



МЕТРОЛОГИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

ТОМ 2

Москва-1972

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР
ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ**

**АКАДЕМИЯ НАУК
СОЮЗА СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК**

ВСЕСОЮЗНЫЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ



ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ

МЕТРОЛОГИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Том 2

ВЫПУСКИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАНЕЕ:

Метрология и измерительная техника. 1968. М., 1969

СЕРИИ ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ ПО МАШИНОСТРОЕНИЮ,
ВЫХОДЯЩИЕ В 1972 Г.

1. Автомобилестроение. Том 1
2. Машиностроительные материалы, конструкции и расчет деталей машин. Гидропривод. Том 4
3. Оборудование пищевой промышленности. Том 2
4. Ракетостроение. Том 3
5. Резание металлов, станки и инструменты. Том 2
6. Судостроение. Том 5
7. Технология и оборудование механосборочного производства. Том 2
8. Трикотажная, швейная и кожевенно-обувная промышленность. Том 3

Примечание редакции: с 1972 г. изменяется название серий «Итоги науки и техники» вместо «Машиностроение» — «Метрология и измерительная техника», а вместо года вводится номер тома.

МОСКВА 1972

ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

МЕТРОЛОГИЯ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Том 2

Научный редактор *Е. В. Кияев*

МОСКВА 1972

СЕРИЯ

МЕТРОЛОГИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР — докт. техн. наук, профессор *В. М. Шестопал*,
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ — канд. техн. наук *Н. К. Соловьев*.

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ: академик *И. И. Артоболевский*,
академик *А. И. Целиков*, докт. техн. наук *П. Н. Агалецкий*,
докт. техн. наук *А. З. Чулков*, канд. техн. наук *А. А. Добрынин*,
канд. техн. наук *Е. В. Кияев*, канд. техн. наук *П. Ф. Коноплев*,
канд. техн. наук *Б. М. Логунцов*, канд. техн. наук *М. И. Меклер*,
канд. с.-х. наук *Н. А. Минх*, канд. техн. наук *А. Т. Мицевич*,
канд. техн. наук *Н. Д. Сазонова*, канд. техн. наук *Ю. Н. Сорокин*,
канд. техн. наук *Е. В. Сукачева*, канд. техн. наук *А. Г. Файн*,
канд. техн. наук *А. В. Фомин*, канд. техн. наук *В. З. Фрейдберг*,
инж. *Л. Н. Виноградова*

Том 2 состоит из пяти обзоров, в которых освещаются состояние и перспективы развития наиболее важных методов и средств измерения в отдельных областях метрологии и измерительной техники. Из области механических измерений рассматриваются динамические измерения (измерения параметров движения и механических колебательных процессов), а также наиболее прогрессивные средства измерения линейных измерений — лазерные приборы и координатные измерительные машины. Из области измерения состава веществ рассматриваются совмещенные установки, состоящие из хроматографа, масс-спектрометра и вычислительной машины. Из теплотехнических приборов рассмотрена расходомерная аппаратура. Приведены данные по теоретическим и экспериментальным исследованиям, описаны схемы и конструкции приборов, методы и средства их проверки и градуировки. Из области электрических измерений освещено состояние и перспективы развития электрометрии, предназначенной для измерения малых и медленно меняющихся электрических величин в высокочастотных цепях.

В обзорах используются материалы, изданные в основном в 1968—1971 гг. Том рассчитан на научных и инженерно-технических работников метрологических организаций, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций и приборостроительных заводов.

Авторы: доктор техн. наук *П. Н. Агалецкий*, канд. техн. наук *М. И. Меклер*,
канд. хим. наук *В. С. Краснова*, канд. техн. наук *С. С. Кивилис*,
канд. техн. наук *А. М. Илюкович*.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для выполнения решений XXIV съезда КПСС по ускорению научно-технического прогресса путем широкого использования возможностей, создаваемых научно-технической революцией, необходимо обеспечить передачу заинтересованным отраслям и предприятиям данных об отечественных и мировых достижениях и передовом опыте.

Целью настоящего сборника является показ результатов, полученных в актуальных, быстроразвивающихся и практически важных областях измерительной техники.

