

ХРОНИКА

М. КАЛАУ, В. КЕМНИЦ, К. МЭБИУС
(ГДР)

ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ ГЕРМАНСКОГО ВЕДОМСТВА МЕР
И ИСПЫТАНИЯ ТОВАРОВ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ ТОЧНЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В ГДР компетентным государственным органом по вопросам метрологии и испытания товаров является Германское ведомство мер и испытания товаров. Четыре сектора этого ведомства проводят государственные испытания материалов и товаров, а два других занимаются вопросами измерительной техники. Сектор эталонирования отвечает за государственные эталоны, метрологические основы которых создаются сектором метрологии.

В круг обязанностей сектора метрологии входят следующие специальные задачи: 1) разработка, поддержание, усовершенствование, хранение и техническое обеспечение национальных эталонов; 2) разработка и усовершенствование эталонов и эталонных методов, воспроизводящих единицы; 3) увязка национальной системы физико-технических единиц измерения с международной системой; 4) подготовка проектов законодательных положений о физико-технических измерительных единицах.

По решению X Генеральной ассамблеи по мерам и весам в качестве электрической основной единицы был принят ампер. Эта единица определена как неизменный по времени ток, который, протекая по каждому из двух бесконечно длинных параллельных прямолинейных проводов ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии 1 метра друг от друга в безвоздушном пространстве, создает между этими проводами, на каждый метр их длины, силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ мкг/сек². Реализовать ампер по этому определению невозможно. Практическое воспроизведение осуществляется с помощью так называемых ампер-весов. Такие ампер-весы монтируются в Германском ведомстве мер и испытания товаров. Каркасы катушек состоят из кварцевых цилиндров. На эти цилиндры наматывается слой медной проволоки, не содержащей железа. Поверхность каркасов катушек, их габариты и обмотка должны быть выбраны так, чтобы геометрические размеры позволяли задавать параметр катушки с соблюдением точности $2 \cdot 10^{-6}$. Одна из этих катушек установлена стационарно, а другая — меньшая катушка — свободно висит на балансирах в центре неподвижной катушки. Обмотка неподвижной катушки выполнена с центральным отводом, а ток проходит через нее так, что в центре ее возникает очень большой градиент поля. Через обе катушки проходит один и тот же ток. Сила тока вычисляется по силе механического воздействия, причем с учетом ускорения силы тяжести.

С помощью ампер-весов мы намеряем производить определения единицы электрической силы тока с соблюдением точности $2 \cdot 10^{-5}$. Конструкция таких ампер-весов и измерения с их помощью связаны с большими затратами. В настоящее время наблюдается стремление к переходу на квантовомеханические эталоны, в том числе и для электрической основной единицы. Поэтому нами дополнительно проводятся еще и работы по созданию измерительного устройства, позволяющего определять силу электрического тока при помощи свободной прецессии протонов в его магнитном поле. Принцип действия такого устройства основан на том, что спины протонов совершают прецессионное движение вокруг направления магнитного поля под воздействием собственных магнитных и механических моментов. Частота этого прецессионного движения пропорциональна напряженности магнитного поля по зависимости, определенной Ламором. Коэффициент пропорциональности (гиромагнитное соотношение) в данном случае яв-

ляется естественным параметром, который не зависит от внешних воздействий. Знак этот параметр, можно, измерив частоту, определить напряженность магнитного поля. Для таких измерений магнитного поля может быть использован преобразователь измеряемой величины, который можно считать абсолютным измерительным устройством. Тем самым представляется возможность определять единицы напряженности магнитного поля из условий резонанса протонов.

Для образования магнитного поля мы пользуемся цилиндрической катушкой с однослойной обмоткой, к которой предъявляются такие же требования, как и к ампервесам. Высокая точность выполнения катушек позволяет расчетным путем перейти от напряженности поля к силе тока. Точность измерения тока по этому методу зависит в основном от точности определения гиромангнитного параметра. Такие определения для протона проводились за последние годы во многих государственных институтах. При этом было установлено, что его среднее значение составляет $2,67513 \cdot 10^8 T^{-1} S^{-1}$. Это значение с погрешностью $3 \cdot 10^{-5}$ XII Генеральной ассамблеей по мерам и весам было объявлено временно обязательным.

