

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

УДК 621.317.33

**К. Б. КАРАНДЕЕВ, В. А. КРАСИЛЕНКО, Б. Н. ПАНКОВ,
В. С. СОБОЛЕВ, К. М. СОБОЛЕВСКИЙ**

(Новосибирск)

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАССИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

(обзор)

В области электрических измерений и контроля существуют два главных направления, по которым развиваются теоретические исследования и ведется разработка соответствующей аппаратуры, а именно: определение активных и пассивных электрических параметров элементов, цепей и веществ. Каждое из этих направлений характеризуется определенной совокупностью методов измерения и контроля, структур измерительных и контрольных цепей, огромным арсеналом конкретных приборов, автоматов, установок и их элементов. Оба направления постоянно развиваются в тесной взаимосвязи и взаимообусловленности. При наличии специфических методов и средств измерения в каждом из них существуют в то же время методы и средства, которые могут быть использованы для измерения как активных, так и пассивных электрических параметров. Тем не менее вполне оправданным является традиционное деление и рассмотрение, с одной стороны, методов, предназначенных для измерения и контроля активных параметров, а с другой — методов, нашедших применение для измерения и контроля пассивных электрических параметров. В настоящей работе делается попытка дать оценку современного состояния и обсудить перспективы развития методов измерения пассивных электрических параметров.

Как известно, под пассивными электрическими параметрами электро- и радиотехнических цепей и материалов понимаются такие их характеристики, которые проявляются лишь под воздействием на эти объекты внешних источников электромагнитной энергии. В формальном смысле указанные параметры являются коэффициентами дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в электрических цепях и веществах.

Остановимся сначала на некоторых особенностях измерения любого параметра независимо от его природы и характера.

В процессе измерения и контроля необходимо определять одну из следующих характеристик: абсолютное значение параметра, степень отклонения параметра от какого-либо заданного его значения, соответствие значения параметра какому-либо установленному пределу его изменений. Определенная специфика методов и средств измерения обуславливается необходимостью определять очень малые и очень боль-

шие по абсолютному значению параметра. Немаловажным обстоятельством, характеризующим эффективность того или иного метода измерения, является возможность или невозможность обеспечить прямое измерение искомой величины, а при комплексном характере последней — раздельное измерение (зависимое или независимое) отдельных составляющих комплексной величины.

Переходя к рассмотрению современных принципов измерения пассивных электрических величин [1—100], будем в соответствии с общепринятой традицией пользоваться термином «метод измерения», имея в виду метод в узком смысле [29], т. е. способ или путь конкретного выполнения физического эксперимента, характеризующийся применением некоторой определенной измерительной цепи.

При измерении пассивных электрических параметров возможны следующие ситуации: а) исследуемые объекты можно рассматривать как элементы электрических цепей с сосредоточенными параметрами, для определения которых используются измерительные цепи с сосредоточенными параметрами; б) исследуемые объекты являются образцами веществ или материалами, параметры которых приходится преобразовывать в сосредоточенные параметры элементов электрических цепей, сводя задачу измерения к предыдущей ситуации; в) исследуемые объекты необходимо рассматривать как элементы электрических цепей с распределенными параметрами, для определения которых используются измерительные цепи с распределенными же параметрами (к последней ситуации можно отнести также и исследование элементов с сосредоточенными параметрами или материалов с помощью цепи с распределенными параметрами). Ниже мы уделим основное внимание лишь первым двум ситуациям, так как третья из них имеет специфический характер и требует отдельного рассмотрения.

Очевидно, что в общем случае критерием применимости тех или иных цепей для определения данного пассивного параметра является возможность измерения с их помощью непосредственно тех активных электрических величин, соотношением которых характеризуется определяемый пассивный параметр. Для сравнения различных принципов построения цепей, удовлетворяющих упомянутому исходному условию, по ряду метрологических и эксплуатационных характеристик, на наш взгляд, целесообразно основываться на тех типовых (обобщенных) функциональных зависимостях, которые связывают измеряемый пассивный параметр с некоторой совокупностью других параметров, характеризующих как сам объект исследования, так и образцовые элементы соответствующих измерительных цепей. В этом смысле можно выделить следующие функциональные зависимости, каждая из которых вызвала к жизни специфический принцип построения измерительных цепей:

$P_x = \frac{u}{i}$ — метод вольтметра — амперметра с большим числом его модификаций и частных способов измерения (здесь P_x — искомый параметр);

$Y_{kp}(P_x) = 0$ — классический мостовой метод измерения, в основе которого лежит требование, чтобы взаимная проводимость Y_{kp} любых двух сторон (k и p) некоторого четырехполюсника равнялась нулю;

$L(P_x) = L_0$ — рассматриваемое как разновидность мостового метода измерение на основе квазиуравновешенных цепей, характеризующих в общем случае функцией $w = \frac{az + b}{cz + d}$, некоторая составляющая

которой равна $L(P_x)$, причем L_0 — заданное значение величины $L(P_x)$;

$u(P_x) - u_0 = 0$ — компенсационный метод измерения и другие ме-

тоды сравнения напряжений или токов (здесь u_0 — компенсирующая активная величина);

$f(P_x) = f(L, C, R, \omega_0)$ — резонансный метод измерения (здесь ω_0 — резонансная частота);

$\tau(P_x) = -t \ln \frac{u_0}{u}$ — метод измерения с использованием переходных характеристик (здесь $\tau(P_x)$ — постоянная времени цепи);

$Z_n(P_x) = f(\omega, \varepsilon, \mu, \sigma, \Gamma_n)$ — методы измерения параметров веществ с использованием индуктивных, индукционных и емкостных преобразователей (здесь $Z_n(P_x)$ — приращение сопротивления преобразователя; Γ_n — геометрические параметры).

