилитронах (диодах Зеннера). Многие страны имеют в составе своих национальных эталонов меры ЭДС обоих видов (рис. 3.9).

Таким образом, в современном эталоне ЭДС, основанном на эффекте Джозефсона, источник джозефсоновского напряжения следует рассматривать как калибратор мер – хранителей единицы ЭДС, который включается 1–2 раза в год во время аттестации эталона, а вся практическая работа по хранению и передаче размера единицы ведется с мерами.

Основным требованием к системе хранения эталона является долговременная стабильность, другим – возможность транспорти-

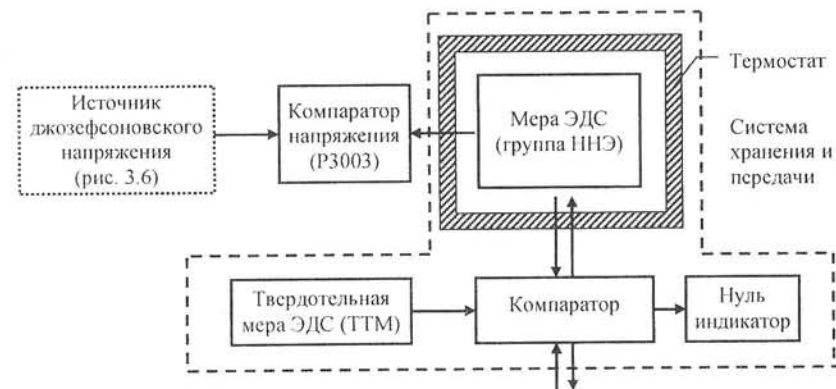


Рис. 3.9. Структурная схема системы хранения и передачи единицы ЭДС

ровки для проведения взаимных сличений эталонов. Первому требованию (при соблюдении определенных условий хранения) наилучшим образом отвечает групповая мера на ННЭ, в меньшей степени – ТТМ. Однако последняя имеет несомненное преимущество перед ННЭ как транспортабельный эталон сравнения.

Отметим также, что в структуру эталона входят очень важные дополнительные устройства и системы, существенно влияющие на его метрологические характеристики: фильтры электрических и магнитных помех в составе криозонда, система экранирования помещения от внешних электромагнитных помех, системы термостатирования, заземления, гидроизоляции, высококачественного энергоснабжения.

Эталон единицы ЭДС на квантовом эффекте Джозефсона в СССР был создан в 1980 году (ВНИИМ им. Менделеева) одним из первых в мире. Он включал в себя джозефсоновскую меру напряжения на четырех контактах, клистронный генератор СВЧ с частотой около 8,6 ГГц, стабилизированный по частоте сигналом вторичного эталона частоты, резистивный компаратор для сличения напряжения, воспроизводимого мерой (порядка 4 мВ), с ЭДС эталонных нормальных элементов (1,018...0 В). Эталон имел НСП воспроизведения $\theta_0 \leq 1 \cdot 10^{-6}$ и СКО $S_0 \approx 5 \cdot 10^{-8}$, что соответствовало мировому уровню того времени [3.11].

В последующие годы эталон неоднократно модернизировался и совершенствовался. В новом ГПЭ, утвержденном в 2001 году, воплощены последние достижения в этой области. В составе эталона

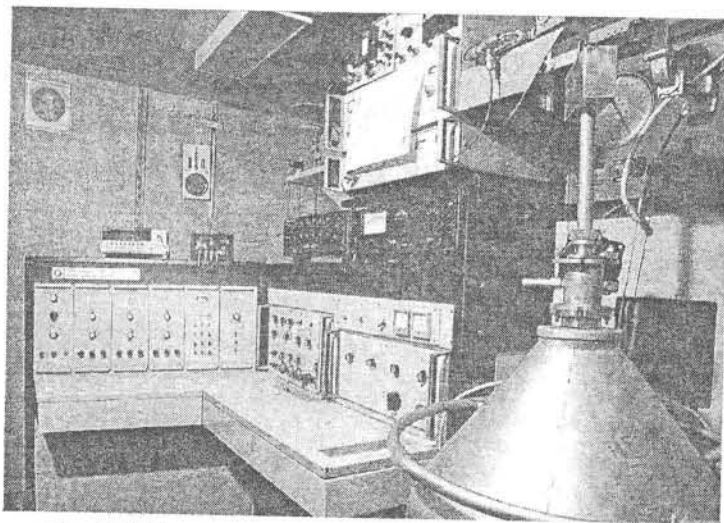


Рис. 3.10. Государственный первичный эталон единицы ЭДС

Таблица 3.2. Составляющие погрешности ГПЭ единицы ЭДС России

Составляющие погрешности	1 В		10 В	
	S_i	θ_i	S_i	θ_i
Нестабильность частоты и погрешность ее измерения	$0,04 \cdot 10^{-9}$	$0,6 \cdot 10^{-9}$	$0,04 \cdot 10^{-9}$	$0,6 \cdot 10^{-9}$
Утечка сопротивления		$0,1 \cdot 10^{-9}$		$0,1 \cdot 10^{-9}$
Наклон ступенек на ВАХ, детектирование СВЧ сигнала	$0,15 \cdot 10^{-9}$	$0,15 \cdot 10^{-9}$	$0,2 \cdot 10^{-9}$	$0,2 \cdot 10^{-9}$
Остаточная термо-ЭДС. ее дрейф	$0,5 \cdot 10^{-9}$	$0,1 \cdot 10^{-9}$	$0,05 \cdot 10^{-9}$	$0,05 \cdot 10^{-9}$
Суммарная оценка	$0,6 \cdot 10^{-9}$	$0,9 \cdot 10^{-9}$	$0,2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$

имеются многоэлементные матрицы джозефсоновских контактов на 1 и 10 В, стабилизированный источник СВЧ излучения в диапазоне 60...80 ГГц на лампе обратной волны, система хранителей единицы на основе групповой меры ННЭ и ТТМ, компараторы постоянного напряжения, управляющая ЭВМ. В структуру эталонного комплекса входит также необходимое криогенное оборудование, измерительные, контрольные и вспомогательные средства системы защиты от электромагнитных помех, термостабилизации и автоматизации (рис. 3.10).

Типичные составляющие погрешности воспроизведения единицы напряжения и оценка их значений в новом эталоне России приведены в табл. 3.2 (при напряжении 1 и 10 В, без учета погрешности определения константы Джозефсона) [3.8].

Прошедшие в 1998 году прямые сличения национальных эталонов России (ВНИИМ) и Германии (РТВ) показали, что результаты измерений согласуются в пределах стандартной неопределенности 1 нВ (10^{-9}), т.е. фактически подтвердили приведенные характеристики.

Отметим также, что в России создана разветвленная система метрологического обеспечения в данной области. Помимо государственного первичного эталона единицы ЭДС, хранимого во ВНИИМ, разработаны и введены в эксплуатацию вторичные эталоны на эффекте Джозефсона во ВНИИФТРИ (Московская область) и



Рис. 3.11. Транспортабельный эталон вольта на эффекте Джозефсона (ВМР)

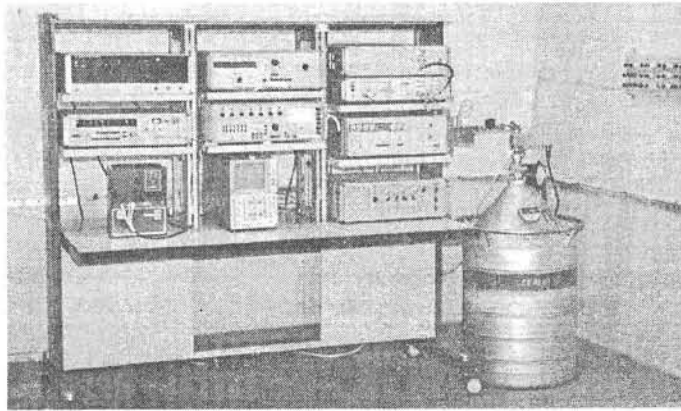


Рис. 3.12. Вторичный государственный эталон единицы постоянного напряжения⁵

ВНИИМС (г. Москва), а также в нескольких институтах восточного региона России. Во ВНИИМ создан также транспортабельный эталон на эффекте Джозефсона, позволяющий проводить взаимные сличения эталонов как в рамках России, так и между разными странами. В настоящее время такая программа сличений реализуется в рамках СООМЕТ. Внешний вид транспортабельного эталона вольты на эффекте Джозефсона ВРМ приведен на рис. 3.11. Отметим также, что современный (на многоэлементной матрице) эталон Джозефсона создала в 1989 году Украина [3.9].

В качестве вторичных эталонов применяются упомянутые выше стационарные и транспортируемые установки, реализующие эффект Джозефсона, а также эталонные групповые меры ЭДС и постоянного напряжения на основе ННЭ и твердотельных мер на стабилитронах. Примером могут служить вторичные эталоны единицы постоянного напряжения, созданные во ВНИИМС и ВНИИФТРИ (рис. 3.12).

В мировой метрологической практике в качестве вторичных эталонов постоянного напряжения наиболее широко распространены твердотельные меры (ТТМ) на прецизионных стабилитронах, которые фактически вытеснили нормальные элементы. Ряд крупных фирм (Wavetek, Fluke, Hewlett-Packard) выпускают ТТМ, имеющие следующие типичные характеристики:

нестабильность (за год).....	$(1...3) \cdot 10^{-6}$;
СКЗ шумового напряжения.....	$(0,03...0,2) \cdot 10^{-6}$;
номинальные напряжения.....	1 и 10 В.

⁵ ВЭТ-13-13-01.

По шумовым характеристикам ТТМ существенно уступают нормальным элементам. Поэтому для повышения точности измерений используют специальные методики выполнения измерений на основе методов математической статистики и математического моделирования.

В России интенсивные работы по созданию ТТМ начались в 1990 году (ВНИИФТРИ), в результате которых были разработаны меры МН-1, МН-2, МН-3, а также методики выполнения измерений с использованием современных вычислительных компьютерных технологий [3.12]. По результатам проведенных исследований, в частности международных сличений, можно утверждать, что характеристики мер МН-3 (рис. 3.13) приближаются к мировому уровню⁶.

Согласно [3.12] использование для обработки результатов так называемых непараметрических методов математической статистики, позволяющих учесть изменчивость условий измерений, шумовые характеристики измерительной аппаратуры и т.д., обеспечит выполнение сличений мерами МН-3 с относительной погрешностью на уровне $(2...5) \cdot 10^{-8}$.

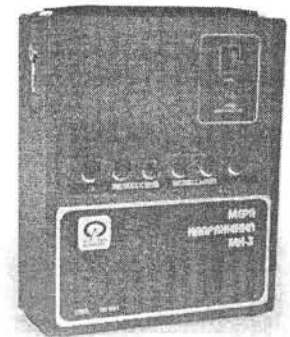


Рис. 3.13. Портативная стабилитронная мера напряжения МН-3

3.5. ЭТАЛОН ОМА НА ОСНОВЕ КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Квантовый эффект Холла был открыт в 1980 году немецким ученым Клаусом фон-Клитцингом. Суть его состоит в том, что в специальных структурах типа металл-диэлектрик-полупроводник (рис. 3.14) при температуре жидкого гелия и в сильном магнитном поле (6...12 Тл) электрическое сопротивление принимает строго фиксированные дискретные значения

$$R_x = \frac{h}{e^2 n}, \quad (3.1)$$

где h/e^2 — константа Клитцинга $R_K = 25812,807 \text{ Ом}$; $n = 1, 2, 3, \dots$ — целое число (номер ступеньки).

⁶ Технические характеристики меры МН-3: выходные напряжения 1,018 В; 10 В, нестабильность выходного напряжения за год $3,0 \cdot 10^{-6}$; кратковременная нестабильность за 10 мин. не более $0,05 \cdot 10^{-6}$; время автономного функционирования не менее 48 ч; габариты 280×220×90 мм; масса не более 8 кг.

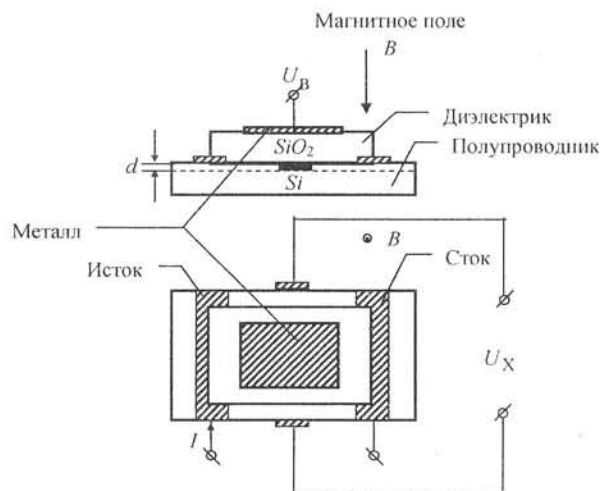


Рис. 3.14. Холловская структура типа металл-диэлектрик-полупроводник

Если на металлическую пластинку подается положительное напряжение U_B , тогда часть электронов из кремниевого полупроводника Si подтянется к границе диэлектрика SiO_2 и окажется заключенной в тонком слое — канале, ограниченном на рис. 3.14 пунктирной линией, поскольку диэлектрик для электронов непроницаем, а возвращаться в полупроводник им не позволяет притяжение к металлической пластине.

Запертые в канале толщиной d электроны, согласно квантовой механике, будут занимать самый низкий из возможных дискретных энергетических уровней, соответствующих движению поперек слоя, а их волновые функции — размазаны по толщине канала. Если подать напряжение на электроды «исток-сток», то между ними потечет ток I . Если, кроме того, приложить магнитное поле B перпендикулярно плоскости канала, то электроны, изгибая свои траектории в поле B , начнут скапливаться у боковых краев структур до тех пор, пока возникшая разность потенциалов между холловскими контактами не воспрепятствуют их дальнейшему накоплению. Это классический эффект Холла, характеризующий холловским сопротивлением $R_X = U_X/I$. Как показано в курсе общей физики, величина R_X обратно пропорциональна плотности электронов ρ_e в канале (рис. 3.15, кривая *a*).

Однако при учете квантового характера движения электронов в магнитном поле возникает другая ситуация. Согласно квантовой механике, энергия электронов в плоскости слоя может принимать

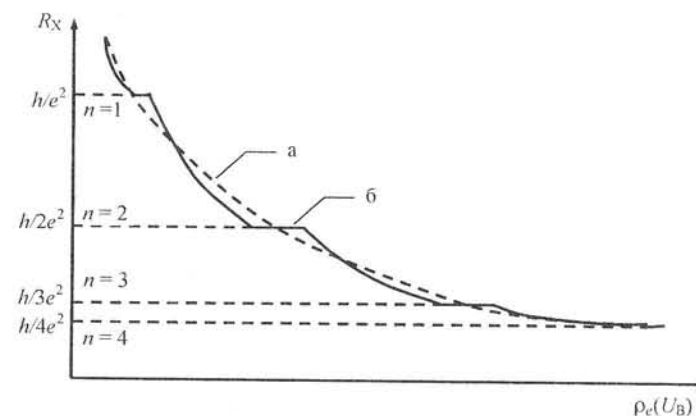


Рис. 3.15. Зависимость холловского сопротивления от плотности электронов в канале

только дискретные значения. Таким образом, движение электрона оказывается квантованным по всем трем координатам. Следствием этого является наличие на зависимости R_X от плотности электронов в слое ρ_e плоских участков — плато с квантованными значениями, согласно приведенной выше формулы (рис. 3.15, кривая *б*). Этот эффект называется квантовым эффектом Холла. Значение ρ_e регулируют, изменяя напряжения U_B .

На практике номер плато (ступеньки) выбирается четным, равным 2 или 4, тогда холловское сопротивление $(R_X)_{n=2} = \frac{h}{2e^2} = 12906,4035$ Ом, или $(R_X)_{n=4} = 6453,20175$ Ом, соответственно.

Как было сказано, квантовый эффект Холла реализуется с помощью специальной МОП-структуры (металл-окисел-полупроводник) (рис. 3.16), технология изготовления которой весьма сложна, но освоена рядом стран (в том числе Россией). Установка для воспроизведения эффекта Холла включает в себя криостат (герметизированная емкость с жидким гелием), в котором в специальном криозонде размещается холловская структура, а также сверхпроводящий соленоид, создающий магнитное поле (рис. 3.17). Важным вопросом является передача размера сопротивления холловской структуры реальной эталонной мере сопротивления R_S , находящейся при нормальной температуре, как правило, в термостате. Номинальное значение сопротивления R_S при этом равно (близко) холловскому $((R_X)_{n=2}$ или $(R_X)_{n=4}$). Измерительная схема содержит два контура с одним источником стабильного тока. В первый контур включена холловская структура, во второй — мера R_S (см. рис. 3.17). Для сравнения R_S и R_X применяется, как правило, потенциометри-

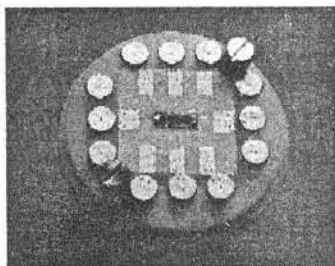


Рис. 3.16. Микросхема с МОП-структурой (BNM)

ческая схема с малошумящим нуль-индикатором. Управление, контроль и обработка информации в современных эталонах осуществляется с применением ЭВМ.

Помимо установки для воспроизведения квантового эффекта Холла первичный эталон единицы электрического сопротивления включает в себя:

- аппаратуру для хранения единицы электрического сопротивления (обычно состоит из группы прецизионных мер электрического сопротивления одного или нескольких номиналов и переходных мер, позволяющих проводить взаимное сличение мер разных номиналов;
- аппаратуру сравнения с эталоном на расчетном конденсаторе;
- аппаратуру передачи размера единицы поверяемым средствам в диапазоне от 10^{-3} до 10^9 Ом, состоящую из набора переходных мер и моста-компаратора сопротивлений.

Именно по такому принципу построен ГПЭ электрического сопротивления России (рис. 3.18, 3.19).

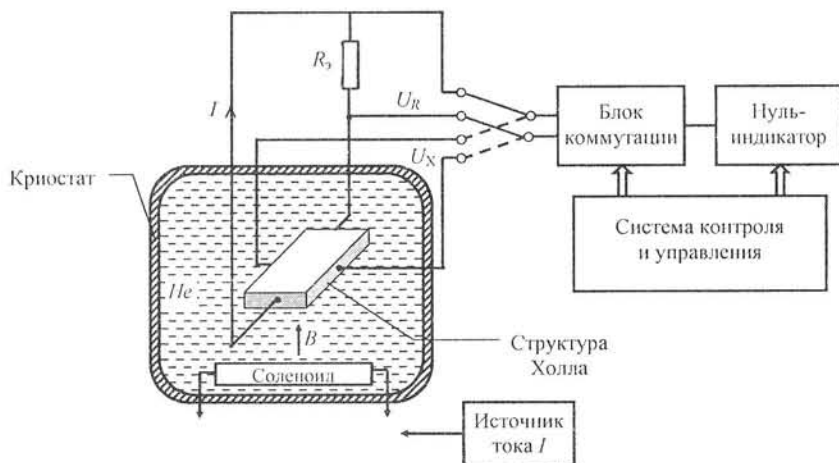


Рис. 3.17. Структурная схема установки для реализации квантового эффекта Холла



Рис. 3.18. Структурная схема ГПЭ электрического сопротивления России



Рис. 3.19. Государственный первичный эталон единицы электрического сопротивления

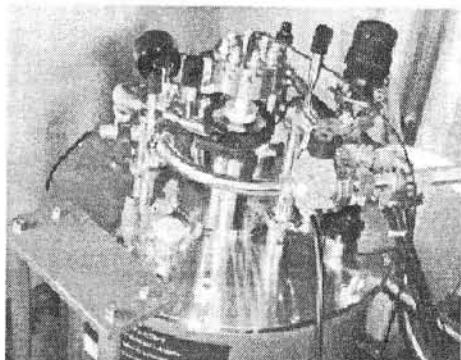


Рис. 3.20. Транспортный эталон Ома на эффекте Холла (ВРМ)

Приведем метрологические характеристики эталона [3.10, 3.13]:	
номинальное значение воспроизводимого сопротивления, Ом.....	12906,4035; 6453,20175;
диапазон, в котором передается размер единицы, Ом.....	$1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^9$;
НСП воспроизведения ($p = 0,99$).....	$4,5 \cdot 10^{-8}$;
СКО случайной погрешности.....	$2,5 \cdot 10^{-8}$.

В ряде стран разработан транспортный эталон ома на эффекте Холла (рис. 3.20).

В качестве вторичных эталонов применяются эталонные меры электрического сопротивления, которые постоянно совершенствуются. Меры последнего поколения, созданные в России (ВНИИМ), выполнены в индивидуальных металлических корпусах (рис. 3.21). Включение мер 1 Ом...10 кОм – пятизажимное (токовые и потенциальные зажимы, экран), мер 100 кОм...10 Ом – трехзажимное. В качестве резистивных элементов используются металлофольговые резисторы (от 1 Ом до 10 кОм) и герметизированные элементы из микропровода в стеклянной изоляции (от 100 кОм до 10 Мом).

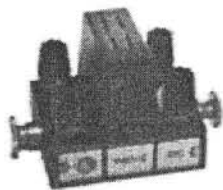


Рис. 3.21. Мера сопротивления постоянного и переменного тока ВНИИМ

Основные характеристики мер:

номинальные значения сопротив-	1, 10, 100 Ом,
ления.....	1, 10, 100 кОм;
диапазон значений постоянной	
времени, нс.....	0,5–200;
диапазон частот, кГц.....	0...1...5...20...50...100;
нестабильность за год, %.....	$(0,3...5) \cdot 10^{-4}$;
температурный коэффициент 1/К...	$(0,2...3) \cdot 10^{-6}$.

Погрешность калибровки:

на постоянном токе.....	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-4}$;
на частоте 1 кГц.....	$5 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3}$;
на частоте 100 кГц (1 Ом...10 кОм)	$5 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-1}$.

3.6. Эталон единицы магнитной индукции на эффекте ядерного магнитного резонанса

Эффект ядерного магнитного резонанса открыт в 1945 году Блохом и Парселем, сущность его заключается в следующем. Ядро атома, обладая механическим и магнитным моментом, совершают в магнитном поле прецессионное движение, которое аналогично движению "волчка" в поле тяготения Земли. Частота прецессии f атомного ядра рабочего вещества определяется магнитно-механическими свойствами ядра и значением напряженности магнитного поля H , в котором оно находится:

$$2\pi f = \mu_0 \gamma H, \quad (3.2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; γ – атомная постоянная – отношение магнитного момента ядра к его механическому моменту, называемая *гиромагнитным отношением ядра*; $\mu_0 H = B$ – магнитная индукция.

Если частота прецессии совпадает с частотой внешнего электромагнитного поля, имеет место явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР), сопровождающегося резонансным поглощением или излучением энергии, возникающим вследствие перехода атома с одного энергетического уровня на другой.

Из приведенной формулы следует, что $B = 2\pi f / \gamma$, т.е. если гиромагнитное отношение ядра применяемого вещества известно, то задача сводится к измерению частоты прецессии. Таким образом, измеритель на эффекте ЯМР является преобразователем магнитной индукции в частоту.

Установлено, что наиболее мощный сигнал ЯМР имеет место при использовании ядра атома водорода (протона), гиромагнитное

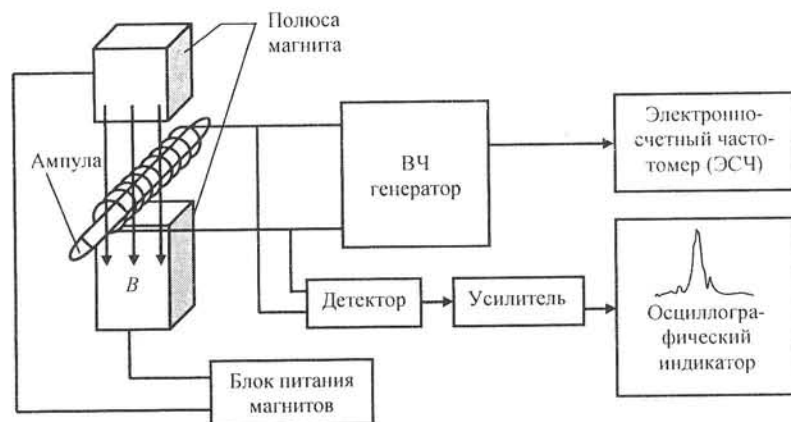


Рис. 3.22. Структурная схема эталона магнитной индукции

отношение которого $2\pi/\gamma_p$ на основании обработки результатов измерений в ряде стран принято CODATA равным $42576,02$ кГц/Тл.

Принцип построения эталона в диапазоне $0,05...2$ Тл (область наибольшего распространения средств измерения магнитной индукции) поясняется с помощью упрощенной структурной схемы, приведенной на рис. 3.22 [3.14].

В работе данной схемы используется резонанс протонов в воде (водном растворе FeCl_3). Раствор находится в ампуле, на которой намотаны ВЧ катушки. Ампула помещается в постоянное магнитное поле между полюсами электромагнитов (рабочем зазоре). Ось катушки должна быть перпендикулярной вектору измеряемой индукции магнитного поля.

Катушка питается от ВЧ генератора и создает вокруг образца переменное магнитное поле. При совпадении частоты генератора с частотой прецессии имеет место ЯМР, сопровождающийся обычно поглощением энергии. При этом ВЧ напряжение на катушке падает, что фиксируется через детектор на осциллографическом индикаторе. Частота ВЧ генератора в момент ЯМР измеряется ЭСЧ, а произведенное значение магнитной индукции определяется из соотношения $B = 2\pi f/\gamma_p$. Регулировка и стабилизация значения магнитной индукции осуществляется в блоке питания регулировкой напряжения на электромагнитах⁷.

⁷ Для получения значения B $0,09...1,2$ Тл (область наибольшего распространения поверяемых средств измерения магнитной индукции) частота ВЧ генератора должна перестраиваться в диапазоне $4...52$ МГц.

Реальная схема эталона значительно сложнее. Для обеспечения необходимых метрологических характеристик эталон включает в себя ряд систем:

- система обеспечения однородного стабильного магнитного поля в рабочем зазоре, что достигается как конструктивными решениями, так и применением специальных устройств стабилизации тока в намагничивающих обмотках и стабилизации магнитной индукции;
- система стабилизации частоты ВЧ генератора, осуществляемой обычно с помощью фазовой автоподстройки частоты относительно кварцевого генератора;
- система управления работой эталона и обработки результатов измерений.

Основными составляющими неисключенной систематической погрешности эталона на ЯМР являются:

- погрешность определения ЯМР;
- влияние формы образца и парамагнитных солей в образце;
- влияние деталей зонда на поле в ампуле;
- отклонение измеряемой частоты от частоты ЯМР.

В СССР были созданы два государственных эталона на эффекте ЯМР для области средних магнитных полей (Украина, ХГНИИМ) и сильных магнитных полей (Россия, ВНИИФТРИ).

Первый из них (рис. 3.23) имеет следующие метрологические характеристики [3.14]:

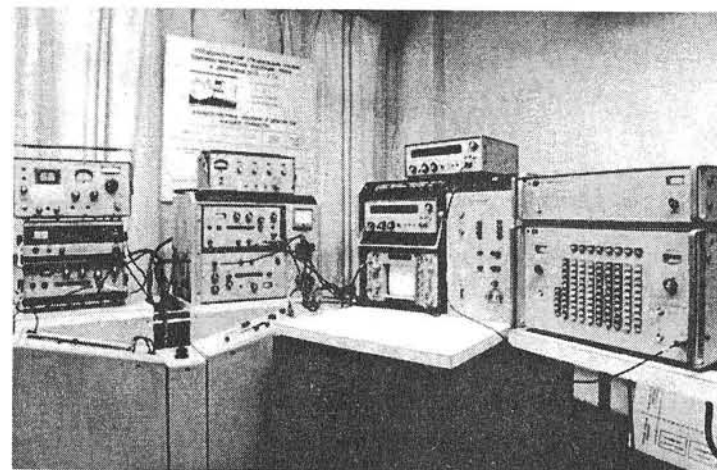


Рис. 3.23. Эталон магнитной индукции в диапазоне $0,05...2$ Тл

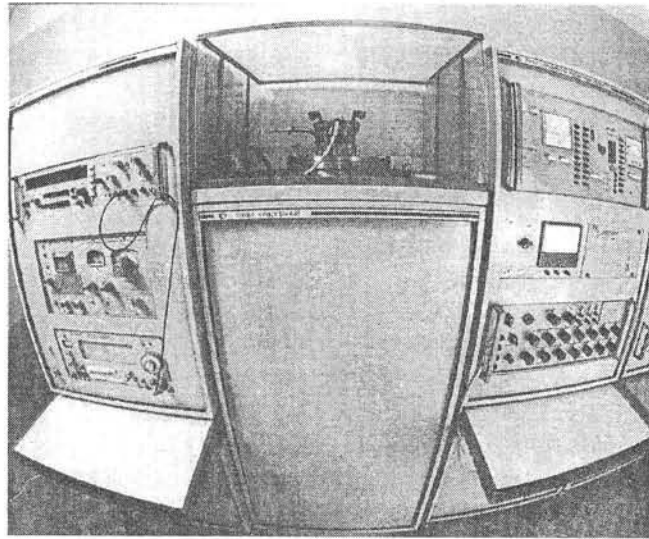


Рис. 3.24. Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции в диапазоне 1...10 Тл

диапазон значений B от 0,05 до 2 Тл;
 СКО (S_0)..... $< 1 \cdot 10^{-6}$;
 НСП (θ_0)..... $< 3 \cdot 10^{-6}$;
 нестабильность (ν)..... $\sim 0,5 \cdot 10^{-6}$;
 погрешность передачи ($S_{E\Sigma}$)..... $< 3 \cdot 10^{-6}$.

Передача размера единицы от эталона к аттестуемым рабочим эталонам происходит помещением датчиков ЯМР тесламетров и нестандартных датчиков в специальные гнезда межполюсных вставок эталона.

По сравнению с описанным выше эталон сильных магнитных полей (1...10 Тл) имеет некоторые особенности. Для получения однородного и высокостабильного магнитного поля в измерительном объеме, где размещаются сличаемые измерительные преобразователи (датчики), в эталоне применена сверхпроводящая катушка (мера) магнитной индукции с корректирующими обмотками [3.15]. Эталон (рис. 3.24) может применяться как для аттестации рабочих эталонов, работающих в нормальных условиях, так и в условиях низких температур (от 4,2 К), что необходимо для решения ряда научно-технических задач по техническому использованию сверхпроводимости. В частности, с его помощью аттестуются образцовые сверхпроводящие меры магнитной индукции.

В состав эталона в области сильных магнитных полей входят эталонные тесламетры на эффекте ЯМР, преобразователи и тесла

Рис. 3.25. Блок токовой катушки квантовой меры постоянного электрического тока

метры Холла и упомянутые выше сверхпроводящие меры. Эталон имеет диапазон воспроизводимых значений 1...10 Тл; НСП $\theta_0 < 1 \cdot 10^{-5}$; СКО $S_0 < 1 \cdot 10^{-6}$ [3.15].

Отметим, что некоторые страны, в том числе Россия, создали эталон единицы магнитной индукции – теслы в диапазоне малых значений (менее $5 \cdot 10^{-2}$), в котором тесла воспроизводится через основные единицы СИ – метр и ампер. В России такой эталон был создан в 1981 году во ВНИИМ [3.16]. Главным элементом эталона является эталонная катушка, через которую пропускается электрический ток. Магнитная индукция определяется в соответствии с выражением

$$B = K_B I + \Delta B, \quad (3.3)$$

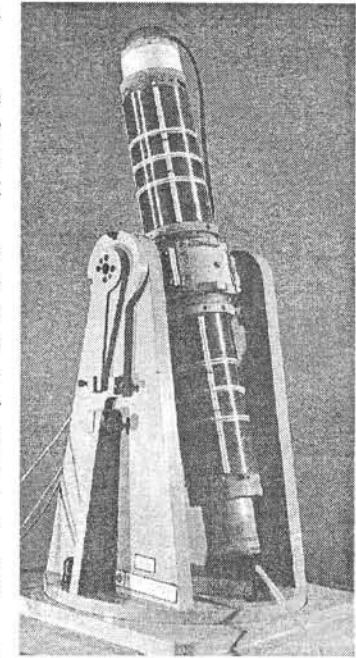
где K_B – постоянная катушки по магнитной индукции, определяемая расчетом по ее геометрическим размерам (с многочисленными поправками на неидеальность различных элементов); I – сила тока в обмотке; ΔB – неисключенный остаток магнитного поля Земли (МПЗ).

Эталон представляет собой уникальную конструкцию и включает в себя:

- специальную эталонную катушку, постоянная K_B которой рассчитывалась по многим показателям, определяемым экспериментально по специальным методикам [3.16];
- меру постоянного тока, опирающуюся на ГПЭ напряжения и сопротивления (рис. 3.25);
- систему автоматической компенсации магнитного поля Земли, а также устройств для компенсации вариаций этого поля;
- ряд дополнительных устройств.