Первый том издания «Итоги науки и техники» по метрологии и измерительной технике», выпущенный в 1968 г., был посвящен направлениям развития метрологии и измерительной техники в СССР и за рубежом в целом, в нем рассматривались тенденции, характерные для всех областей измерений. В настоящем, втором томе рассматриваются современное состояние и перспективы развития отдельных областей измерения, что дало возможность более подробно остановиться на характерных для соответствующих областей тенденциях развития.

Особое внимание обращено на описание методов и средств измерения, основанных на новых физических принципах, получающих в настоящее время все большее практическое применение и открывающих новые возможности повышения метрологических и эксплуатационных характеристик приборов и способствующих автоматизации процессов измерений.

Так, в обзоре «Динамические измерения механических величин» наибольшее внимание уделено преобразователям, в которых использованы новые физические эффекты и явления, автоматизации обработки результатов измерений, а также метрологическому обеспечению точности динамических измерений.

Из области линейных измерений рассмотрены наиболее современные и перспективные для этой области средства — лазерные приборы и координатные измерительные ма-

шины, а также применение для автоматизации процессов измерения вычислительной техники.

В качестве примера повышения производительности и точности методов анализа состава рассматривается одна из характерных для этой области измерительной техники тенденция совмещения аппаратуры — комплексные установки, состоящие из хроматографа, масс-спектрометра и вычислительной машины.

В области расходомерии наибольшее внимание уделено новым для этих измерений физическим принципам и основанным на них приборам — электромагнитным, ультразвуковым, лазерным, корреляционным, ядерно-резонансным расходомерам.

В обзоре по электрометрии показано современное состояние и тенденции развития, а также области применения электрометрической аппаратуры, требования к ее метрологическим и эксплуатационным характеристикам, особенно ее производства. Рассматриваются последние достижения в области электрометрии, проблемы, стоящие перед разработчиками аппаратуры, и пути решения этих проблем.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

П. Н. Агалецкий

ВВЕДЕНИЕ

Гигантское расширение объема измерений, производимых в настоящее время во всех областях человеческой деятельности; необычайное увеличение количества измеряемых величин, характеризующих свойства изделий и процессов; расширение диапазонов измерений от сверхмалых до сверхвысоких значений; необходимость проводить одновременные измерения ряда различных величин и их взаимосвязи с целью нахождения зависимости между этими величинами; необходимость измерять быстрые изменения величин и характеристик процессов и сложных систем; усложнение условий измерений; необходимость обеспечивать высокую точность с учетом различных внешних воздействий или помех — вот те важнейшие факторы, которые обусловили бурное развитие измерительной техники и одновременно выдвинули ряд новых проблем перед метрологией в деле обеспечения достоверности и сопоставимости результатов измерений.

Среди измерений механических величин особое место занимают измерения величин, характеризующих параметры движения и механические колебательные процессы [1].

В последние годы опубликован ряд работ, посвященных теории этих измерений, новым методам и аппаратуре для их выполнения, а также методам и средствам метрологического обеспечения, позволяющим получать результаты этих измерений в установленных единицах с необходимой точностью.

Современному состоянию и тенденциям развития метрологии и измерительной техники в области измерений параметров движения и механических колебательных процессов посвящен настоящий обзор.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В тот период, когда в подавляющем большинстве случаев производили измерения физических величин в стабильном статическом режиме, вопросы метрологического обеспечения измерений были разработаны только для двух видов измерений: прямых и косвенных. Для прямых измерений характерно, что в измерительном эксперименте непосредственно участвует измеряемая физическая величина определенного размера. Результат прямых измерений получают либо путем сравнения измеряемой величины с мерой известного значения, либо с помощью измерительного прибора, предварительно проградуированного по соответствующим образцовым средствам измерений в единицах измеряемой величины.

При выполнении косвенных измерений измеряемая величина непосредственно в измерительном эксперименте не участвует. Измерения этого вида позволяют определять значение физической величины в установленных для нее единицах с помощью приборов для прямых измерений других величин, с которыми в наблюдаемом объекте косвенно измеряемая величина находится в известном соотношении.

Как прямые, так и косвенные измерения служат для получения в принятой единице значения одной физической величины определенного размера. Результат этих измерений выражают именованным числом.

Необходимость расширения наших представлений о видах измерений возникла тогда, когда перед метрологами был поставлен вопрос о метрологическом обеспечении **динамических измерений**, т. е. измерений физических величин в процессе их изменения во времени.