Охарактеризуем вкратце каждый из указанных выше методов, отметив отдельно тенденции их развития и перспективы.

Метод вольтметра — амперметра ввиду своей простоты и доступности требуемых для его реализации приборов наиболее распространен при измерениях с невысокой точностью сопротивлений, емкостей, индуктивностей. В общем случае метод не обеспечивает прямого измерения искомой величины. Однако стабилизация источников питания и ряд других мер позволили создать омметры, мегомметры, тераомметры, а в последнее время цифровые омметры, микрофарадметры и т. д., обеспечивающие прямое измерение пассивных параметров [14, 19, 25, 26, 35, 53, 56, 58, 69, 72, 82, 86]. Надо полагать, что метод вольтметра — амперметра будет широко использоваться и в дальнейшем.

Особое место среди методов измерения пассивных электрических параметров занимает мостовой (в широком смысле) метод измерения. В настоящее время по характеру окончательного измерительного состояния, при котором происходит отсчет величин, определяющих измеряемые или контролируемые параметры, принято различать уравновешенные, неуравновешенные, квазиуравновешенные и полууравновешенные мостовые цепи, причем две последние группы имеют место лишь на переменном токе.

На постоянном токе наибольшее распространение получили четырехплечие (одинарные) и шестиплечие (двойные) мостовые цепи [13, 28, 29, 38, 49, 60, 81]. Погрешности лучших современных мостов постоянного тока снижены до тысячных и десятитысячных долей процента. Верхний предел измеряемых величин может достигать 10^{14} ом. При соответствующем построении измерительной цепи и ее техническом воплощении с помощью моста постоянного тока могут быть измерены сопротивления порядка 10^{-5} — 10^{-6} ом с погрешностью, не превышающей долей процента [13]. В теоретическом плане всесторонне исследованы: влияние погрешностей составных элементов мостовых цепей постоянного тока на погрешность цепи в целом; чувствительность мостовых цепей при различных режимах работы; связь чувствительности цепи с погрешностью измерения; вопросы рационального согласования параметров мостовых цепей с целью получения минимальной или заданной погрешности измерения; вопросы расчета мостовых цепей с применением различных общих методов анализа электрических цепей, равно как и использования этих методов для определения метрологических характеристик цепи (чувствительности, погрешности), а также обеспечения оптимальных энергетических режимов элементов цепей и необходимой защиты мостов от влияния токов утечки (соответствующую этим исследованиям библиографию см., например, в [66]).

Исключительно большое количество задач в технике измерений и контроля пассивных электрических параметров решается с помощью мостов переменного тока. Исследованию уравновешенных четырех-

шести- и семиплечих, Т-образных (одинарных и двойных) мостовых цепей переменного тока посвящена обширная литература, относящаяся к областям электрических, радиотехнических и магнитных измерений в широком частотном диапазоне от долей герца до сотен мегагерц. Классификации мостовых цепей переменного тока также посвящено значительное количество работ. Поэтому остановимся лишь на некоторых общих аспектах современного состояния и развития мостовых и вообще любых электроизмерительных цепей уравнивания, предназначенных для измерения пассивных электрических параметров на переменном токе.

Прежде всего необходимо иметь в виду [39, 40], что при измерении активных и реактивных составляющих комплексного сопротивления нельзя не учитывать конкретной схемы замещения последнего (естественно, что при измерении модуля и фазового угла, а также добротности или тангенса угла потерь в общем случае схема замещения роли не играет). Далее следует отметить, что процесс измерения с помощью мостов переменного тока отличается существенной особенностью, поскольку речь идет об измерении комплексных величин, характеризуемых двумя скалярными составляющими. Эти составляющие необходимо в принципе сравнивать с некоторыми двумя скалярными составляющими образцовой величины, образуемой измерительным устройством. Поэтому в отличие от измерения в обычном смысле, когда оно трактуется как процесс сравнения двух физических величин, измерение комплексных величин, по существу, представляет собой в общем случае процесс одновременного зависимого сравнения четырех реальных величин, что существенно усложняет задачу быстрых и точных измерений и обусловило необходимость поиска путей упрощения указанного процесса.

Значительные практические достижения в области измерения комплексных пассивных электрических параметров оказались возможными благодаря успешному развитию теории мостовых и компенсационных цепей переменного тока. Теория раздельного уравнивания, теория сходимости и обобщенная теория мостовых цепей переменного тока, а также основы обобщенной трактовки любых линейных цепей уравнивания; принципы построения автоматических мостовых и компенсационных устройств переменного тока и основы теории автоматических мостов с экстремальным регулированием и с параметрической модуляцией; принципы построения мостовых цепей с индуктивно связанными и активными плечевыми элементами, многомостовых измерительных цепей, измерительных преобразователей параметров электрических цепей в частоту, фазопостоянных измерительных цепей; развитие методов анализа электроизмерительных цепей уравнивания; установление ряда интересных общих свойств мостов переменного тока на основе обобщенных круговых диаграмм и обобщенных параметров мостовых цепей; установление специфических для переменного тока свойств чувствительности цепей уравнивания; формулировка особых требований по определению погрешности измерения комплексных величин; разработка принципов и методов защиты цепей переменного тока от влияния электромагнитных помех; формулировка и решение ряда задач синтеза электроизмерительных цепей переменного тока — вот краткий перечень основных результатов (см., например, [2, 3, 7, 9, 11, 15—19, 24, 28—30, 32, 33, 37, 40—42, 44, 45, 49, 52, 54, 66—69, 74, 78, 83, 84, 91, 92, 94, 97—99]), позволивших создать совершенные измерители комплексных пассивных параметров.