Ввиду того, что гиромангнитный параметр протона до сих пор можно было определять только путем измерения тока, данный метод может быть на первых порах использован лишь в качестве вторичного эталона тока. При этом относительная погрешность не превышает $1 \cdot 10^{-6}$. Наше устройство работает с напряженностью магнитного поля $10^{-3} T$, которая может быть легко достигнута благодаря использованию катушки с воздушным сердечником и однослойной обмоткой. По окончании монтажа это измерительное устройство будет постоянно использоваться для контроля тока, протекающего по эталонному сопротивлению и эталонному элементу э. д. с. Кроме того, в перспективе мы намерены принять участие в работах по определению гиромангнитного параметра протона. Для этого нам необходимо обеспечить возможность определения гиромангнитного параметра без измерения тока, например по методу двух полей.

Единица напряжения Германского ведомства мер и испытания товаров основана на 40 международных элементах Уитстона, размещаемых в измерительном шкафу, рассчитанном на 200 элементов. Большое количество элементов позволяет повышать точность эталона путем осреднения результатов измерения э. д. с. отдельных элементов. Для решения различных задач требуются высокостабилизированные источники напряжения, допускающие легкую транспортировку. Нами начаты исследования возможности использования полупроводниковых зенеровских диодов в качестве эталона напряжения. К эталону напряжения предъявляются следующие требования: низкий температурный коэффициент, продолжительная стабилизация и малое внутреннее сопротивление. Всем этим требованиям отвечают упомянутые диоды. Особенно подходят при этом диоды, которые для обеспечения температурной стабилизации изготавливаются в виде определенного сочетания полупроводниковых слоев, имеющих положительные и отрицательные температурные коэффициенты. Такие элементы могут быть использованы в специальных стабилизирующих схемах каскадного типа. Например, при помощи трехкаскадной схемы может быть обеспечен коэффициент стабилизации до 10^5 .

Стабильность может быть еще более повышена применением мостовой цепи. Достигнутое нами в этом отношении усовершенствование заключается в том, что мы снабдили мостовую цепь предварительным каскадом, состоящим из двух зенеровских диодов, и тем самым смогли на первых порах добиться того, что при изменении входного напряжения на $\pm 5\%$ напряжение на выходе изменяется всего лишь на $2 \cdot 10^{-7}$. Температурный коэффициент при $25^\circ C$ составляет приблизительно $-1 \cdot 10^{-6} 1/град$ без нагрузки, а с нагрузкой $-2 \cdot 10^{-6} 1/град$. Исследования в режиме продолжительной эксплуатации показали, что такие полупроводниковые элементы могут иметь различные термические гистерезисы.

Единица сопротивления Германского ведомства мер и испытания товаров состоит из 10 реостатов по 1 ому. Обмотка изготовлена из манганина или сплава хрома и золота. В течение последних лет нами выполнены сопротивления от 10^{-5} до 10^5 ом из сплава хрома и золота, манганина и хромоникелевых материалов, температурный коэффициент которых меньше $\pm 3 \cdot 10^{-6} 1/град$.

Одной из важнейших величин, измерением и воспроизведением которых занимается наш отдел, является частота. Единица герц тесно связана с основной единицей времени — секундой. На X Генеральной ассамблее по мерам и весам в качестве единицы времени была определена эфемеридная секунда на астрономической основе. Воспроизведение единицы частоты осуществляется в нашем Ведомстве при помощи группы кварцевых генераторов. В ее состав входят 4 кварцевых генератора с рабочими частотами 60 кГц и 1 МГц. Три кварцевых генератора с частотой 60 кГц работают в нас непрерывно уже свыше десяти лет. Они отличаются высокой стабильностью в режиме долгосрочной работы. Суточный ход этих часов составляет от $3 \cdot 10^{-11}$ до $3 \cdot 10^{-10}$. Кварцевый генератор с частотой 1 МГц представляет собой новую конструкцию, недавно созданную в нашем Ведомстве, и имеет приблизительно такие же технические характеристики. Он предназначен прежде всего для управления работой приборов, используемых для измерения частоты, таких, например, как электронные счетчики, декадные генераторы и т. п.