Динамические измерения являются частным случаем одновременного измерения двух или нескольких физических величин в их взаимосвязи.

В работах [2, 3] было предложено рассматривать в качестве самостоятельного вида измерений одновременные измерения различных физических величин в их взаимосвязи, выполняемые с целью нахождения зависимости между ними. Авторы предложения называли этот вид измерения **совокупными**. Позже определение этого вида измерений под названием **совместные измерения** было дано в Государственном стандарте СССР 16263—70 поз. 4.5: совместные измерения — производимые одновременно измерения двух или нескольких неодновременных величин для нахождения зависимости между ними [8].

Введение в метрологию понятия о совместных измерениях не только расширило и систематизировало наши представле-

ния об измерениях, но позволило с единых методических позиций решать ряд принципиально новых вопросов метрологического обеспечения этого весьма распространенного в практике вида измерений [7].

Физические величины количественно оцениваются посредством измерений как в отдельности, так и во взаимосвязи с другими физическими величинами.

Во многих случаях количественная оценка зависимости между различными физическими величинами представляет существенный интерес для практики. Примерами этому могут служить: градуировочная зависимость измерительного прибора, выражающая связь между отсчетом показаний прибора в условных единицах и измеряемой величиной, в принятых для нее единицах; зависимость между расстоянием, пройденным движущимся телом и протекавшим временем, зависимость между температурой тела и его линейными размерами и т. п.

Целям количественного определения зависимостей между конкретными физическими величинами служат **совместные измерения**.

При выполнении дискретных совместных измерений величин Y и X одновременно путем прямых или косвенных измерений находят значения величин Y_1 и X_1 , затем, изменяя в заданных пределах размеры этих величин, одновременно находят новые значения величин Y_2 и X_2 и, продолжая в таком же порядке измерения, получают дискретные ряды совмещенных во времени значений величин Y_i и X_i . В этих рядах каждому значению величины X_i будет соответствовать значение величины Y_i и, следовательно, результаты совместных измерений позволяют найти зависимость между величинами $Y=F(X)$, выраженную в форме таблицы, графика или уравнения.

При проведении совместных измерений учитывают характер искомой зависимости и принимают решение о том, как проводить аппроксимацию полученной совокупности измеренных значений: по всей совокупности или же по отдельным ее участкам, а также, какого вида функцию целесообразно принять для аппроксимации.

Обработку результатов дискретных совместных измерений обычно осуществляют по способу наименьших квадратов [9] и сводят к нахождению числовых значений коэффициентов интерполяционного уравнения заданного вида, определению среднего квадратического отклонения измеренных значений от найденной зависимости и к оценке точности коэффициентов интерполяционного уравнения. Эти коэффициенты являются именованными числами; единицы, в которых они выражены, являются производными от единиц, в которых измерены величины Y и X .

Классическим примером совместных измерений, не утратившим до настоящего времени своего методического значения, является выполненная во ВНИИМетрологии (Ленинград) работа по абсолютному определению ускорения свободного падения тел (g) с помощью способа совмещения свободного и несвободного падения [27].

Значение g находили из результатов совместных измерений двух величин — промежутков времени t и отрезков пути l , проходимых свободно падающим телом.

Совместные измерения производили путем регистрации свободного падения с помощью периодических временных отметок, задаваемых импульсами, имеющими точно известную частоту повторений f .

В опытах со свободным падением тела отмечали по высоте n последовательных уровней, на которых свободно падающее тело находилось в моменты времени, задаваемые сигналами частоты f .

Измеряя расстояния между первой и последующими отметками, получали n значений отрезков пути l_i , пройденных свободно падающим телом за промежутки времени, равные соответственно $T, 2T, 3T, \dots, nT$, где $T = \frac{1}{f}$. Ряд измеренных значений l_i позволяет составить систему уравнений вида $l_i = A + B(iT) + C(iT)^2$.

Решение по способу наименьших квадратов этой системы уравнений позволяет определить значение $g = 2Cf^2$ и оценить погрешность этого значения.

Особого рассмотрения заслуживают совместные измерения, у которых одной из измеряемых величин служит время. Эти измерения, позволяющие определять временные зависимости, называют также **динамическими измерениями**. Результат совместных измерений содержит дискретную или непрерывную совокупность взаимозависимых значений нескольких величин, измеренных в соответствующих единицах.