По характеру используемых регулируемых плечевых элементов современные мостовые цепи переменного тока могут быть разделены на

цепи: а) с регулируемым пассивными плечевыми элементами («классические» мосты); б) с регулируемым активными плечевыми элементами (плечевыми источниками напряжения или тока); в) с комбинированным регулированием плечевых элементов. Для каждой из этих групп мостов характер диаграмм уравнивания, сходимости и других характеристик уравнивания отличен.

Уравнивание современных мостов производится вручную или автоматически, причем в последнем случае широко применяется как аналоговое, так и дискретное уравнивание с использованием в основном электромеханических, электронных и параметрических систем [9, 15, 16, 28—30, 37, 57, 91].

В области уравниваемых мостовых цепей переменного тока в настоящее время, наряду с традиционной тенденцией повышения точности для собственно метрологических целей [7, 17, 18, 20, 41, 68, 89, 93, 98, 100], проводятся значительные работы по созданию высокоточных и высокопроизводительных автоматических измерительных устройств широкого назначения. Последнее достигается, как правило, на основе принципиально новых измерительных цепей и средств вычислительной техники [15, 18, 23, 30—33, 37, 40, 43, 52, 75, 80, 84] и объясняется в большей степени тем, что повышенные точности измерения требуются уже при массовых производственных измерениях и научных экспериментах. Для обеспечения высокого быстродействия мостовых устройств весьма перспективными представляются исследования по использованию электронных систем уравнивания измерительных цепей (см., например, [16, 91]).

Неуравненные мосты переменного тока применяются весьма широко, преимущественно там, где изменения измеряемых величин незначительны и требуется невысокая точность измерений [28, 29, 49, 54, 61, 63, 74, 86]. В последнее время возможности неуравненных мостов существенно расширены благодаря тому, что в качестве носителя полезной информации была избрана фаза выходного напряжения, которая, как известно, не зависит от колебаний напряжения источника питания, чем устраняется один из главных недостатков подобного типа мостов — зависимость результата измерения от изменений напряжения питающего измерительную цепь. При определенных условиях (см., например, [61]) неуравненные мосты могут применяться для раздельного измерения отдельных составляющих комплексных сопротивлений.

Основной областью применения квазиуравненных мостов (а также полууравненных), выделившихся в большой самостоятельный класс измерительных устройств [32, 33, 66, 67], является раздельное независимое измерение одной или двух составляющих комплексных сопротивлений и проводимостей.

Квазиуравненные мосты по простоте приведения их в заданное измерительное состояние идентичны, как известно, мостам постоянного тока, а по точности лучшие из них приближаются к уравниваемым мостам. Так, например, исследованный в [52] квазиуравненный мост для раздельного измерения емкости аттестован по классу 0,1. В теоретическом плане достаточно развиты методы анализа основных свойств квазиуравненных цепей [24, 32, 33, 45, 50, 66, 67, 83] и начаты работы по синтезу, направленные прежде всего на разработку методов оптимального поиска структур квазиуравненных цепей заданной конфигурации [40, 66, 67]. Известные в настоящее время структуры квазиуравненных двухэлементных, мостовых и Т-образных цепей позволяют с приемлемой чувствительностью осуществлять раздельное измерение составляющих комплексного параметра, которые

несильно отличаются друг от друга по абсолютным значениям. К сожалению, верхний предел рабочих частот квазиуравновешенных цепей ограничивается частотными свойствами не только образцовых элементов измерительной цепи, но и указателей квазиравновесия, представляющих собой, как правило, прецизионные измерительные устройства [15, 32, 33, 46, 64, 83, 84].

Остановимся вкратце на использовании для измерения пассивных электрических параметров компенсационного метода [2, 3, 29, 49, 58, 75, 79, 81, 97]. По существу, оно сводится, как известно, к использованию компенсаторов при измерениях по методу вольтметра — амперметра. Однако применение компенсаторов, содержащих образцовую меру напряжения, приводит к значительному повышению точности измерения на постоянном токе [58]. На переменном токе применение прямоугольно-координатных и полярных компенсаторов позволяет отдельно измерять составляющие пассивных комплексных параметров. Как показано в [21], при измерении составляющих комплексных параметров с помощью компенсаторов переменного тока может быть достигнута достаточно высокая точность (до 0,1%). При сравнительно невысоких точностях для измерения составляющих пассивных комплексных параметров успешно начинают применяться так называемые квазикомпенсационные устройства, в которых компенсация сравниваемых активных величин (напряжений или токов) достигается лишь для отдельных составляющих [83]. Наряду с компенсаторами с ручным уравниванием в последнее время широкое распространение получают автоматические компенсаторы с электромеханическим уравниванием, а также автокомпенсационные измерительные устройства [2, 48, 51, 75].

Говоря о перспективах компенсационного метода измерений, следует отметить целесообразность создания на его основе универсальных компенсаторов, пригодных для измерения как активных (напряжение, ток), так и пассивных электрических параметров.

При измерениях пассивных электрических параметров мостовым и компенсационным методами достигаемая точность и чувствительность в большой степени определяются параметрами указателя равновесия или квазиравновесия. В связи с этим необходимо указать, что значительное улучшение характеристик измерительных устройств достигнуто при использовании экстремальных и модуляционных принципов обнаружения неравновесия измерительных устройств [15], а также методов периодического сравнения [46, 64].

Перейдем к рассмотрению резонансного метода измерения пассивных электрических параметров [17, 19, 49, 55, 56, 86, 95, 96], развитие которого связано со становлением радиотехники. Хотя в области низких частот резонансный метод был вытеснен более точными методами (мостовым и компенсационным), в области повышенных и высоких частот он и до настоящего времени занимает прочные позиции. Последнее объясняется тем, что структура резонансной измерительной цепи весьма проста, вследствие чего цепь содержит минимум паразитных связей, являющихся источником погрешности.