Эталон обеспечивает воспроизведение единицы магнитной индукции в диапазоне от $5 \cdot 10^{-12}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ Тл с НСП $\theta_0 \approx 3 \cdot 10^{-6}$ и СКО $S_0 \approx 1 \cdot 10^{-6}$.

В последние годы этот эталон постоянно совершенствовался: были применены новые методические и аппаратные решения, расширены функциональные возможности, повысились метрологи-



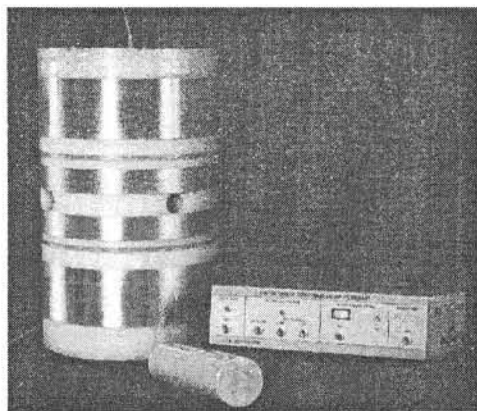


Рис. 3.26. Эталонная катушка магнитных величин и эталонный цезий-гелиевый атомно-резонансный тесламетр

ческие характеристики. В 1991 году был утвержден новый эталон, который воспроизводит комплекс единиц магнитных величин [3.17]. Основу этого эталона по-прежнему составляет эталонная катушка, однако единица магнитной индукции воспроизводится в двух вариантах: с помощью эталонной катушки и эталонного цезий-гелиевого тесламетра (рис. 3.26):

$$B(\text{Тл}) = K_B I = \frac{2\pi f_{\text{He}}}{\gamma_p P_\gamma},$$

где f_{He} – частота магнитного резонанса ^4He ; $P_\gamma = \gamma_{\text{He}}/\gamma_p$ – константа связи гиромантных отношений атомов ^4He и протона.

Эталонный тесламетр основан на квантовом преобразовании магнитной индукции в частоту напряжения с использованием принципов оптической накачки атомов ^{133}Cs и магнитного резонанса атомов ^4He [3.18], т.е. на квантовом эффекте.

Помимо единицы магнитной индукции постоянного поля эталон воспроизводит [3.17]:

- единицу постоянного магнитного потока – вебер:
 $\Phi(\text{Вб}) = K_\Phi I;$
- отношение магнитного потока к магнитной индукции Вб/Тл:
 $K_m \left(\frac{\text{Вб}}{\text{Тл}} \right) = \frac{K_\Phi}{K_B};$
- единицу магнитной индукции переменного поля;
- отношение магнитной индукции и магнитного потока к силе тока: Тл /А; Вб /А.

В приведенных выражениях K_B и K_Φ – постоянные эталонной катушки по магнитной индукции и магнитному потоку, соответственно, определяемые по геометрическим параметрам обмоток.

Основными устройствами эталона являются:

- эталонная катушка – единая мера магнитных величин (рис. 3.26);
- эталонный цезий-гелиевый атомно-резонансный тесламетр (см. рис. 3.26);
- квантовый и индукционный компараторы магнитного поля;
- автоматическая система управления.

Таким образом, в новом эталоне реализована взаимосвязь между единицами магнитной индукции, потока, момента, а также их отношений к амперу.

Метрологические характеристики эталона приведены в табл. 3.3.

По своим метрологическим характеристикам и функциональным возможностям эталон находится на уровне лучших мировых аналогов. Размер единицы магнитной индукции, воспроизводимый данным эталоном, согласуется с единицей, воспроизводимой другими эталонами, описанными ранее, через гиромантное отношение протона.

Создание такого комплексного эталона магнитных величин позволило объединить три существовавшие ранее в России поверочные схемы в одну и выделить в ней три ветви, возглавляемые соответствующими вторичными эталонами: магнитной индукции, магнитного потока и магнитного момента.

Таблица 3.3. Метрологические характеристики комплексного эталона единицы магнитных величин

Измеряемая величина	Диапазон измерений	НСП	СКО
Магнитная индукция, (постоянный ток)	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ Тл	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-7}$
Отношение магнитной индукции к силе тока в интервале частот $0 \dots 10$ кГц	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ Тл/А $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ Тл/А	$1,5 \cdot 10^{-6}$ $(1,5 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-7}$ $9 \cdot 10^{-5}$
Магнитная индукция (частота $0 \dots 300$ Гц)	$1 \cdot 10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-5}$ Тл	$(1,5 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Магнитный поток (постоянный ток)	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ Вб	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-6}$
Отношение магнитного потока к магнитной индукции (частота 10 кГц)	$1 \cdot 10^{-3} \dots 20$ Вб/Тл	$1,5 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-5}$
Отношение магнитного потока к силе тока (частота 0 и $20 \dots 30$ Гц)	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ Вб/А	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-6}$

3.7. Заключение

В табл. 3.4 приведены основные сведения о рассмотренных эталонах России. Методология использования квантовых эффектов в метрологии продолжает активно развиваться. Также совершенствуется техника и технология построения соответствующих эталонов. Одним из направлений дальнейшего совершенствования является повышение точности определения физических констант и их согласование. Как уже говорилось, эту работу ведут наиболее крупные центры метрологии: NIST (США), NPL (Англия), PTB (Германия), а также ВНИИМ (Россия).

Уточнение ФФК важно не только для совершенствования квантовых эталонов, но и для развития системы единиц в целом, а также для многих направлений научных исследований.

Другим важным направлением являются исследования в области технологии изготовления сверхпроводящих структур, с помощью которых реализуются квантовые эффекты. Так, для реализа-

Таблица 3.4 Основные сведения о квантовых эталонах

Физическая величина, единица	Физический эффект	Уравнение эталона	Используемые ФФК	Через какую ФВ определяется единица	Основная аппаратура	Погрешности	
						НСП	СКО
ЭДС, постоянное напряжение, В	Квантовый эффект Джозефсона	$E = n \frac{h}{2e} f_0$	$\frac{h}{2e}$	Частота	Узел Джозефсона	$\sim 1 \cdot 10^{-9}$	$< 0,6 \cdot 10^{-9}$
Электрическое сопротивление, Ом	Квантовый эффект Холла	$R_H = \frac{h}{ne^2}$	$\frac{h}{e^2}$	Самостоятельно	Установка воспроизведения КЭХ	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Магнитная индукция, Тл	Ядерный магнитный резонанс	$B = \frac{f_{\text{ЯМР}}}{\gamma_p}$	γ_p	Частота	Установка воспроизведения ЯМР	3 · 10 ⁻⁶ (диапазон 0,05...2Тл)	1 · 10 ⁻⁶
						7 · 10 ⁻⁶ (диапазон 1...10 Тл)	
Магнитная индукция, Тл Магнитный поток, Вб Вб/Тл; Тл/А; Вб/А	Расчетная катушка, ЯМР	$B = K_B I = \frac{f_{He}}{\gamma_p \mu_0}$ $\Phi = K_\Phi I$	γ_p γ_{He}	Ток, частота	Эталонная катушка, цезий-гелиевый тесламетр, квантовая мера тока	См. табл. 3.3	

ции эффекта Джозефсона помимо упомянутых выше SIS-матриц разработаны матрицы на структурах “сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник” (SNS) и “сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-сверхпроводник” (SINIS), обладающих другими характеристиками⁸. Выбор того или иного типа зависит от многих условий, прежде всего, от вида решаемой измерительной задачи. В частности, в настоящее время, когда ставится вопрос об использовании эффекта Джозефсона для измерения переменного напряжения, важной технологической задачей является создание программируемой матрицы для работы в динамическом режиме [3.19]. Подобные технологические проблемы имеют место и в плане совершенствования Холловских МОП-структур и структур для реализации эффекта одноэлектронного туннелирования.

Наконец, в третье направление следует выделить совершенствование всей инфраструктуры квантовых эталонов: магнитных систем эталонов на КЭХ и ЯМР, криогенной техники (включая использование сверхтемпературной проводимости), СВЧ генераторов, хранителей единиц (твердотельных мер напряжения и мер сопротивления). Одной из ветвей этого направления является дальнейшее совершенствование мобильных квантовых эталонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗД. 3

- 3.1. Квантовая метрология и фундаментальные константы: Пер. с англ. Сб. статей. – М.: Изд-во Мир, 1981. – 368 с.
- 3.2. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология: Учебник для вузов. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 492 с.
- 3.3. Purcell, Torrey, Paund // Phys. Rev. Mod. Phys. – 1946. – V.18. – P. 323.
- 3.4. Bloch, Hansen, Packard // Phys. Rev. – 1946. – V.69. – P. 127.
- 3.5. Josephson B. // Phys. Lett. – 1962. – V.1. – P. 251.
- 3.6. Klitzing K., Dorda G., Pepper M. New method for high accuracy determination of the fine structure constant based on quantized-Hall resistance // Phys. Rev. Lett. – 1980. – V.45. – № 6. – P. 494–497.
- 3.7. Popel R. The Josephson Effect and Voltage Standards // Metrologia. – 1992. – V.29. – P.153–174.
- 3.8. Александров В.А., Катков А.С., Телитченко Г.П. Новый государственный эталон единицы ЭДС // Измерительная техника. – 2002. – № 3. – С. 6–9.
- 3.9. Павленко Ю.Ф., Аникин В.В., Колбасин А.И. и др. Государственный первичный эталон единицы электродвижущей силы – вольта // Украинский метрологический журнал. – 1999. – Вып. 3. – С.14–19.
- 3.10. Государственные эталоны России: Каталог / Под общей редакцией В.Н.Крутикова. – М.: Андреевский флаг, 2000. – 184 с.
- 3.11. Галахова С.П., Краснов К.А., Кржимовский В.И. и др. Эффекты Джозефсона и возможности их применения для метрологического обеспечения электроизмерительной техники. – М.: Машиностроение, 1982. – 56 с.

⁸ Матрицы характеризуются затуханием, параметрами гистерезиса, значением критического напряжения, выходной мощностью, частотой возбуждения и т.д.

3.12. Альшин Б.И., Бухштабер В.М., Карпов О.В. и др. Меры напряжения на прецизионных стабилизаторах: метрологические характеристики и область применения // Измерительная техника. – 2001. – № 6. – С. 39–41.

3.13. Колтик Е.Д. Создание и развитие метрологии электрических измерений // Законодательная и прикладная метрология. – 2001. – № 4. – С. 43–50.

3.14. Зингерман В.И. и др. Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции // Украинский метрологический журнал. – 1996. – Вып. 2.3. – С. 36–40.

3.15. Ягола Г.К., Казанцев Ю.И. Государственный специальный эталон единицы магнитной индукции в диапазоне 1–10 Тл // Измерительная техника. – 1986. – № 8. – С. 3–4.

3.16. Барахин К.К., Баунин С.В., Русанова В.Л. и др. Государственный первичный эталон единицы магнитной индукции // Измерительная техника. – 1981. – № 7. – С. 6–8.

3.17. Калабин В.Н., Чернышев В.Е., Хорев В.Н. и др. Государственный первичный эталон единиц магнитных величин – магнитной индукции, магнитного потока и их отношения // Измерительная техника. – 1991. – № 10. – С. 3–5.

3.18. Блинов Е.В., Житников Р.А., Ильина Е.А. и др. Метрологические исследования щелочно-гелиевых магнитометров // Измерительная техника. – 1986. – № 11. – С. 53–55.

3.19. Нимейер Ю. Матрицы Джозефсона для динамических измерений напряжения // Украинский метрологический журнал. – 2001. – Вып. 1. – С. 5–11.

ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К РАЗД. 3

1. ГОСТ 8.027-01. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений постоянного напряжения и электродвижущей силы. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 9 с.

2. ГОСТ 8.028-86. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений электрического сопротивления. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 8 с.

3. ГОСТ 8.030-91. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции постоянного поля в диапазоне от $1 \cdot 10^{-12}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ Тл, постоянного магнитного потока, магнитной индукции и магнитного момента в интервале частот от 0 до 20000 Гц. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 12 с.

4. ГОСТ 8.144-75. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции в диапазоне от 0,05 до 2 Тл. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 8 с.

5. ГОСТ 8.212-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Меры электродвижущей силы. Элементы нормальные. Методика поверки. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 23 с.

6. ГОСТ 8.231-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений магнитного момента и магнитной восприимчивости. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 9 с.

7. ГОСТ 8.237-77. Государственная система обеспечения единства измерений. Катушки электрического сопротивления измерительные. Методы и средства поверки. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 27 с.

Раздел 4

ЭТАЛОНЫ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

4.1. ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

4.1.1. ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Переменное напряжение, как известно, характеризуется четырьмя основными параметрами:

Пиковое значение U_m (для квазигармонических колебаний – амплитудное) – наибольшее мгновенное значение напряжения $u(t)$ за время измерения T (или за период T):

$$U_m = \max |u(t)|, \quad t \in [t_0; t_0 + T]. \quad (4.1)$$

Среднее значение U_0 за время измерения T (или за период T) – постоянная составляющая напряжения $u(t)$:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt. \quad (4.2)$$

Средневыпрямленное значение (СВЗ) – среднее значение абсолютного значения напряжения:

$$U_{св} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |u(t)| dt. \quad (4.3)$$

Среднеквадратическое значение (СКЗ)¹ – положительный корень квадратный из среднего значения квадрата напряжения:

$$U_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t) dt}. \quad (4.4)$$

Перечисленные параметры взаимосвязаны. Для чисто гармонических колебаний эта связь выражается известными соотношениями:

$$U_0 = 0; \quad U_m = \sqrt{2} U_{ск} = \frac{\pi}{2} U_{св}; \quad U_{св} = \frac{2}{\pi} U_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{ск};$$

$$U_{ск} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{св}. \quad (4.5)$$

¹ В литературе часто встречаются синонимы СКЗ – действующее, эффективное значение.

Наиболее универсальным и информативным параметром переменного напряжения является СКЗ. Требование градуировки показаний вольтметров в значениях СКЗ официально закреплено в нормативных документах, в частности, России и Украины. Поэтому, когда говорят об эталонировании напряжения переменного тока, имеют в виду именно среднеквадратическое значение.

4.1.2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ (ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ) НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Существует несколько методов точного измерения СКЗ переменного напряжения. Первый основывается на дискретизации сигнала, измерении мгновенных значений с последующей цифровой обработкой и вычислении по ф-ле (4.4). В этом направлении в последние годы достигнуты высокие результаты даже в серийных приборах, например в HP3458A (фирма Hewlett-Packard, США), где наименьшая погрешность не превышает 0,01 %.

Второй, пригодный для чисто гармонического сигнала или другого с точно известной формой, заключается в измерении амплитуды переменного напряжения и последующем пересчете в СКЗ. Этот способ применяется в компенсационных вольтметрах, где в предположении синусоидальности напряжения вычисляется СКЗ по ф-ле (4.5):

$$U_{\text{ск}} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m.$$

Третий — базируется на компарировании тепловых энергий (мощностей) при воздействии на термопреобразователь измеряемого переменного и известного постоянного напряжения.

Первые два способа имеют ряд известных недостатков и характерных источников погрешностей, ограничивающих их точность и возможность использования в эталонных средствах, поэтому, не оставаясь на них более подробно, отметим, что наибольшее распространение для точных измерений параметров интенсивности излучения любого типа получил метод теплового компарирования. Согласно закону сохранения энергии при полном преобразовании равные количества тепла соответствуют одинаковым энергиям независимо от вида излучения. Благодаря этому сравнивается энергия переменного тока с энергией постоянного тока. Метод обеспечивает единство единиц напряжения, тока, мощности при различных длинах волн, обеспечивая их привязку к тем же единицам на постоянном токе. Параметры постоянного тока, в частности, напряжение, определяются с необходимой точностью на базе эффекта Джозефсона, рассмотренном выше.

Диапазон частот, в котором обычно создают эталоны единицы переменного напряжения, составляет от 20 Гц до 2...3 ГГц. Этот диапазон обычно перекрывается двумя—тремя эталонами. В России, в частности, созданы два государственных эталона: ГЭТ 89-75 на диапазон 20 Гц...30 МГц и ГЭТ 27-82 на диапазон 30...3000 МГц. Хотя в основе обоих эталонов лежит метод теплового компарирования, аппаратная реализация их различна и будет рассмотрена раздельно.

4.1.3. ДИАПАЗОН НИЗКИХ И СРЕДНИХ ЧАСТОТ

Упрощенную структурную схему эталона в этом диапазоне можно представить на рис. 4.1. Сущность воспроизведения единицы переменного напряжения заключается в попеременной подаче на эталонный термопреобразователь (ТП) измеряемого переменного напряжения и замещающего постоянного напряжения, значение которого может быть установлено (измерено) с необходимой точностью.

При подаче на вход ТП переменного напряжения U_{\sim} (переключатель П в положении 1) фиксируется термо-ЭДС E на его выходе, пропорциональная $U_{\text{ск}}$. Затем на вход ТП подается постоянное напряжение $U_{=}$ и регулируется его уровень до получения термо-ЭДС на выходе ТП, равной E . Тогда $U_{\text{ск}} = U_{=}$. Термо-ЭДС E и напряжение $U_{=}$ измеряются, как правило, компенсационным методом с помощью соответствующих устройств, входящих в состав эталона (меры ЭДС, потенциометра, делителя напряжения).

В качестве источника переменного напряжения в эталонах обычно используется либо измерительные генераторы (при необходимости с усилителем), либо специальные прецизионные источники, получившие название мер (калибраторов) напряжения. Важнейшим устройством эталона, определяющим его метрологические

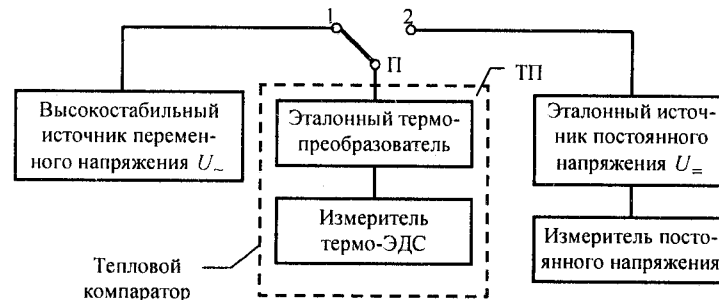


Рис. 4.1. Упрощенная структурная схема эталона переменного напряжения

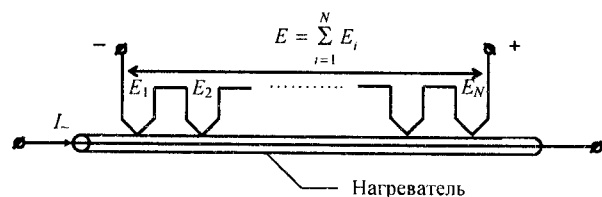


Рис. 4.2. Схема многоэлементного термопреобразователя

характеристики, является термопреобразователь. В разных странах этот узел реализуется по разному, хотя требование к нему единое: минимальная разница в преобразовании постоянного и переменного тока в тепловую энергию (термо-ЭДС), характеризующая погрешностью перехода от постоянного к переменному току. Для анализа этой погрешности необходимо рассмотреть конструкции ТП. Так, в России для перекрытия диапазона частот от 20 Гц до 30 МГц используются два вида ТП: низкочастотный многоэлементный для диапазона 0,02...100 кГц и высокочастотный одноэлементный – для диапазона 0,1...30 МГц.

Основным элементом НЧ преобразователя является воздушный бесконтактный многоэлементный ТП (рис. 4.2), представляющий собой термобатарей, в которой на нихромовом ленточном нагревателе равномерно расположены 40 последовательно соединенных хромель-копелевых термопар [4.1]. При напряжении свыше 3 В последовательно с нагревателем ТП включается добавочный резистор.

Важнейшими требованиями к добавочному резистору являются его весьма малая реактивность (для минимизации частотной погрешности) и высокая точность подгонки². Так выполнен, в частности, термопреобразователь ТЭМ-6М разработки ВНИИМ (Россия).

Преобразователь для частот выше 100 кГц выполняется коаксиальным с бесконтактным одноэлементным вакуумным термопреобразователем (ТВБ). Добавочный резистор выполнен пленочным и расположен вместе с ТП в одном массивном экране. Схема термопреобразователя типа ПНТЭ-6 разработки ВНИИМ приведена на рис. 4.3. Имеются также термопреобразователи с двумя последовательно или параллельно включенными ТВБ (типа ПНТЭ-10).

Ряд зарубежных фирм, в частности Holt, Fluke (США), разработали единый эталонный одноэлементный преобразователь во всем диапазоне до 30 МГц с несколькими переключаемыми добавочными резисторами. Так, в ТП Fluke 792 А, признанном одним из лучших в мире, совмещены один ТП и многопредельный переключатель

² Отклонение сопротивления добавочного резистора от номинального значения не должно превышать $1 \cdot 10^{-4}$.

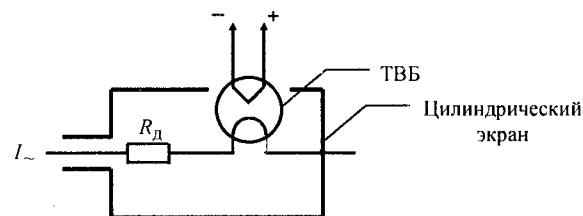


Рис. 4.3. Схема термопреобразователя ПНТЭ-6

атель добавочных сопротивлений или усилителей (для перекрытия динамического и частотного диапазонов). В эталоне РТВ (Германия) каждый предел (по напряжению) реализуется жестко соединенным термопреобразователем и добавочным частотно-компенсированным сопротивлением.

Как правило, в эталоне напряжения преобладает неисключенная систематическая погрешность, основными источниками которой являются:

- погрешность термопреобразования, т.е. перехода от постоянного напряжения к переменному;
- погрешность измерения постоянного напряжения, зависящая от применяемых технических средств и метода измерения.

Доминирующей составляющей является **погрешность термопреобразования**, источниками которой являются:

- а) так называемое явление Томпсона и Пельтье³, связанное с полярностью постоянного тока в нагревателе (погрешность асимметрии);
- б) наличие реактивных составляющих и поверхностного эффекта (частотная погрешность) в цепи ТП.

Погрешность измерения постоянного напряжения существенно ниже погрешности термопреобразования (несколько единиц в степени 10^{-6}) и более подробно не рассматривается.

Погрешность асимметрии обусловлена неодинаковым распределением температуры вдоль нагревателя на постоянном и переменном токе [4.2] и не зависит от частоты последнего. Эту погрешность можно уменьшить несколькими способами: конструктивно-технологическими, например, рациональным выбором мате-

³ Если вдоль проводника существует градиент температуры, то при прохождении тока в нем за счет явления термо-ЭДС происходит выделение дополнительной теплоты (помимо джоулевой) при переходе электронов из горячего в холодный участок или поглощение теплоты при переходе из горячего участка в холодный.

риала нагревателя, оптимальным конструкторским решением, применением многоэлементных ТП; методическим – измерением при двух полярностях постоянного тока и вычислении результата как среднего арифметического двух измерений. У лучших ТП погрешность асимметрии составляет менее 10^{-4} %.

Частотная погрешность определяется следующим образом. Преобразователь (0,1...30 МГц) состоит из бесконтактного термопреобразователя ТВБ и добавочного резистора R_d (рис. 4.3). Эквивалентная схема этого ТП может быть представлена в виде (рис. 4.4).

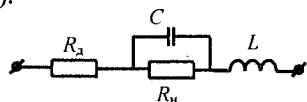


Рис. 4.4. Эквивалентная схема высокочастотного ТП

С учетом влияния поверхностного эффекта в нагревателе частотная погрешность [4.2]

$$\delta_{\omega} = \frac{|Z_{вх}|}{R_n + R_d} \sqrt{\frac{R_n}{R_f}} \quad (4.6)$$

где $|Z_{вх}|$ – полное входное сопротивление преобразователя на переменном токе; R_n и R_f – соответственно сопротивление нагревателя постоянному и переменному току; R_d – сопротивление добавочного резистора на постоянном токе.

В общем виде цепь ТП рассматривают как длинную линию с равномерно распределенными параметрами, нагруженную активным сопротивлением нагревателя ТП. Тогда при $R_d \ll R_n$ [4.3]

$$\delta_{\omega} = -\frac{\omega^2}{Z} \left(\frac{L^2}{R_d^2} - \frac{LC}{3} + \frac{R_d^2 C^3}{90} \right).$$

Значения равномерно распределенной индуктивности и емкости вычисляются по формулам:

$$L = 4,6 \cdot 10^{-7} \mu l_R \lg \frac{D}{d}; \quad C = \frac{0,24 \cdot 10^{-10} \epsilon l_R}{\lg D/d},$$

где D – внутренний диаметр внешнего цилиндра, м; d – диаметр резистора, м; l_R – длина резистора, м; μ и ϵ – магнитная и диэлектрическая проницаемости среды.

Здесь допущено пренебрежение реактивностью выводов добавочного резистора и ТП, а также емкости, шунтирующей резистор, что подлежит проверке.

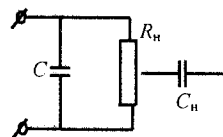


Рис. 4.5. Упрощенная эквивалентная схема высокочастотного ТП

При конструировании ВЧ преобразователей в первую очередь необходимо уменьшить остаточные реактивности всех элементов и поверхностный эффект. Этим условиям удовлетворяет использование коаксиальной конструкции.

На практике обычно роль доминирующей реактивности играет емкость C_n между нагревателем и корпусом (рис. 4.5).

Эту емкость можно корректно измерить, например, высокочувствительным мостом (C_n порядка 0,1 пФ) и вычислить постоянную времени нагревателя $\tau_n = C_n R_n$, откуда частотная погрешность $\delta_{\omega} = (\omega \tau_n / 4)^2$ (определяется для ряда значений частотного диапазона).

Далее находят значения $\delta_{\omega i}$ для других пределов измерений (с включением дополнительных сопротивлений и усилителей) следующим образом. Термоэлектрическим компарированием измеряют переменное напряжение U на двух смежных пределах, для одного из которых оно является верхней границей, а для другого – нижней. Получают U_{-1} и U_{-2} . При этом U_{-1} получено с погрешностью $\delta_{\omega 1}$, а в значение U_{-1} дополнительно входит погрешность $\delta_{\omega 2}$ из-за цепей нового поддиапазона. Ее относительное значение

$$\delta_{\omega 2} = \frac{U_{-2} - U_{-1}}{U_{-1}} 100 \%$$

Тогда для второго поддиапазона частотная погрешность равна $\sqrt{\delta_{\omega 1}^2 + \delta_{\omega 2}^2}$. Измерения выполняются для всех принятых значений частотного диапазона и всех пределов измерений.

Приведем метрологические характеристики ГПЭ России для диапазона частот 20 Гц...30 МГц:

диапазон измерений, В.....	0,1...10;
диапазон передачи, В.....	до 1000 В;
НСП (θ_0).....	$1 \cdot 10^{-5}$... $3 \cdot 10^{-4}$;
СКО (S_0).....	$5 \cdot 10^{-6}$... $5 \cdot 10^{-5}$.

Комплект ТП государственного эталона России приведен на рис. 4.6.

На Украине пока создан ГПЭ в диапазоне 10 Гц...1 МГц. Он обеспечивает воспроизведение напряжения в диапазоне 0,1...20 В на частотах 10 Гц...1 МГц и до 1000 В на частотах 50 Гц...100 кГц. Для этого эталона НСП $\theta_0 = 3,5 \cdot 10^{-6}$... $2 \cdot 10^{-4}$ и СКО $S_0 = 10^{-6}$... $2 \cdot 10^{-5}$.



Рис. 4.6. Комплект эталонных термоэлектрических преобразователей с добавочными резисторами из состава ГПЭ России

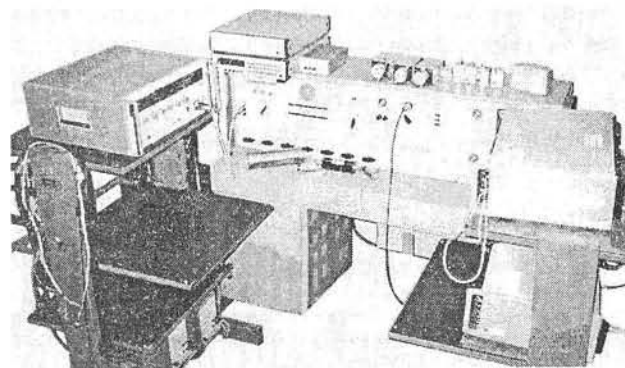


Рис. 4.7. Эталон РЭН-2

В качестве вторичных эталонов в России и странах СНГ используют разработанные ВНИИМ эталоны РЭН-2 и РЭН-2М [4.9] (в диапазоне частот 20 Гц...30 МГц, погрешность $1 \cdot 10^{-5} \dots 6 \cdot 10^{-3}$) (рис. 4.7).

4.1.4. ДИАПАЗОН ВЫСОКИХ И УЛЬТРАВЫСОКИХ ЧАСТОТ

На частотах свыше сотни мегагерц работа схемы на рис. 4.3 приводит к весьма значительной частотной погрешности, поэтому в этом диапазоне применяют другие технические решения, хотя метод теплового компарирования остается в основе построения эталона. Известны следующие основные схемы построения эталона:

а) использование в качестве термопреобразователей специальных терморезисторов (термисторов или болометров), меняющих свое сопротивление при подаче на них ВЧ мощности. Эти терморезисторы включаются, как правило, в мостовую схему, с помощью которой осуществляется уравнивание измеряемой ВЧ мощности (напряжения) мощностью постоянного тока;

б) измерение ВЧ напряжения путем точного измерения ВЧ мощности и импеданса.

В большинстве развитых стран, в частности, в США и России использовано первое решение и достигнуты примерно одинаковые метрологические характеристики. В то же время эталон Германии построен на основе измерения мощности. Работы по использованию эталонов мощности для воспроизведения ВЧ напряжения ведутся и в России. В частности, в работе [4.4] теоретически и экспериментально показана возможность измерения ВЧ напряжения на основе этого метода до частоты 2 ГГц с погрешностью $(2 \dots 3) \cdot 10^{-2}$, что приближается к точности, достигнутой при использовании мостовой схемы.

Рассмотрим более подробно метод с использованием терморезисторов и мостовой схемы, применяемый в ГПЭ России. Структурная схема ГПЭ России в диапазоне ВЧ и УВЧ представлена на рис. 4.8 [4.5].

Эталон состоит из следующих основных устройств:

- источников ВЧ напряжения;
- полосовых фильтров;
- терморезисторного преобразователя напряжения;
- уравновешенного моста постоянного тока, в одно из плеч которого включен терморезисторный преобразователь;
- прецизионного измерителя постоянного напряжения.

Принцип действия эталона основан на косвенном определении воспроизводимого напряжения переменного тока U по результатам прямых измерений напряжения постоянного тока в двух режимах: отсутствии переменного напряжения (U_1) и его наличии (U_2).

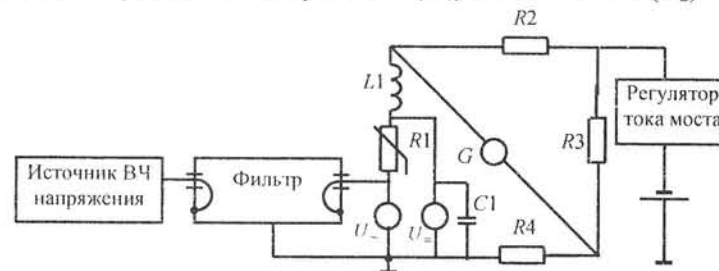


Рис. 4.8. Структурная схема эталона переменного напряжения для частот свыше 30 МГц

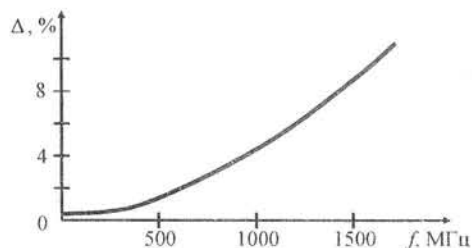
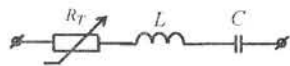


Рис. 4.9. Частотная погрешность термопреобразователя

Рис. 4.10. Эквивалентная схема высокочастотного ТП на частотах свыше 30 МГц



Методика измерения заключается в следующем. Вначале, при отсутствии на входе преобразователя переменного напряжения, мост автоматически уравнивается и измеряется падение напряжения постоянного тока U_1 на терморезисторе R_1 . Затем на вход терморезисторного преобразователя подается переменное напряжение U_- . При этом регулятор тока моста автоматически уменьшает проходящий через него ток до наступления баланса моста, после чего измеряется падение напряжения постоянного тока U_2 на терморезисторе R_1 . Значение воспроизводимого напряжения рассчитывается по формуле

$$U_- = \sqrt{U_1^2 - U_2^2} = \sqrt{(2U_2 + \Delta U)\Delta U}, \quad \Delta U = U_1 - U_2. \quad (4.7)$$

В эталоне России в качестве терморезистора применен платиновый болометр, в котором термочувствительный элемент выполнен из платиновой проволоки. Болометр включен в специальную конструкцию — диодно-болометрическую головку, позволяющую обеспечить параллельное включение терморезистора и измерительной головки градуируемого рабочего эталона (образцового вольтметра), а также подключение к терморезистору напряжения переменного и постоянного токов.