В течение последних лет во всем мире проводятся исследования, направленные на определение времени и единицы частоты на основе ядерных процессов. В этом направлении известен уже ряд возможностей, например получение эталонной частоты при помощи атомного излучения цезия, аммиачного или водородного лазера, из рубидия и т. п. Достигаемые при этом точности намного превосходят точности, получаемые при астрономическом определении. Международные организации, занимающиеся вопросами мер и весов, создали консультативный комитет для определения понятия «секунда». Первым шагом в определении секунды на атомной основе было объявленное Международным комитетом мер и весов в 1964 году решение о принятии структуры излучения цезия 133 как временной основы для определения секунды с установлением частоты этого эталона $9\,192\,631\,770$ Гц. На основании этих фактов мы начали в 1964 году работы по реализации единицы частоты и времени при помощи квантовоэлектронных средств. При этом сначала было решено создать конструкцию газоклеточного резонатора, работающего по следующему принципу.

1. Стекланный сосуд, содержащий цезий и нейтральный буферный газ, облучается резонансной линией цезия. Тем самым в сверхтонкой структуре основного состояния цезия изменяются цифры состава. Это приводит к изменению поглощающих свойств линий цезия. Наличие буферного газа определяет уменьшение доплеровского изменения спектральной линии.

2. Газовая камера дополнительно подвергается воздействию поля сверхвысокой частоты. Если частота этого поля совпадает с частотой перехода атомной сверхтонкой структуры, то тем самым в основном ликвидируется разница цифр состава, что, в свою очередь, приводит к изменению поглощающих свойств.

3. Частота поля СВЧ получается методом умножения с помощью кварцевого генератора. Путем дополнительной фазовой модуляции с незначительной девиацией обеспечивается изменение поглощающих свойств в зависимости от ритма модуляции частоты. При помощи фазочувствительного выпрямителя можно получать регулирующее напряжение, отвечающее отклонению сверхвысокой частоты от средней частоты линии атомного спектра. Это регулирующее напряжение используется для управления работой кварцевого генератора при помощи диодов, емкость которых зависит от напряжения, благодаря чему его частота максимально согласовывается с частотой атомного перехода.

Однако этот газоклеточный резонатор может быть использован только в качестве вторичного эталона, так как добавка буферного газа вызывает некоторые сдвиги частоты атомного перехода. Этот очевидный недостаток компенсируется тем, что в данном случае отпадает весьма сложный узел молекулярного облучения, который требуется при реализации других видов атомных эталонов частоты.

После данного краткого обзора методов реализации основных единиц приведем характеристики некоторых методов, обеспечивающих проведение точных измерений.

Быстрое развитие, наблюдаемое в различных областях высокочастотной техники, положительно отразилось и на частотно-измерительной технике. Это касается как модуляции частот, так и их измерения. Этой тенденции отвечает не только создание атомного эталона частоты, но и конструкция нового измерительного устройства для точного определения частоты до 2 Гц.

Любое точное измерение частоты, как правило, основано на сравнении двух частот. Одна из этих частот обычно является высокостабилизированной эталонной частотой с хорошо известными техническими данными. Характеристика же другой так называемой измерительной частоты определяется в результате сравнения. Важными параметрами, характеризующими метод точного измерения частоты, являются разрешающая способность и продолжительность измерения. Под разрешающей способностью подразумевается наименьшая разница частоты, которая может быть еще различима при помощи данного метода. К современному методу точного измерения частоты необходимо предъявлять следующие требования:

1) частотный диапазон, допускающий применение данного метода, должен доходить до области гигагерц;

2) разрешающая способность данного метода должна отвечать, по крайней мере, порядку величин стабилизации современных генераторов эталонной частоты, т. е. их относительное значение должно быть равным 10^{-11} и выше;

3) необходимая продолжительность измерения для достижения такой разрешающей способности должна быть в пределах от 1 мсек до 1000 сек и выше.