Найденная путем совместных измерений зависимость между величинами обладает многими свойствами. Одни из этих свойств могут рассматриваться как физические величины, производные от величин, измеряемых при совместных измерениях, и быть объектами прямых или косвенных измерений. Другие же свойства, так называемые оценки, находят путем соответствующей обработки результатов измерений.

Например, при выполнении совместных измерений ускорения и времени в механическом колебательном процессе можно с помощью регистрирующего устройства на выходе измерительного преобразователя акселерометра получить в графическом виде зависимость $a = f(t)$, но можно путем

дальнейшего преобразования сигнала измерительной информации о результате совместных измерений получать на выходе прибора значения величин, характеризующих отдельные свойства зависимости $a=f(t)$: пиковые или эффективные значения ускорения, спектральную плотность и др.

Усложнение требований к измерительной информации, необходимой потребителю для математического анализа, используемого при описании исследуемых процессов, вызвало соответствующее усложнение требований к измерительной аппаратуре.

В аппаратуре для совместных (и в том числе для динамических) измерений во многих случаях используют сочетание собственно измерительных средств, реагирующих на измеряемую физическую величину и выдающих соответствующие сигналы измерительной информации, и вычислительных средств, с помощью которых производится дальнейшая обработка полученной измерительной информации.

При совместных измерениях величин, характеризующих, например, вибрацию, последняя может рассматриваться как процесс периодический, полигармонический, импульсный, переходный, случайный и пр. В этих случаях исследователя могут интересовать мгновенные значения смещения, скорости, ускорения или резкости, размахи, пиковые и эффективные значения, спектральный состав, крутизна нарастания и спада, вероятностные характеристики и пр.

В современной аппаратуре для измерения величин, характеризующих разнообразные механические колебательные процессы (вибрации, акустические колебания, переменные усилия и деформации, пульсирующие давления и т. п.) различными являются только первичные измерительные преобразователи (датчики), с помощью которых измеряемые механические величины преобразуются в соответствующие электрические сигналы-носители измерительной информации. Дальнейшие преобразования измерительной информации, получаемой от датчиков, производят с помощью соответствующей электроизмерительной аппаратуры.

Аппаратура для измерения параметров механических колебательных процессов получает все новые и новые области применения.

Развитие современной техники неразрывно связано с ростом интенсивности и расширением сферы применения вибрационных и ударных процессов [6].

Полезное действие вибрации и удара используется в станках и инструментах (вибропогружатели и виброуплотнители, станки ударной штамповки), для упрочнения металлов и др. Но не менее велика и область вредного действия вибрационных и ударных нагрузок: она охватывает почти все

виды летательных аппаратов и транспортных средств, энергетические, металлообрабатывающие и многие другие машины. Вибрация, особенно в сочетании с ударом, вызывает интенсивный усталостный износ механизмов, создает шум, снижающий работоспособность людей; при достаточной интенсивности непосредственное воздействие вибраций на организм человека может вызвать вибрационную болезнь.

Достижение требуемой надежности объектов современной техники, обеспечение высокой эффективности соответствующих технологических процессов, а также организация охраны здоровья требуют интенсивного развития техники измерения параметров вибрации и удара — ее теоретических основ, средств измерения, метрологического обеспечения измерений в этой области.

В состав средств измерения параметров вибрации и удара обычно входят измерительный преобразователь (датчик), согласующий усилитель и прибор для отсчета, регистрации или анализа результатов измерения, состоящие из электро-механических и чисто электронных элементов.

Виброизмерительная аппаратура и ее элементы используются в системах управления, контроля и сигнализации, динамической балансировке роторов, навигации и пр. Сюда, в частности, относятся установки для вибрационных, прочностных и усталостных испытаний с автоматическим программированием; вибраторы, самонастраивающиеся в зависимости от нагрузки и условий внешней среды; силовые и прецизионные гироскопы с коррекцией от колебательного движения элементов системы; акселерометрические устройства систем инерциальной навигации; различные типы вибрационных гироскопов; сигнализаторы обвалоопасных состояний выработок в горной промышленности; автоматизированный контроль прецизионного изготовления зубчатых колес и пр.