Простейшим примером измерений резонансным методом является определение одного из реактивных параметров по известным значениям второго из них и резонансной частоты. Распространенными являются измерения реактивных параметров методом замещения при резонансе цепи и измерения активного сопротивления и добротности по резонансным значениям токов и напряжений. Сравнивая резонансный метод с мостовым, можно отметить аналогию с полууравновешенным мостом,

грешности, вызванные неточностью настройки контура в резонанс, могут быть значительно уменьшены при использовании генераторного способа измерений [55].

Одной из наиболее распространенных реализаций резонансного метода измерений являются измерители добротности — куметры [17]. Проведенные в последние годы исследования по определению остаточных параметров элементов измерительной цепи куметра и по повышению точности их работы показали принципиальную возможность получения погрешности измерения добротности порядка единиц процентов. Весьма перспективным направлением в создании куметров следует считать использование переходных процессов в контуре или сдвига фазы огибающей модулированного напряжения. На этой основе могут быть созданы куметры с цифровым отсчетом [17].

Оригинальные возможности создания цифровых измерителей пассивных параметров появились на основе использования переходных процессов в RC - и RL -цепях [14, 35, 53, 56, 86]. Достоинством метода измерения с использованием переходных характеристик является линейная зависимость выходной величины (отрезка времени) от измеряемого параметра и сравнительная легкость преобразования результата измерения в цифровую форму [56]. Приходится, однако, с сожалением констатировать, что еще не найдены пути раздельного измерения различных по характеру пассивных электрических параметров на основе указанного метода.

Рассмотрим теперь методы измерения пассивных электромагнитных параметров веществ [4, 8, 12, 25—27, 36, 76, 77, 82, 87]. К основным из этих параметров относятся диэлектрическая и магнитная проницаемости ϵ и μ , а также удельная электропроводность σ . Как указывалось ранее, в большинстве случаев для измерения этих параметров необходимо вначале преобразовать их в эквивалентные сосредоточенные параметры элементов цепей. Для этой цели при измерениях ϵ используются емкостные, а при измерениях μ индуктивные и индукционные преобразователи. Для измерения электропроводности используются указанные выше бесконтактные преобразователи, а также специальные контактные приспособления, которые можно назвать преобразователями активного сопротивления. Все указанные преобразования основаны на взаимодействии вещества и электромагнитного поля. Выходной параметр преобразователя, эквивалентный величине, подлежащей измерению, может быть определен теперь с помощью методов, описанных выше. Специфическим, подлежащим особому рассмотрению, является в данном случае вопрос о связи преобразователя и контролируемого образца, ибо характер этой связи во многом определяет точность измерений.

Так, при измерении диэлектрической постоянной вещества конденсаторным методом специфика измерений [87] заключается в создании такого измерительного конденсатора, емкость которого была бы связана с диэлектрической постоянной исследуемого образца известным с высокой точностью соотношением. Аналогичная же ситуация имеет место и при измерении магнитной проницаемости веществ. Достаточно сказать, что при конструировании пермеаметров [17] основное внимание уделяется вопросам обеспечения такой связи образца и обмотки пер-

меметра, чтобы поле внутри образца с высокой степенью точности ным полем вихревых токов. Если же исследуемые вещества обладают значительной электропроводностью, то при описании явлений, происходящих в преобразователе, необходимо принимать во внимание эти искажения поля. Метод измерения с использованием индукционных датчиков, при котором учитываются подобные искажения поля, получил название метода вихревых токов. Указанным методом успешно измеряются как неэлектрические величины, так и электропроводность и магнитная проницаемость веществ [22]. Кроме того, недавно начались исследования и по применению его для измерения диэлектрической проницаемости (например, горных пород).

Теория метода вихревых токов вначале была разработана лишь для так называемых проходных датчиков [62, 85], и только в последние годы достигнуты определенные успехи в теории более перспективных накладных и экранных датчиков [65].

Важными задачами при использовании метода вихревых токов являются устранение влияния мешающих факторов и многопараметровый контроль. Можно считать, что в настоящее время они успешно решаются

Т а б л и ц а 1

Методы измерения активных сопротивлений на постоянном токе

Методы измерения и их реализации	Пределы измерения, ом	Погрешности измерения, %
Метод вольтметра—амперметра		
а) омметры, мегомметры (по последовательной, параллельной схемам; с использованием логометров, с магнитным шунтом)	10^{-4} — 10^9	0,2—4
б) электронные мегомметры	До 10^{12}	1,5—20
в) тераомметры	До 10^{14}	
г) метод вольтметра — электрометрического усилителя	До $5 \cdot 10^{16}$	1—5
д) метод двух вольтметров или амперметров (непосредственное сравнение измеряемого сопротивления с образцовым при последовательном или параллельном их соединении)	До 10^{12}	До 5
Мостовой метод измерения (одинарные и двойные мосты)	10^{-6} — 10^{14}	0,0001—5
Компенсационный метод измерения	Искомое сопротивление, одинаковое по порядку с образцовым	До 0,0001
Метод измерения с использованием переходных процессов	10^9 — 10^{11}	1—5
а) метод заряда с использованием баллистического гальванометра		
б) метод разряда с использованием электростатического вольтметра		
в) метод разряда с использованием конденсатора переменной емкости и электрометра (метод Таунсенда)		0,1—1

Таблица 2

Методы измерения пассивных электрических параметров в области низких, повышенных и высоких частот