Исследования показывают, что частотная систематическая погрешность термопреобразователей, связанная с наличием реактивностей и токов утечки, составляет от 0,4 % на частоте 400 МГц до 8,9 % на частоте 1500 МГц (рис. 4.9) [4.6].

Для исключения этой погрешности ее определяют по параметрам эквивалентной схемы преобразователя (рис. 4.10) расчетно-экспериментальным методом, а затем вносят поправку [4.5, 4.6].

Индуктивность обусловлена телом термопреобразователя и выводами, емкость — это конструктивная емкость схемы. Реактивное сопротивление ТП $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ можно определить методом вариации активного сопротивления болометра путем изменения рабочего сопротивления R моста постоянного тока. Если при постоянной частоте и постоянном значении напряжения на входе пове-

ряемого вольтметра изменять сопротивление ТП постоянному току R_T и определять при этом напряжение U_- по ф-ле (4.7), то, очевидно, должно соблюдаться равенство

$$U_{-1} \sqrt{\frac{(1+X^2)}{R_{T1}}} = U_{-2} \sqrt{\frac{(1+X^2)}{R_{T2}}}$$

Решая это уравнение, можно определить X . Повторяя процедуру несколько раз для разных значений R_T можно составить систему уравнений относительно L и C . Решение системы методом наименьших квадратов позволяет получить вероятные значения L и C и погрешность их определения [4.5].

Для применяемых в государственном эталоне России болометров БП4-150 получено $L = (0,925 \pm 0,005) \cdot 10^{-8}$ Гн, $C = (110 \pm 10) \cdot 10^{-12}$ Ф. На основе полученных значений L и C определяется частотная поправка, %, $\Delta_0 = \left[\sqrt{1 + X^2/R_T^2} - 1 \right] \cdot 100$ и действительное значение воспроизводимого напряжения $U_n = U_- (1 + \Delta_0/100)$.

Первый источник НСП эталона практически полностью определяется погрешностью определения поправки Δ_0 (на частоте 1500 МГц оценивается значением $6 \cdot 10^{-3}$).

Второй источник НСП — приближенный характер эквивалентной схемы, приведенной на рис. 4.10. В [4.5] показано, что эта погрешность незначительна.

Третьим источником НСП является возможная неэквивалентность замещения тока ВЧ и постоянного тока, связанная с различием в распределении тепловых источников в болометре при прохождении тока ВЧ и постоянного тока. Эксперименты показывают, что эта погрешность может достигать значения, равного нескольким десяткам процента.

Заметим, что стремление минимизировать частотную погрешность привело в США к созданию специального болометра, названного Volovac [4.7]. Погрешность измерения напряжения с его помощью на частотах до 2 ГГц не превышает 1 %, при 8 ГГц — 4 %. Конструкция Volovac признается работоспособной вплоть до частоты 18 ГГц.

Государственный эталон России (рис. 4.11) работает в диапазоне 30...3000 МГц, имеет следующие метрологические характеристики [4.17]:

диапазон измерения, В.....	0,1...1;
НСП (θ_0).....	$5 \cdot 10^{-4}$... $2 \cdot 10^{-2}$;
СКО (S_0).....	$5 \cdot 10^{-5}$... $5 \cdot 10^{-3}$.

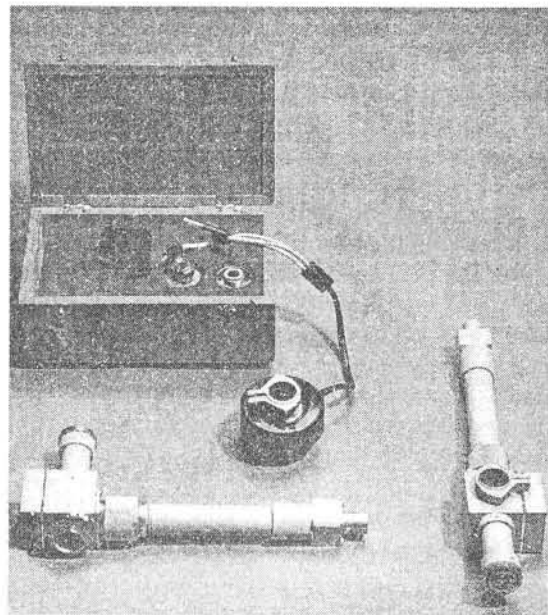


Рис. 4.11. Комплект эталонных терморезисторных преобразователей переменного напряжения из состава государственного эталона России

Приведем еще одно оригинальное техническое решение терморезисторного преобразователя [4.8], разработанное в последние годы во ВНИИФТРИ, позволяющее минимизировать его частотную погрешность и применять на частотах до 10...18 ГГц. Схематическая конструкция преобразователя показана на рис. 4.12.

На срез коаксиальной линии насажен цанговый разъем, в который вставляется пробник поверяемого вольтметра (на рис. пробник не показан), касающийся своим наконечником среза центрального

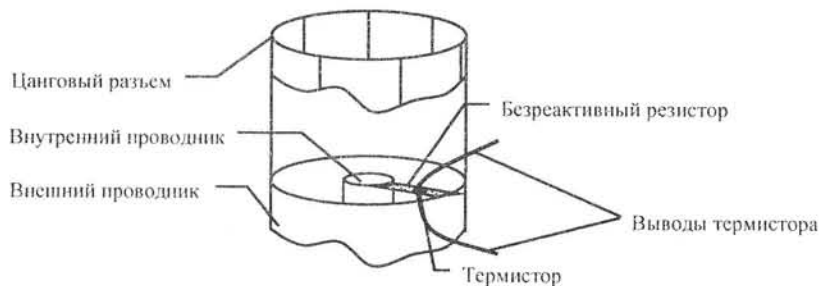


Рис. 4.12. Конструкция ТП ВНИИФТРИ

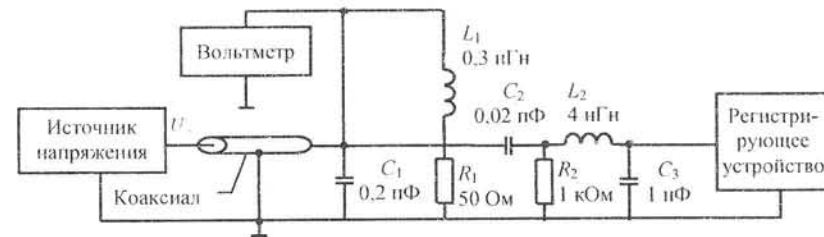


Рис. 4.13. Способ подключения ТП ВНИИФТРИ

проводника коаксиала. Между обоими проводниками коаксиала непосредственно на самом срезе встроен безреактивный резистор, изображенный прямоугольником. Со стороны, противоположной резистивному слою, на керамическую подложку приклеен термистор, образуя вместе с резистором терморезистор косвенного подогрева. Выводы термистора подключаются к устройству регистрации (с помощью фильтрующих конденсаторов). Такая конструкция обеспечивает малую частотную зависимость коэффициента преобразования, хороший тепловой контакт резистора с термистором и слабую их электрическую связь между собой.

Эквивалентная электрическая схема данного ТП и способ его подключения приведены на рис. 4.13.

Здесь C_1 и L_1 — остаточные реактивные элементы нагрузочного резистора R_1 ; R_2 — термистор, приклеенный к резистору R_1 ; C_2 — характеризует степень электрической связи между R_1 и R_2 ; L_2 , C_3 — фильтрующая цепочка.

Поверяемый вольтметр включен пробником с помощью цангового разъема между проводниками коаксиала.

Согласно [4.8] результирующая относительная погрешность данного эталона

$$\Delta = (0,2 + 0,1U^{-1} + 0,4f), \%,$$

где U — напряжение, В; f — частота, ГГц. На частоте 1 ГГц $\Delta = 0,7\%$, на частоте 3 ГГц $\Delta = 1,5\%$.

В качестве вторичного эталона в России и странах СНГ и ближнего зарубежья используется разработанный ВНИИМ эталон РЭН-3 (в диапазоне 30 Гц...2000 МГц, погрешность от $7 \cdot 10^{-4}$... $1,2 \cdot 10^{-2}$) (рис. 4.14). В основе этого эталона также лежит метод теплового компарирования [4.10].

Основным видом рабочих эталонов 1-го разряда являются диодные компенсационные вольтметры (ВЗ-49, ВЗ-59, ВЗ-63), относительная погрешность которых составляет $5 \cdot 10^{-4}$... $1,5 \cdot 10^{-2}$ в зависимости от частоты и напряжения.

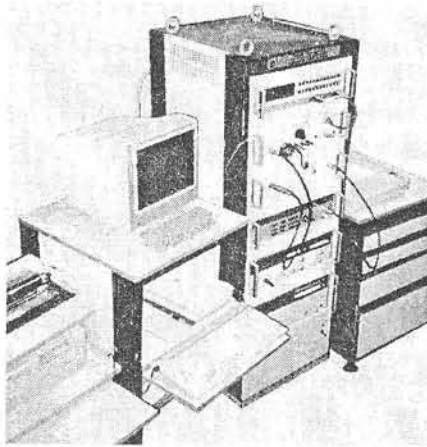


Рис. 4.14. Эталон РЭН-3

4.2. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ СИЛЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Как показывает метрологическая практика развитых стран, точные измерения силы переменного тока необходимы в диапазоне частот вплоть до 300 МГц. При этом наибольшая точность измерения требуется на низких и средних частотах (до 1 МГц) при значениях тока до 10...20 А. В более высокочастотном диапазоне требования к точности ниже, но сила тока может достигать сотен ампер. Поэтому и соответствующие эталоны в разных диапазонах строятся на разных принципах.

4.2.1. ДИАПАЗОН НИЗКИХ И СРЕДНИХ ЧАСТОТ

При создании эталона единицы силы переменного тока в этом частотном диапазоне применяется та же методология, что и при создании эталона переменного напряжения НЧ диапазона, т.е. производится среднеквадратическое значение переменного тока

$$I_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt}, \quad (4.8)$$

а для измерения используется описанный выше способ теплового компарирования с одновременным сравнением СКЗ силы переменного тока с постоянным током [4.3, 4.14].

Структурная схема эталона при этом принимает вид, приведенный на рис. 4.15.

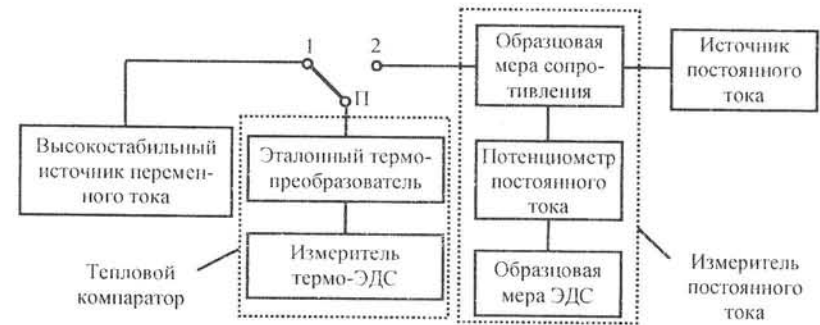


Рис. 4.15. Структурная схема эталона единицы переменного тока НЧ диапазона

При включении ТП в цепь переменного тока (переключатель П в положении 1) измеряется термо-ЭДС E_{-} , пропорциональная $I_{\text{ск}}^2$:

$$E_{-} = k \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = k I_{\text{ск}}^2.$$

Затем ТП включают в цепь постоянного тока. При этом термо-ЭДС $E_{-} = k I_{\text{ск}}^2$. Постоянный ток регулируют таким образом, чтобы получить то же значение термо-ЭДС, что и при подаче переменного тока, т.е. $E_{-} = E_{+}$.

При этом I_{-} измеряют с помощью потенциометра и мер ЭДС и сопротивления. На основе равенства $E_{-} = E_{+}$ имеем $k I_{\text{ск}}^2 = k I_{-}^2$, т.е. $I_{-} = I_{\text{ск}}$. Отметим, что источники и характер погрешностей воспроизведения единицы силы тока близки тем, которые имеют место при воспроизведении единицы переменного напряжения, однако имеются и некоторые особенности, влияющие на конструкцию эталона, в частности термопреобразователей.

Так как в суммарной погрешности воспроизведения размера ампера погрешность перехода с переменного тока на постоянный является доминирующей, то все усилия специалистов в данной области направлены на разработку расчетных и экспериментальных методов ее определения и минимизацию. В частности, в ГПЭ России [4.11, 4.12] выбрана групповая структура построения, т.е. он содержит группы эталонных ТП по 2–3 на каждый из номинальных токов (рис. 4.16). Каждая группа составлена из ТП разных конструкций. Так, группа ТП на номинальные токи 1...100 мА, помимо вакуумных ТП типа ТВБ, состоит из разработанных во ВНИИМ воздушных многоэлементных ТП. Группа ТП на токи 0,3...20 А состоит из многоэлементных ТП прямого включения, т.е. без шунтов. Таким образом, во ВНИИМ созданы различные конструкции ТП с использованием разных материалов и сплавов, оптимальные для конкретных значений токов и поддиапазонов частот.

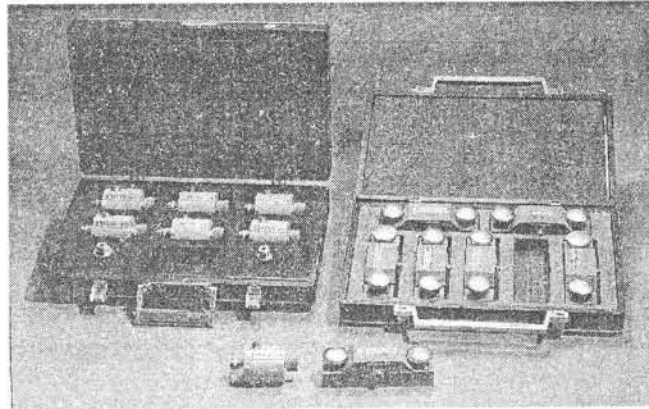


Рис. 4.16. Комплект эталонных термоэлектрических преобразователей переменного тока

Групповая структура ГПЭ России позволяет определять его метрологические характеристики и частотные свойства путем взаимных сличений ТП как внутри каждой группы, так и ТП со смежными номинальными токами, учитывая, что ТП имеют как разные конструкции, так и разные материалы.

Последние международные сличения национальных эталонов силы переменного тока (CCE 92-63) [4.13] показали, что ГПЭ России входят в группу эталонов ведущих мировых метрологических центров. Он обеспечивает воспроизведение размера ампера в диапазоне измерений от 10^{-3} до 20 А и диапазоне частот 20 Гц... 10^6 Гц с СКО $5 \cdot 10^{-7}$... $1 \cdot 10^{-4}$ и НСП $1 \cdot 10^{-5}$... $3 \cdot 10^{-4}$ [4.17].

Эти характеристики, в основном, соответствуют аналогичным характеристикам национальных эталонов США и Англии.

Вторичные эталоны России, согласно поверочной схеме по МИ1940-88, имеют диапазон измерений 10^{-3} ...25 А, диапазон частот 20... 10^6 Гц и доверительные границы погрешности $(1,5 \dots 6,5) \cdot 10^{-5}$ и также основаны на методе теплового компарирования.

4.2.2. ДИАПАЗОН ВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Измерения силы тока высокой частоты необходимы для контроля параметров средств связи, радионавигации, контроля качества изделий радиотехнической и электронной промышленности. Широкое распространение получили термоамперметры, работающие в диапазоне частот до 300 МГц, а также измерители силы тока в эквиваленте антенны. Измерения силы тока ВЧ наиболее часто используют для сравнительно больших токов от сотен миллиампер

до сотен ампер, при этом значении тока обычно характеризуют интенсивность сигнала на "передающей стороне" радиотехнических систем. Для обеспечения проверок амперметров ВЧ в некоторых странах, в частности в России, созданы эталоны единицы силы тока ВЧ [4.15]. Рассмотрим принцип построения государственного эталона России.

Воспроизведение единицы силы тока ВЧ основано на электродинамическом преобразовании энергии электромагнитного поля в механическую энергию колебаний кольца, помещенного в это поле. Схема первичного преобразователя приведена на рис. 4.17. В результате действия ВЧ тока, протекающего по внутреннему проводнику коаксиальной линии, в металлическом кольце наводится вторичный ток, и из-за взаимодействия двух токов появляется вращающий момент M , определяемый силой тока и параметрами системы [4.6, 4.14, 4.15]:

$$M = -\frac{I^2}{L} L_{12} \frac{\partial L_{12}}{\partial \alpha} \frac{\cos\left(\arctg \frac{R}{\omega L}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}}, \quad (4.9)$$

где I — сила тока ВЧ в линии; L_{12} — взаимная индукция между линией и кольцом; R — активное сопротивление кольца; ω — частота тока; α — угол поворота кольца относительно плоскости поперечного сечения линии; W — жесткость нити подвеса.

Вращающий момент в соответствии с (4.9) зависит от силы тока, геометрических характеристик кольца, взаимного расположения кольца и линии, активного сопротивления кольца и частоты тока. Кольцо обычно выполняется из материала с хорошей проводимостью, так что при достаточно высокой частоте ($R \ll \omega L$), зависимость периода механических колебаний кольца от частоты тока является достаточно слабой.

Из изложенного очевидно, что при неизменной геометрии подвижной системы и высокой частоте период колебаний определяется только значением тока в линии.

Среднее квадратическое значение силы тока

$$I_{\text{ск}} = \frac{C_3}{T} \sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_0}\right)^2},$$

где C_3 — постоянная эталона, зависящая от его геометрических размеров; T — период собственных колебаний кольца при наличии тока в линии; T_0 — период собственных колебаний кольца, обусловленный упругостью нити подвеса и другими факторами при отсутствии тока в линии.



Рис. 4.17. Схема первичного преобразователя эталона

Период колебаний определяется через число колебаний, отсчитываемых автоматически с помощью пучка света, направляемого на зеркальце и электронного секундомера (рис. 4.17).

Процедура измерений с помощью эталона состоит в следующем. Сначала определяют период свободных колебаний T_0 при отсутствии тока, а затем электромагнитом закручивают подвижную систему на угол α_0 , включают измеряемый ток, освобождают подвес и отсчитывают необходимое число колебаний с помощью фотореле, счетчика импульсов, электронного секундомера, к которому подводится эталонная частота 10 кГц.

Случайная погрешность эталона в большой мере зависит от внешних факторов: нестабильности тока, вибраций фундамента, конвекционных потоков, электростатических зарядов. Для их уменьшения принимают специальные меры.

Основными составляющими систематической погрешности являются: погрешность определения T и T_0 , связанные с затуханием колебаний; погрешность определения постоянной эталона C_3 ; погрешность, вызванная отличием условий при измерении тока и определении C_3 .

Главная задача метрологического исследования эталона — определение значений его постоянной C_3 , которое может быть проведено как расчетным, так и экспериментальным путем. Расчетный метод заключается в нахождении связи между характеристиками кольца, конфигурации поля коаксиальной линии, момента инерции и т.п., и последующим расчетом C_3 .

Экспериментальный метод основан на измерении известного значения тока на одной из частот ω , другими словами, сравнении результатов измерения тока описанным и другими методами (например, методом теплового или фотоэлектрического компарирования).

Созданный в России (ВНИИФТРИ) эталон (рис. 4.18) имеет следующие метрологические характеристики [4.17]:

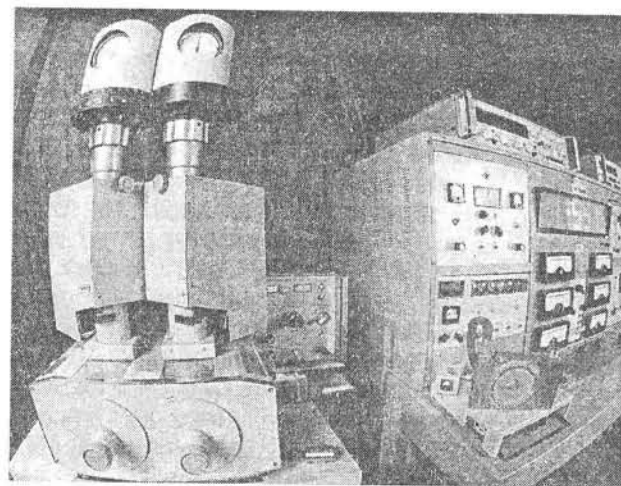


Рис. 4.18. Государственный специальный эталон единицы силы тока в диапазоне 0,1...300 МГц

Пределы воспроизведения силы тока, А.....	3...100;
Диапазон частот, МГц.....	0,1...300;
Неисключенная систематическая погрешность.....	$8,5 \cdot 10^{-4}$;
СКО результата измерений.....	$5 \cdot 10^{-4}$.

В качестве вторичных и рабочих эталонов тока высокой частоты применяются прецизионные ВЧ амперметры, основанные на электродинамическом, термоэлектрическом или фотоэлектрическом методах. Эти амперметры обеспечивают измерение силы тока от 0,01 до 500 А в диапазоне частот до 300 МГц с погрешностью 0,5...2,5 %.

4.3. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ПРОМЫШЛЕННОЙ И НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

Большое значение топливно-энергетического комплекса в экономике любой страны, активное развитие энергоприборостроения, энергомашиностроения, внутреннего и внешнего энергетических рынков постоянно требуют повышения точности и достоверности измерения энергетических величин, прежде всего, электрической мощности на промышленной частоте.

В СССР в 60-е годы была обеспечена возможность измерения электрической мощности с погрешностью 0,05...0,2 % (в зависимости от коэффициентов мощности) благодаря, прежде всего, усилиям ВНИИМ. В 70-е годы эта погрешность была уменьшена до 0,02...0,05 %, а в конце 80-х годов был создан государственный

эталон с НСП $(2...4) \cdot 10^{-5}$ на частотах 45...65 Гц и не более $2 \cdot 10^{-4}$ на частотах до 2,5 кГц. Аналогичный прогресс в измерении энергетических величин и эталонировании мощности наблюдается и в других странах.

Методы измерения электрической мощности существенно отличаются от методов измерения других электрических величин. Вызвано это тем, что реальная активная мощность P , которая поглощается в нагрузке цепи и преобразуется в другие неэлектрические виды мощности (тепловую, механическую и т.д.), непосредственно не воздействуют на средства измерения мощности (СИМ), за исключением случаев измерения мощности калориметрическими методами. На СИМ, включаемое, как правило, в цепь между генератором и нагрузкой, воздействуют две величины: падение напряжения на нагрузке $u(t)$ и протекающий через нагрузку ток $i(t)$. Результатом измерения при этом является среднее за период значение произведения

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = UIK_p,$$

где U и I – среднеквадратические значения напряжения и тока; K_p – коэффициент мощности.

В частном случае, при чисто гармонических $u(t)$ и $i(t)$ активная мощность определяется как скалярное произведение векторов напряжения и тока

$$P = UI \cos \varphi, \quad (4.10)$$

где φ – угол сдвига фаз между векторами \vec{U} и \vec{I} .

Таким образом, СИМ измеряют не реальную физическую величину – активную мощность в нагрузке, а так называемую *проходящую* мощность, что приводит к появлению характерных для СИМ погрешностей измерения.

Метрологические работы, связанные с воспроизведением единиц мощности и энергии, поверкой и калибровкой СИМ не могут быть проведены ни при реальной, ни при проходящей мощности, поскольку для этого пришлось бы создавать прецизионные генераторы большой мощности и высокостабильные комплексные нагрузки, способные эту мощность рассеять. Отмеченные виды работ выполняются при *фиктивной* мощности, когда напряжение и ток во входные цепи СИМ подаются от отдельных маломощных источников. При этом фиктивная мощность имитирует проходящую мощность в условиях, когда реальная мощность вообще отсутствует. Этот путь оказался наиболее рациональным для решения метрологических задач, в частности, для создания эталона единицы электрической мощности.

Принципы воспроизведения единицы мощности должны удовлетворять следующим условиям:

- возможности воспроизведения ватта с опорой на эталоны единиц вольта и ома (прослеживаемость измерений);
- возможности воспроизведения единицы в форме фиктивной электрической мощности.

Существует несколько различных вариантов построения эталона:

а) отдельного измерения среднеквадратических значений тока, напряжения и угла сдвига фаз между ними с последующим нахождением мощности как произведения этих трех величин (4.10). Метод справедлив, как было сказано выше, при чисто гармонических формах тока и напряжения, кроме того, он не является оптимальным по критериям минимума погрешности и простоты аппаратной реализации;

б) метод перемножения мгновенных значений тока, проходящего в цепи, и напряжения, приложенного к ней (например, с помощью специальных АЦП). Метод представляется очень перспективным, применяется в эталонах некоторых стран;

в) метод, основанный на воспроизведении малого значения активной мощности (мощности поглощения) и передачи размера единицы от мощности поглощения к фиктивной мощности [4.16].

Последний метод нашел применение в эталоне СССР (1986 г.) и в настоящее время используется в эталоне России и многих других стран. Рассмотрим его подробнее.

Процесс воспроизведения единицы мощности на основе эталонов вольта и ома может быть проиллюстрирован схемой (рис. 4.19), где $Вт_+$, $Вт_-$, $Вт_\varphi$ – соответственно единица мощности на постоянном токе, переменном токе и в форме фиктивной мощности.

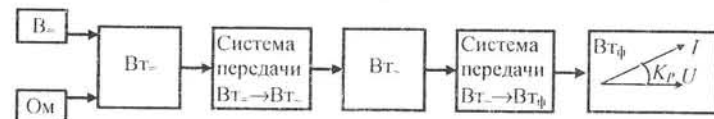


Рис. 4.19. Воспроизведение единицы мощности на основе эталонов вольта и ома

Упрощенная структурная схема государственного эталона России приведена на рис. 4.20 [4.22].

Рассмотрим отдельные элементы этой схемы. Источник фиктивной мощности (ИФМ) представляет собой два отдельных источника тока и напряжения с регулировкой фазового сдвига между ними (рис. 4.21).

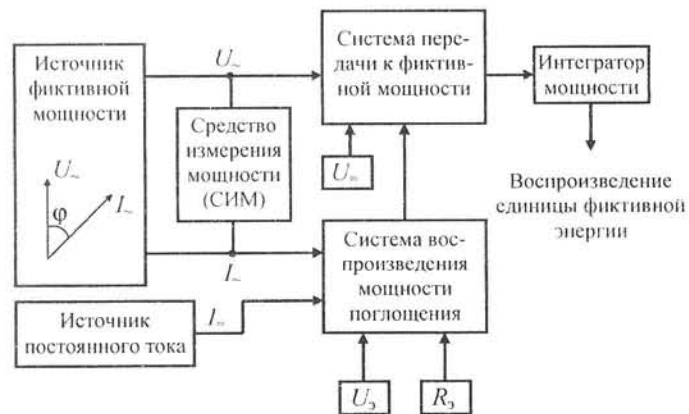


Рис. 4.20. Упрощенная структурная схема эталона мощности

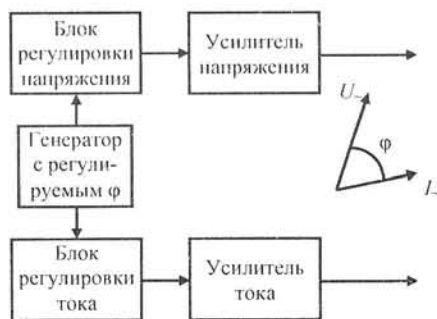


Рис. 4.21. Источник фиктивной мощности

Система воспроизведения мощности поглощения (СВМП) и передачи размера единицы в область фиктивной мощности приведена на рис. 4.22. Если через СВМП протекает переменный ток $I_~$, то в его активном элементе – образцовом резисторе R_n поглощается активная мощность $P_n = I_~^2 R_n$. При этом $I_~$ измеряется с помощью термопреобразователя ТП путем компарирования с постоянным током, а R_n – известное сопротивление, опирающееся на эталон ома.

Таким образом, в резисторе R_n воспроизводится реальная активная мощность небольшого размера (0,1...10 Вт), значение которой определено через эталоны вольты (ампера) и ома на постоянном токе.

Возникшее на R_n падение напряжения U_n с помощью селективного нуль-индикатора (НИ) сравнивается с выходным напряжением U_d делителя напряжения (ДН), к которому приложено напряжение $U_~$ от ИФМ (см. рис. 4.21). При этом в варианте $K_p = 1$ конденсатор

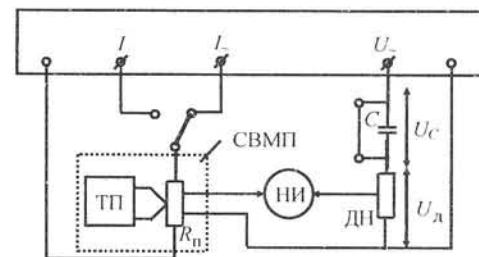


Рис. 4.22. Система воспроизведения единицы фиктивной мощности

C “закорочен”. Нулевые показания НИ, соответствующие равенству $U_n = U_d$, обеспечиваются регулированием коэффициента деления K_d и угла сдвига фаз φ между напряжением и током. При синусоидальных $U_~$ и $I_~$ и безреактивных R_n и ДН напряжение на зажимах “ $U_~$ ” ИФМ $U_~ = I_~ R_n K_d$, а фиктивная мощность, воспроизведенная на зажимах “ $U_~$ ” и “ $I_~$ ” ИФМ, будет равна мощности поглощения в СВМП, умноженной на K_d :

$$P_\phi = P_n K_d. \quad (4.11)$$

Для воспроизведения фиктивной мощности при $K_p < 1$ используется RC -нагрузка. В цепь напряжения вводится конденсатор C (см. рис. 4.22), значение емкости которого устанавливается в зависимости от требуемого K_p , сопротивления делителя $R_{дн}$ и частоты

$$C = \frac{1}{\omega R} \frac{K_p}{\sqrt{1 - K_p^2}}.$$

Таким образом, воспроизведение фиктивной мощности P_ϕ в обоих случаях сводится к воспроизведению реальной мощности поглощения P_n и определению коэффициента деления ДН. Как уже было сказано выше, P_n устанавливается методом компарирования с мощностью постоянного тока с опорой на эталоны вольты и ома. Коэффициент деления K_d определяется известными методами либо на постоянном токе, либо на переменном с помощью эталонного индуктивного делителя.

Основными составляющими НСП воспроизведения единицы мощности являются [4.22]:

- погрешность воспроизведения мощности поглощения (куда входят погрешности мер постоянного напряжения, сопротивления и термокомпаратора);
- погрешность определения коэффициента деления ДН;
- погрешность передачи размера единицы от поглощенной к фиктивной мощности (определяется угловыми погрешностями ДН, конденсатора и искажениями формы напряжения).



Рис. 4.23. Государственный специальный эталон единицы электрической мощности в диапазоне частот 40...2500 Гц

Государственный эталон России (рис. 4.23) имеет следующие основные характеристики [4.17]:

диапазон измерений, Вт.....	$0,01...6 \cdot 10^3$;
НСП (θ_0).....	$(2...4) \cdot 10^{-5}$;
СКО (S_0).....	$(5...10) \cdot 10^{-6}$.

Помимо государственного первичного эталона в экономически развитых странах создается развитая эталонная база в данной области, включающая в себя ряд подсистем, обеспечивающих воспроизведение единицы электрической энергии — джоуля, а также передачу размеров единиц различным видам одно- и трехфазных средств измерений мощности и энергии, эталоны сравнения, в том числе транспортируемые, а также ряд рабочих эталонов различного уровня.

4.4. ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЧ И СВЧ ДИАПАЗОНОВ

Если точные измерения мощности на промышленной частоте очень важны для энергетики и коммерческих расчетов при торговле электроэнергией, то в ВЧ и особенно СВЧ диапазонах мощность является основным параметром интенсивности. Отсюда важность соответствующих эталонов.

Первый эталон мощности ВЧ и СВЧ диапазонов в бывшем СССР был разработан в 1972 году во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, который воспроизводил единицу мощности от 10^{-3} до 1 Вт в диапазоне частот 0,03...10 ГГц [4.18]. В дальнейшем главную роль в этой области стали играть ВНИИФТРИ (Московская обл.), создавший ГПЭ мощности в сантиметровом диапазоне (частота 2,59...37,5 ГГц) [4.19], и ХГНИИМ (г. Харьков), создавший ГПЭ в миллиметровом диапазоне (37,5...178,6 ГГц) [4.20].

Хотя тракты передачи колебаний в разных поддиапазонах частот существенно отличаются (коаксиальные, волноводные разных сечений), что приводит к разным конструктивным решениям многих узлов эталона, однако все эталоны мощности имеют в своей основе единые физические принципы. Основным законом, лежащим в их основе, является закон сохранения энергии, а именно — замещенные измеряемой мощности ВЧ или СВЧ излучения известной мощностью постоянного тока.

Общей для всех эталонов является и их структура. Каждый эталон включает источник СВЧ излучения, эталонный измеритель мощности, средства аттестации эталона, компаратор, источник постоянного тока и прецизионные средства измерения его мощности (рис. 4.24). Наивысшая точность воспроизведения единицы мощности может быть достигнута при условиях, максимально приближенных к некоторой идеальной модели. Исходя из этого требования эталон создается для монохроматического электромагнитного излучения, распространяющегося от неотражающего генератора в бесконечном однородном волноводе стандартного размера.