Особую, исключительно важную область составляют методы и средства измерения механических величин, характеризующих процессы, происходящие в биомедицинских объектах [10, 11, 12]. К этим измерениям относятся измерение параметров, характеризующих механическую деятельность сердца и сосудов, дыхательной и нервно-мышечной систем. К параметрам, характеризующим движение сердца и крупных сосудов, возникающим при работе сердца, относятся изменения размеров сердца и сосудов, скорости движения мышцы и клапанов сердца, перемещения стенок артерий и вен.

Изменение размеров сердца и крупных сосудов регистрируют при помощи электрокимографии по перемещениям отдельных участков контура сердца или сосудов, получаемых на флюоресцирующем экране при их рентгеновском просвечивании и преобразуемых в электрический сигнал при помо-

щи фотоэлектрического преобразователя с щелевой диафрагмой.

Скорость мышцы и клапанов сердца измеряют при помощи ультразвуковой доплеровской кардиографии по величине девиации частоты непрерывного УЗ-сигнала, отраженного от мышцы и клапанов сердца при их локации. Выбирая частоту излучения ультразвука в пределах 2—3,5 Мгц, получают девиацию частоты от движения клапанов сердца 500—1000 гц, а от мышцы сердца 100—200 гц.

Расстояние до лоцируемых отделов сердца (клапанов) измеряют при помощи методики ультразвуковой импульсной кардиограммы по временным интервалам между зондирующими и отраженными УЗ-импульсами. По полученным кривым ультразвуковой кардиограммы определяют скорость движения клапанов сердца.

Перемещения стенок артерий и вен регистрируют при помощи емкостных, пьезоэлектрических и тензометрических преобразователей.

Величину скорости распространения пульсовой волны, квадрат которой пропорционален модулю упругости артериальной стенки и характеризует ее тонус, определяют как отношение расстояния между двумя точками регистрации сфигмограмм по длине артерии ко времени сдвига фаз между ними.

Параметры механических колебаний сердца и крупных сосудов: смещение грудной клетки, перемещение, скорость и ускорение тела, перемещение центра тяжести тела при сердечной деятельности измеряют с помощью ряда разработанных методик. Сущность методики фонокардиографии состоит в регистрации при помощи направленного микрофона акустических колебаний сердца и крупных сосудов в диапазоне 20—1000 гц, сопровождающих их механические колебания и передающихся через переднюю стенку грудной клетки. Методика кардиографии представляет собой контактную регистрацию инфранизкочастотных составляющих колебаний стенки грудной клетки (в диапазоне частот 0,5—20 гц).

Для снятия кардиограмм и фонокардиограмм используют воздушные и контактные микрофоны. Наибольшее распространение получили динамические и пьезоэлектрические микрофоны.

По методике кинетокардиографии регистрируют скорость или ускорение стенки грудной клетки, возникающие при механических колебаниях сердца, при помощи укрепляемого на груди датчика. Регистрация ускорения стенки грудной клетки позволяет судить о силе сердечных сокращений.

Чувствительность часто применяемого для этих измерений пьезоэлектрического акселерометра составляет 8 мкв/см·сек⁻², а собственная частота 800 гц.

Сущность методики баллистокардиографии состоит в измерении либо параметров движения тела (перемещение, скорость, ускорение) относительно неподвижной опоры, на которой оно помещается, либо параметров совместного движения подвижной опоры с телом, возникающих за счет реактивных сил при механических колебаниях сердца.

Сущность методики динамокардиографии состоит в регистрации вызываемых сердечной деятельностью смещений центра тяжести тела при помощи специальной платформы, устанавливаемой под грудной клеткой исследуемого. Подвижная часть платформы покоится на четырех упругих стальных кольцах, деформации которых, воспринимаемые тензоэлементами, оказываются пропорциональными смещениями центра тяжести тела по его продольной и поперечной осям.

Группа параметров, характеризующих движение крови в сердце и сосудах, включает в себя давление крови в сердце и крупных сосудах, артериальное и венозное давление крови, изменение объема органов при кровенаполнении, скорость кровотока, минутный объем кровообращения и циркулирующий (активный) объем крови.