Методы измерения	Измеряемые параметры	Пределы измерения	Частотный диапазон	Достижимая погрешность измерения
Метод вольтметра — амперметра	Модуль комплексного сопротивления	$10^{-3}—10^{12}$ ом	До 0,5 Гц	В среднем 5%
Методы, основанные на использовании цепей уравнивания				
а) двухэлементные цепи	Модуль комплексного сопротивления	$10^{-2}—10^{12}$ ом	До десятков Мгц	2%
б) трехэлементные цепи	Емкость Индуктивность Модуль и фаза комплексного сопротивления	1 пф—1 мкф До 10^3 гн До 100 ком	До нескольких Мгц Низкие и звуковые	5—7% 2% 2%
в) Т-образные цепи	Проводимость Емкость Индуктивность	До 100 мксим До единиц мкф 0,03 мкгн— 0,3 гн	От звуковых до сотен Мгц	0,5% 0,1—1% До 5%
г) мостовые цепи уравниваемые	Добротность Емкость Индуктивность Сопротивление (проводимость) Тангенс угла потерь Добротность	2—120 10^{-8} пф— 10^4 мкф $10^{-8}—10^4$ гн 0,10 ом—10 Мом $2 \cdot 10^{-6}—10$ 1—500	От десятых долей гц до сотен Мгц Звуковые и радиочастоты До сотен Мгц	3—20% $10^{-4}—1\%$ $10^{-2}—5\%$ 0,05—1% 2·10 ⁻⁶ До 5% 2—20%
неуравновешенные	Емкость Индуктивность Активное сопротивление Тангенс угла потерь	— 1 мкгн—0,1 гн — —	— — — —	0,1—10% 0,25% — —
полууравновешенные	Емкость Тангенс угла потерь	50 пф—1 мкф $10^{-4}—5 \cdot 10^{-2}$	До 1 Мгц	0,5—1% $1 \cdot 10^{-4}—5\%$
квазиуравновешенные	Емкость Индуктивность Тангенс угла потерь Добротность	1 пф—100 мкф — — —	Звуковые	0,1—1% — — —
д) компенсационные	Емкость	До $3 \cdot 10^9$ пф	—	0,5%
Резонансный метод	Индуктивность Модуль Фазовый угол Емкость Индуктивность Тангенс угла потерь	— — — $2 \cdot 10^{-4}$ пф—0,1 мкф 0,1 мкгн—1,0 гн $1 \cdot 10^{-4}—0,5$	Звуковые — — До сотен Мгц До 1,5 Мгц До 10 Мгц	1—2 5% — — 1—2 5% До 10% 5—10%

Методы измерения	Изменяемые параметры	Пределы измерения	Частотный диапазон	Достижимая погрешность измерения
Метод переходных процессов	Добротность Активное сопротивление Емкость Индуктивность Добротность	До 1200 Область больших и средних значений параметров	До сотен Мгц	5—10% 0,1—1%
Методы измерения параметров веществ, основанные на использовании электроизмерительных цепей с сосредоточенными параметрами	Электропроводность металлов и полупроводников Магнитная проницаемость металлов и полупроводников	От сверхпроводников до полупроводников	От инфранизких до сотен Мгц	0,5—10%

для тех случаев, когда систему датчик—объект можно линеаризовать [59], т. е. когда контролируются малые отклонения параметров от заданных значений. Учитывая актуальность задач бесконтактного получения измерительной информации, исследования, относящиеся к совершенствованию метода вихревых токов, можно считать весьма перспективными.

В заключение отметим один аспект исследования объектов, пассивные электрические параметры которых необходимо рассматривать как распределенные. Сегодня эта область измерений, носящая самостоятельный характер, относится в основном к диапазону сверхвысоких частот [5, 6, 25, 71]. Следует, однако, иметь в виду, что в связи с развитием микроэлектроники, в частности при разработке интегральных схем, появляется настоятельная необходимость, с одной стороны, в измерении и контроле распределенных параметров и в диапазоне радио- и звуковых частот и, с другой стороны, в создании принципиально новых измерительных цепей, которые для указанного диапазона частот нужно будет рассматривать как цепи с распределенными параметрами. Поэтому представляется целесообразным распространение хорошо разработанных методов измерения и принципов построения измерительных средств в области сверхвысоких частот на измерение и контроль параметров интегральных схем и построение микроминиатюрных электроизмерительных цепей и устройств.

Общее представление о современных методах измерения пассивных электрических параметров можно составить, обратившись к табл. 1—3, в которые сведены некоторые данные о методах измерения, наиболее широко используемых на постоянном токе (см. табл. 1), в области низких, повышенных и высоких частот (см. табл. 2) и в области высоких и сверхвысоких частот (см. табл. 3). В таблицах указаны пределы и погрешности измерения исследуемых параметров, а также диапазоны рабочих частот (для табл. 2 и 3).

Таким образом, на основе приведенного выше обзора современного состояния и основных тенденций развития методов измерения пассивных электрических параметров можно отметить, что наиболее широкие возможности представляет использование электроизмерительных цепей

Таблица 3

Методы измерения пассивных параметров в области высоких и сверхвысоких частот

Методы измерения	Измеряемые параметры	Пределы измерения	Частотный диапазон	Погрешность измерения, %
Методы, основанные на использовании измерительных линий (коаксиальных и волноводных)	к.с.в.н.	1,05—1,0		1) 1—7 2) 3—10 3) до 5
1) измерительные линии с подвижным зондом	Комплексная диэлектрическая проницаемость	Проницаемость от 1 до 200 и выше Тангенс угла потерь 0,0005—0,01	До миллиметровых волн	2—15
2) измерительные линии с подвижным зондом и фазовращателем	Добротность колебательных контуров			
3) сжимаемые измерительные линии				
Методы, основанные на использовании направленных волн	Полные сопротивления	10—3000 <i>ом</i>	До миллиметровых волн	5—20
	Относительная диэлектрическая проницаемость	До 50—80		До 3
	Тангенс угла потерь			До 12
Мостовой метод				
а) коаксиальные мосты	Полное сопротивление к.с.в.н.	2—2000 <i>ом</i>	До сантиметровых волн	1—10
б) волновые мосты		До 5		До 0,5
Оптические методы	Показатель преломления		До 1 <i>мм</i>	До 2
Интерференционные методы	Диэлектрическая проницаемость			0,5—9
Калориметрические методы	Тангенс угла потерь диэлектриков		До сантиметровых волн	2—20
Пондеромоторные методы				0,5—10

уравновешивания. Теория и практика электроизмерительных цепей уравновешивания, бесспорно, имеют большие достижения, причем с полным основанием можно считать, что в этой области Советский Союз занимает одно из ведущих мест.