Динамический диапазон эталонов мощности большинства стран составляет $10^{-3}...10^{-2}$ Вт. Выбор этого диапазона объясняется рядом причин. Диапазон мощностей рабочих приборов простирается от 10^{-6} до 10^4 Вт средней мощности и от 10^{-15} до 10^8 Вт мощности в импульсе. Естественно поэтому иметь эталон с диапазоном, равноудаленным от краев динамического диапазона рабочих ваттметров.

В качестве эталонных ваттметров в составе эталонов применяют ваттметры поглощаемой или проходящей мощности, а принцип измерения состоит в сравнении всей (или части) поглощаемой ваттметром мощности с мощностью постоянного тока, измеренной при помощи прецизионных средств измерения напряжения и сопротивления.



Рис. 4.24. Структурная схема эталона мощности ВЧ и СВЧ

Итак, как и в эталоне мощности промышленной частоты, ватт на ВЧ или СВЧ “рождается” на базе эталонов ЭДС и электрического сопротивления. На практике сравнение мощности СВЧ с мощностью постоянного тока осуществляется преобразованием той и другой в тепловую энергию и сравнении этих энергий, проявляющихся в изменении температур поглотителя энергии (термопреобразователя). В качестве термопреобразователя (ТП) применяют термисторы, болометры, терморезисторы.

Мощность постоянного тока (мощность замещения) измеряется с помощью измерительных блоков, представляющих собой самобалансирующиеся мосты со средствами измерения напряжения и сопротивления. В основу компараторов всех эталонов положен принцип деления мощности с помощью направленного ответвителя со вспомогательным ваттметром в боковом плече. Такой компаратор вместе с источником сигнала позволяет создать калибровочный генератор сигнала для передачи размера единицы от эталонного ваттметра к поверяемым средствам измерений.

Эталонные ваттметры однотипны по составу и принципу действия для всех трактов. Они состоят из рабочего термопреобразователя, моста постоянного тока и устройства аттестации. При подаче СВЧ мощности на ТП он нагревается, что вызывает изменение его сопротивления постоянному току R_T . Поскольку ТП включен в одно из плеч моста, который автоматически поддерживает равновесие регулировкой мощности постоянного тока (замещения) $P_{зам}$, можно по изменению этой мощности однозначно судить о значении поглощенной термопреобразователем мощности СВЧ $P_{СВЧ}$.

Из физических соображений ясно, что не вся мощность, падающая на вход ТП, поглощается: часть ее может рассеяться в других элементах, часть — отразиться. Кроме того, известно, что для изменения сопротивления ТП на одно и то же значение при длинах волн λ , соизмеримых с длиной болометра, требуются разные мощности $P_{зам}$ и $P_{СВЧ}$. Поэтому эталонный ваттметр характеризуют калибровочным коэффициентом K_3 , называемым чаще коэффициентом эффективности, а мощность $P_{СВЧ}$, падающую на вход ТП, рассчитывают по формуле

$$P_{СВЧ} = \frac{P_{зам}}{K_3}.$$

Погрешность измерения мощности эталонным ваттметром определяется, таким образом, погрешностью определения $P_{зам}$ и K_3 . Первая из этих погрешностей может быть сведена к достаточно малому значению (0,01...0,03 %), вторая — является доминирующей. Поэтому определение K_3 является центральной задачей метрологического исследования всех эталонов мощности ВЧ и СВЧ.

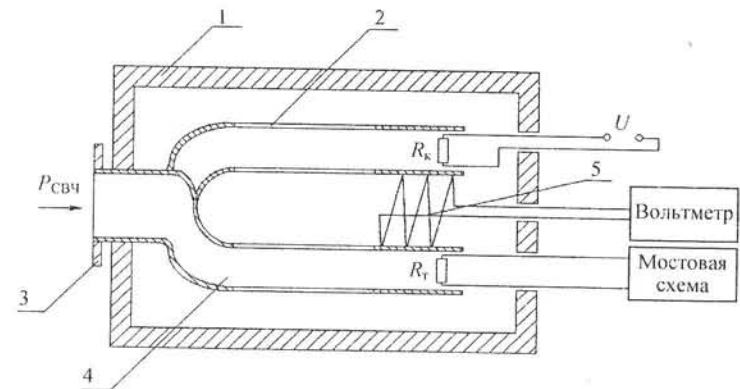


Рис. 4.25. Конструкция калориметра эталона мощности ВЧ и СВЧ:
1 — корпус; 2 — компенсирующий отрезок волновода; 3 — фланец;
4 — рабочий отрезок волновода; 5 — дифференциальная термопара

Для измерения K_3 в эталонах мощности применяют специальные устройства аттестации, основанные на калориметрическом методе. Один из вариантов конструкции калориметра приведен на рис. 4.25.

В отсутствие СВЧ мощности мостовая схема, в одно плечо которой включен рабочий термопреобразователь R_T , сбалансирована. При подаче $P_{СВЧ}$ на рабочий ТП последний дополнительно нагревается, меняется его сопротивление, и мост выходит из равновесия. Если мост является автоматическим (что обычно для современных эталонов), мощность источника постоянного тока изменяется на значение, необходимое для восстановления равновесия (мощность замещения $P_{зам}$).

Поскольку часть СВЧ мощности, как было сказано, расходуется на нагрев конструкции (P_K), уравнение теплового баланса имеет вид:

$$P_{СВЧ} = P_{зам} + P_K.$$

Поскольку

$$P_{СВЧ} = P_{зам} / K_3,$$

то

$$K_3 = \frac{P_{зам}}{P_{СВЧ}} = \frac{1}{1 + P_K / P_{зам}},$$

т.е. для определения K_3 необходимо измерить P_K и $P_{зам}$. Мощность $P_{зам}$ измеряется с помощью устройств, входящих в мостовую схему, а для измерения P_K служит калориметр (рис. 4.25). В этой конструкции в один из отрезков волновода включен рабочий ТП R_T , в другой — идентичный ему компенсирующий ТП R_K . Между отрез-

ками волновода устанавливается дифференциальная термопара, которая преобразует разность температур между волноводами в термо-ЭДС, регистрируемую вольтметром, т.е. фактически измеряет величину, пропорциональную P_k . Таким образом, вольтметр в цепи термопары можно проградуировать в значениях мощности. Однако точнее измерить P_k можно, подавая на компенсирующий ТП P_k мощность постоянного тока до выравнивания температур волноводов, т.е. до получения нулевого тока в цепи термопары⁴.

Экспериментальное изучение и теоретический анализ погрешностей показали, что погрешности измерения K , термопреобразователей эталонных ваттметров (с учетом погрешности рассогласования) в коаксиальных трактах могут быть снижены до 10^{-3} на частотах до 1 ГГц, до $2 \cdot 10^{-3}$ – на частотах до 3 ГГц и до $3 \cdot 10^{-3}$ – на частотах до 10 ГГц. В волноводных трактах эта погрешность составляет $(1...3) \cdot 10^{-3}$, в миллиметровом диапазоне – до $1 \cdot 10^{-2}$.

Основные метрологические характеристики государственных эталонов России (рис. 4.26) и Украины (рис. 4.27) приведены в табл. 4.1 [4.6]. Эти характеристики соответствуют лучшим зарубежным эталонам мощности СВЧ, о чем свидетельствуют многочисленные международные сличения эталонов. Однако столь высокую точность воспроизведения мощности не удается сохранить при передаче размера единицы от ГПЭ подчиненным средствам измерений. Это связано, главным образом, с погрешностью из-за рассогласования, т.е. из-за наличия коэффициентов отражения выхода ге-

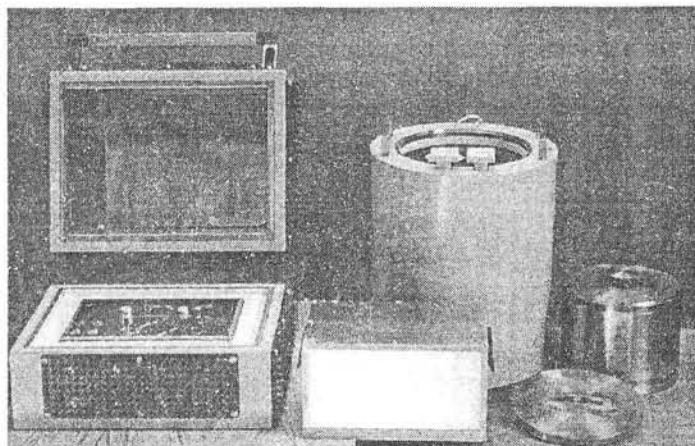


Рис. 4.26. Калориметрический компаратор для частот 0,03...37,5 ГГц

⁴ Имеется много особенностей в конструкции эталонных калориметров для различных размеров тракта, которые здесь подробно не рассматриваются.

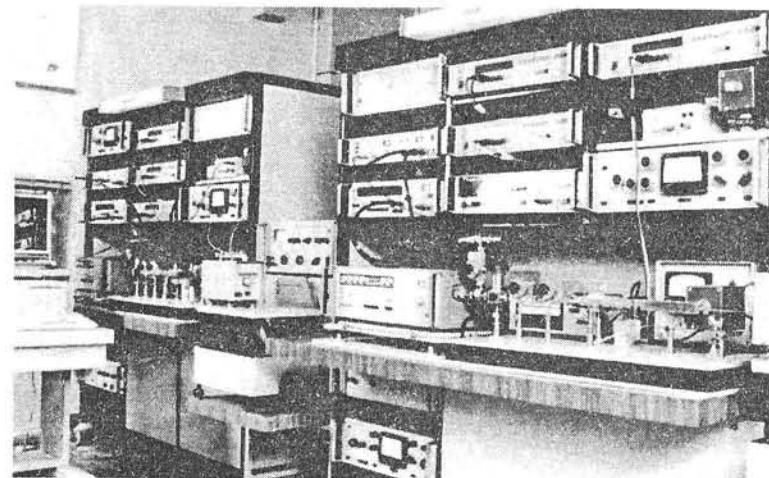


Рис. 4.27. Государственный эталон мощности электромагнитных колебаний в диапазоне 37,5...178,6 ГГц

нератора СВЧ, входов эталонного и поверяемого ваттметров. Исследования показывают, что при принятии всех мер для минимизации этой погрешности, вторичные и рабочие эталоны могут градуироваться на ГЭ с погрешностью 0,5...1,0 % – в диапазоне до 37,5 ГГц, с погрешностью 1,0...1,5 % – в диапазоне 37,5...178,6 ГГц.

Таблица 4.1. Основные метрологические характеристики государственных эталонов мощности ВЧ и СВЧ России и Украины.

Характеристики	ВНИИФТРИ (Россия)	ХГНИИМ (Украина)		
		37,5...53,57	53,57...78,33	78,33...178,6
Диапазон частот, ГГц	0,03...37,5	37,5...53,57	53,57...78,33	78,33...178,6
Вид тракта (сечение, мм)	Коаксиал, волновод	Волновод 5,2×2,6	Волновод 3,6×1,8	Волновод 2,4×1,2; 1,6×0,8
Пределы воспроизводимой мощности, мВт	1...100	3...10	2...10	1...10
НСП	$(1...3) \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
СКО	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$

4.5. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ШУМОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Одним из основных параметров радиоприемных устройств ВЧ и СВЧ, используемых в дальней связи, радиолокации и радионавигации, телевидении и радиовещании, является чувствительность.

Во всех случаях чувствительность приемных устройств (и его узлов – усилителей, преобразователей и т.д.) ограничивается, главным образом, уровнем случайных электромагнитных колебаний, т.е. шумов, возникающих внутри устройства. Наиболее просто и достоверно чувствительность может быть проконтролирована с помощью измерительных генераторов шума (ГШ), которые являются мерами спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения (СПМШ).

Параметром СПМШ (G) называется предел отношения мощности шумового радиоизлучения ΔF , заключенной в определенном частотном интервале ΔF , к значению этого частотного интервала при условии, что интервал ΔF стремится к нулю; СПМШ численно равна мощности шумового радиоизлучения в частотном интервале 1 Гц, ее единицей является Вт/Гц.

Воспроизведение единицы СПМШ или эквивалентной единицы шумовой температуры – кельвина основано на свойстве абсолютно черного тела излучать электромагнитные волны, подчиняющиеся закону Планка:

$$G = \frac{hf}{hf / (e^{kT} - 1)},$$

где T – абсолютная температура, К; f – частота радиоизлучения, Гц; h – постоянная Планка, Дж/с; k – постоянная Больцмана, Дж·К⁻¹.

При $hf \ll kT$ (неквантовая область излучения) можно принять $G = kT$. На практике используется номинальная избыточная СПМШ (G_n), т.е. разность двух тел, нагретых до температур T и T_0 . Тогда

$$G = k(T - T_0),$$

где $T_0 = 293$ К (нормальная температура 20 °С).



Рис. 4.28. Структурная схема ГЭ СПМШ

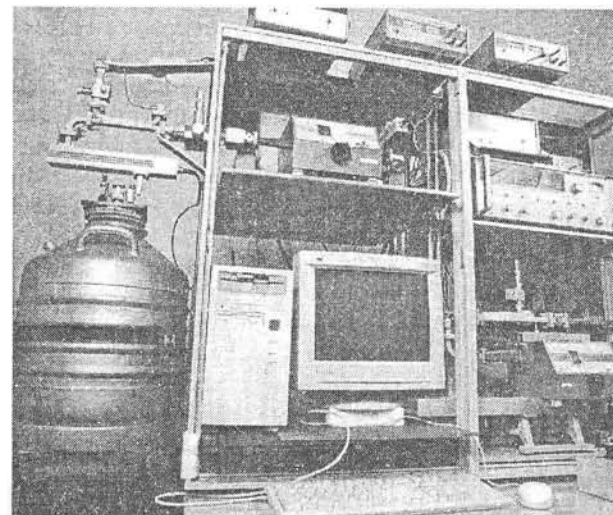


Рис. 4.29. Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности шумового радиоизлучения

ГШ различных конструкций и принципов действия градуируют сравнением их СПМШ с шумами эталонных тепловых ГШ с помощью модуляционного супергетеродинного приемника-радиометра.

Государственный эталон СПМШ России создан во ВНИИФТРИ, в его состав входят: набор эталонных тепловых ГШ, компараторы (приемники-радиометры), а также устройства для контроля условий измерений и неизменности воспроизводимого размера единицы СПМШ (рис. 4.28) [4.21].

В эталоне России (рис. 4.29) последнего поколения (1991 г.) в качестве генераторов шума используются наиболее современные и надежные низкотемпературные генераторы шума (НГШ). Диапазон частот 0,002...178,3 ГГц перекрывается девятью НГШ, работающими с коаксиальными (до 12 ГГц) и волноводными трактами. Каждый эталонный НГШ представляет собой одномерную модель абсолютно черного тела с термодинамической температурой вблизи точки кипения азота. Основным узлом НГШ является помещенная в азотный криостат коаксиальная или волноводная согласованная нагрузка (излучатель), тепловое электромагнитное излучение которой выводится из криостата через теплоизолирующую линию передачи к выходному соединителю, имеющему температуру, близкую к комнатной.

Значение СПМШ поверяемого ГШ определяется с помощью эталонного ГШ поочередным подключением их к входу компаратора (радиометра). Последний представляет собой модуляционный

супергетеродинный приемник радиометрического типа, функционально и конструктивно разделяющийся на ВЧ (СВЧ) тракт и систему индикации. Для того, чтобы ослабить влияние собственных шумов радиометра на погрешность измерения, шумы измеряемого источника модулируются ("окрашиваются"), усиливаются в приемнике и затем синхронно детектируются. Переменная составляющая сигнала на выходе радиометра характеризует уровень шума исследуемого источника, постоянная составляющая – собственные шумы радиометра. Упрощенная схема модуляционного радиометра приведена на рис. 4.30.

При вращении диска, частично покрытого поглощающим материалом, в волновод периодически вводится поглотитель. Таким образом, открытое состояние входа радиометра чередуется с закрытым, когда к его входу подключена согласованная нагрузка с комнатной температурой. Генератор импульсов вырабатывает сигналы синхронно с вращением диска и с помощью устройства синхронизации управляет процессом детектирования в приемнике, в результате чего показания индикатора пропорциональны уровню шума, поступающего на вход радиометра. Отметим, что существует много разновидностей схем модуляционных радиометров, но сущность их одна – модуляция измеряемых шумов.

Центральная задача исследования эталона СПМШ – метрологическая аттестация эталонных ГШ, включающая в себя выполнение таких процедур, как измерение ослабления, вносимого линией передачи, измерение температуры излучателя, определение распределения температуры вдоль линии передачи, расчет эквивалентной шумовой температуры на выходе НГШ, расчет СПМШ на выходе НГШ и анализ погрешностей.

Эталон России (см. рис. 4.29) имеет следующие метрологические характеристики [4.17]:

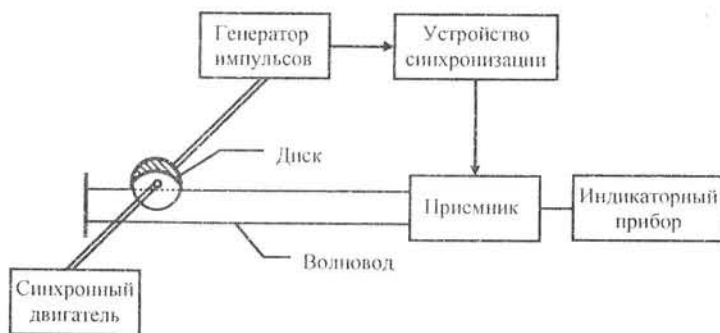


Рис. 4.30. Схема модуляционного радиометра

Диапазон частот, ГГц.....	0,002...37,5	37,5...178,3
Диапазон измерений		
СПМШ, Вт/Гц · 10 ⁻²¹	1,07...1,1	1,17... 2,12
(шумовой температуры, К)	(77,4...153,5)	(85,0...153,5)
СКО, К.....	0,1	0,5...0,7
НСП, К.....	0,2...0,4	0,6...1,0

4.6. ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Измерения напряженности электромагнитных полей важны при изучении распространения радиоволн, определении параметров антенн различного назначения, оценке зон покрытия радиовещанием и телевидением, при определении параметров электромагнитной совместимости и биологического воздействия полей на человека. Кроме радиоэлектроники, техника измерения полей применяется в транспорте, метрологии, геофизике, медицине и других областях науки и техники.

Как известно, перенос энергии электромагнитным полем однозначно описывается с помощью вектора Умова–Пойнтинга (рис. 4.31):

$$\dot{S} = [\dot{E} \cdot \dot{H}],$$

где \dot{S} – плотность мощности или плотность потока энергии, Вт/м²; \dot{E} – напряженность электрического поля, В/м; \dot{H} – напряженность магнитного поля, А/м, т.е. электромагнитное поле в свободном пространстве определяется векторами \dot{E} и \dot{H} .

В плоской линейно-поляризованной волне векторы связаны соотношением

$$E = 120\pi H, \quad (4.12)$$

где 120π – волновое сопротивление свободного пространства, Ом.

На практике при $f < 30$ МГц ($\lambda > 10$ м) условия существования плоской волны и соотношение (4.12) не выполняются. Поэтому в этом диапазоне создают отдельные эталоны напряженностей электрического и магнитного полей.

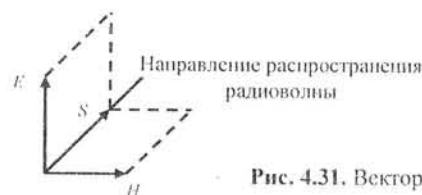


Рис. 4.31. Вектор Умова-Пойнтинга

Для частот свыше 30 МГц условия "свободного пространства", в котором существует плоская волна, в основном соблюдаются, соотношение (4.12) справедливо, поэтому в этом диапазоне создают только один эталон, обычно – эталон напряженности электрического поля.

Первые эталоны электромагнитного поля (ЭМП) создавались в США. Целью их создания являлось обеспечение калибровочной службы для коммерческих измерителей напряженности поля, применяемых при испытании эффективности антенн радиостанций и определении зон покрытия устойчивой связью в диапазоне частот 30...300 МГц, выделенной Федеральной комиссией связи США для частотно-модулированного и телевизионного вещания. Работа выполнялась более 50 лет тому назад Центральной лабораторией распространения радиоволн Национального бюро стандартов США (ныне NIST) в рамках программы по разработке высокоточных средств калибровки и измерения параметров ЭМП. Первая развернутая публикация по этой работе вышла в 1950 году [4.23]. Свой подход к созданию эталонов авторы сформулировали в ней следующим образом: "Мы не претендуем на оригинальность используемых методов и техники... Однако новизна представляемых эталонов состоит в их простоте и полученной точности". Действительно, в это время уже сформировались многие направления в радиосвязи, методы и средства радиоизмерений, – и метрологам было трудно претендовать на существующую новизну в этой области. Однако, как справедливо отмечено в [4.24], "простота и точность тоже немало, учитывая сложность объекта измерения – электромагнитного поля".

Задачи, которые пришлось решать создателям первых эталонов ЭМП, не потеряли актуальности и до настоящего времени. Одна из таких задач – определение оптимального метода при создании эталонов ЭМП: "эталонной антенны" (эталон – измеритель) или "эталонного поля" (эталон – генератор).

Другой важной задачей является выбор параметра, характеризующего эталонируемую напряженность поля, ибо последняя является сложной физической величиной, характеризуемой несколькими параметрами. Даже при гармонической зависимости от времени в точке пространства она описывается вектором, который может изменять свою длину и направление в течение периода и обладает свойством поляризации. Проверка временем показала, что выбор авторами [4.23] среднеквадратического значения проекции вектора напряженности линейного поляризованного гармонического электрического поля в качестве параметра эталонируемой величины был удачным [4.24].

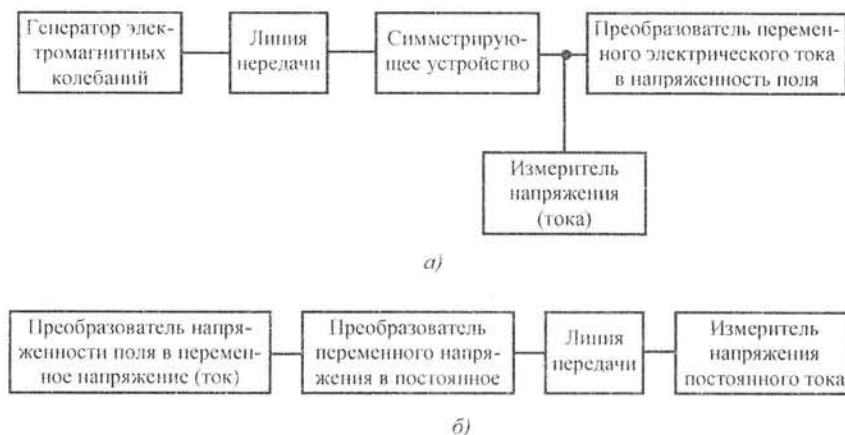


Рис. 4.32. Структурные схемы реализации методов эталонного поля (а) и эталонной антенны (б)

Возвращаясь к описанию современных эталонов ЭМП и методов воспроизведения поля, уточним понятия "эталонного поля" и "эталонной антенны". Метод эталонного поля заключается в возбуждении требуемой составляющей поля, расчете значения напряженности по размерам и форме передающей антенны, распределению токов в ней, а также учете границ области, в которой образуется эталонное поле (рис. 4.32, а). Метод эталонной антенны (измерителя) основан на измерении напряжения или тока, возбуждаемого в приемной эталонной антенне, и вычислении напряженности с учетом формы, размеров и ориентации эталонной антенны (рис. 4.32, б).

При выборе метода воспроизведения поля (эталонной антенны и эталонного поля) решающими являются следующие обстоятельства: в диапазоне частот до 30 МГц можно создать поля, локализованные в ограниченной области пространства и защищенные от действия окружающих предметов. В этом диапазоне справедливы законы квазистационарных полей, поскольку размеры антенн и объемы полей много меньше длины волны. В диапазоне частот выше 30 МГц создать поле с известной напряженностью значительно сложнее из-за необходимости учитывать волновой характер распространения поля, влияние окружающих предметов и т.п. Поэтому в этом диапазоне обычно используется метод эталонной антенны.

Рассмотрим эталоны напряженности полей на примере созданных в СССР, затем модернизированных в России (ВНИИФТРИ). По своим характеристикам – они соответствуют мировому уровню в этой области.

4.6.1. ЭТАЛОН НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЧАСТОТАХ 0,0003...30 МГц

В основе эталона лежит метод эталонного поля [4.25, 4.26], которое создается между обкладками плоского конденсатора, играющего роль преобразователя переменного напряжения в напряженность электрического поля. Расстояние между пластинами, их площадь и форма выбираются такими, чтобы обеспечить зону однородного поля достаточного размера для размещения калибруемых антенн. Электрическое поле конденсатора может быть рассчитано с достаточной точностью. Известно, что напряженность поля между бесконечными пластинами плоского конденсатора

$$E = U/d, \text{ В/м,}$$

где U — напряжение между пластинами; d — расстояние между ними.

Для конденсатора ограниченных размеров это выражение справедливо лишь для участков поля, достаточно удаленных от края пластин конденсатора, где поле можно считать однородным. Для более точных расчетов пользуются формулой

$$E = \gamma_l \gamma_f \frac{U}{d},$$

где γ_l — коэффициент, учитывающий так называемый краевой эффект и позволяющий приводить показания термовольметра, измеряющего напряжение на краях пластин, к центру, где существует область эталонного поля; γ_f — коэффициент, учитывающий частотную зависимость показаний измерителя напряжения U (термовольметра). Данный коэффициент характеризует неэквивалентность теплового действия постоянного и переменного напряжения. о чем подробно говорилось при рассмотрении эталона переменного напряжения.

Упрощенная структурная схема эталона приведена на рис. 4.33.

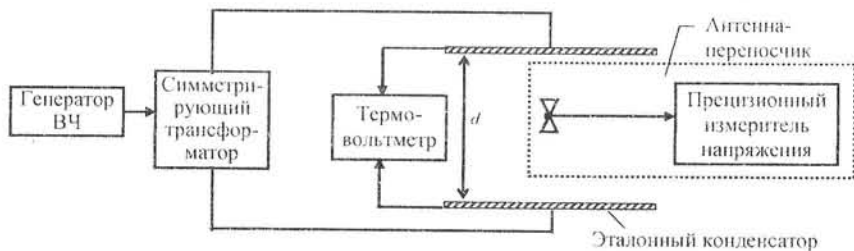


Рис. 4.33. Структурная схема эталона напряженности электрического поля

Эталонный конденсатор возбуждается посредством подачи на его пластины ВЧ сигнала генератора через симметрирующий трансформатор. Напряжение U на пластинах конденсатора измеряется термовольтметром, представляющим собой термопреобразователь в сочетании с прецизионным вольтметром постоянного тока. Частотный коэффициент термовольметра γ_f определяется с помощью четвертьволновой линии и образцового вольтметра. Значение γ_l находят экспериментально измерением распределения напряженности поля конденсатора относительно его центра (с помощью вспомогательного вольтметра со скользящими контактами или с помощью сферической антенны). Расстояние d между пластинами в эталоне России составляет 0,5 м, его постоянство контролируется специальным нутромером.

Диаметр пластин конденсатора выбирается из соображений минимизации краевых эффектов в зоне размещения антенны — переносчика, о которой речь пойдет ниже. В эталоне России (рис. 4.33, 4.34) он составляет 1 м. Неисключенная систематическая

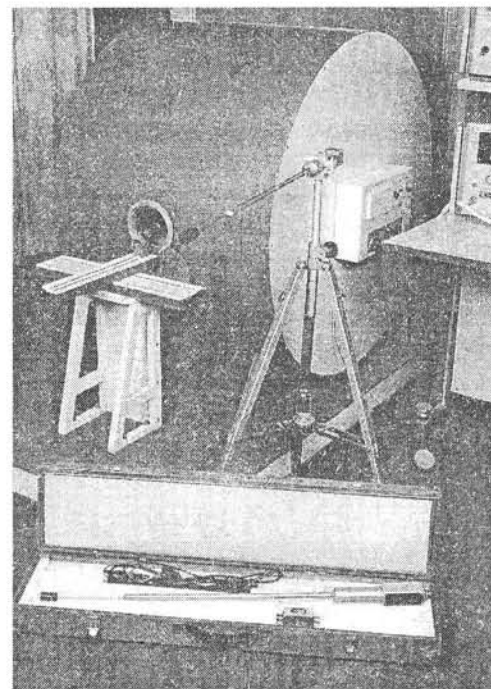


Рис. 4.34. Государственный специальный эталон единицы напряженности электрического поля на основе экранированного конденсатора

погрешность воспроизведения напряженности поля в центре конденсатора включает следующие основные частные составляющие:

- погрешность определения коэффициента γ_f (около $1 \cdot 10^{-2}$) и γ_l (порядка $5 \cdot 10^{-3}$);
- погрешность термовольметра (около $5 \cdot 10^{-3}$);
- погрешность определения значения d (порядка $2 \cdot 10^{-4}$);
- погрешности, связанные с влиянием окружающих предметов (около $2 \cdot 10^{-3}$) и несоответствием конденсатора идеальной модели (около $1 \cdot 10^{-3}$).

Результирующая НСП при доверительной вероятности 0,99 составляет около $1 \cdot 10^{-2}$ (на частоте 30 МГц). На более низких частотах НСП имеет тенденции к уменьшению (СКО оценивается значением $5 \cdot 10^{-3}$). Диапазон напряженности электрического поля, в котором воспроизводится единица, составляет обычно 0,2...20 В/м.

Передача размера единицы напряженности вторичным и рабочим эталонам осуществляется с помощью упомянутой выше антенны-переносчика. Она обычно представляет собой настроенный в резонанс электрический диполь в совокупности с прецизионным измерителем напряжения (термовольтметром).

Размер единицы передается на нескольких фиксированных частотах (пяти–семи), а антенны-переносчики изготавливаются на каждую из этих частот. Процедура передачи заключается в использовании метода замещения. Антенну помещают в поле конденсатора первичного эталона и отмечают показания ее термовольметра. Затем антенну-переносчик помещают в поле аттестуемого эталона и регулировкой возбуждающего напряжения последнего устанавливают те же показания термовольметра, что и в поле первичного эталона. При этом напряженности полей первичного и аттестуемого эталонов равны.

Передача размера единицы сопровождается следующими погрешностями:

- частотной погрешностью термовольметра (около $3 \cdot 10^{-3}$);
- неточностью установки антенны-переносчика в измеряемое поле ($3 \cdot 10^{-3}$) и нестабильностью антенны за время измерения ($2 \cdot 10^{-3}$);
- влиянием антенны-переносчика на поле, в которое она помещается (порядка $1 \cdot 10^{-3}$).

Суммарная погрешность (СКО) передачи оценивается значением $5 \cdot 10^{-3}$.

4.6.2. ЭТАЛОН НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДИАПАЗОНЕ 30...1000 МГц

В этом диапазоне частот для воспроизведения единицы напряженности обычно используется метод эталонной антенны (измерителя). В качестве последней в эталоне России используют антенну в виде полуволнового диполя [4.6, 4.27]. В основе выбора типа антенны лежат следующие критерии: близость характеристик реальной конструкции к расчетной модели; простота связи измеряемой электрической величины на выходе антенны (тока или напряжения) с измеряемым вектором электрического поля, хорошие поляризационные показатели.

Напряженность электрического поля устанавливается на основе расчетных параметров диполя, а также измерений напряжения в диполе или тока и его сопротивления.

Упрощенная структурная схема эталона приведена на рис. 4.35. Излучающая антенна возбуждается генератором СВЧ. В состав эталонного измерителя входят дипольные антенны с термопреобразователями типа ТВБ, работающие на фиксированных частотах в диапазоне 30...1000 МГц, измеритель постоянного тока, а также вспомогательные излучатели и средства измерения частотных коэффициентов преобразователей.

Воспроизведение единицы напряженности электрического поля, В/м, основывается на применении равенства

$$E = \frac{I(R_{\Sigma} + R_T)}{L_d} \alpha, \quad (4.13)$$

где I – высокочастотный ток в антенне, измеренный термопреобразователем; R_{Σ} – сопротивление излучателя эталонной антенны; R_T – сопротивление термопреобразователя; L_d – действующая длина антенны; α – частотный коэффициент эталонной антенны.

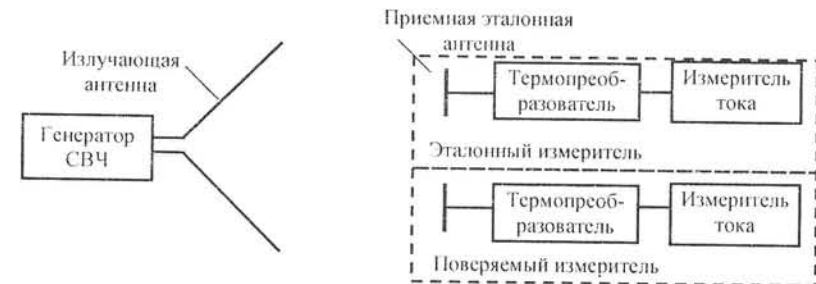


Рис. 4.35. Структурная схема эталона напряженности электрического поля, реализующего метод эталонного измерителя

Измерение напряженности осуществляется эталонными антеннами на расстояниях и высотах, кратных полуволне излучения $n \frac{\lambda}{2}$, где $n = 2, 3, \dots$. Эталонные антенны устанавливаются и ориентируются посредством специальных координатных устройств.