Давление крови в сердце и крупных магистральных сосудах измеряют при помощи введения в исследуемую полость катетера (полый нейлоновой или пластмассовой трубки), гидравлически связанного с электроманометром, либо зонда с миниатюрным вмонтированным в него датчиком давления.

Артериальное давление крови является одним из параметров, наиболее часто используемых в исследованиях и практической медицине для различных целей. Различают минимальное (или диастолическое) давление; боковое (или систолическое) давление и максимальное давление, имеющее место при полном перекрытии. Для измерения давления используют как прямые, так и косвенные методы.

Для измерения скорости кровотока применяют УЗ-доплеровский метод, УЗ-импульсный метод, электромагнитный метод и др.

При физиологических исследованиях определяют кинематические параметры мышечных движений (перемещение, скорость, ускорение).

Приведенные нами примеры характеризуют разнообразие условий, в которых в настоящее время решают в принципе одни и те же задачи динамических измерений механических величин.

Это разнообразие условий проведения измерений обусловило появление огромного количества типов первичных измерительных преобразователей механических величин в электрические.

В литературе появляются описания новых конструкций датчиков, использующих различные физические явления для электромеханических преобразований.

Сюда относится эффект Холла [14], электрокинетический и хемотронный эффект, эффект Доплера [22, 23], пьезорезистивный эффект, эффект Мессбауэра, радиоактивные изотопы. Созданы новые конструктивные и схемные решения аппаратуры для измерения параметров механических колебаний с использованием электретов, емкостных, токовых и магнитострикционных датчиков и электронно-ионных приборов как вакуумных, так и полупроводниковых.

Однако промышленное применение перечисленных методов и приборов незначительно. Оно ограничивается выпуском нескольких типов датчиков — емкостных, токовых и использующих пьезорезистивный эффект [13].

Пьезорезистивные акселерометрические датчики рекомендуется применять для измерения низкочастотных вибраций (0—5 *гц*) и ударов большой длительности (от 10 *мсек* и выше).

В основной массе аппаратуры для измерения параметров вибрации, выпускаемой как в СССР, так и за рубежом, по-прежнему, используются электродинамические, индуктивные (трансформаторные), пьезоэлектрические и тензометрические датчики.

Наибольшее распространение получили пьезодатчики, которые в настоящее время по совокупности свойств лучше всего удовлетворяют разнообразным требованиям практики.

Непрерывное совершенствование пьезодатчиков идет по пути повышения температуроустойчивости [15], прочности, помехоустойчивости (особенно к неизмеряемым компонентам вибрации), увеличения чувствительности, собственной частоты и собственной емкости и уменьшения габаритов и массы. При разработке пьезодатчиков широко используются новые материалы, оригинальные конструктивные и схемные решения, передовая технология и весьма тонкие методы расчета.

Большой эффект в пьезоэлектрических акселерометрах приносит использование встроенных в измерительный преобразователь согласующих усилителей. Будучи выполненными на полевых транзисторах, эти усилители позволяют полностью исключить помехи от «кабельного эффекта», что расширяет область применения преобразователей в сторону инфранизких частот.

Уменьшение емкости линии делает возможным применение монокристаллических пьезоэлектриков, в частности полупроводниковых высокоактивных материалов, что существенно улучшает стабильность характеристик преобразователя.

Одним из путей совершенствования характеристик индукционной аппаратуры является применение коррекции ее по-

казаний с помощью дополнительных чувствительных элементов, позволяющих моделировать динамическую погрешность измерения.

Заслуживают внимания системы измерения параметров инфранизочастотных процессов широкополосными пьезоэлектрическими системами, содержащими электрометрические усилители [18]. Они открывают возможность производить их градуировку по ускорению силы тяжести, что существенно повышает точность измерения малых ускорений.

Наряду с пьезоэлектрическими преобразователями широкое применение получили тензорезистивные преобразователи с металлическими проволочными решетками. Преимущества и технические характеристики преобразователей этого типа общеизвестны.

Менее известны свойства полупроводниковых тензорезистивных преобразователей, которые пока еще не получили широкого распространения. Пьезорезистивный эффект у полупроводникового кристалла проявляется в том, что у кристалла, находящегося под действием внешней силы, нарушается симметрия структуры и изменяются механизм проводимости кристалла и его электрическое сопротивление [28].