Современное развитие электроизмерительных цепей связано как с разработкой или привлечением из других областей новых принципов построения, так и с развитием и созданием новых методов анализа и синтеза. Важными задачами в области методов измерения пассивных электрических параметров следует считать дальнейшее повышение точности измерения и быстродействия измерительной аппаратуры. Для повышения точности измерения существенное значение приобретает тенденции построения измерительных цепей из однородных структурных элементов (однородные делители напряжения, многоступенчатые однородные измерительные трансформаторы напряжения и тока и др.) [18, 48, 66, 99], а также из управляемых элементов с активными выход-

ными параметрами [16, 91]. Для повышения быстродействия необходимы дальнейшие исследования в области оптимизации алгоритмов уравнивания измерительных цепей и по использованию электронных систем уравнивания. Последнее требует особо всесторонних исследований, поскольку быстродействие измерительной аппаратуры с самоуравнивающимися цепями может в принципе достигать единиц микросекунд на одно измерение. Весьма актуальным является углубление исследований, связанных с отдельным измерением компонент комплексных величин. В частности, особо важными являются задачи разработки принципов построения измерительных цепей, пригодных для многопараметровых исследований сложных объектов. Большой интерес в этом отношении представляет отдельное измерение параметров при нелинейной связи между каждым из них, с одной стороны, и измеряемой величиной — с другой.

Успешное решение упомянутых выше проблем невозможно без дальнейшего развития методов анализа и синтеза электроизмерительных цепей. В частности, в области анализа целесообразны: а) разработка методов анализа основных метрологических характеристик измерительных цепей при учете вероятностных характеристик их элементов и воздействия помех; б) создание общей теории чувствительности и общей теории погрешностей электроизмерительных цепей; в) развитие методов анализа и принципов построения цепей уравнивания, предназначенных для измерения пассивных параметров при импульсных и спектральных воздействиях на исследуемый объект, а также для измерения случайно изменяющихся пассивных параметров; г) разработка методов анализа, позволяющих учесть одновременно метрологические, динамические и эксплуатационные характеристики устройств, основанных на данной измерительной цепи; д) изучение особенностей построения измерительных цепей с рассредоточенными функциональными узлами, а также разработка условий оптимального согласования первичных измерительных преобразователей и электроизмерительных цепей; е) разработка методов оценки предельных метрологических возможностей цепей и измерительных систем в целом. Особо актуальным следует считать развитие методов синтеза электроизмерительных цепей. В числе основных задач в этом направлении могут явиться: а) разработка методов синтеза, обеспечивающих получение не только оптимальной структуры, но и самой геометрической конфигурации цепи по заданным критериям; б) разработка методов синтеза функциональных блок-схем измерительных устройств, отвечающих заданным метрологическим, динамическим и эксплуатационным требованиям.

В заключение авторы выражают признательность д-ру техн. наук М. П. Цапенко, принявшему участие в обсуждении основных положений настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация радиоизмерений. Под ред. В. П. Балашова. М., «Советское радио», 1966.
2. Т. М. Алиев, А. М. Мелик-Шахназаров, И. Л. Шайн. Автоматические компенсационные устройства переменного тока. Баку, Азерб. гос. изд-во, 1965.
3. В. О. Арутюнов. Фазопостоянные измерительные цепи переменного тока и их применение. М., Стандартгиз, 1963.
4. А. А. Бранд. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, 1963.
5. Л. Н. Брянский. Точное измерение коэффициента стоячей волны напряжения и полных сопротивлений на сантиметровых волнах. М., Стандартгиз, 1963.