Измерение тока I происходит методом замещения известным значением постоянного тока по равенству термо-ЭДС на выходе термопреобразователя (аналогично эталону переменного тока). Одновременно измеряется значение R_T при данном токе. Частотный коэффициент α термопреобразователя измеряют с помощью калиброванного болометрического преобразователя (имеющего весьма малую частотную зависимость до частоты 1000 МГц), а коэффициент α для эталонной антенны с термопреобразователем в целом определяют расчетно-экспериментальным способом с учетом R_Σ и R_T . Действующая длина L_d также определяется расчетно-экспериментальным методом.

Для эталона НСП обусловлена следующими частными составляющими:

- погрешностью определения коэффициента α ;
- погрешностями определения L_d и R_Σ , а также неточностью настройки антенны в резонанс;
- взаимным влиянием передающей и приемной антенн, а также окружающих предметов и Земли.

Оценка НСП в эталоне России составляет $(1,5 \dots 2) \cdot 10^{-2}$, СКО — порядка $5 \cdot 10^{-3}$.

При передаче размера единицы уровень сигнала на выходе генератора поддерживается постоянным, а эталонный измеритель напряженности заменяется поверяемым. Разность показаний поверяемого измерителя и значения E , рассчитанного по ф-ле (4.13), представляет собой погрешность поверяемого измерителя (или поправку к его показаниям). Эталонная и поверяемая антенны устанавливаются и ориентируются с помощью специальных координатных устройств. Неидентичность антенн и неодинаковость их установки по отношению к излучающей антенне — это источники доминирующих составляющих погрешностей передачи размера единицы. СКО суммы систематической и случайной составляющих погрешности передачи в эталоне России для разного типа поверяемых антенн оценивается в $(1 \dots 2) \cdot 10^{-2}$. Заметим, что в 1994 году в России утвержден единый комплекс эталонов единицы напряженности электрического поля в диапазоне частот 0,0003...1000 МГц (рис. 4.36), в который входят три установки на базе: плоского конденсатора; четыре проводной линии; биконических антенн.

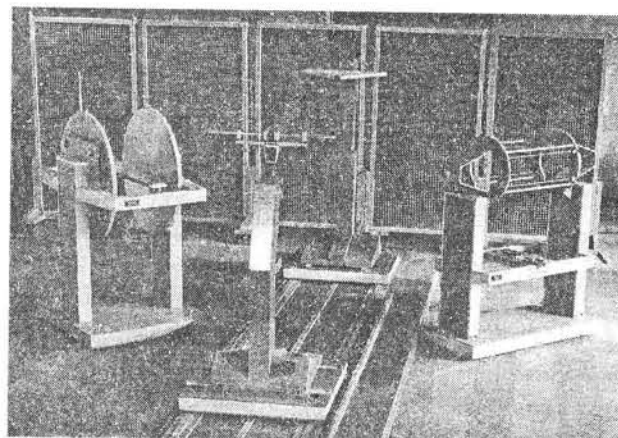


Рис. 4.36. Государственный специальный эталон напряженности электрического поля в диапазоне частот 0,0003...1000 МГц

Эталон имеет следующие метрологические характеристики [4.17]:

диапазон измерений, В/м.....	0,2...10;
СКО (S_0).....	$0,5 \cdot 10^{-2}$;
НСП (θ_0).....	$1,5 \cdot 10^{-2}$.

4.6.3. ЭТАЛОН НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДИАПАЗОНЕ 0,01...30 МГц

При построении данного эталона используется метод эталонного поля. В эталоне России [4.6, 4.28] квазистатическое эталонное магнитное поле создается с помощью излучающей рамочной плоской кольцевой симметричной антенны с радиусом R_1 . Периметр антенны много меньше длины волны, поэтому можно пренебречь волновым характером тока и считать его амплитуду и фазу постоянными во всех точках кольца. Провод, образующий кольцевую рамку, считается бесконечно тонким. Структурная схема эталона приведена на рис. 4.37.

Значение нормальной составляющей напряженности магнитного поля, А/м, в точке расположения индикаторной антенны

$$H = \frac{IS}{2\pi L}, \quad (4.14)$$

где I — действующее значение тока в передающей антенне; S — площадь эталонной антенны; L — расстояние между эталонной и индикаторной антеннами.

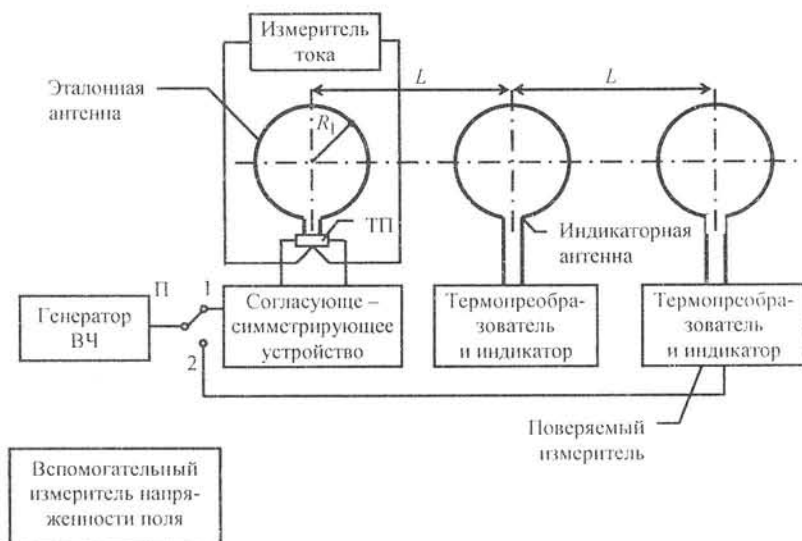


Рис. 4.37. Структурная схема эталона напряженности магнитного поля

При воспроизведении единицы устанавливается уровень выходного напряжения генератора ВЧ, соответствующий номинальному току термопреобразователя (ТП) эталонной антенны. С помощью потенциометрической установки измеряется сила тока ВЧ в эталонной антенне и по ф-ле (4.14) рассчитывается H .

При передаче размера единицы (поверке) регистрируются показания индикаторной антенны, после чего генератор ВЧ переключается на антенну поверяемого измерителя (П в положении 2). Последняя располагается соосно с эталонной и индикаторной антеннами на расстоянии L от индикаторной. При равенстве показаний индикаторного прибора и его поочередном возбуждении полем эталонной и поверяемой антенн выполняется равенство напряженности магнитного поля, создаваемого обеими антеннами. Разность показаний, естественно, соответствует погрешности поверяемого прибора.

Государственный специальный эталон единицы напряженности магнитного поля в диапазоне 0,01...30 МГц России (рис. 4.38) имеет диапазон воспроизводимых значений напряженности от $2 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ А/м.

Составляющими систематической погрешности эталона являются:

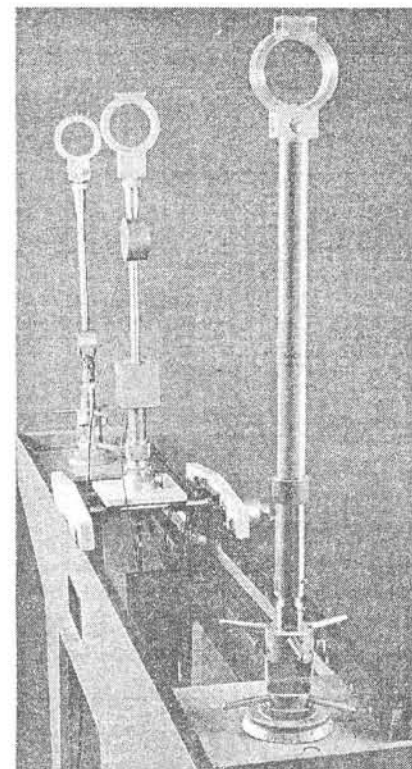
- погрешности измерения радиуса R_1 эталонной антенны ($\sim 1 \cdot 10^{-3}$) и расстояния L ;

Рис. 4.38. Государственный специальный эталон единицы напряженности магнитного поля в диапазоне 0,01...30 МГц

- погрешности, связанные с неоднородностью поля в рабочей зоне ($1 \cdot 10^{-3}$) и неравномерностью распределения тока в эталонной антенне ($1 \cdot 10^{-3}$);
- отражения от стен, конструктивных элементов и т.д. ($2 \cdot 10^{-3}$);
- "антенный эффект" эталонной рамочной антенны ($\sim 2 \cdot 10^{-3}$);
- погрешность измерения тока ($2 \cdot 10^{-3}$);
- токи смещения между витками ($2 \cdot 10^{-3}$).

Суммарная НСП оценивается значением $\theta_0 \approx 1 \cdot 10^{-2}$, СКО составляет $S_0 \approx (0,4 \dots 0,5) \cdot 10^{-2}$.

При передаче размера единицы поверяемого измерителя возникают погрешности, связанные с неточностью измерения тока в поверяемой антенне, несоосностью антенны и неточностью определения L , "антенным эффектом" поверяемой антенны. При этом СКО передачи оценивается значением $S_0 \approx (8 \dots 10) \cdot 10^{-3}$.



4.7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В табл. 4.2 обобщены основные сведения о первичных эталонах параметров интенсивности и приведены метрологические характеристики соответствующих эталонов России. Как видно, основополагающим принципом воспроизведения единиц напряжения, тока, мощности, напряженности поля для переменного тока является метод теплового компарирования. Поэтому одним из основных направлений дальнейшего совершенствования эталонов в данной подобласти электрорадиоизмерений следует считать развитие техники и технологии данного метода (термопреобразователей, калориметров и их элементов). Другим перспективным направлением представляется создание комплексированных эталонов мощности,

Таблица 4.2. Основные сведения о первичных эталонах параметров интенсивности

Физическая величина, единица	Диапазон частот	Закон, лежащий в основе эталона	Принцип воспроизведения	Основная аппаратура	Погрешность	
					НСП	СКО
Напряжение переменного тока, В	20 Гц... ...30 МГц	Закон сохранения энергии	Тепловое сравнение переменного и постоянного напряжений	Многоэлементный и одноэлементный термопреобразователи	$1 \cdot 10^{-5} \dots$ $\dots 3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6} \dots$ $\dots 5 \cdot 10^{-5}$
	30...3000 МГц	Закон сохранения энергии		Терморезистор в мостовой схеме	$1 \cdot 10^{-5} \dots$ $\dots 2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-5} \dots$ $\dots 5 \cdot 10^{-1}$
Сила переменного тока, А	20 Гц... ...1000 кГц	Закон сохранения энергии	Тепловое сравнение	Многоэлементный и одноэлементный термопреобразователи	$1 \cdot 10^{-5} \dots$ $\dots 3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7} \dots$ $\dots 1 \cdot 10^{-4}$
	0,1...300 МГц	Законы электродинамики	Преобразование энергии электромагнитного поля в механическую	Преобразователь электрической энергии в механическую	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Мощность, Вт	40...2500 Гц	Закон сохранения энергии	Тепловое сравнение, воспроизведение фиктивной мощности	Термопреобразователь	$(2 \dots 4) \cdot 10^{-5}$	$(0,5 \dots 1) \cdot 10^{-5}$
	2,59...37,5 ГГц	Закон сохранения энергии	Тепловое сравнение	Калориметр с рабочим и компенсирующим ТП	$(1 \dots 3) \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-4}$
	37,5... ...178,6 ГГц				$(0,5 \dots 1) \times$ $\times 10^{-2}$	$(1 \dots 2) \cdot 10^{-3}$
Спектральная плотность мощности шума, Вт/Гц	0,002... ...178,3 ГГц	Закон Планка	Свойство абсолютно черного тела	Генераторы шума, приемник-радиометр	$(0,2 \dots 1) \cdot K$	$(0,1 \dots 0,7) \cdot K$
Напряженность электрического поля, В/м	0,003... ...30 МГц	Законы электродинамики и сохранения энергии	Метод эталонного поля	Плоский конденсатор, ТП	$1 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$
	30...1000 МГц		Метод эталонного измерителя	Эталонная приемная антенна, ТП	$(1,5 \dots 2) \times$ $\times 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$
Напряженность магнитного поля, А/м	0,01...30 МГц	Законы электродинамики и сохранения энергии	Метод эталонного поля	Эталонная антенна-излучатель, ТП	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$

напряжения, тока, полного сопротивления и затухания в области ВЧ и СВЧ [4.4, 4.29], позволяющих реализовать в единой аппаратуре наилучшие технические и конструкторские решения в смежных подвидах и минимизировать частотные погрешности, погрешности расхождений, нестабильности и т.д.

Если говорить о конкретных эталонах, в частности об эталоне мощности в промышленном и низкочастотном диапазоне частот, то весьма перспективным является использование цифровой и вычислительной техники для реализации перемножения мгновенных значений напряжения и тока и получения значения мощности. Этот метод, используемый в ряде стран, позволяет получать программно-вычислительным путем ряд других параметров, в частности, параметров, определяющих качество электрической энергии. Точное измерение параметров качества и обеспечение прослеживаемости этих измерений до эталонов – одно из важнейших и актуальных направлений измерений в электроэнергетике.

Наконец, следует сказать об одном из наиболее интересных направлений – использовании квантового эффекта Джозефсона для измерения переменного напряжения и, в перспективе, создания единого квантового эталона вольты на постоянном и переменном токе. Концепция построения такого эталона в России рассмотрена в [4.30]. Сущность метода (см. рис. 4.39) заключается в сравнении переменного синусоидального сигнала $U \sin \omega t$ с "джозефсоновским" сигналом ступенчатой формы U_d с помощью некоторого нуль-индикатора (например, СКВИДа). При этом проводится сравнение площадей или, что то же самое, средневыпрямленных значений сравниваемых сигналов. Опорным сигналом служит напряжение, воспроизводимое мерой на основе эффекта Джозефсона U_d . Ступенчатый сигнал U_d может быть получен путем дискретных отсчетов с выводов джозефсоновской матрицы, расположенных, например, по двоичному коду. Разность напряжений (см. вид разности

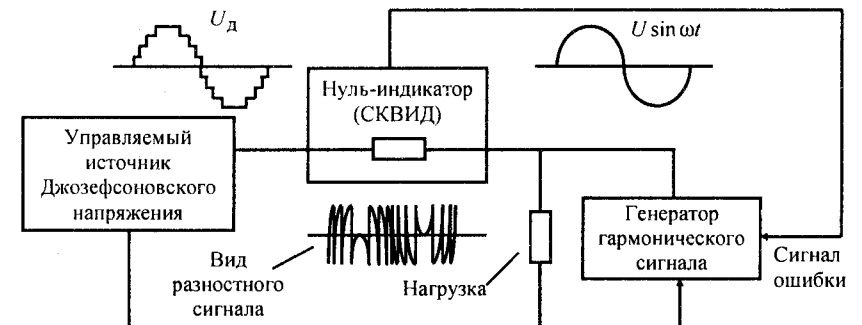


Рис. 4.39. Упрощенная схема воспроизведения переменного напряжения

ного сигнала на рис. 4.37) подается на вход СКВИДа, фильтруется, усиливается, выпрямляется на фазочувствительном детекторе и поступает на регулятор уровня U в виде сигнала ошибки. При равенстве средневывпрямленных значений $U_{св}$ напряжение сигнала ошибки равно нулю, для перехода к среднеквадратическим или амплитудным значениям напряжения в соответствии с выражениями (4.5) ($U_{ск} = \pi U_{св} / \sqrt{8}$, $U_m = \pi U_{св} / 2$) необходимо применять масштабные преобразователи напряжения.

Такое упрощенное рассмотрение представляется достаточно ясным, однако практическая реализация данного эталона содержит в себе множество вопросов. Это создание управляемой матрицы с безгистерезисными джозефсоновскими переходами, формирование ступенчатого сигнала U_d с заданными параметрами, построение прецизионного масштабного преобразователя в ряд других. Проблемой создания эталона переменного напряжения на основе эффекта Джозефсона занимается ряд метрологических центров мира, владеющих технологией создания многоэлементных матриц (РТВ, NIST и др.). Отметим, в частности, статью ведущего ученого в этой области Ю. Нимейера (РТВ), посвященную проблеме построения управляемой матрицы Джозефсона [4.31].

Отметим, что первые результаты в этом направлении есть и в России. Во ВНИИФТРИ создан цифровой синтезатор переменного напряжения на основе 8-битной джозефсоновской SINIS матрицы, изготовленной в РТВ (Германия). Частота облучения составляет 10 ГГц. Синтез напряжения осуществляется включением необходимого числа переходов Джозефсона. Время установления на требуемую рабочую квантовую ступеньку напряжения составляет не более 1 мкс. Синтезатор воспроизводит сигналы постоянного и переменного напряжения с частотой до 20 Гц и амплитудой ± 20 мВ. Работы в этом направлении активно продолжаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗД. 4

- 4.1. Акнаев Р.Ф., Галахова О.П., Рождественская Т.Б. Методы и средства обеспечения единства измерений напряжения переменного тока // Измерительная техника. – 1976. – № 4. – С. 66–71.
- 4.2. Рождественская Т.Б. Электрические компараторы для точных измерений тока, напряжения и мощности. – М.: Издательство стандартов, 1964. – 185 с.
- 4.3. Галахова О.П., Федоров А.М. Методы точных измерений силы тока, напряжения, мощности и их отношений в диапазоне звуковых и высоких частот. – М.: Машиностроение, 1976. – 128 с.
- 4.4. Чуйко В.Г. Применение рабочих эталонов мощности СВЧ в качестве эталонов напряжения // Измерительная техника. – 1997. – № 5. – С. 48–53.
- 4.5. Федоров А.М., Крестовский В.В. Государственный специальный эталон единицы напряжения переменного тока при высоких частотах // Измерительная техника. – 1974. – № 11.

- 4.6. Актуальные проблемы метрологии в радиоэлектронике / Под ред. В.К. Коробкова. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 296 с.
- 4.7. Selby M.C. Bolometric voltage and current (Bolovac) standard for high and microwave frequencies // J. Res. of NBS. – 1965. – Vol. 72, № 1.
- 4.8. Механиков А.И. Эталон для поверки высокочастотных вольтметров // Измерительная техника. – 2002. – № 3. – С. 47–50.
- 4.9. Байков В.М. Опыт эксплуатации рабочих эталонов РЭН-2 и РЭН-2М за 10 лет // Законодательная и прикладная метрология. – 1993. – № 6.
- 4.10. Телитченко Г.П., Шевцов В.И. Рабочий эталон напряжения РЭН-3 для диапазона частот 30–2000 МГц // Измерительная техника. – 1993. – № 8.
- 4.11. Shcheglov V.A., Galakhova O.P., Belyaeva M.S. Alternating Current Standard Based on AC/DC Thermal Current Converters // CPEM Conference Digest. – Canada, Ottawa, 1990.
- 4.12. Галахова О.П., Телитченко Г.П. Состояние эталонной базы в области измерений силы переменного тока при частотах 20–1·10⁶ Гц // Метрология в радиоэлектронике. – 2000: Научные труды. III Междунар. науч.-техн. конф. в 2-х т. Т.1. – Харьков: ХГНИИМ. 2000. – С. 137–139.
- 4.13. De Vreede. I.P.M. CCE Intercomparison of AC-DC Transfer Standards // IEEE Trans. Instr. and Meas. – 1993. – Vol. 42, № 2, April.
- 4.14. Кротков И.Н., Рождественская Т.Б., Федоров А.И. и др. Эталон единицы электрических величин для широкого диапазона частот. – М.: Машиностроение, 1978. – 96 с.
- 4.15. Лопань В.Р. Государственный специальный эталон единицы силы тока ВЧ и его применение в метрологической практике // Измерительная техника. – 1977. – № 4.
- 4.16. Безикович А.Я., Шапиро Е.З. Измерение активной мощности в звуковом диапазоне частот. – Л.: Энергия, 1980.
- 4.17. Государственные эталоны России: Каталог / Под общ. ред. В.Н. Крутикова. – М.: Андреевский флаг, 2000. – 184 с.
- 4.18. Федоров А.М. и др. Государственный специальный эталон единицы мощности переменного тока в коаксиальных трактах при высоких частотах // Измерительная техника. – 1975. – № 4. – С. 51–54.
- 4.19. Фрумкин В.Д., Чуйко В.Г. Государственный специальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 2,59–37,5 ГГц // Измерительная техника. – 1974. – № 7.
- 4.20. Ахизер А.Н., Сенько А.П., Терехов М.В. и др. // Измерительная техника. – 1974. – № 5. – С. 5–7.
- 4.21. Петросян Г.Г. Государственный эталон единицы спектральной плотности мощности шумов радионизлучения в диапазоне частот 2,6–17,4 ГГц // Измерительная техника. – 1971. – № 6. – С. 53–56.
- 4.22. Шапиро Е.З., Белов В.С. и др. Государственный специальный эталон единицы электрической мощности // Измерительная техника. – 1990. – № 8. – С. 3–5.
- 4.23. Green F.M., Solov V.S. // J. Res. NBS. – May 1950. – № 44. – P. 527.
- 4.24. Гищенко В.А., Токатлы В.И., Лукьянов В.И. Начала метрологии электромагнитных полей радиочастотного диапазона и первые эталоны напряженности электрического поля // Измерительная техника. – 2003. – № 1. – С. 50–56.
- 4.25. Белякова Г.М. и др. Государственный специальный эталон единицы напряженности электрического поля в диапазоне частот 0,15–30 МГц // Измерительная техника. – 1974. – № 3.

- 4.26. Тищенко В.А., Токатлы В.И., Лукьянов В.И. Становление и развитие метрологического обеспечения измерения напряженности низкочастотного электрического поля // Измерительная техника. — 2002. — № 4.
- 4.27. Белякова Г.М., Бузинов В.С., Мелехов М.Е. Государственный специальный эталон единицы напряженности электрического поля в диапазоне частот 30–1000 МГц // Измерительная техника. — 1976. — № 3.
- 4.28. Бузинов В.С., Белякова Г.М., Мелехов М.Е. Государственный специальный эталон единицы напряженности магнитного поля в диапазоне частот 0,01–30 МГц // Измерительная техника. — 1974. — № 4.
- 4.29. Чуйко В.Г. Взаимосвязь физических величин в радиоизмерениях на ВЧ и СВЧ и перспектива создания комплексированных эталонов // Измерительная техника. — 1997. — № 12. — С. 47–54.
- 4.30. Катков А.С., Колтик Е.Д., Кржимовский В.И. и др. Единый квантовый эталон вольты на постоянном и переменном токе. Концепция построения // Измерительная техника. — 1997. — № 12. — С. 39–44.
- 4.31. Нимейер Ю. Матрицы Джозефсона для динамических измерений напряжения // Украинский метрологический журнал. — 2001. — Вып. 1. — С. 5–11.

ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К РАЗД. 4

1. ГОСТ 8.047-80. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот 2,59–37,5 ГГц. — М.: Издательство стандартов, 1980.
2. ГОСТ 8.098-73. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений напряженности электрического поля в диапазоне частот от 0,15 до 30 МГц. — М.: Издательство стандартов, 1973. — 16 с.
3. ГОСТ 8.097-73. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений напряженности магнитного поля в диапазоне частот от 0,01–300 МГц. — М.: Издательство стандартов, 1973. — 7 с.
4. ГОСТ 8.102-73. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 37,5 до 53,57 ГГц. — М.: Издательство стандартов, 1973. — 8 с.
5. ГОСТ 8.189-76. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений напряженности электрического поля в диапазоне частот от 30 до 1000 МГц. — М.: Издательство стандартов, 1976.
6. ГОСТ 8.277-78. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц. — М.: Издательство стандартов, 1978. — 6 с.
7. ГОСТ 8.333-78. ГСИ. Компенсаторы переменного тока. Методы и средства поверки. — М.: Издательство стандартов, 1978. — 16 с.
8. ГОСТ 8.350-79. ГСИ. Амперметры высокочастотные. Методы и средства поверки. — М.: Издательство стандартов, 1979. — 8 с.
9. ГОСТ 8.497-83. ГСИ. Амперметры, вольтметры, ваттметры, варметры. Методика поверки. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 18 с.
10. ГОСТ 8.535-85. ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений мощности электромагнитных колебаний в волноводном тракте в диапазоне частот от 78,3 до 178,6 ГГц. — М.: Издательство стандартов, 1985. — 8 с.

11. ГОСТ 8.540-85. ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений напряженности импульсных электрических и магнитных полей. — М.: Издательство стандартов, 1985.
12. ГОСТ 8.551-86. ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений электрической мощности и коэффициента мощности в диапазоне частот 40–20000 Гц. — М.: Издательство стандартов, 1986. — 9 с.
13. ГОСТ Р 8.562-96. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 0,03 до 37,50 ГГц. — М.: Издательство стандартов, 1996. — 8 с.
14. ГОСТ Р 8.564-96. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений напряженности электрического поля в диапазоне частот 0–20 кГц. — М.: Издательство стандартов, 1996. — 7 с.
15. ГОСТ 8.569-2000. ГСИ. Ваттметры СВЧ малой мощности диапазона частот 0,02–178,6 ГГц. Методика поверки и калибровки. — М.: Издательство стандартов, 2000. — 11 с.

Раздел 5

ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПЕЙ И ТРАКТОВ

Электрические и радиотехнические цепи делят на две большие группы: цепи с сосредоточенными и распределенными постоянными.

К параметрам цепей с сосредоточенными постоянными относят сопротивление, индуктивность, емкость и их комбинации, а реализующими их компонентами являются соответственно резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы. При анализе этих цепей и измерений их параметров "работает" аппарат основ электротехники.

В начале своего развития (30-е и 40-е годы прошлого века) техника СВЧ также использовала аппарат цепей с сосредоточенными постоянными. Однако уже в 40-е и 50-е годы стало понятно, что этот аппарат имеет ограниченные перспективы для описания процессов в трактах СВЧ и необходимо вводить параметры, характеризующие именно волновые процессы и их свойства. В это время были введены в теорию и практику СВЧ волновое сопротивление и коэффициенты рассеяния. Если сопротивление, емкость и индуктивность являются мерами энергии, рассеянной на тепло, запасенной электрической и магнитной энергии, то коэффициенты рассеяния характеризуют процессы передачи и отражения (рассеяния) электромагнитных волн. Такое описание оказалось весьма универсальным и нашло широкое применение. Центральное место в технике измерений параметров линейных устройств СВЧ занимают методы измерения волнового сопротивления, коэффициентов передачи и коэффициентов отражения, о чем речь пойдет ниже.

Начнем рассмотрение с эталонов параметров цепей с сосредоточенными постоянными, в частности, с эталона единицы электрической емкости, поскольку именно для емкости удалось найти конфигурацию, которую можно было достаточно точно рассчитать. В свое время это был значительный шаг в плане повышения точности воспроизведения электрических единиц, а расчетный конденсатор и в настоящее время не потерял своего значения для метрологии.

5.1. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

В основе эталона единицы электрической емкости – расчетного конденсатора лежит основная теорема электростатики (теорема

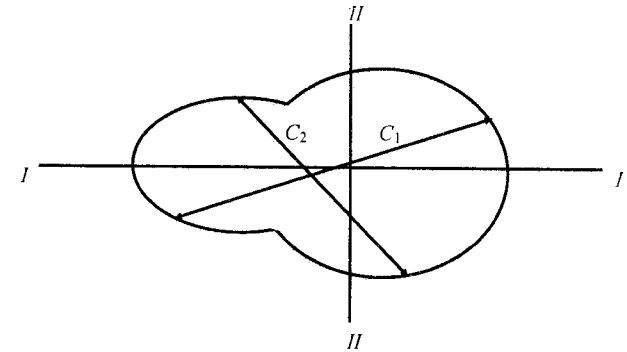


Рис. 5.1. Поперечное сечение цилиндрической оболочки конденсатора

Томпсона–Лампарда¹) [5.1, 5.2], которую можно сформулировать следующим образом: если поперечное сечение некоторой произвольной цилиндрической оболочки, имеющей по крайней мере одну ось симметрии, разделено на четыре части двумя взаимно перпендикулярными прямыми, лежащими в плоскостях, линия которых параллельна образующим цилиндрической оболочки, то емкости на единицу длины между противоположными сторонами будут равны.

Рассмотрим некий цилиндр, обладающий плоскостью симметрии ($I-I$), разделенный вдоль образующих на четыре части. Его поперечное сечение приведено на рис. 5.1. Тогда удельные емкости $C_1 = C_2 = \bar{C}$.

Точный расчет емкости такого конденсатора сопровождается определенными трудностями, преодолеваемыми путем представления достаточно сложного объекта совокупностью простых моделей (системы прямых и коаксиальных цилиндров, тороидов, колец с круглыми или квадратными сечениями, бесконечные плоскости и полуплоскости). Подробно основы методики воспроизведения емкости с помощью расчетного конденсатора изложены в [5.3], где показано, что для идеального расчетного конденсатора с длиной цилиндра (электродов) l полная "перекрестная" емкость

$$C = \bar{C}l = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l,$$

а ее приращение

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} \Delta l.$$

¹ Tompson-Lampard.

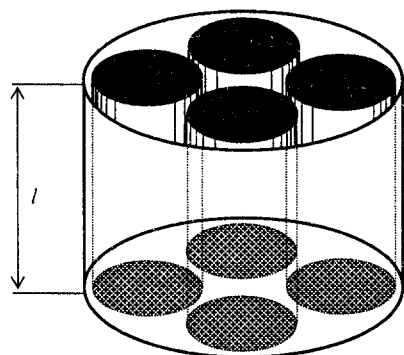


Рис. 5.2. Конструкция расчетного конденсатора

Из этих формул видно, что среднее значение удельной емкости \bar{C} такого конденсатора является постоянным. Отклонение от симметрии приводит к поправочным членам второго порядка малости, столь же незначительно влияют на емкость \bar{C} параметры температурного поля. Положительным свойством конденсатора Томпсона-Лампарда является то, что для определения емкости требуется только измерение длины l , которое можно выполнить с высокой точностью. Недостаток его — малая емкость (1 пФ на 50 см длины), что требует построения специальных масштабных преобразователей для передачи размера единицы в область больших емкостей.

Существует много вариантов конструкции конденсатора с перекрестными емкостями, но оптимальной оказалась конфигурация из четырех параллельных стержней, помещенных в заземленный

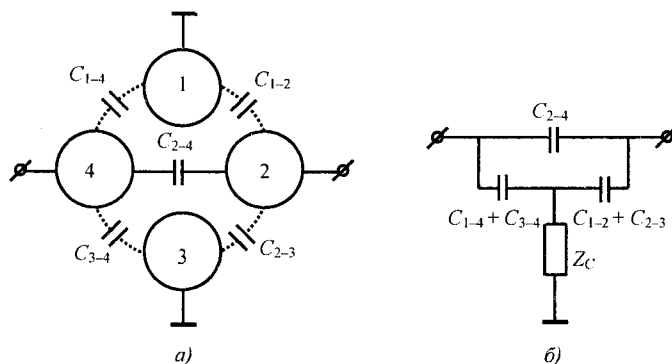


Рис. 5.3. Электрическая (а) и эквивалентная (б) схемы расчетного конденсатора

круговой цилиндр (рис. 5.2) — конденсатор В. Клотье² [5.4]. Электрическая и эквивалентная схемы этого конденсатора приведены на рис. 5.3 (а, б).

Длина электродов измеряется с помощью специальной интерферометрической установки (обычно применяются интерферометры типа Фабри-Перо), работающей совместно с расчетным конденсатором в одном вакуумном блоке.

Источником доминирующей погрешности расчета эталонной емкости является наличие так называемых краевых эффектов, приводящих к образованию емкостей между торцовыми поверхностями каждой пары цилиндров ($C_{кр}$). С учетом краевого эффекта

$$C = \frac{\varepsilon_0 \ln 2}{\pi} l_0 + C_{кр}.$$

Для повышения точности расчета необходимо исключить влияние этих емкостей. Для этого определяют не саму среднюю емкость C , а ее приращение ΔC , которое получают изменением эффективной длины электродов с l_1 до l_2 (рис. 5.4, а). В государственном эталоне России это достигается тем, что в пространство между электродами вводится заземленный экран цилиндрической формы (рис. 5.4) [5.7].