Для выполнения этих требований нами был принят гетеродный метод. Он основан на следующем принципе. Измеряемая частота умножается с расчетом на достижение требуемой продолжительности измерения и необходимой разрешающей способности. Из эталонной частоты путем деления частот получается сравнительная частота. Эта частота или ее многократное значение должны быть приблизительно равными измеряемой частоте или ее многократному значению. Обе частоты смешиваются, после чего производится выделение разностной частоты. Диапазон разностной частоты со-

ставляет при этом 10 гц — 5 кгц. Разностная частота определяется измерением длительности периодов.

Благодаря применению электронных счетчиков с присоединенными к ним устройствами, печатающими результаты подсчета, в скором времени будет обеспечена максимальная автоматизация работы этой установки. При необходимости меньшей разрешающей способности для определения разностной частоты используется индикатор частоты с присоединенным к нему самописцем. Это измерительное устройство позволяет исследовать для генераторов эталонной частоты: 1) необратимые изменения частоты, вызванные в основном старением соответствующих узлов конструкции генератора; 2) воздействия различных рабочих параметров и параметров окружающей среды на частоту; 3) статистические колебания частоты.

Разрешающая способность данного метода составляет при продолжительности измерения 1 мсек около 10^{-10} , а при 1 сек — 10^{-13} и т. д. Точность измерения частоты соответствует стабилизации генераторов эталонной частоты.

Важнейшими показателями в области высоких и сверхвысоких частот являются, помимо мощности, напряжение и затухание. Поведение системы в области высокой частоты оценивается на основе результатов измерения тока и напряжения. С повышением частоты эти измерения становятся очень сложными. На результаты данных измерений в таком случае в недопустимой мере влияют индуктивности и емкости подводов. Кроме того, проводить измерения напряжения в области сверхвысоких частот бессмысленно и из-за того, что размеры используемых проводов и элементов конструкции должны отвечать порядку величин применяемых диапазонов воли. Мощность же, наоборот, можно хорошо определять и в области сверхвысоких частот, причем используемые для этого различные методы измерения могут быть хорошо приспособлены к особым условиям таких измерений.

Почти все методы измерений, применяемые в области сверхвысоких частот, основаны на принципе преобразования энергии сверхвысокой частоты в тепло. При этом осуществляется наблюдение за вызываемыми таким образом повышениями температуры, которые используются затем для количественной оценки.

Созданное нами устройство для определения мощности сверхвысокой частоты отвечает наивысшим требованиям современной измерительной техники. Измеряемые мощности сверхвысоких частот подводятся к абсорберу, который расположен без отражения в коаксиальном проводе и в котором эти мощности превращаются в тепло. Повышение температуры абсорбера служит мерилем абсорбируемой мощности и вызывает разбаланс согласованного измерительного моста постоянного тока. Напряжение на выходе моста пропорционально росту температуры абсорбера и тем самым — поглощаемой энергии. Количественная взаимосвязь между абсорбируемой энергией и напряжением на выходе моста определяется эталонированием. Ввиду того, что термический метод принципиально не зависит от частоты, эталонирование может быть произведено постоянным током.

В качестве абсорбера мощности применяется маленькое тонкослойное сопротивление. Пренебрежение скин-эффектом позволяет осуществлять во всем интересующем частотном диапазоне хорошее согласование с волновым сопротивлением. Приблизительно свободную от отражения работу устройства обеспечивает конус с удлиненной характеристикой. На этом конусе расположена обмотка для измерения температуры, представляющая собой ответвление измерительного моста постоянного тока. Для обеспечения совершенно незначительного отвода тепла данный конус выполнен из очень тонкого материала толщиной лишь в несколько микрон. Термическое равновесие создается очень быстро, за несколько минут. Для ликвидации воздействия температуры помещения и ее колебаний на внешней стороне измерительной головки предусмотрено эталонное сопротивление, которое также является ответвлением измерительного моста. Для успешной ликвидации воздействий температуры помещения необходимо обеспечить одинаковые коэффициенты температуры измерительного и эталонного сопротивлений.