6. Г. Д. Бурдун, Р. А. Валитов, В. Д. Кукуш, Л. Н. Брянский, В. И. Проненко. Радиоизмерения на миллиметровых волнах. Харьков, Изд-во ХГУ, 1958.
7. М. А. Быков. Основные вопросы теории и практики точных измерений фазовых погрешностей у конденсаторов и безреактивных сопротивлений и конструирования образцовых «безпотерьных» конденсаторов и безреактивных мер сопротивлений. Автореф. докт. дисс. М., 1962.
8. А. Ф. Вальтер, К. Б. Карандеев, Е. В. Кувшинский, М. М. Михайлов, В. Т. Ренне. Испытания электроизолирующих материалов. М.—Л., ОНТИ, 1936.
9. М. А. Гаврилюк. Автоматическое уравнивание мостов переменного тока. Автореф. канд. дисс. Львов, 1964.
10. С. А. Гаряинов, И. Д. Абезгауз. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. М.—Л., «Энергия», 1966.
11. Г. В. Гессен. Теория и расчет мостов с индуктивно связанными плечами для измерения параметров конденсаторов при низких напряжениях. Л., Изд-во Военной Академии Связи, 1962.
12. Б. И. Горин, М. В. Локшин. Измерение диэлектрических потерь при наличии влияний. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
13. А. Ф. Городовский. Мосты постоянного тока. М.—Л., «Энергия», 1964.
14. Ю. И. Грибанов. Измерение слабых токов, зарядов и больших сопротивлений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
15. Ф. Б. Гриневиц. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
16. Ф. Б. Гриневиц, Е. Е. Добров, К. Б. Карандеев. Автокомпенсационные мостовые цепи.—Автометрия, 1965, № 5.
17. А. Л. Грохольский. Измерители добротности — куметры. Новосибирск, «Наука», 1966.
18. А. Л. Грохольский, К. М. Соболевский. Мосты переменного тока с индуктивно связанными плечевыми элементами.—Автометрия, 1965, № 1.
19. А. Гунд. Измерения при высокой частоте. М.—Л., ГНТИ, 1931.
20. Т. М. Гущина. Новые метрологические методы и аппаратура для точных измерений углов потерь. Автореф. канд. дисс. Л., 1962.
21. Р. М. Демидова-Панферова. Потенциометры для звуковых частот и применение их для измерений параметров электрических цепей. Автореф. канд. дисс. М., 1960.
22. А. Л. Дорофеев. Неразрушающие испытания методом вихревых токов. М., Оборонгиз, 1961.
23. Л. Г. Дубицкий. Радиотехнические методы контроля изделий. М., Машгиз, 1963.
24. Т. А. Журавлева. Некоторые вопросы анализа квазиуравновешенных мостов. Автореф. канд. дисс. Новосибирск, 1965.
25. Измерения в электронике. Справочник, т. 1, 2. Редактор-составитель Б. А. Доброхотов. М.—Л., «Энергия», 1965.
26. Д. М. Казарновский, Б. М. Тареев. Испытания электронизоляционных материалов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
27. Л. В. Каменев. Мостовые импульсные схемы для измерения электропроводности и диэлектрической проницаемости.—В сб. «Автоматизация химических производств». М., ГК Совета Министров СССР по химии, 1962.
28. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. Киев, Гостехиздат УССР, 1953.
29. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
30. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневиц, К. М. Соболевский, В. П. Шульц, Т. Н. Мантуш, М. А. Ахмаметьев, Е. А. Ковалев, Б. Н. Панков. Автоматический контроль электрических конденсаторов. Новосибирск, «Наука», 1967.
31. К. Б. Карандеев, Б. В. Карпюк, А. Н. Касперович, Б. М. Пушной, В. И. Рабинович, Б. С. Синицын, П. Е. Твердохлеб, М. П. Чапенко. Электрические методы автоматического контроля. М.—Л., «Энергия», 1965.
32. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамберггер. Квазірівноважені мости змінного струму. Київ, Вид-во АН УРСР, 1960.
33. К. Б. Карандеев, Г. А. Штамберггер. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
34. В. П. Карпенко. К расчету мостов переменного тока при повышенных частотах.—Труды конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1961.
35. В. В. Карпихин. Массовые измерения в производстве радиоконденсаторов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
36. И. Ф. Кифер. Испытание ферромагнитных материалов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
37. В. Ю. Кнеллер. Автоматическое измерение составляющих комплексного сопротивления. М.—Л., «Энергия», 1967.

38. В. А. Кочан. Точные мостовые измерения сопротивлений на постоянном токе, методы, эталоны. М., Стандартгиз, 1966.
42. М. И. Левин. Электрические измерения. Элементы теории электрических измерительных приборов. М., МЭИ, 1965.
43. Т. Н. Мантуш. Исследование способов и устройств логической обработки данных при автоматическом контроле и сортировке конденсаторов по электрическим параметрам. Автореф. канд. дисс. Новосибирск, 1966.
44. В. Н. Мильштейн. Энергетические соотношения в электроизмерительных приборах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
45. Е. Н. Мотора. Исследование электроизмерительных схем с отдельным уравниванием. Автореф. канд. дисс. Киев, 1966.
46. Л. Я. Мізюк. Електронні показники змінної напруги. Київ, Держтехвідав УРСР, 1960.
47. С. М. Нижний. Мосты переменного тока. М.—Л., «Энергия», 1966.
48. К. А. Нетребенко. Цифровые автоматические компенсаторы. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
49. А. Д. Нестеренко. Основы расчета электроизмерительных схем уравнивания. Киев. Изд-во АН УССР, 1960.
50. В. И. Обухов. Исследование систем автоматического контроля химического процесса с использованием квазиуравношенного моста. Автореф. канд. дисс. Минск, 1962.
51. П. П. Орнатский. Автоматические измерительные приборы. Киев, «Техніка», 1965.
52. Б. Н. Панков. Квадратурные квазиуравношенные мосты повышенной точности. Автореф. канд. дисс. Новосибирск, 1966.
53. Г. Ф. Панкратов. Методы измерения больших сопротивлений на постоянном токе.—ЭИКА, вып. 2. М.—Л., «Энергия», 1964.
54. В. А. Петровский. Теория и расчет неуравношенных мостов. Автореф. канд. дисс. Львов, 1953.
55. К. С. Полулях. Электронные резонансные измерительные приборы. Харьков, Изд-во ХГУ, 1961.
56. К. С. Полулях. Электронные измерительные приборы (аналоговые и цифровые). М., «Высшая школа», 1966.
57. В. С. Попов. Металлические подогреваемые сопротивления в электроизмерительной технике и автоматике. М.—Л., «Наука», 1964.
58. Курс электрических измерений, ч. 1. Под ред. В. Т. Прыткова, А. В. Талицкого. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
59. В. Г. Пустыльников. Вопросы общей теории измерений в технике многочастотного контроля. Автореф. докт. дисс. Л., 1967.
60. Б. И. Пучкин. Приклеиваемые тензодатчики сопротивления. М.—Л., «Энергия», 1966.
61. К. Г. Рего. Принципы построения фазовых и фазопостоянных модульных неуравношенных мостов переменного тока. Автореф. канд. дисс. Киев, 1965.
62. Н. М. Родигин, И. Е. Коробейникова. Контроль качества изделий методом вихревых токов. М., Машгиз, 1958.
63. М. С. Ройтман. Вопросы построения неуравношенных мостов переменного тока. Автореф. канд. дисс. Томск, 1962.
64. Ю. А. Скрипник. Принципы построения одноканальных модуляционных устройств для измерения комплексных величин. (Методы периодического сравнения переменных напряжений, токов и комплексных сопротивлений). Автореф. канд. дисс. М., 1960.
65. В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. Накладные и экранные датчики. Новосибирск, «Наука», 1967.
66. К. М. Соболевский. Электроизмерительные цепи уравнивания и элементы их общей теории.—Автометрия, 1965, № 2.
67. К. М. Соболевский. Обобщенный анализ и элементы синтеза электроизмерительных цепей уравнивания.—В. сб. «Проблемы электрометрии». Новосибирск, «Наука», 1967.
68. К. М. Соболевский, Ю. А. Шакола. Защита мостов переменного тока. Киев, Изд-во АН УССР, 1957.