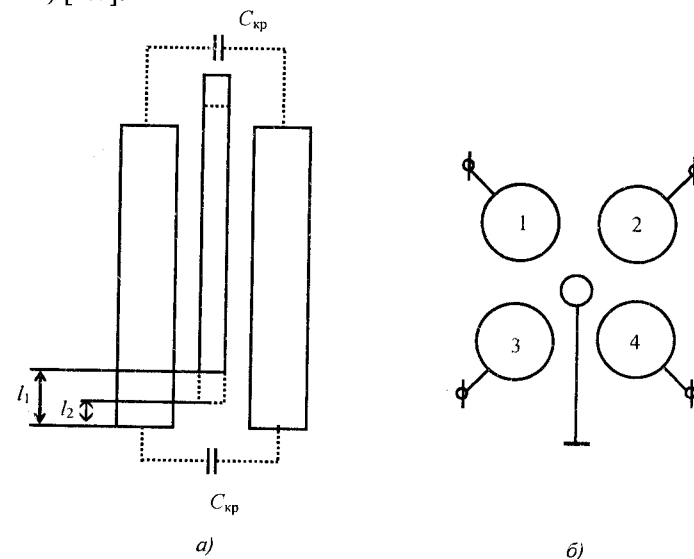


Рис. 5.4. Схема расчетного конденсатора с заземленным экраном

² Clothier.

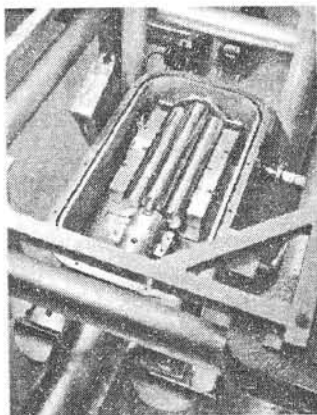


Рис. 5.5. Горизонтальный пятиэлектродный конденсатор Томпсона–Лампарда емкостью 0,375 нФ (BNM)

При перемещении такого экрана вдоль оси краевые эффекты остаются неизменными, что позволяет вычислить разность емкостей в зависимости от расстояния, на которое перемещается экран. В этом случае

$$\begin{aligned} \Delta C &= \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l_1 + C_{\text{кр}} - \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l_2 - C_{\text{кр}} = \\ &= \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} \Delta l, \end{aligned}$$

где Δl – получаемое искусственно изменение эффективной длины электродов. Расстояние Δl , на которое перемещается экран вниз, измеряется интерферометром.

Такие цилиндрические конструкции (рис. 5.5) применяются и в других странах и позволяют получить малую погрешность воспроизведения (на уровне 10^{-6} и ниже) [5.5]. Неудобство заключается в том, что емкость их мала, о чем говорилось выше. В качестве эталонов более низких порядков используют другие конфигурации электродов, обеспечивающие большие значения емкостей (10...100 пФ), но обладающие также и большими погрешностями воспроизведения.

Передача размера единицы от расчетного конденсатора к конденсаторам вторичных эталонов представляет собой самостоятельную задачу и осуществляется с помощью специальных метрологических установок на базе мостов переменного тока. Простейшая схема такого моста приведена на рис. 5.6.

Известное условие равновесия моста в комплексной форме $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$, может быть представлено в виде

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3; \quad \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Из этого следует, что для уравнивания моста переменного тока необходимо регулировать не менее двух параметров схемы.

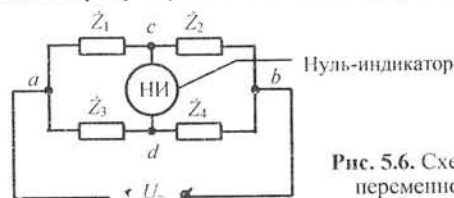


Рис. 5.6. Схема моста переменного тока

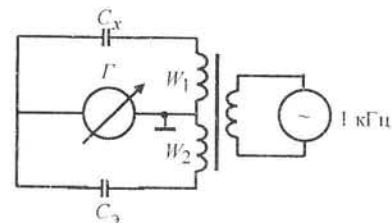


Рис. 5.7. Емкостной трансформаторный мост

В метрологической практике для прецизионного измерения емкости чаще всего применяют мосты с индуктивно-связанными элементами плеч или так называемые трансформаторные мосты³. Упрощенная схема емкостного трансформаторного моста приведена на рис. 5.7.

Для такого моста

$$\frac{Z_x}{Z_3} = \frac{W_1}{W_2}; \quad \frac{1/\omega C_x}{1/\omega C_3} = \frac{W_1}{W_2}; \quad C_x = \frac{C_3}{W_1} W_2.$$

Практические схемы таких мостов и процедура передачи размера единицы значительно сложнее. Приведем краткое описание метрологического моста, созданного во ВНИИМ и применяемого в государственном эталоне России. Его схема приведена на рис. 5.8.

Для точного измерения емкости применяется метод одновременного сличения эталонной C_3 и исследуемой C_x мер. Конденсато-

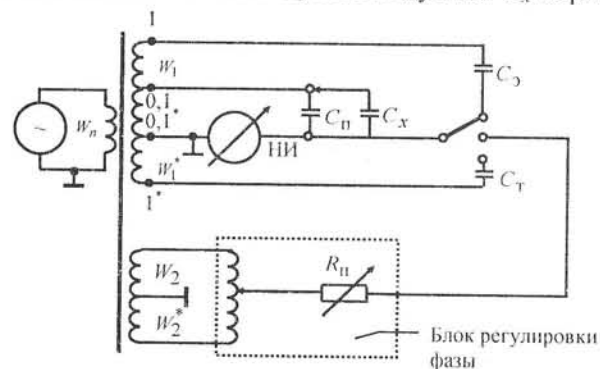


Рис. 5.8. Схема метрологического моста ВНИИМ

³ Особенность трансформаторных мостов состоит в том, что плечи отношения в них образуют катушки с тесной индуктивной связью, расположенные на одном сердечнике из материала с большой магнитной проницаемостью, что обеспечивает малое влияние электрических и магнитных помех.

ры C_3 и C_x поочередно включаются в одно из плечей сравнения, при этом в смежное плечо включается так называемый “гарный” конденсатор с емкостью $C_T = C_3$, которая остается неизменной при двух поочередных уравниваниях моста. Равновесие моста достигается регулированием переменных конденсатора C_n и сопротивления R_n .

В результате совместного решения двух уравнений, составленных по результатам, полученным при равновесии моста, определяем [5.6]

$$C_x = kC_0 + \Delta C_n + \Delta \epsilon_c,$$

где k – коэффициент деления индуктивного делителя, $k \geq 1$ (погрешность аттестации делителя порядка $10^{-7} \dots 10^{-8}$); ΔC_n – разность отсчетов по C_n при двух уравниваниях цепи; $\Delta \epsilon_c$ – поправочный коэффициент, зависящий от ряда параметров моста.

Установка применяется для передачи размера фарады вторичным и рабочим эталонам с номинальными значениями от 10^{-2} до 10^4 пф при частоте 1000 Гц. Погрешность передачи $S_{\Sigma \epsilon}$ составляет $5 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-4}$ в зависимости от значения емкости.

Отметим, что эталон на расчетном конденсаторе представляет собой весьма сложную конструкцию, изготовить которую на необходимом технологическом и метрологическом уровнях – достаточно трудная и дорогостоящая задача. Поэтому лишь немногие страны имеют такие эталоны. Важнейшим принципиальным достоинством такого эталона является возможность воспроизведения единицы

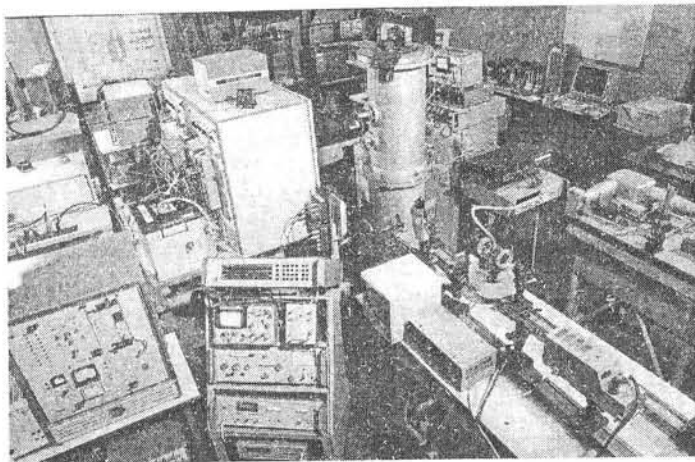


Рис. 5.9. Государственный первичный эталон единицы электрической емкости России

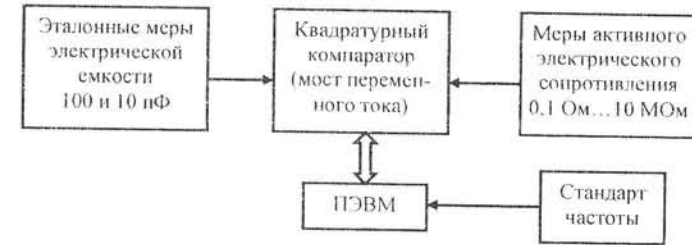


Рис. 5.10. Структурная схема эталона единицы электрической емкости Украины

емкости в абсолютной мере – через основную единицу СИ – метр. Государственный эталон России (рис. 5.9) создан во ВНИИМ и имеет следующие метрологические характеристики [5.11, 5.13]:

номинальное значение емкости, пФ.....	0,2;
НСП (θ_0).....	$5 \cdot 10^{-7}$;
СКО (S_0).....	$2 \cdot 10^{-7}$.

Существует альтернативный путь воспроизведения размера единицы емкости – через эталонное активное сопротивление и частоту с использованием соотношения $R = F(\omega, C)$, которое реализуется с помощью различных модификаций мостов переменного тока. Именно этот путь осуществлен в государственном эталоне единицы емкости в Украине. Упрощенная структура эталона приведена на рис. 5.10.

В качестве моста-компаратора используется автоматизированная установка, разработанная в Институте электродинамики НАН Украины.

Эталон электрической емкости Украины имеет следующие характеристики:

диапазон значений емкости.....	$1 \cdot 10^{-3}$ пФ... 100 мкФ;
НСП воспроизведения единицы емкости... $\theta_0 \approx$	$2,5 \cdot 10^{-6}$;
СКО воспроизведения единицы емкости... $S_0 \approx$	$1 \cdot 10^{-6}$;
нестабильность эталона за год..... $\nu_0 \approx$	$(2 \dots 5) \cdot 10^{-7}$.

Указанный метод воспроизведения емкости уступает по точности методу с использованием расчетного конденсатора, однако существенно проще в реализации.

В заключение заметим, что возможность воспроизведения фарады двумя методами – с помощью расчетного конденсатора, т.е. в системе СИ ($\Phi_{СИ}$) и через холловское сопротивление и частоту ($\Phi_{Холл}$) позволяет провести их сравнение и согласование, а также открывает перспективу дальнейших метрологических исследований в этой области (см. рис. 5.11). Этой возможностью в настоящее время обладает Россия.



Рис. 5.11. Два способа воспроизведения единицы электрической емкости

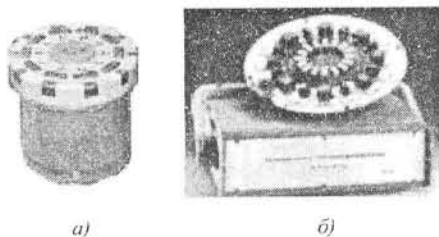


Рис. 5.12. Многозначные меры электрической емкости ММЕ (а) и РД-1 (б)

В качестве вторичных и рабочих эталонов единицы электрической емкости применяют однозначные и многозначные меры емкости. В России (ВНИИМ) созданы многозначные меры емкости ММЕ и РД-1 (рис. 5.12).

Широкодиапазонная многозначная мера емкости ММЕ содержит малогабаритные герметизированные конденсаторы, имеющие емкость, кратную 10^n пФ ($n = -1 \dots 7$), а также емкость 4 нФ. Мера имеет следующие метрологические характеристики:

емкость, пФ.....	$10^{-1}; 1 \dots 10^7;$
частота, кГц.....	$0,05 \dots 100;$
погрешность (СКО).....	$(1 \dots 5) \cdot 10^{-5};$
температурный коэффициент емкости, K^{-1}	$5 \cdot 10^{-6}.$

Мера превосходит зарубежные аналоги по диапазону емкости и ТКЕ.

Ультрапрецизионная компьютерно-управляемая мера РД-1 воспроизводит 11110 значений емкости ступенями по 100 пФ в диапазоне 100 пФ...1,111 мкФ. Ее оригинальная конструкция обеспечивает внутреннюю сходимость результатов порядка 0,0001 % при самокалибровке.

5.2. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ИНДУКТИВНОСТИ

Как говорилось выше, примерно до середины 70-х годов прошлого века воспроизведение единицы индуктивности – генри осуществлялось в абсолютной мере с помощью эталона, основанного на расчетных катушках индуктивности (через геометрические размеры катушек и магнитную проницаемость среды) [5.3, 5.6]. В то же время с начала 70-х годов успешно развивались работы по созданию эталона емкости на основе рассмотренного выше расчетного конденсатора Томпсона–Лампарда, точность воспроизведения которой была существенно выше, чем индуктивности. Поэтому в настоящее время эталон индуктивности получает значение размера единицы от эталона емкости, а передача размера единицы осуществляется с помощью индуктивно-емкостного моста. Эта ситуация характерна для большинства эталонов развитых стран, отличие состоит лишь в некоторых технических деталях.

В частности, государственный эталон единицы индуктивности России, созданный во ВНИИМ в 1980 году, представляет собой комплекс из четырех мер индуктивности – торроидальных катушек и эталонного индуктивно-емкостного моста [5.7]. Размер воспроизводимой эталоном единицы определяется как среднее арифметическое группы

$$L = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 L_i.$$

где L_i – действительное значение индуктивности i -той меры, определяемое с помощью эталонной меры емкости, меры частоты и индуктивно-емкостного моста.

Упрощенная схема моста приведена на рис. 5.13 (мост Максвелла – Вина).

Особенностью конструкции моста является выполнение резистивных плеч R_2 и R_4 в виде смешанных элементов с пятизажимной схемой включения, что позволяет проводить предварительную атте-

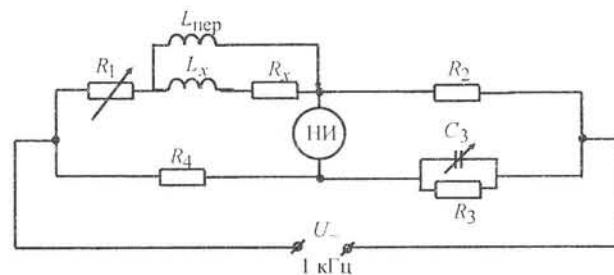


Рис. 5.13. Схема моста Максвелла-Вина

станцию этих мер и последующее применение их в схеме без внесения дополнительных погрешностей за счет влияния параметров монтажа и контактов. Для этого предусмотрены также конденсаторы с трехзажимной схемой включения.

Для точного измерения индуктивности применяется метод двух уравновешиваний цепи [5.12]:

а) при включении последовательно с переменным сопротивлением R_1 калибруемой индуктивности L_x , при этом схема уравновешивается регулировкой R_1 и C_3 ;

б) при включении перемычки $L_{пер}$ на выводы L_x равновесие моста восстанавливается регулированием тех же элементов ($R_{1кз}$, $C_{3кз}$).

Выражение для определения L_x имеет вид:

$$L_x = R_2 R_4 (C_3 - C_{3кз})(1 + \mathcal{E}_l) + L_{пер},$$

где \mathcal{E}_l — поправочный член, зависящий от остаточных параметров моста; $L_{пер}$ — индуктивность перемычки (выполняется минимальной, оценивается по геометрическим размерам).

В эталоне России (рис. 5.14) номинальное значение воспроизводимой индуктивности составляет $10 \cdot 10^{-3}$ Гн, оценка НСП равно $5 \cdot 10^{-6}$, СКО $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ [5.13, 5.14].

Передача размера единицы мерам индуктивности, вторичным и рабочим эталонам проводится с помощью индуктивно-емкостного моста на частоте $f = 1000$ Гц.

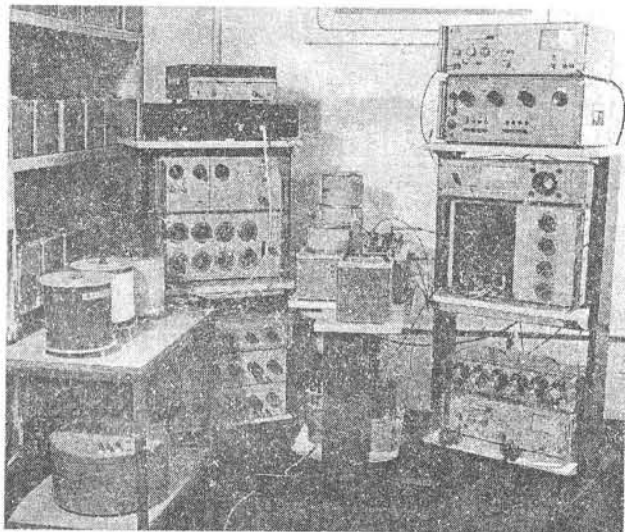


Рис. 5.14. Государственный первичный эталон единицы индуктивности

5.3. ЭТАЛОНЫ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПОСТОЯННЫМИ

Выше было сказано, что важнейшим понятием в технике СВЧ является отражение. Отражения энергии от приемника сигналов и антенны снижают коэффициент полезного действия (подобно отличию от единицы $\cos \varphi$ на промышленных частотах). Разработчики и потребители радиотехнических систем стремятся создать режим бегущей волны в передающей линии, т.е. исключить или компенсировать отражения. Свойство узлов ВЧ тракта отражать электромагнитную волну характеризуют *коэффициентом отражения*.

Коэффициент отражения (КО) Γ представляет собой отношение напряжения отраженной волны U_o к напряжению падающей волны U_n .

$$\Gamma = \left| \frac{U_o}{U_n} \right| e^{j\varphi},$$

где φ — разность фаз между U_o и U_n .

Коэффициент отражения, выраженный через волновое сопротивление линии W и полное сопротивление Z в сечении линии, проходящем через начало отсчета, имеет вид:

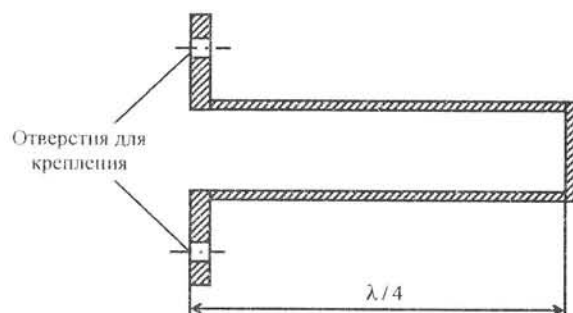
$$\Gamma = \frac{Z - W}{Z + W}.$$

Очевидно, имеет смысл говорить о КО только относительно линии, принятой за эталон, так как КО — относительная безразмерная величина. Поэтому КО неоднородности можно правильно измерить, если имеются два эталона: отрезок линии, принятой за эталон, и измеритель отношения напряженности поля отраженной волны к напряженности поля падающей волны. Точный измеритель КО можно заменить эталонной мерой КО, представляющей собой расчетную неоднородность, исключив измеритель отношений отраженной волны к падающей. Для удобства передачи правильных значений КО создают (и включают в состав эталонов) меры различных значений КО. Для создания мер КО применяются неоднородности простых геометрических форм, поддающиеся электродинамическому расчету.

Типовая структура эталона КО (волнового сопротивления) включает в себя следующие устройства [5.8]:

а) отрезок эталонного волновода — для воспроизведения волнового сопротивления;

б) измеритель отношения падающей и отраженной волны или расчетную меру КО — для воспроизведения значения КО;

Рис. 5.15. Четвертьволновая мера КО ($\Gamma=1$)

в) меры фиксированных значений КО – для воспроизведения набора значений КО;

г) измеритель отношения двух значений КО (компаратор) – для измерения произвольного значения КО.

Приведем пример построения эталона КО в волноводных трактах в диапазоне частот 2,54...37,5 ГГц, созданного в России (имеет статус установки высшей точности). В состав эталона входят устройства, перечисленные выше. Первичным эталоном КО обычно является четвертьволновая секция короткозамкнутого волновода (рис. 5.15).

Четвертьволновая длина линии обеспечивает минимальное влияние на КО фланцевого соединения, так как на расстоянии $\lambda/4$ от короткого замыкания токи в линии практически отсутствуют и неидеальность фланцевых соединений не проявляется. В идеальном случае КО такого отражателя равен единице, реально он составляет около 0,9995 (погрешность порядка $2 \cdot 10^{-4}$). Определение значения КО отражателя является центральной задачей метрологического исследования эталона.

При сравнении устройств, имеющих малые значения КО (0,01 и менее), с эталонным короткозамыкающим отражателем возникает необходимость измерения отношений сигналов 40 дБ и более, что сопряжено обычно с заметным ростом погрешности. Поэтому возникла необходимость иметь эталонные отражатели с КО порядка 0,1. На рис. 5.16 представлены несколько конструкций отражателей на волноводах прямоугольного сечения. На рис. 5.16, а представлен пример так называемой нерегулярности апертурного типа, расчет коэффициента отражения которой ведется на основе теории Бёте по формуле

$$|\dot{\Gamma}| = \frac{\pi d^3}{6ab\Lambda} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2 \right].$$

где Λ, λ – длина волны в волноводе и свободном пространстве соответственно.

Для уменьшения излучения из волновода через апертуру стенки волновода утолщают в месте апертуры. Образовавшаяся труба представляет собой заперделный волновод и эквивалентна эффективной развязке между волноводом и свободным пространством.

Остальные три конструкции на рис. 5.16 представляют собой примеры препятствий с цилиндрической симметрией, расположенных в волноводе. Расчет КО для них ведется с привлечением методов дифракции электромагнитных волн в полых системах. Сущность метрологических исследований при этом заключается в оценке влияния на результаты расчетов конечной проводимости металлов, неточности изготовления, качества запайки, неточностей геометрии и т.д. Погрешность таких промежуточных мер КО составляет около 1%.

Отсутствие активных потерь в волноводных нерегулярностях позволяет установить однозначное соответствие между модулем коэффициента отражения и его фазой:

$$\varphi = \pi - \arctg \left(-|\dot{\Gamma}| / \sqrt{1 - |\dot{\Gamma}|^2} \right).$$

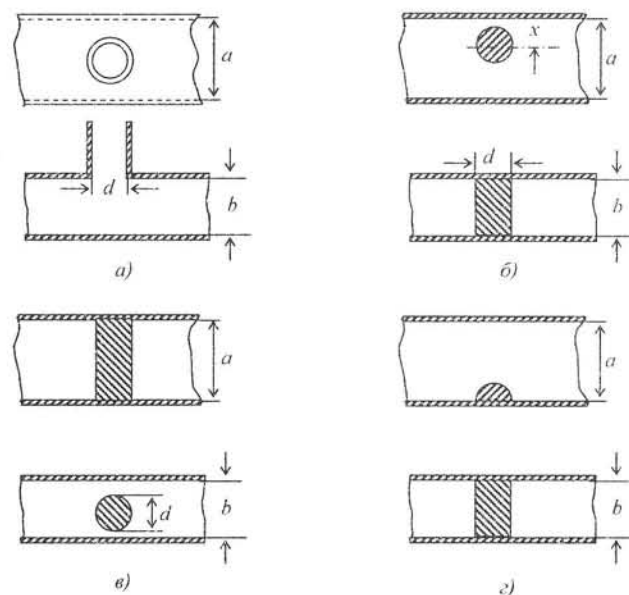


Рис. 5.16. Конструкции отражателей на волноводах прямоугольного сечения

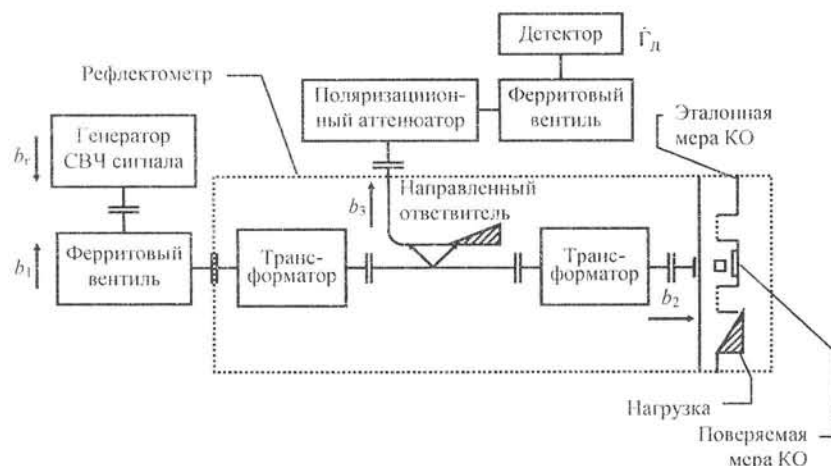


Рис. 5.17. Структурная схема компаратора КО

Это уравнение справедливо для так называемых плоских нерегулярностей, эквивалентная схема которых может быть представлена в виде шунтирующей реактивной проводимости. В более общем случае связь между φ и $|\Gamma|$ остается однозначной, однако формула усложняется. Таким образом, эталонные отражатели на основе реактивных элементов одновременно являются мерами фазового сдвига.

При наличии надежных мер КО точность передачи единицы (градуировки нагрузок) определяется погрешностью компаратора, назначение которого – измерение отношения КО поверяемой нагрузки к КО эталонной нагрузки.

В качестве компаратора в эталоне России применяется установка с трехплечим настраиваемым рефлектометром (рис. 5.17). На рисунке b_r , b_1 , b_2 , b_3 – напряжения отраженных сигналов.

Измерение заключается в сравнении отраженных сигналов от эталонной и поверяемой нагрузок. Результирующие погрешности градуировки поверяемых нагрузок с учетом НСП и случайной погрешности рефлектометров достаточно хорошо изучены и приведены в табл. 5.1 [5.8]

Таблица 5.1. Характеристики рефлектометров

Номинальные значения Γ_n (КСВН)	Относительные погрешности, %	
	$\delta\Gamma_n$	$\delta_{КСВН}$
0,33 (2,0)	1,1	0,8
0,17 (1,4)	0,7	1,7
0,07 (1,14)	0,5	3,3
0,025 (1,05)	0,3	4,0

Передачу размера единицы КО от эталона к рабочим эталонам и РСИ в волноводном диапазоне наиболее рационально осуществлять с помощью транспортируемых эталонных мер коэффициентов отражения.

Приведем метрологические характеристики эталона (установки высшей точности) России, созданной во ВНИИФТРИ:

диапазон измерений:

по модулю КО..... 0...1;
 по фазе КО..... 0...360 град;
 номинальные значения КСВН..... 1,05; 1,2; 1,4; 2,0; 4,5;

неисключенная систематическая погрешность:

по КСВН..... $2 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-2}$;
 по фазе КО..... 0,3...1,5 град;

СКО случайной погрешности:

по КСВН..... $3 \cdot 10^{-3}$;
 по фазе КО..... 0,3 град.

Принцип построения эталонов для коаксиальных трактов аналогичен. В состав эталона входят наборы эталонных мер волнового сопротивления – расчетные отрезки прецизионных коаксиальных линий различной длины, эталонные измерители отношений амплитуд отраженной и падающей волн (измерители КСВН), используемые одновременно в качестве компараторов, меры волнового (входного) сопротивления на различные номинальные значения [5.8, 5.10]. Очевидно, что погрешности эталона зависят от точности изготовления коаксиальных линий и измерения их геометрических размеров. Кроме того, на точность расчета элементов эталона влияют наличие эллиптичности и искривлений коаксиалов, а также качество обработки. Эти вопросы рассмотрены в [5.9, 5.10].

Как было сказано, в состав эталона входят измерители отношений амплитуд отраженной и падающей волн. Из-за того, что они должны измерять "абсолютные", а не относительные, как в волно-

Таблица 5.2. Метрологические характеристики государственного эталона волнового сопротивления

Характеристики канала			НСП	СКО
Номинальное сопротивление, Ом	Сечение, мм	Диапазон частот, ГГц		
75	16 / 4,58	1...3	$9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
50	16 / 6,95	1...7	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$
50	7 / 3,04	1...18	$3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
50	3,5 / 1,52	2...18	$6 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$

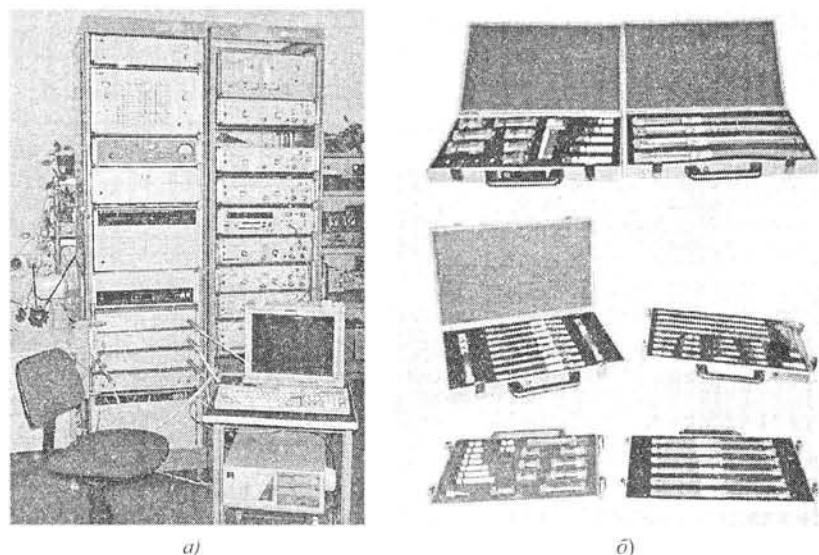


Рис. 5.18. Государственный специальный эталон волнового сопротивления в коаксиальных волноводах ГЭГ 75-87 (а) и наборы мер для каждого типа коаксиального волновода (б)

водном диапазоне, значения коэффициентов отражения, рефлектометры на направленных ответвителях не применяют, а используют прецизионные измерительные линии.

В табл. 5.2 приведены метрологические характеристики государственного эталона волнового сопротивления России (рис. 5.18), созданного ВНИИМ [5.10, 5.11].

В качестве вторичных и рабочих эталонов применяют образцовые меры КО и волнового сопротивления, а также измерители отношения амплитуд отраженной и падающей волн (измерители КСВН), используемые одновременно в качестве компараторов.

5.4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие сведения об эталонах параметров цепей и трактов приведены в табл. 5.3. Представляется, что основные направления их совершенствования лежат в технологической плоскости: совершенствование качества и технологии изготовления узлов и деталей расчетного конденсатора, эталонных катушек, мер КО и волнового сопротивления. Прогресс в этом подвиде, по-видимому, будет идти в направлении постепенного совершенствования названных выше основных элементов, а также других устройств, участвующих в процедуре воспроизведения и передачи единиц: мостов переменного тока, рефлектометров и измерителей КСВН.

Таблица 5.3. Основные сведения об эталонах параметров цепей и трактов

Физическая величина, единица	Закон, лежащий в основе воспроизведения	Уравнение эталона	Основная аппаратура	Погрешности	
				НСН	СКО
Электрическая емкость, Ф	Теорема Томпсона–Лампарда	$C = \frac{\epsilon_0 \ln 2}{\pi} l$	Расчетный конденсатор, интерферометр	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Индуктивность, Гн	Законы электродинамики	$L = \Psi(f, R, C)$	Эталонные катушки, мост переменного тока	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент отражения ($f = 2,54 \dots 37,5$ ГГц)	Теория длинных линий и волноводов	–	Меры КО, рефлектометр	по КСВН $(2 \dots 10) \cdot 10^{-3}$	по КСВН $3 \cdot 10^{-3}$
Волновое сопротивление, Ом ($f = 1 \dots 18$ ГГц)	Теория длинных линий и волноводов	–	Меры волновых сопротивлений, измеритель КСВН	$(1 \dots 6) \cdot 10^{-3}$	$(1 \dots 8) \cdot 10^{-4}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗД. 5

- Lampard D.G. Proc. IEEE Monograph 216M. – 104 p., 271 (1957).
- Thompson A.M., Lampard D.G. A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance // Nature. – 1956. – V.177. – № 4515. – P. 888.
- Кротков И.И. Точные измерения электрических емкости и индуктивности. – М.: Издательство стандартов, 1966. – 272 с.
- Clothier W. Metrologia. – 1965, № 2.
- Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
- Гушина Т.М., Кротков И.И. Измерение параметров электрических полей. – М.: Издательство стандартов, 1971.
- Акнаев Р.Ф., Любимов Л.И., Панасюк–Мирович А.М. Проверка средств измерений электрических и магнитных величин. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 256 с.
- Актуальные проблемы метрологии в радиоэлектронике / Под ред. В.К. Коробкова. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 296 с.
- Йеш, Джинлинг. Измерение полных сопротивлений в коаксиальных линиях / Пер. с англ. // ТИИЭР – 1967. – Т. 55, № 6.
- Петров В.И. и др. Государственные специальные эталоны единицы волнового сопротивления // Измерительная техника – 1976. – № 3.
- Государственные эталоны России: Каталог / Под общей редакцией В.И. Крутикова. – М.: Андреевский флаг, 2000. – 184 с.
- Кротков И.И., Рождественская Т.Б., Федоров А.М. и др. Эталонные единицы электрических величин для широкого диапазона частот. – М.: Машиностроение, 1978. – 94 с.

5.13. **Эталонная база России** // Измерительная техника. — 1999. — № 10. — С. 3–8.