В зависимости от свойств кристалла и от направления действия внешней силы сопротивление кристалла может увеличиваться или уменьшаться. Количественные соотношения между приложенной силой и изменением электрического сопротивления получают на основе зонной теории.

Для полупроводниковых тензорезистивных преобразователей коэффициент тензочувствительности лежит в пределах от 100 до 200, в то время как у преобразователей с металлическими проволочными решетками он не превышает 4—5. Путем введения в полупроводниковые кристаллы легирующих добавок с различными свойствами можно получать полупроводниковые преобразователи с положительным или с отрицательным коэффициентом тензочувствительности. В полупроводниковых тензорезистивных преобразователях наибольшее распространение получили кристаллы Ge и Si.

Чувствительные элементы полупроводниковых тензорезистивных преобразователей изготавливают путем механической обработки с последующим травлением или методом осаждения монокристаллов из газовой фазы.

Метод осаждения из газовой фазы позволяет получать тензочувствительные элементы с высокой механической прочностью и высокими упругими свойствами.

Осаждение обычно производится на поверхность кварцевой трубки. Элементы имеют диаметр 20—50 *мкм* и длину ~6—8 *мм*. Крепление тензорезисторов осуществляют с помощью цемента.

Недавно разработаны диффузионные кремневые тензорезистивные мембраны. Область применения тензорезистивных мембран ограничивается их чувствительностью к воздействию паровых химических веществ. Обычно тензорезистивные мембраны закрепляют на металлической мембране.

Тензорезистивные преобразователи изготавливают также путем напыления тонких полупроводниковых пленок на стеклянные, кварцевые и слюдяные подложки.

Такие преобразователи имеют коэффициент тензочувствительности порядка 30—50, т. е. значительно выше, чем преобразователи с металлическими проволоочными решетками, но много меньше, чем обычные полупроводниковые преобразователи. Температурные характеристики пленочных преобразователей пока еще мало изучены.

Как проволоочные так и полупроводниковые тензометрические преобразователи чувствительны к температуре. Однако температурный коэффициент сопротивления полупроводниковых материалов, применяемых в тензорезистивных преобразователях, значительно больше температурного коэффициента сопротивления металлов, используемых в проволоочных преобразователях. Влияние температуры на параметры полупроводниковых тензорезистивных преобразователей можно значительно уменьшить путем введения легирующих добавок. Обычно в преобразователях применяют слабо легированные полупроводниковые материалы с удельным сопротивлением $0,001—1,0 \text{ ом} \cdot \text{см}$, а температурные погрешности исключают или уменьшают схемными и конструктивными методами, например, путем использования нескольких чувствительных элементов.

Наибольшее применение полупроводниковые тензорезистивные элементы получили в преобразователях давления. Эти преобразователи имеют высокую чувствительность, большую надежность и малые габариты. Микроминиатюрные преобразователи давления с полупроводниковыми тензорезистивными элементами применяются в медицинской аппаратуре.

Эти преобразователи имеют чувствительность порядка 25 мв на 100 мм рт. ст. и рабочий диапазон в несколько сотен мм рт. ст.

Промышленные преобразователи имеют рабочий диапазон от 0 до 700—1400 кгс/см² и чувствительность порядка 0,15—0,70 мв/кгс·см⁻².

Самокомпенсирующиеся полупроводниковые преобразователи имеют максимальную рабочую температуру ~70° С. Схемные методы компенсации температурных погрешностей позволяют расширить рабочий диапазон преобразователей приблизительно до 100° С.

Дрейф нуля составляет приблизительно 0,1% на 1° С. Чувствительность преобразователей изменяется не более чем на 0,1% на 1° С. Погрешности из-за нелинейности и гистерезиса не превышают 1 % предела измерений. Диапазон измерений преобразователей с кремниевыми мембранами составляет от 0 до 140—210 кгс/см².

В новых разработках западноевропейских фирм наблюдается тенденция к увеличению выпуска аппаратуры с миниатюрными индуктивными датчиками, работающими на высокой несущей частоте [40].

Удельный вес чисто механических или оптико-механических приборов весьма мал и продолжает снижаться. Однако эти приборы с успехом применяют в некоторых простейших случаях, особенно если они встроены в стационарные установки — производственные, испытательные или наладочные (например, для балансирования).