69. Н. Н. Соловьев. Основы измерительной техники проводной связи, ч. 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.
70. Ф. Термен, Дж. Петтит. Измерительная техника в электронике. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
71. Ф. Тишер. Техника измерений на сверхвысоких частотах. Перевод с нем. И. В. Иванова. Под ред. В. Н. Сретенского. М., Физматгиз, 1963.
72. Электрические измерения. Общий курс. Под ред. А. В. Фремке. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
73. О. Хорна. Тензометрические мосты. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
74. М. П. Цапенко. Многомостовая измерительная схема переменного тока.—Измерительная техника, 1956, № 6.
75. М. П. Цапенко. Создание и исследование автоматических цифровых измерительных систем и их элементов. Авт. доклад по работам, представленным на соискание ученой степени докт. техн. наук. Новосибирск, 1963.
76. Е. Т. Чернышев, Е. Н. Чечурина. Состояние и перспективы развития метрологии в магнитных измерениях.—Измерительная техника, 1964, № 12.
77. Н. Г. Чернышева, Е. Г. Шрамков. Современное состояние и пути развития методов и аппаратуры для исследования ферромагнитных материалов.—Измерительная техника, 1967, № 3.
78. Б. И. Швецкий. Раздельное уравнивание мостов переменного тока. Автореф. канд. дисс. Львов, 1951.
79. К. П. Широков. Вопросы точности и повышения точности электроизмерительных приборов постоянного и переменного тока. Доклад об опубликованных работах, представленных к защите на соискание ученой степени докт. техн. наук. Л., 1963.
80. В. М. Шляндин, К. Н. Чернецов. Автоматизация контроля электрических цепей. М.—Л., «Энергия», 1966.
81. А. Я. Шрамков. Приборы сопротивления (мосты, компенсаторы и магазины сопротивления постоянного тока). Львов, Изд-во ЛьвПИ, 1959.
82. Электрические и магнитные измерения. Под ред. Е. Г. Шрамкова. М., ОНТИ, 1937.
83. Г. А. Штамбергер. Принципы построения и элементы общей теории измерительных цепей для аэроэлектроразведки. Автореф. докт. дисс. Новосибирск, 1967.
84. В. П. Шульц. Некоторые методы автоматического контроля и нормирования электрических конденсаторов. Автореф. канд. дисс. Новосибирск, 1966.
85. Н. Н. Шумиловский, Г. Г. Ярмольчук, Г. Г. Грабовецкий, М. А. Прусов. Метод вихревых токов для контроля производственных параметров. Фрунзе, «Илим», 1964.
86. С. Л. Эпштейн. Измерение характеристик конденсаторов. Емкость и тангенс угла потерь. М.—Л., «Энергия», 1965.
87. Точные электрические измерения. (Материалы конференции по точным электрическим измерениям). Перевод с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
88. C. T. Baldwin. Methods of electrical measurements. London—Glasgow, Blackie & Son Limited, 1952.
89. Blechsmidt. Präzisionsmessungen von Kapazitäten, Induktivitäten und Zeitkonstanten. Bd. I, II. VEB, Verlagstechnik, 1956.
90. P. Breant. Mesures électriques. 2 Ed. Eyrolles, Paris, 1957.
91. R. Calvert, J. Mildwater. Self-balancing Transformer Ratio Arm Bridges.—Electron. Engng., 1963, v. 35, № 430.
92. H. A. Clark, P. B. Vanderlyn. Double-ration a. c. Bridges with Inductively-coupled Ratio Arms.—Proc. IEE, 1949, v. 96, pt. III.
93. M. C. Gregor, R. D. Cutkosky, F. K. Harris, F. R. Kotter. New Apparatus at the National Bureau of Standards for Absolute Capacitance Measurement.—IRE Trans. Instrum., 1958, v. 1—7, № 3—4.
94. B. Haque. Alternating current bridge methods. 5-th ed. (revised). London, Pitman, 1959.
95. S. Haderka. Mereni rezonansnimi metodami. Praha, SNTL, 1963.
96. L. Hartshorn. Radio-frequency measurements by bridge and resonance methods. J. Wiley, 1940.
97. J. Krönert. Messbrücken und Kompensatoren, Bd. 1. München—Berlin, Verl. R. Oldenbourg, 1935.
98. C. W. Oatley, J. G. Yates. Bridges with Coupled Inductive Ratio Arms as Precision Instruments for the Comparison of Laboratory Standards of Resistance or Capacitance.—Pros. IEE, 1954, v. 101, pt. III.
99. J. C. Riley. A.-c. Measurements Using Ratio Techniques.—ISA Journal, 1965, v. 12, № 3.
100. A. M. Thompson. The Precise Measurement of Small Capacitances.—IRE Transactions on Instrumentation, 1958, v. 1—7, № 3—4.

*Поступила в редакцию
1 июня 1967 г.*