5.14. **Колтук Е.Д.** Создание и развитие метрологии электрических величин. — Законодательная и прикладная метрология, 2001. № 4. — С. 43–50.

ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К РАЗД. 5

1. **ГОСТ 8.029-80.** Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений индуктивности. — М.: Издательство стандартов, 1980. — 13 с.

2. **ГОСТ 8.249-77.** Государственная система обеспечения единства измерений. Аттеноаторы коаксиальные и волноводные измерительные. Методы и средства поверки в диапазоне частот от 100 кГц до 17,44 ГГц. — М.: Издательство стандартов, 1977. — 15 с.

3. **ГОСТ 8.255-2003.** Государственная система обеспечения единства измерений. Меры электрической емкости. Методика поверки. — М.: Издательство стандартов, 2003. — 26 с.

4. **ГОСТ 8.274-85.** Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений бикомплексной проницаемости и модуля коэффициента отражения в диапазоне частот 0,2–1,0 ГГц. — М.: Издательство стандартов, 1985. — 10 с.

5. **ГОСТ 8.371-80.** Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений электрической емкости. — М.: Издательство стандартов, 1980. — 9 с.

6. **ГОСТ 8.498-98.** Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений электрической добротности. — М.: Издательство стандартов, 1998. — 10 с.

7. **ГОСТ 8.564-98.** Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений электрической емкости в диапазоне частот от 1 до 100 МГц. — М.: Издательство стандартов, 1998. — 9 с.

8. **ГОСТ Р 8.597-2003.** Государственная система обеспечения единства измерений. Нагрузки коаксиальные. Методика поверки. — М.: Издательство стандартов, 2003. — 16 с.

Раздел 6

ЭТАЛОНЫ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ И СПЕКТРА РАДИОСИГНАЛОВ

К средствам измерения параметров формы и спектра общего применения¹ в соответствии с классификацией по ГОСТ 15094-86 относятся:

- осциллографы различных видов (подгруппы С1, С7, С8, С9);
- измерители коэффициента амплитудной модуляции (С2);
- измерители девиации частоты (С3);
- анализаторы спектра (С4, СК4);
- измерители нелинейных искажений (С6).

Помимо приборов общего применения в данной области радиоизмерений существует множество специализированных приборов связного, технологического и исследовательского назначения. Параметры формы и спектра нормируются также в ряде приборов других групп, например в измерительных генераторах (подгруппы Г3, Г4, Г5, Г6), синтезаторах (Ч6) и других.

Три вида приборов общего применения из перечисленных (подгруппы С6, С2 и С3) предназначены для измерения конкретного вида сигнала и имеют нормированную погрешность измерения основного параметра этого сигнала. Так, измерители нелинейных искажений предназначены для измерения коэффициентов гармоник квазигармонических сигналов. Измерители коэффициента АМ (модулометры) и измерители девиации частоты (девиометры) предназначены для измерения параметров амплитудно-модулированных (АМ) и частотно-модулированных (ЧМ) сигналов соответственно².

Иначе обстоит дело с такими приборами, как осциллографы и анализаторы спектра (АС). Для этих приборов, предназначенных для исследования сигналов во временной (осциллографы) и частотной (анализаторы спектра) областях, характерны следующие особенности:

- возможность исследования с их помощью широкого класса сигналов — от простых гармонических до сложных модулированных, манипулированных и составных;

¹ К средствам измерения общего применения относят серийно выпускаемые электрорадиоизмерительные приборы, соответствующие ГОСТ 22261-94 "Приборы радиоизмерительные электронные".

² Помимо основных (полезных) параметров, обозначенных в названиях приборов, модулометры и девиометры способны измерять и так называемые "паразитные" параметры АМ и ЧМ сигналов: искажения закона модуляции, сопутствующую модуляцию (АМ при ЧМ, ЧМ при АМ), амплитудную и угловую модуляцию шумового характера. Подробнее — в пп. 6.2 и 6.3.

- многофункциональность, т.е. возможность решения с их помощью множества измерительных задач.

Для этих приборов неприменимы понятия “погрешность осциллографа” или “погрешность анализатора спектра”. В них нормируется до 30–40 “внутренних” параметров (неравномерность АЧХ, нелинейность амплитудной характеристики, шумы, погрешность измерения уровней и частот, переходная характеристика и т.д.), что дает возможность пользователю самому рассчитать погрешность измерения того или иного параметра в зависимости от характера решаемой измерительной задачи, исследуемого объекта и условий измерения.

Поэтому подходы к метрологическому обеспечению разных подгрупп параметров формы и спектра радиосигналов принципиально отличаются. Если для приборов подгрупп С2, С3, С6 можно говорить о построении эталонов единиц измеряемых величин (коэффициента гармоник, коэффициента АМ, девиации частоты), то для осциллографов и АС говорить о каких либо эталонах неуместно. Подход к метрологическому обеспечению этих приборов иной и будет рассмотрен отдельно.

6.1. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТА ГАРМОНИК

Эталон предназначен для аттестации и поверки измерителей нелинейных искажений или приборов, генерирующих квазигармонический сигнал с калиброванным коэффициентом гармоник (КГ).

6.1.1. ПАРАМЕТРЫ КВАЗИГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Квазигармонический сигнал $u_{кг}(t)$ может быть записан в виде

$$u_{кг}(t) = \sum_{i=1}^n U_{mi} \sin(i\Omega t + \varphi_i), \quad (6.1)$$

где U_{mi} – амплитуда i -й гармоники основной частоты ($i = 1, 2, \dots, n$ – номер гармоники); $\Omega = 2\pi F$ – основная частота колебания; φ_i – фаза i -й гармоники.

Среднеквадратическое значение (СКЗ) напряжения $U_{кг}$ этого сигнала определится выражением:

$$U_{кг} = \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2}, \quad (6.2)$$

где $U_i = U_{mi}/\sqrt{2}$ – СКЗ i -й гармоники.

Коэффициент гармоник сигнала (6.1) есть отношение СКЗ напряжения высших гармоник $U_{вр}$ к СКЗ напряжения первой гармоники:

$$K_r = \frac{U_{вр}}{U_1} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100\%. \quad (6.2)$$

Различают парциальные КГ по второй, третьей и т.д. гармоникам:

$$K_{r2} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%, \quad K_{r3} = \frac{U_3}{U_1} \cdot 100\%, \quad \dots, \quad K_{rn} = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\%.$$

Тогда

$$K_r = \sqrt{\sum_{i=2}^n K_{ri}^2} = \sqrt{K_{r2}^2 + K_{r3}^2 + \dots + K_{rn}^2}. \quad (6.3)$$

Иногда нормируют и измеряют КГ в форме отношения СКЗ напряжения высших гармоник и СКЗ полного напряжения $U_{кг}$:

$$K_r^* = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2}} \cdot 100\%. \quad (6.4)$$

Связь между K_r и K_r^* имеет вид:

$$K_r = \frac{K_r^*}{\sqrt{1 - (K_r^*)^2}}. \quad (6.5)$$

Если искажения не очень велики ($K_r < 10\%$), то значения K_r и K_r^* отличаются незначительно (менее чем на 1%)³.

На практике задачу измерения коэффициента гармоник можно разбить на две:

1) измерение больших КГ (свыше 1% и вплоть до 100%), необходимое для исследования сигналов специальной формы или сильно искаженных гармонических сигналов;

2) измерение весьма малых КГ (от тысячных долей процента), необходимое для контроля и аттестации источников прецизионных гармонических сигналов, высококачественных аудио- и видеосистем и систем связи.

Для решения первой задачи существует достаточно много методов как измерения КГ (в том числе цифровых), так и воспроизведения сигналов с калиброванным КГ. Существенно более сложной (и более востребованной на практике) является вторая задача.

³ В общем случае относительная погрешность такой замены составляет $\sqrt{1 - (K_r^*)^2} - 1$.

Именно в направлении повышения разрешающей способности измерения малых КГ идет совершенствование измерителей КГ общего применения. Для их поверки и выпуска из производства разработана образцовая аппаратура (рабочие эталоны), генерирующая сигнал с калиброванным КГ (в СНГ это установки СК6-10 и К2С-57). Для метрологического обеспечения этих установок потребовалось создание еще одного звена — первичного эталона единицы КГ, а основной задачей, решаемой при его создании, явилось измерение сверхмалых значений КГ. Эта задача и предопределила принцип построения эталона и его схемное решение.

6.1.2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ КГ

Эталон единицы КГ России и Украины [6.1] построен таким образом, что могут, как воспроизводить сигналы с калиброванными значениями КГ (режим поверки измерителей КГ), так и осуществлять точное измерение КГ внешнего сигнала (режим аттестации рабочих эталонов). Таким образом, эталон КГ сочетает в себе свойства, как меры, так и измерительного прибора.

Структурная схема эталона приведена на рис. 6.1. Рассмотрим его работу в режиме аттестации рабочего эталона.

Рабочие эталоны (СК6-10, К2С-57) выдают сигналы следующих видов:

- искаженный гармонический, представляющий собой колебание с частотой Ω и несколькими ее гармониками (6.1):

$$u_{кр}(t) = \sum_{i=1}^n U_{mi} \sin(i\Omega t + \varphi_i);$$

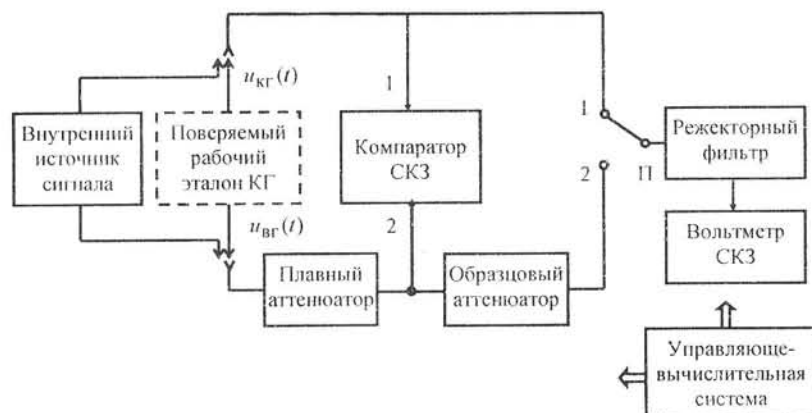


Рис. 6.1. Структурная схема эталона единицы коэффициента гармоник

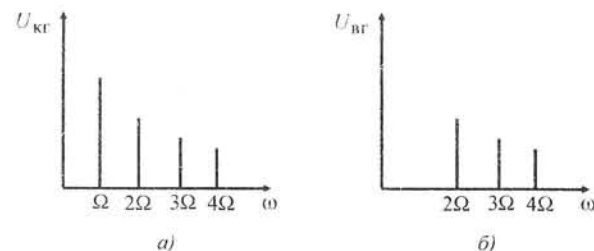


Рис. 6.2. Спектры сигналов $u_{кр}(t)$ и $u_{вр}(t)$

- состоящий из высших гармоник частоты Ω (с подавленной первой гармоникой)

$$u_{вр}(t) = \sum_{i=2}^n U_{mi} \sin(i\Omega t + \varphi_i).$$

Спектры этих сигналов приведены на рис. 6.2, а, б.

Напряжение $u_{кр}(t)$ подается на первый вход компаратора, а на его второй вход поступает через плавный аттенюатор напряжение $u_{вр}(t)$. С помощью плавного аттенюатора по компаратору устанавливается равенство СКЗ этих напряжений:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2} = \sqrt{\sum_{i=2}^n A_i^2}, \quad (6.6)$$

где A_i — СКЗ i -й гармоники после прохождения аттенюатора.

С учетом выражений (6.4) и (6.6) можно записать:

$$A_{вр} = \sqrt{\sum_{i=2}^n A_i^2} = K_r^* \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2}.$$

Далее $u_{кр}(t)$ подается на режекторный фильтр (переключатель П в положении 1), в котором осуществляется подавление первой гармоники. Напряжение N_1 на выходе режекторного фильтра измеряется вольтметром СКЗ:

$$N_1 = \sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}.$$

Затем на вход режекторного фильтра (переключатель П в положении 2) через образцовый аттенюатор подается напряжение

$$\frac{A_{вр}}{K_A} = K_r^* \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \frac{1}{K_A},$$

где $1/K_A$ — коэффициент передачи аттенюатора, устанавливаемый равным номинальному КГ сигнала аттестуемого рабочего эталона.

Напряжение N_2 на выходе режекторного фильтра

$$N_2 = K_r^* \sqrt{\sum_{i=2}^n A_i^2} \frac{1}{K_A}$$

Относительная погрешность рабочего эталона

$$\frac{\Delta K_r^*}{K_r^*} = \frac{N_1 - N_2}{N_2}$$

В режиме поверки измерителя КГ вместо рабочего эталона включают внутренний источник эталона, выдающий аналогичные сигналы: $u_{кр}(t)$ и $u_{вт}(t)$. В соответствии с описанной выше процедурой осуществляют калибровку K_r воспроизводимого сигнала и подают его на поверяемый измеритель. Управление и обработка результатов измерений производится с помощью управляющей вычислительной системы, включающей в себя ПЭВМ, исполнительные и программные средства.

Основными источниками погрешности эталона являются неидеальность обработки сигнала (фильтрации, компарирования) и неидеальность измерительного тракта (неточность аттенюатора, неравномерность АЧХ, шумы). Эталон создается обычно в диапазоне звуковых (до 20 кГц) и видеочастот (до 200 кГц). Созданный в 1992 году в СНГ государственный эталон единицы коэффициента гармоник (рис. 6.3) имеет следующие метрологические характеристики:

Диапазон частот (по первой гармонике сигнала), кГц.....	0,01...200;
Минимальный измеряемый КГ, %.....	0,001;
НСП (θ_0).....	$(2...6) \cdot 10^{-3}$;
СКО (S_0).....	$5 \cdot 10^{-4}$.



Рис. 6.3. Эталон единицы коэффициента гармоник

Отметим, что многие страны имеют эталонные средства для поверки измерителей нелинейных искажений и измерительных генераторов, разница заключается в их статусе: национальный эталон, рабочий эталон или эталон фирмы. В качестве рабочих эталонов в странах СНГ и некоторых зарубежных странах используются упомянутые выше установки СК6-10 и К2С-57, численность которых составляет несколько сотен единиц.

6.2. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТА АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Эталон предназначен для аттестации образцовой аппаратуры (рабочего эталона), воспроизводящей АМ сигнал с калиброванным коэффициентом АМ, и поверки наиболее точных модулометров, являющихся измерителями (приемниками) АМ сигналов.

6.2.1. ПАРАМЕТРЫ АМ СИГНАЛА [6.2]

Амплитудно-модулированный сигнал с гармоническим несущим колебанием можно представить выражением

$$u(t) = E(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где $E(t)$ — мгновенная амплитуда или *огibaющая* АМ сигнала; ω_0 — несущая частота (частота в отсутствии модуляции); φ_0 — начальная фаза.

Огибающая сигнала может быть представлена выражением

$$E(t) = E_0[1 + m(t)],$$

где E_0 — амплитуда высокочастотного немодулированного (несущего) колебания; $m(t)$ — относительное изменение амплитуды при модуляции (*закон изменения амплитуды*).

При гармонической АМ закон изменения амплитуды описывается выражением

$$m_{\Omega}(t) = m \cdot \sin \Omega t,$$

где $\Omega = 2\pi F$ — круговая частота модулирующего напряжения (F — циклическая частота); m — коэффициент АМ⁴.

Изображения модулирующего $m_{\Omega}(t)$ и АМ сигнала $u(t)$ приведены на рис. 6.4.

Среднее значение амплитуды за период модуляции $T = 1/F$

$$E = \frac{1}{T} \int_0^T E(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T E_0 [1 + m(t)] dt = E_0 + m_0 E_0,$$

⁴ Для неискаженной модуляции $m \leq 1$.

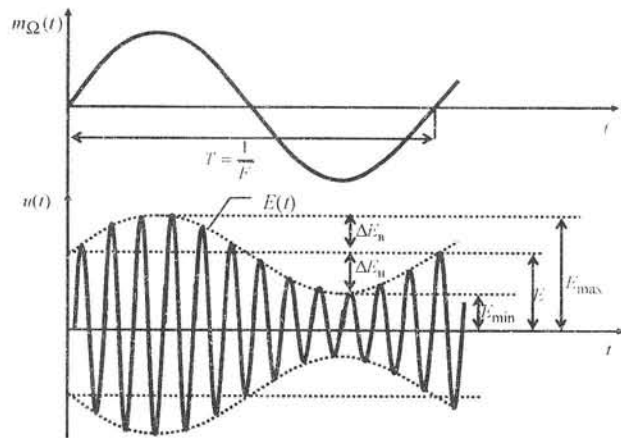


Рис. 6.4. AM сигнал $u(t)$ и его огибающая $E(t)$

$$\text{где } m_0 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} m(t) dt^5.$$

Коэффициенты АМ в сторону увеличения и уменьшения амплитуды (соответственно для положительной и отрицательной полуволн огибающей АМ сигнала) принято называть коэффициентами амплитудной модуляции “вверх” m_n и “вниз” $m_{\text{н}}$, (см. рис. 6.4):

$$m_n = \frac{\Delta E_n}{E} = \frac{E_{\text{max}} - E}{E}; \quad m_{\text{н}} = \frac{\Delta E_{\text{н}}}{E} = \frac{E - E_{\text{min}}}{E}.$$

В ряде случаев, например, при передаче цифровой информации, используется среднее значение коэффициента АМ

$$m_c = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}}.$$

При симметричной модуляции, когда модуляционная характеристика линейна, все перечисленные значения коэффициента АМ совпадают: $m_n = m_{\text{н}} = m_c = m$.

При сложном законе АМ обычно используется среднеквадратическое значение коэффициента АМ

$$m_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} m^2(t) dt}.$$

В случае нелинейных искажений модулирующей функции⁶ (огибающей) АМ сигнала выражение для АМ сигнала имеет вид:

$$u(t) = E_0 \left[1 + \sum_{i=1}^N m_i \sin(i\Omega t + \varphi_i) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где m_i – парциальные коэффициенты АМ с частотами $i\Omega$.

$$\text{Тогда } K_{r2} = \frac{m_2}{m_1}; \quad K_{r3} = \frac{m_3}{m_1}; \quad \dots \quad K_{rN} = \frac{m_N}{m_1}.$$

где K_{ri} – парциальные коэффициенты гармоник по i -й гармонике. Суммарный КГ

$$K_r = \sqrt{K_{r2}^2 + K_{r3}^2 + \dots + K_{rN}^2} = \sqrt{\sum_{i=2}^N K_{ri}^2} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N m_i^2}}{m_1}.$$

Помимо полезной (вынужденной) АМ реальный сигнал всегда сопровождается паразитной АМ флуктуационного (шумового) характера, называемой также амплитудным шумом. Он нормируется в форме среднеквадратического коэффициента паразитной АМ $m_{\text{ш}}$:

$$m_{\text{ш}} = m_{\text{ск}} = \frac{\sqrt{\int_{F_{\text{min}}}^{F_{\text{max}}} S_u(F) dF}}{U_{\text{ск}}} \cdot 100 \%,$$

где $S_u(F)$ – спектральная плотность мощности флуктуаций амплитуды, В²/Гц; F_{min} и F_{max} – граничные значения полосы частот; $U_{\text{ск}}$ – СКЗ напряжения флуктуации амплитуды.

Коэффициент $m_{\text{ш}}$ всегда является абсолютной погрешностью измерения (воспроизведения) полезного коэффициента АМ.

6.2.2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТА АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Анализ, приведенный в [6.2] позволяет сформулировать следующие принципы построения эталона коэффициента АМ (КАМ):

а) оптимальным является построение эталона в виде меры единицы коэффициента АМ, т.е. источника измерительного сигнала с гармонической АМ и с калиброванным КАМ;

б) диапазоны несущих (f) и модулирующих (F) частот АМ сигналов эталона должны соответствовать частотам поверяемой аппаратуры, однако воспроизведение сигнала вполне достаточно проводить в дискретных значениях f , F и m ;

⁶ Нелинейные искажения АМ сигнала являются одной из доминирующих погрешностей эталона.

⁵ Для гармонической АМ $E = E_0$, $m_0 = 0$.

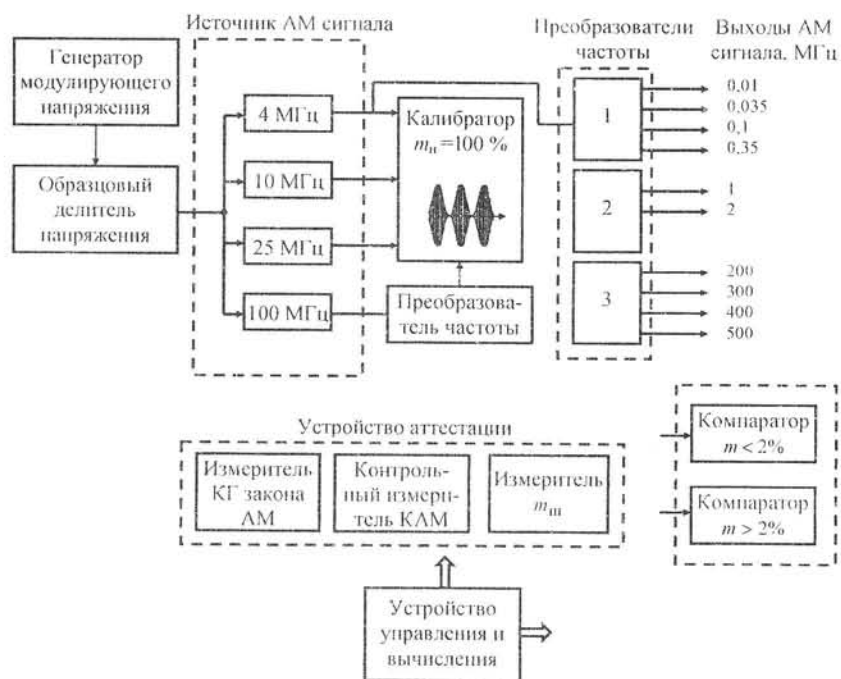


Рис. 6.5. Структурная схема ГПЭ единицы коэффициента АМ

в) поскольку такие параметры АМ сигнала, как K_T и $m_{ш}$ являются источниками погрешности воспроизведения КАМ, в состав аппаратуры должны входить средства аттестации АМ сигнала по этим параметрам.

В СССР ГПЭ единицы КАМ был впервые создан в 70-е годы прошлого века, который затем был модернизирован в 90-е годы и в настоящее время действует как эталон СНГ [6.3].

В основу воспроизведения единицы коэффициента АМ положен метод, заключающийся в формировании АМ сигнала с огибающей, близкой к синусоидальной, установлении с высокой точностью коэффициента АМ $m_n = 100\%$ и точном делении модулирующего напряжения для получения калиброванных значений m в диапазоне $0,1 \dots 100\%$. Структурная схема эталона приведена на рис. 6.5.

Амплитудно-модулированный сигнал формируется модуляторами с квазилинейными модуляционными характеристиками ($m = kU_L$), как правило, на нескольких фиксированных несущих частотах.

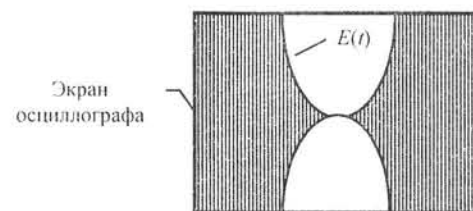


Рис. 6.6. Осциллограмма АМ сигнала при $m_n = 100\%$

Для расширения диапазона несущих частот служат преобразователи частоты, с помощью которых осуществляется воспроизведение АМ сигнала во всем диапазоне работы модулометров общего применения ($0,01 \dots 500$ МГц).

Калибровка коэффициента АМ $m_n = 100\%$ осуществляется по характерной осциллограмме (рис. 6.6) при максимальной чувствительности вертикального усилителя осциллографа, входящего в состав калибратора.

Передача размера единицы коэффициента АМ рабочим эталонам (являющимися источниками АМ сигналов) происходит с помощью компаратора, на который поочередно поступают сигналы от государственного и рабочего эталонов. В диапазоне коэффициентов АМ $2 \dots 100\%$ функции компаратора выполняет серийный модулометр С2-32, в диапазоне коэффициента АМ $0,1 \dots 2\%$ — специальный измерительный АМ приемник с малым уровнем амплитудного шума. При поверке модулометров (приемников сигнала) эталонный сигнал подается непосредственно на их вход, минуя компаратор.

В состав средств аттестации эталона входят дополнительный измеритель коэффициента АМ, в котором реализуется контрольный независимый метод измерения среднего значения коэффициента АМ, а также устройства для аттестации АМ сигналов эталона по КГ и амплитудным шумам. Управление работой эталона и обработка результатов осуществляется с помощью управляюще-вычислительного устройства.

Источниками погрешности воспроизведения КАМ являются:

- нелинейные искажения огибающей АМ сигнала;
- паразитная АМ шумового характера;
- неточность установки $m_n = 100\%$;
- неточность образцового делителя модулирующего напряжения;
- искажения АМ сигнала в преобразователях частоты.

При использовании компаратора добавляется также погрешность последнего, которая носит, в основном, случайный характер.

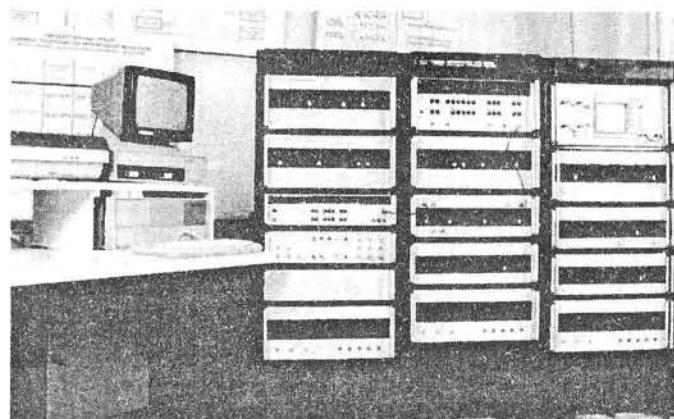


Рис. 6.7. Эталон единицы коэффициента АМ

Практика разработки и эксплуатации эталона в СНГ показывает, что доминирующими являются погрешности, связанные с качеством эталонного АМ сигнала (наличием K_r и $m_{ш}$), поэтому основным направлением метрологических исследований при его создании является формирование эталонных АМ сигналов и разработка методов их аттестации по K_r и $m_{ш}$ и паразитной угловой модуляции с высокой разрешающей способностью.

Государственный эталон СНГ (рис. 6.7) имеет следующие метрологические характеристики:

диапазон несущих частот.....	0,01...500 МГц;
диапазон модулирующих частот.....	0,02...200 кГц;
пределы воспроизводимых значений КАМ....	0,1... 100 %;
НСП (θ_0).....	$(1...2) \cdot 10^{-3}$;
СКО (S_0).....	$3 \cdot 10^{-4}$.

Эти характеристики соответствуют лучшим мировым образцам аналогичных устройств⁷.

В качестве вторичных и рабочих эталонов используются образцовые установки, представляющие собой, как и ГПЭ, источники АМ сигналов с внутренней калибровкой их коэффициента АМ. В СНГ это установки типа К2-34, которыми оснащены также ряд стран дальнего зарубежья, а также К2-54, выпущенная в нескольких экземплярах.

⁷ За рубежом отсутствуют национальные эталоны коэффициента АМ, но имеются эталоны транснациональных фирм Marconi (Англия), Hewlett-Packard (США), Rohde & Schwartz (Германия).

6.3. ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Эталон предназначен для аттестации рабочих эталонов и проверки наиболее точных рабочих девиомеров. Представляет собой комплекс средств измерений, способный воспроизводить, хранить и передавать калиброванные значения девиации частоты ЧМ колебаний в необходимом диапазоне несущих и модулирующих частот.

6.3.1. ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛА С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ [6.4]

Сигнал с угловой модуляцией (УМ) в общем случае имеет вид

$$u(t) = E \cos \left[\int_0^t \omega(\tau) d\tau \right] = E \cos \left[\omega_0 t + \int_0^t \Delta\omega(\tau) d\tau \right],$$

где E – амплитуда, принимаемая постоянной; ω_0 – несущая частота (частота в отсутствии модуляции); $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t)$ – *мгновенная частота*; $\Delta\omega(t)$ и $\int_0^t \Delta\omega(\tau) d\tau$ – законы изменения частоты и фазы соответственно; $\tau \in [t, t+T]$.

При периодической УМ средняя частота за период модулирующего сигнала T (рис. 6.8)

$$\omega = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \omega(\tau) d\tau = \omega_0 + \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \Delta\omega(\tau) dt,$$

где $\Delta\omega(\tau)$ – периодическая функция, которая может содержать или не содержать постоянную составляющую (при гармонической УМ постоянная составляющая $\Delta\omega(\tau)$ отсутствует).

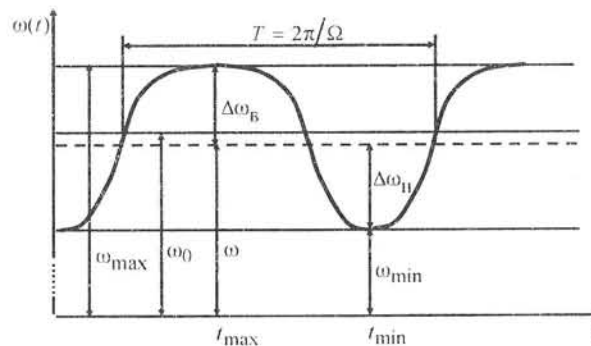


Рис. 6.8. Закон изменения частоты сигнала в функции времени

Среднеквадратическое значение девиации частоты за период T

$$\Delta\omega_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T} \Delta\omega^2(\tau) d\tau}.$$

Экстремальные значения угловой частоты сигнала:

$$\omega_{\text{max}} = \omega + \Delta\omega_{\text{в}}; \quad \omega_{\text{min}} = \omega - \Delta\omega_{\text{н}},$$

где $\Delta\omega_{\text{в}}$ и $\Delta\omega_{\text{н}}$ – угловые девиации частоты (ДЧ) “вверх” и “вниз” соответственно.

Если значениям ω_{max} и ω_{min} соответствуют моменты времени t_{max} и t_{min} (рис. 6.8), то величины $\int_0^{t+T} \Delta\omega(t_{\text{max}}) dt$ и $\int_0^{t+T} \Delta\omega(t_{\text{min}}) dt$ представляют девиации фазы “вверх” и “вниз”.

В случае гармонической УМ мгновенная частота сигнала $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t$ и

$$u(t) = E \cos \left[\omega_0 t + \int_0^t \Delta\omega \cos \Omega \tau d\tau \right] = E \cos \left[\omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t \right],$$

где $\Delta\omega$ – **девиация частоты** (ДЧ); Ω – частота модулирующего гармонического колебания; $\Delta\omega/\Omega = \Delta f/F = \beta$ – **индекс модуляции**, который равен **девиации фазы** $\Delta\phi$.

Как и при АМ, в случае квазигармонической УМ с искаженным законом модуляции оперируют понятиями парциальных девиаций частоты $\Delta\omega_i$ (девиаций фазы $\Delta\phi_i$), а для оценки нелинейных искажений модулирующей функции используют коэффициент гармоник⁸. Так, для сигнала с искаженной УМ

$$u(t) = E \cos \left[\omega_0 t + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Delta\omega_i}{i\Omega} \sin(i\Omega t + \phi_i) \right]$$

выражения для частоты, девиаций частоты и девиаций фазы имеют вид:

$$\omega(t) = \omega_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \Delta\omega_i \cos(i\Omega t + \phi_i);$$

$$\Delta\omega_{\text{в}}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Delta\omega_i \cos(i\Omega t_{\text{max}} + \phi_i);$$

$$\Delta\omega_{\text{н}}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Delta\omega_i \cos(i\Omega t_{\text{min}} + \phi_i);$$

⁸ Как и при АМ, нелинейные искажения модулирующей функции ЧМ (ФМ) сигнала являются источниками одной из доминирующих погрешностей эталона.

$$\Delta\phi_{\text{в}} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Delta\omega_i}{i\Omega} \sin(i\Omega t_{\text{max}} + \phi_i);$$

$$\Delta\phi_{\text{н}} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Delta\omega_i}{i\Omega} \sin(i\Omega t_{\text{min}} + \phi_i).$$

Коэффициент гармоник

$$K = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} \Delta\omega_i^2}}{\Delta\omega_1} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} K_i^2},$$

где $K_i = \frac{\Delta\omega_i}{\Delta\omega_1}$ – парциальные коэффициенты i -й гармоники.

Помимо полезной УМ реальный сигнал всегда сопровождается паразитной УМ флуктуационного (шумового) характера, которая может нормироваться в форме паразитной девиации частоты (частотный шум) в полосе частот от F_{min} до F_{max} :

$$\Delta f_{\text{ш}} = \sqrt{\int_{F_{\text{min}}}^{F_{\text{max}}} S_f(F) dF}, \text{ Гц}$$

или паразитной девиации фазы (фазовый шум)

$$\Delta\phi_{\text{ш}} = \sqrt{\int_{F_{\text{min}}}^{F_{\text{max}}} S_{\phi}(F) dF}, \text{ рад},$$

где S_f и S_{ϕ} – спектральные плотности мощности флуктуаций частоты (Гц²/Гц) и фазы (рад²/Гц) соответственно.