Наше измерительное устройство рассчитано на частотный диапазон от 0 до 15 Гц. При помощи этого устройства мы можем измерять мощности от 1 мвт до 10 вт с погрешностью 0,5%. Измерительное устройство предназначено для волновых сопротивлений 50 и 60 ом. Проведенные до сих пор международные сравнительные измерения подтвердили хорошую пригодность этого высококачественного устройства для таких измерений. Это устройство может быть использовано и для измерения напряжения в частотном диапазоне ниже 1000 Мгц. Из вышеуказанного диапазона измерения мощности вытекает диапазон измерения напряжения от 0,3 до 20 в, вычисляемый по соотношению $U = \sqrt{NR}$. (Напряжение, вычисленное по измеренной мощности, равно при этом перепаду напряжения на абсорбере мощности R , обозначенном выше как измерительное сопротивление.) При этом для R необходимо подставлять точное и не зависящее от мощности значение. Значение R может быть определено с относительной погрешностью 0,1%. Погрешность при определении мощности N равна по нашим данным 0,5%. При этом погрешность измерения напряжения получается равной 0,3%.

При практическом измерении мощности для вывода из нее соответствующего напряжения необходимо, однако, учитывать, что коэффициент отражения измерительной головки создает волнообразную кривую распределения напряжения вдоль провода, вызывающую дополнительные ошибки, которые необходимо принимать в расчет при обработке результатов измерения. Величина волнистости зависит от вида измерительного устройства, величины коэффициента отражения и длины волны измерительной частоты. Погрешность определения напряжения в любом месте провода может быть из-за волнистости в несколько раз больше, чем погрешность, указанная для перепада напряжения на абсорбирующем сопротивлении. Эти ошибки, получающиеся от волнообразной кривой напряжения на проводе, имеют особое значение прежде всего при необходимости эталонирования проходных измерительных головок. В таком случае испытуемый элемент и эталонная измерительная головка располагаются по серийной схеме в различных местах общей трассы провода.

При применении двухполюсных головок для измерения напряжения к источнику измерительного тока попеременно присоединяются испытуемые головки для измерения напряжения и эталонная измерительная головка. В таком случае этих ошибок не возникает.

Для измерения затухания нами была создана новая конструкция эталонных гасительных контуров. При этом речь идет о гасительных контурах с сопротивлением и о волноводном делителе напряжения.

Волноводный делитель напряжения состоит из точно калиброванного пустотелого цилиндра, в котором аксиально расположены два электрода. Магнитное поле, возбуждаемое электродом-датчиком, уменьшается с переменной крутизной в аксиальном направлении. При помощи улавливающего электрода, передвигаемого в этом направлении, можно в любом месте уловить соответствующий потенциал. Поэтому, если улавливающий электрод не нарушает заметным образом магнитного поля, такое устройство может быть использовано в качестве регулируемого демпфирующего звена и регулируемого делителя напряжения. При этом затухание линейно зависит от расстояния между электродами.

Наш волноводный делитель напряжения рассчитан на модуляцию E_{01} . Его предельная длина волны была выбрана так, чтобы при верхней предельной частоте 300 Мгц параметр затухания был еще достаточно надежно независимым от частоты. Для получения очень точных результатов измерений внутренний диаметр волновода должен быть постоянным по всей его длине, а регулирование каретки с улавливающим электродом должно обеспечивать очень точное и воспроизводимое передвижение этого электрода. При помощи такого волноводного делителя напряжения можно, учитывая начальное затухание, задавать любое затухание от 0 до 100 дб. Погрешность результатов измерений составляет с учетом различных поправок, например на мешающие модуляции, от 0,02 до 0,05 дб. Прибор рассчитан на волновое сопротивление 60 ом.

Мы надеемся, что этот материал даст определенное представление о наших работах и о связанных с ними проблемах.