Угловой шум является абсолютной погрешностью воспроизведения полезной девиации частоты или девиации фазы. Поскольку на практике из двух разновидностей УМ чаще применяется частотная, чем фазовая, то целесообразно создавать эталон основного параметра частотной модуляции – девиации частоты⁹.

6.3.2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ

В основу эталона единицы девиации частоты положены следующие принципы [6.2]:

- как и в случае АМ, эталон целесообразно строить в виде меры девиации частоты, т.е. источника сигнала с гармонической ЧМ и калиброванной девиацией частоты;

⁹ Принципиально отсутствие эталона девиации фазы ничего не меняет, так как с помощью эталона девиации частоты можно осуществлять проверку (аттестацию) и измерителей ФМ.



Рис. 6.9. Структурная схема эталона единицы девиации частоты ЧМ сигнала

- диапазон девиации частоты и модулирующей частоты должны соответствовать этим параметрам поверяемой аппаратуры, несущая частота может быть любой;
- в состав эталона должны входить средства аттестации эталонного ЧМ сигнала по паразитным параметрам (K_r , сопутствующая АМ, $\Delta f_{ш}$), поскольку они являются основными источниками погрешности.

Структурная схема эталона единицы девиации частоты, созданного в СНГ, приведена на рис. 6.9.

Источник ЧМ сигнала генерирует сигнал вида

$$u(t) = U_m \cos \left(\omega_0 t + \frac{\Delta f}{F} \sin 2\pi F t \right).$$

и обеспечивает получение девиаций частоты Δf от 1 Гц до 1 МГц в полосе модулирующих частот F от 0,02 до 200 кГц (диапазоны Δf и F , в которых работают измерители ЧМ общего применения). Для получения такого сигнала и обеспечения малых значений паразитных параметров потребовалось создание трех генераторов на частотах 8, 50 и 200 МГц.

Девиация частоты ЧМ сигналов калибруется с помощью эталонных измерителей, в которых реализованы три наиболее точных метода:

1) цифровой (счетный), основанный на подсчете числа периодов исследуемого сигнала (обработанного специальным образом) в течение образцового интервала времени;

2) спектральный, основанный на свойствах спектра ЧМ сигнала (“метод нулей функции Бесселя”);

3) метод мгновенной частоты, заключающийся в измерении максимальной и минимальной мгновенных частот ЧМ сигнала.

Применение трех методов в эталоне понадобилось потому, что каждый из них обеспечивает высокую точность лишь в ограниченном диапазоне девиаций частоты и модулирующих частот [6.2, 6.4].

В состав средств для аттестации входят измерители КГ закона ЧМ, сопутствующей АМ и паразитной девиации частоты, построение которых представляет собой самостоятельную задачу [6.4].

Передача размера единицы девиации частоты от эталона к рабочему эталону (источнику образцового сигнала) осуществляется с помощью компаратора. Последний представляет собой супергетеродинный измерительный приемник с частотным детектором (ЧД) и измеритель относительной разности напряжений на выходе ЧД, пропорциональной разности девиаций частоты сличаемых ЧМ сигналов. Передача размера единицы девиации частоты происходит непосредственной подачей на него эталонного сигнала.

Управление всеми измерительными операциями и обработка результатов измерений осуществляются с помощью управляюще-вычислительного устройства на базе ПЭВМ. Метрологические характеристики эталона определяются как параметрами ЧМ сигнала, так и эталонными измерителями девиации частоты. Основными методами измерения являются цифровой (счетный) и спектральный “метод нулей Бесселя”, поэтому рассмотрим их подробнее. Упрощенная структурная схема, по которой реализуется счетный метод, приведена на рис. 6.10 [6.4].

Частотно-модулированный сигнал с гармонической модуляцией смешивается с сигналом гетеродина, на выходе смесителя выделяется сигнал разностной частоты

$$u(t) = U_m \cos [(\omega - \omega_r) t + \Delta\omega \cos \Omega t],$$

причем выполняется условие $\omega - \omega_r = \omega_{нч} \ll \Delta\omega$.

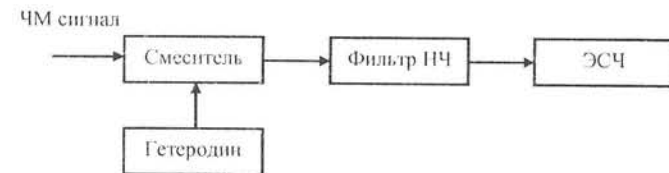


Рис. 6.10. Структурная схема реализации счетного метода

Этот сигнал подается на стандартный электронно-счетный частотомер (ЭСЧ). Накопление фазы ЧМ сигнала за период $T = 2\pi/\Omega$

$$\psi = \int_0^T (\omega_{\text{пч}} + \Delta\omega \cos \Omega t) dt,$$

а количество прохождений фазы через 2π (которые считает ЭСЧ)

$$N_{\Omega} = \frac{\psi}{2\pi} = \text{ent} \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^T (\omega_{\text{пч}} + \Delta\omega \cos \Omega t) dt \right],$$

где ent – символ целочисленного значения.

Решение этого интеграла приводит к выражению [6.4]:

$$N_{\Omega} = \text{ent} \left\{ \frac{\Delta\omega}{\Omega\pi} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{\text{пч}}}{\Delta\omega} \right)^2} - \frac{\omega_{\text{пч}}}{\Delta\omega} \right] \right\} + \\ + \text{ent} \left\{ \frac{\Delta\omega}{\Omega\pi} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{\text{пч}}}{\Delta\omega} \right)^2} + \frac{\omega_{\text{пч}}}{\Delta\omega} \left(\pi - \arccos \frac{\omega_{\text{пч}}}{\Delta\omega} \right) \right] \right\}.$$

Если $\frac{\Delta\omega}{\Omega\pi}$ – большое число (т.е. при больших индексах модуляции), $N_{\Omega} = 2 \frac{\Delta\omega}{\Omega\pi} = 2 \frac{\Delta f}{F\pi}$.

Показания ЭСЧ за 1 с (время счета стандартного ЭСЧ) N можно получить, умножив N_{Ω} на F :

$$N = 2 \frac{\Delta f}{F\pi} F = 2 \frac{\Delta f}{\pi}, \quad (6.7)$$

т.е. ЭСЧ считает величину, пропорциональную девиации частоты.

Как показано в [6.4], при $\omega_{\text{пч}} \ll \Delta\omega$ и $\omega_{\text{пч}} \neq 0$ это равенство справедливо и при малых индексах модуляции, т.е. когда $\frac{\Delta\omega}{\Omega\pi}$ – любое число.

Второй метод основан на свойствах спектрального разложения ЧМ сигнала с гармонической модуляцией, которое, как известно, имеет вид (рис. 6.11):

$$u(\omega) = U_m \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} J_{\lambda}(\beta) \sin(\omega + \lambda\Omega)t,$$

где $J_{\lambda}(\beta)$ – функция Бесселя первого рода λ -го порядка.

Амплитуда λ -й спектральной составляющей

$$U_{\lambda} = U_m J_{\lambda}(\beta).$$

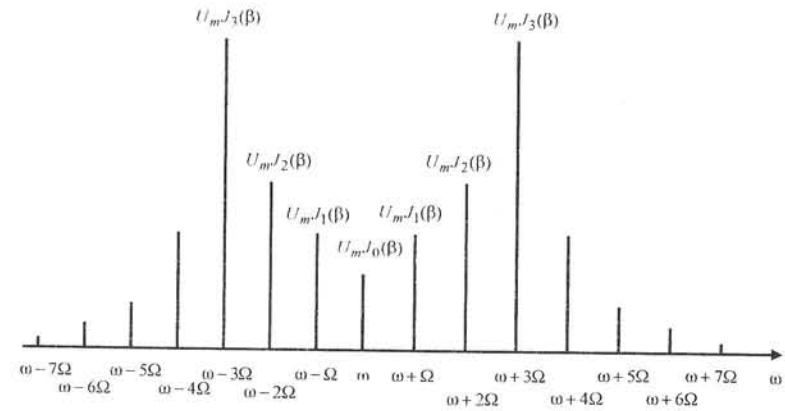


Рис. 6.11. Спектральное разложение ЧМ сигнала (амплитудный спектр)

Бесселева функция является квазипериодической затухающей функцией (рис. 6.12), корни которой (пересечение с осью β) табулированы с высокой точностью. Таким образом, регистрируя равенство

$$U_m J_{\lambda}(\beta) = 0,$$

можно устанавливать $\beta = \beta_{0n}$, где β_{0n} – n -й “нуль” λ -й спектральной составляющей.

Поскольку n и λ известны, β_{0n} находится по таблицам, а исконая девиация определяется по формуле $\Delta f = \beta_{0n} F$ (модулирующая частота F может быть измерена достаточно точно).

Практически метод реализуется путем регистрации с помощью спектрального индикатора (например, стандартного анализатора спектра) обращения в нуль той или иной составляющей спектра ЧМ сигнала (см. рис. 6.11). Обычно для измерения используется составляющая с несущей частотой ($\lambda = 0$), т.е. индицируется равенство

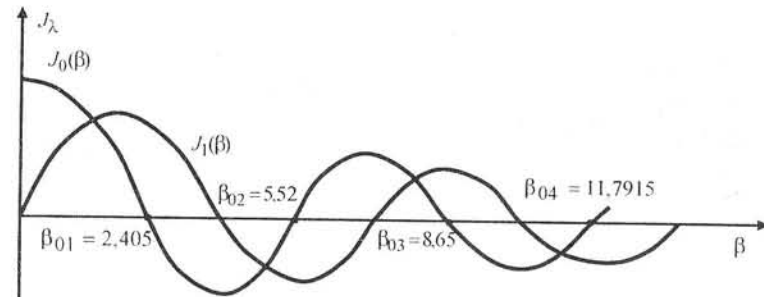


Рис. 6.12. Бесселевы функции $J_0(\beta)$, $J_1(\beta)$

$$U_m J_0(\beta) = 0,$$

которое имеет место при $\beta_{0m} = 2,4048; 5,5201; 8,6537; 11,7915; 14,9309; 18,0711$ и т.д.

Счетный метод обеспечивает наивысшую точность в области средних и больших индексов модуляции β , метод “нулей функции Бесселя” – в области малых β . Метод мгновенной частоты играет роль контрольного [6.4]. Наличие нескольких независимых методов позволяет проводить их взаимное сличение, т.е. контролировать отсутствие неучтенных источников систематической погрешности.

Основными составляющими погрешности эталона являются:

- погрешности вследствие неидеальности эталонного ЧМ сигнала (наличие КГ закона ЧМ, сопутствующей АМ, паразитной ЧМ);
- погрешности эталонных измерителей ДЧ;
- погрешности компарирования.

Приведем основные метрологические характеристики эталона СНГ:

Диапазон несущих частот (в который передается эталонное значение девиации частоты), МГц.....	0,1...10 000;
Диапазон модулирующих частот, кГц.....	0,02...200;
Пределы воспроизводимой девиации частоты, Гц ¹⁰	1...10 ⁶ ;
НСП (θ_0).....	(0,5...2)·10 ⁻³ ;
СКО (S_0).....	(3...5)·10 ⁻⁴ .

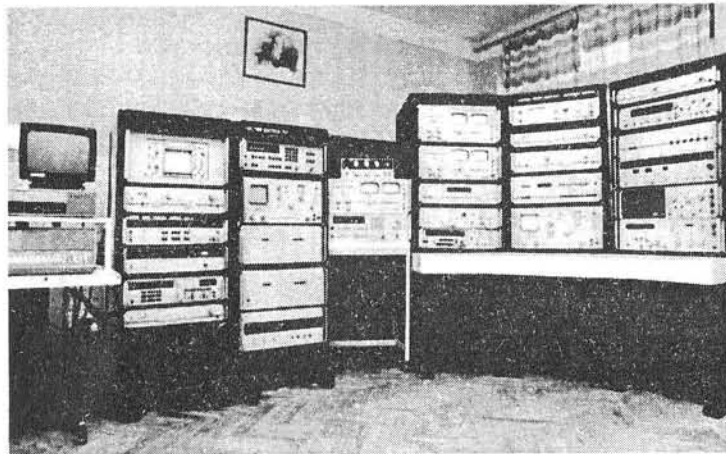


Рис. 6.13. Эталон единицы девиации частоты ЧМ колебаний

¹⁰ В совокупности с установкой К2-44 эталон способен перекрыть диапазон девиации частоты до 10 МГц.

Сравнительный анализ показывает, что эти характеристики находятся на уровне лучших мировых аналогов.

Внешний вид эталона СНГ приведен на рис. 6.13.

В качестве рабочих эталонов единицы девиации частоты в СНГ применяют образцовые установки К2-38, К2-44, К2-54, представляющие собой источники ЧМ сигналов с калиброванными девиациями частоты и малыми значениями паразитных параметров. Особо следует отметить разработанный в 2002 году в России новый рабочий эталон [6.5], по метрологическим характеристикам близкий к описанному выше эталону СНГ, а по функциональным, сервисным и эксплуатационным характеристикам значительно превышающий его.

6.4. О МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ОСЦИЛЛОГРАФОВ, АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА И ДРУГИХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ

Выше говорилось об особенностях этих приборов, у которых нормируются несколько десятков внутренних параметров и характеристик, по которым, в зависимости от решаемой измерительной задачи, можно рассчитать погрешность измерения той или иной величины. Анализ показывает, что все нормируемые параметры этих приборов можно разделить на следующие группы: частотные, амплитудные, параметры искажений, параметры входа-выхода.

Традиционным методом поверки данных приборов является поэлементная поверка с помощью серийных радиоизмерительных приборов (метод прямого измерения), которая позволяет определить большинство параметров. Однако остается ряд параметров, определение которых таким способом не обеспечивает необходимой точности и достоверности. Для анализаторов спектра это параметры искажений (динамический диапазон, уровень интермодуляционных, комбинационных, гармонических помех и др.), амплитудные параметры (погрешность измерения уровней и отношения уровней спектральных составляющих, АЧХ и др.) для осциллографов – переходная характеристика, АЧХ, ФЧХ и некоторые другие.

Это же относится и к некоторым специализированным приборам для измерения параметров сигналов, применяемых, например, в технике связи.

Одной из трудностей, с которой обычно сталкивается метролог при разработке методики поверки такого прибора, является нормирование того или иного свойства прибора в форме, необычной для РИП общего применения. Так, в АС нелинейности различных узлов и трактов, из-за разной природы их возникновения и проявления, нормируются в виде динамического диапазона, уровня интермодуляционных, комбинационных, гармонических и т.д. помех [6.6].

В некоторых связанных приборах нелинейности измеряются в виде дифференциальной крутизны и фазы, шумов нелинейных переходов, переходного шума и др.

Задача метролога в этом случае заключается в корректном преобразовании нормируемого “экзотического” параметра в параметр, общепринятый в радиоизмерениях, в частности, параметра нелинейности – в коэффициент гармоник. Иногда для этого требуется специальный анализ, разработка метода и аппаратуры. Если же эта задача успешно решена – остается лишь корректно применить тот или иной прибор, “опирающийся”, в свою очередь, на соответствующий эталон общепринятой ФВ. Так реализуется прослеживаемость, т.е. привязка измеряемой величины к тому или иному эталону. Алгоритм решения этой поверочной задачи можно представить в виде схемы на рис. 6.14 [6.7].

Таким образом, решение задачи метрологического обеспечения таких многофункциональных и многопараметрических приборов сводится к привязке всех их нормируемых параметров к существующим эталонам единиц ФВ без создания каких либо специализированных эталонов (спектра и т.п.)

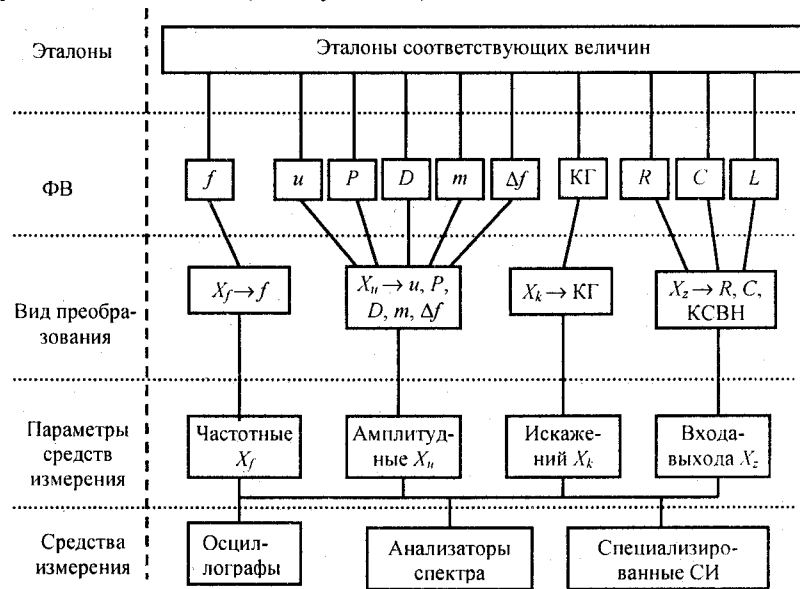


Рис. 6.14. Алгоритм передачи размера единиц многофункциональным средствам измерения:

f – частота; u – напряжение; P – мощность; D – затухание; m – коэффициент АМ; Δf – девиация частоты; КГ – коэффициент гармоник; R – электрическое сопротивление; C – электрическая емкость; L – индуктивность; КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению

6.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из табл. 6.1, в основе эталонов параметров формы и спектра лежит метод формирования аналогового эталонного сигнала (эталонны коэффициента АМ и ДЧ) или сочетание методов эталонного сигнала и эталонного измерителя (эталон КГ).

Таблица 6.1. Характеристики эталонов КГ, КАМ и ДЧ

Физическая величина, единица	Теоретическая база	Принцип построения	Метод воспроизведения единицы	Основная аппаратура	Погрешности	
					НСП, %	СКО
Коэффициент гармоник (КГ), %	Гармонический анализ и синтез	Сочетание свойств эталонного измерителя и меры КГ	Компенсационно-фильтровой	Эталонный измеритель КГ	$5 \cdot 10^{-3} K_1 + 0,001$	$5 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент амплитудной модуляции (КАМ), %	Гармонический анализ и синтез	Формирование эталонного сигнала (меры КАМ)	Установление КАМ $m_n = 100\%$ по его характерной осциллограмме	Эталонный источник АМ сигнала, осциллографический калибратор КАМ	$(0,5 \dots 2) \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Девиация частоты сигналов с угловой модуляцией, Гц	Гармонический анализ и синтез. Спектральный анализ	Формирование эталонного сигнала (меры ДЧ)	Методы “нулей функции Бесселя” и счетный	Эталонный источник ЧМ сигнала, спектральный и цифровой калибраторы ДЧ	$(0,5 \dots 1) \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$

Альтернативой этому методу является давно обсуждаемый в литературе метод аналого-цифровой обработки сигналов. Сравним эти два метода более подробно применительно к модулированным колебаниям и немодулированному искаженному колебанию.

1. Эталонны параметров АМ и ЧМ колебаний.

При изложенной концепции построения этих эталонов как источников прецизионных сигналов основными источниками погрешности являются паразитные параметры сигнала: сопутствующая АМ при ЧМ (для ЧМ сигнала) и сопутствующая УМ при АМ (для АМ сигнала), нелинейные искажения закона АМ или ЧМ, паразитная модуляция шумового характера, сопровождающая полезную (частотный, фазовый или амплитудный шум). Для уменьшения этих составляющих определенные перспективы представляет дальнейшее схемотехническое совершенствование аппаратуры, позволяющее минимизировать эти параметры. Такой путь прекрасно реализован в рабочем эталоне единицы девиации частоты, создан-

ном в 2002 году [6.5] что позволило, по существу, превзойти даже характеристики государственного эталона.

Другой путь заключается в цифровой обработке модулированного АМ или ЧМ сигнала и извлечении из полученного массива мгновенных значений сигнала необходимой информации о его параметрах с использованием современных вычислительных технологий [6.8]. Этот путь представляется весьма привлекательным с точки зрения автоматизации, эксплуатационных и функциональных возможностей, однако пока неизвестны отечественные или зарубежные работы, которые бы практически реализовали этот подход в необходимом диапазоне несущих и модулирующих частот.

2. Эталоны коэффициента гармоник.

Аналогичные выводы можно сделать о перспективах измерения нелинейных искажений и создании соответствующего эталона. Действительно, при всех впечатляющих успехах цифровой измерительной техники создать цифровой измеритель весьма малых коэффициентов гармоник (а именно это наиболее важно в данном виде) пока не удается. В то же время метод цифровой обработки [6.8] дает прекрасные результаты при КГ больше 1 %, а также в области инфранизких частот [6.9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗД. 6

- 6.1. **Беликов В.А., Климашевский В.С., Дейч З.Ш.** Государственный эталон единицы коэффициента гармоник // Труды I Украинской научно-технической конференции "Метрология в радиоэлектронике". – Харьков. – 1994. – С. 98–99.
- 6.2. **Болмусов Ю.Д., Павленко Ю.Ф., Соколовский Н.П.** Метрологическое обеспечение измерителей модуляции. – М.: Военное издательство, 1992. – 192 с.
- 6.3. **Беликов В.А. и др.** Новый государственный первичный эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции ВЧ колебаний // Измерительная техника. – 1985. – № 11. – С. 4–5.
- 6.4. **Павленко Ю.Ф., Шпаньон П.А.** Измерение параметров частотно-модулированных колебаний. – М.: Радио и связь, 1986. – 208 с.
- 6.5. **Болмусов Ю.Ф., Мартынов В.А., Скворцова Е.Л. и др.** Рабочий эталон единицы девиации частоты ЧМ колебаний // Законодательная и прикладная метрология. – 2002. – № 3. – С. 22–25.
- 6.6. **Павленко Ю.Ф., Славинский С.И.** Вопросы метрологического обеспечения анализаторов спектра // Украинский метрологический журнал. – 1999. – Вып. 3. – С. 35–42.
- 6.7. **Павленко Ю.Ф., Славинский С.И.** Вопросы метрологического обеспечения анализаторов спектра (окончание) // Украинский метрологический журнал. – 1999. – Вып. 4. – С. 23–26.
- 6.8. **Горлач А.А., Минц М.Я., Чинков В.Н.** Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. – К.: Техніка, 1985б – 152 с.
- 6.9. **Смеляков В.В.** Цифровая измерительная аппаратура инфранизких частот. – М.: Энергия, 1975. – 168 с.

ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К РАЗД. 6

1. **ГОСТ 8.110-97.** Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента гармоник. – 9 с.
2. **ГОСТ 8.109-97.** Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний. – 9 с.
3. **ГОСТ 8.232-97.** Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений девиации частоты. – 9 с.
4. **ГОСТ 8.311-78.** Государственная система обеспечения единства измерений. Осциллографы электронно-лучевые универсальные. Методы и средства проверки. – 21 с.
5. **МИ 1201-86.** Анализаторы спектра последовательного действия. Методика проверки. – 1985. – 31 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключениях по отдельным главам авторы старались рассмотреть научно-технические аспекты совершенствования эталонов в области электрорадиоизмерений. В заключении по книге в целом хотелось бы рассмотреть некоторые организационные аспекты развития эталонной базы и, в частности, вопросы международного сотрудничества в этой области на современном этапе развития мирового сообщества.

Отметим, что уже к середине XIX века резкий подъем мировой торговли и дальнейшее развитие науки и техники привели к осознанию необходимости международного соглашения в метрологии. Результатом этого явилось подписание в 1875 году Метрической конвенции, ставшей первым официальным международным соглашением, направленным на обеспечение единства измерений и эталонов.

Длительное время сотрудничество в рамках Метрической конвенции заключалось, в основном, в разработке международной системы единиц и сличении эталонов. Передача размеров единиц, вопросы прикладной и законодательной метрологии оставались в компетенции национального законодательства.

Эта ситуация в основе изменилась благодаря развивающейся индустриализации и связанному с ней мировому товарообороту. Глобализация национальных экономических систем и международное разделение труда сильно повлияли и на развитие метрологии.

Измерения и испытания тесно связаны с качеством продукции и, таким образом, с экономикой и торговлей. Сегодня измерения во все возрастающей степени создают предпосылки для свободного продвижения товаров и услуг. В связи с этим возникла необходимость в создании абсолютно прозрачных систем взаимного признания, в частности, взаимного признания национальных эталонов и сертификатов о калибровке, выданных национальными метрологическими институтами.

Если создание Метрической конвенции осуществлялось сверху, т.е. благодаря межправительственным переговорам, то необходимость в различных договоренностях в области калибровки и испытаний, способствующих развитию системы взаимного признания, возникла в самой экономике [3.1, 3.2]. Впервые соглашение о взаимном признании сертификатов в области калибровки было заключено между британской и немецкой калибровочными службами. С этого соглашения началось все более активное движение в этой области, которое привело к разработке документа “Соглаше-

ние о многостороннем признании национальных эталонов и представленных национальными метрологическими институтами сертификатов о калибровке” (MRA). В октябре 1999 года во время XXI Генеральной конференции по мерам и весам 38 стран (в том числе Россия) и две международные организации подписали соглашение о первой фазе, причем двери к его подписанию остались открытыми и для других стран. На конец 2003 года число участников этого соглашения составило 59, включая Украину и Белоруссию.

Одним из краеугольных камней этого соглашения являются так называемые “ключевые сличения”, для проведения которых созданы особые правила и определения [3.3]. Введены также дополнительные сличения, которые проводятся исключительно на региональном уровне.

Можно сказать, что глобализация экономики и торговли привели к аналогичному явлению и в метрологии и, в частности, в создании и функционировании эталонов. Вопросы хранения эталонов из национальной проблемы превратились в глобальную. Происходит некоторое смещение центра тяжести эталонных работ с количественной в качественную сторону, в сторону участия в международных сличениях, что требует тщательной подготовки, отработки методик и аппаратуры эталонов, глубокой экспериментальной проверки всех метрологических характеристик эталонов, гармонизации понятий и процедур в данной области. Россия – активный участник этого процесса, многие ее эталоны прошли процедуры международных сличений и признаны в мире. Включились в этот процесс также Украина и Белоруссия. Поэтому представляется, что активное участие стран СНГ в Евро-Азиатском сотрудничестве государственных метрологических учреждений (COOMET), упомянутом Соглашении о признании (MRA), в частности составление СМС таблиц (данные о калибровочных и измерительных возможностях национальных метрологических институтов), а также практическая реализация сличений своих эталонов, как на региональном, так и ключевом уровнях – важное направление развития их эталонных баз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ЗАКЛЮЧЕНИЮ

- 3.1. Бахмайер Х. Влияние глобализации на метрологию В Европе // Украинский метрологический журнал. – 2000. – Вып. 1. – С. 9–14.
- 3.2. Кохзих М. Национальные метрологические институты на пути в новое тысячелетие // Украинский метрологический журнал. – 2000. – Вып. 3. – С. 5–9.
- 3.3. BIPM: Le Systeme International d’Unites 7 edition. – 1998.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Результаты некоторых сличений, представленные Консультативным комитетом по электричеству и магнетизму (ССЕМ)

Величины	Интервал сличений, (год)	Даты начала и конца	Обозначение
Напряжение постоянного тока: сличение эталонов на эффекте Джозефсона	10	Постоянно	ВІРМ
Напряжение постоянного тока: сличение эталонов на мерах Зенера	10	Постоянно	ВІРМ
Электрическое сопротивление: сличение квантовых эталонов сопротивления на эффекте Холла	10	Постоянно	ВІРМ
Сопротивление: сличение мер 1 Ом и 10 кОм	10	Постоянно	ВІРМ
Сопротивление: сличение мер 10 МОм и 1 ГОм	5	Сент. 1996 – окт. 1999 г.	ССЕ-95-1
Емкость: сличение мер от 10 до 100 пФ	10	Февр. 1996 – янв. 1999 г.	ССЕ-92-1
Индуктивность: сличение мер 10 мГн на частоте 1000 Гц	12	1989–1994 гг.	ССЕ-88-1
Коэффициент усиления по переменному напряжению до 100 В	10	Нояб. 1997 – нояб. 2000 г.	ССЕ-97-1
Преобразование переменного тока в постоянный при соответствующих напряжениях и частотах: 3 В, 1 кГц и три частоты на выбор 500 и 1000 В, от 1 до 100 кГц 3 и 4 В, выше 1 МГц	10	Янв. 1994 – май 1996 г. Апр. 1995 – дек. 1997 г. Авг. 1995 – июнь 1998 г.	ССЕ-92-3 ССЕ-92-4 ССЕ-92-5
Мощность переменного тока от 50 до 60 Гц	10	Июнь 1996 – июнь 1999 г.	ССЕ-92-2

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АМ – амплитудная модуляция
 АС – анализатор спектра
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь
 АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
 БелГИМ – Белорусский государственный институт метрологии
 ВАХ – вольт-амперная характеристика
 ВНИИМ – Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии
 ВНИИМС – Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы
 ВНИИОФИ – Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений
 ВНИИФТРИ – Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений
 ВЧ – высокие частоты
 ГКМВ – Генеральная конференция по мерам и весам
 ГПЭ – государственный первичный эталон
 ГШ – генератор шума
 ДН – делитель напряжения
 ДЧ – девиация частоты
 ИФМ – источник фиктивной мощности
 КАМ – коэффициент амплитудной модуляции
 КГ – коэффициент гармоник
 КО – коэффициент отражения
 КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению
 КЭХ – квантовый эффект Холла
 МКМВ – Международная комиссия по мерам и весам
 МОП – металл-окисел-полупроводник
 МТШ – Международная температурная шкала
 НГШ – низкотемпературный генератор шума
 НИ – нуль-индикатор
 НМХ – нормируемые метрологические характеристики
 ННЭ – насыщенный нормальный элемент
 НСП – неисключенная систематическая погрешность
 РОЧМ – радиооптический частотный мост
 РЭ – рабочий эталон
 СВЧ – сверхвысокие частоты
 СВМП – система воспроизведения мощности поглощения
 СИ – Международная система единиц
 СИМ – средство измерений мощности

- СКВИД – сверхпроводящий квантовый интерференционный детектор
СКЗ – среднеквадратическое значение
СКО – среднее квадратическое отклонение
СНИИМ – Сибирский научно-исследовательский институт метрологии
СПМШ – спектральная плотность мощности шумового радиоизлучения
ТВБ – вакуумный термопреобразователь
ТП – термопреобразователь
ТТМ – твердотельная мера напряжения
УМ – угловая модуляция
ФВ – физическая величина
ФМ – фазовая модуляция
ФФК – фундаментальные физические константы
ФЧХ – фазо-частотная характеристика
ХГНИИМ – Харьковский государственный научно-исследовательский институт метрологии (ныне ННЦ “Метрология”)
ЧД – частотный детектор
ЧМ – частотная модуляция
ЭДС – электродвижущая сила
ЭМП – электромагнитное поле
ЭРТ – электрорадиотехника
ЭСЧ – электронно-счетный частотомер
ЯМР – ядерный магнитный резонанс
BIPM – Международное Бюро мер и весов
BNM – Национальное Бюро по метрологии Франции
CCEM – Консультативный комитет по электричеству и магнетизму
СМС – Данные о калибровочных и измерительных возможностях национальных метрологических институтов
CODATA – Комитет по численным данным для науки и техники
COOMET – Евроазиатское сотрудничество государственных метрологических учреждений
EUROMET – Организация метрологических учреждений Европы
MRA – Соглашение о многостороннем признании национальных эталонов и представленных национальными метрологическими институтами сертификатов о калибровке
NBS – ныне NIST
NIST – Национальный институт стандартов и технологий США
NPL – Национальная физическая лаборатория Англии
PTB – Федеральный физико-технический институт Германии
SINS – сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-сверхпроводник
SNS – сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник

**И. П. Захаров
Ю. Ф. Павленко**

ЭТАЛОНЫ

В ОБЛАСТИ

ЭЛЕКТРО РАДИО ИЗМЕРЕНИЙ

Справочное пособие

Дается описание первичных эталонов основных единиц системы СИ. Осуществляется классификация подвидов электрорадиоизмерений. Анализируются возможности построения базовых эталонов на квантовых эффектах и фундаментальных физических константах (ФФК). Приводится система электрических эталонов. Описываются эталоны параметров интенсивности электрических колебаний (от постоянного тока до СВЧ), эталоны параметров цепей (включая цепи с сосредоточенными постоянными), эталоны параметров формы и спектра радиосигналов. Намечаются перспективы развития эталонной базы в области электрорадиоизмерений.

Книга предназначена для широкого круга специалистов, работающих в области электро- и радиотехники, может быть полезна учащимся вузов.

Книги издательства «Горячая линия – Телеком»

можно заказать через почтовое агентство **DESSY: 107113, г.Москва, а/я 10,**
а также интернет-магазин: **www.dessy.ru**

Сайт издательства:

www.techbook.ru

ISBN 978-5-9912-0032-5



9 785991 200325