Большое значение получает автоматизация процесса измерения и обработки измерительной информации. Она совершенно необходима, когда измерения производятся на труднодоступных объектах по сложной программе, а также если требуется производить большое число однотипных и притом сравнимых между собой измерений с исключением личной ошибки экспериментатора (например, в производственных условиях для контроля продукции, при исследовании прочностных свойств материалов и т. п.). Автоматизация процесса измерения способствует повышению надежности аппаратуры и допускает ее эксплуатацию менее квалифицированными операторами [29, 32, 35].

При расчетной и графической обработке осциллограмм большая часть измерительной информации теряется. Использование современных автоматических анализаторов спектра и корреляторов позволяет с ничтожной затратой труда и времени полноценно обрабатывать первичную измерительную информацию, получать сложные характеристики колебательных процессов и в необходимых случаях исследовать причины возникновения колебаний [39].

Автоматизация анализа результатов измерения особенно важна при регистрации колебаний, рассматриваемых как случайный процесс. Без современных автоматических анализаторов, используемых для анализа измерительной информации, записанной обычно на магнитной ленте, получение вероятностных оценок было бы не только очень сложной, трудоемкой и длительной операцией, но и не приводило бы к достаточно точным и повторяющимся результатам [25].

В качестве примера приведем универсальный анализатор ударных процессов типа SM-30, выпускаемый народным предприятием ГДР Meßelektronik [19].

Анализатор стационарных и нестационарных механических процессов предназначен для работы с приборами серии SM, изготавливаемых предприятием, и обеспечивает регистрацию измеряемых сигналов в соответствующих механических единицах.

В анализаторе используются 2 типа резонаторных устройств, амплитудно-частотные характеристики которых аналогичны характеристикам фильтра нижних частот и узкополосного фильтра.

Основная частота каждого из резонаторных устройств может плавно или дискретно регулироваться в пределах от 2 гц до 2 кгц.

Анализатор служит для частотного анализа колебательных и ударных процессов.

Спектральный анализ периодических процессов осуществляется с помощью перестраиваемых резонансных контуров по общеизвестной методике.

Анализ стохастических процессов производится на основе измерения спектральной плотности мощности анализируемого механического параметра.

Анализ ударных процессов может быть разделен на анализ ударного спектра и определение гармонических составляющих, соответствующих разложению функции ударного сигнала в тригонометрический ряд.

Для первичной обработки экспериментальных данных наряду с универсальными ЭВМ находят применение многоканальные анализаторы, представляющие собой специализированные электронные цифровые устройства для классификации и запоминания данных [29]. Ввод и вывод данных может производиться в аналоговой и цифровой форме. Анализаторы содержат аналого-цифровой преобразователь с усилителем, многоканальное запоминающее устройство, устройство индикации, устройство вывода данных.

Многоканальные анализаторы применяются для исследования медленно изменяющихся напряжений в качестве цифровых осциллографов. Они обеспечивают запоминание значений сигнала в функции времени.

Получили применение многоканальные анализаторы при статистических исследованиях, например при экспериментальном определении функций распределения случайных процессов, автокорреляционных и взаимных корреляционных функций.

С помощью автоматических аналоговых анализаторов случайных колебаний, предназначенных для обработки аналоговых сигналов в частотном диапазоне от 2 гц до 40 кгц, выполняют следующие операции [32].

1. Вычисление зависимости от частоты среднего значения амплитуды двух выпрямленных аналоговых сигналов.

2. Вычисление зависимости от частоты пиковых значений амплитуд двух аналоговых сигналов.

3. Вычисление мощности двух аналоговых сигналов в функции частоты.

4. Вычисление спектральной плотности мощности двух аналоговых сигналов.

5. Вычисление взаимной спектральной плотности двух аналоговых сигналов.

6. Вычисление зависимости от частоты отношения амплитуд двух аналоговых сигналов (вычисление коэффициента передачи).

7. Вычисление зависимости отношения мощностей двух аналоговых сигналов от частоты.

8. Вычисление действительной и мнимой части передаточной функции.

Результаты всех этих вычислений выдаются в виде диаграмм Боде. Результаты операций 5 и 6 могут быть представлены также в виде диаграмм Найквиста.

Разнообразные типы анализаторов и счетно-вычислительных устройств, используемых для анализа и обработки измерительной информации, не относятся к категории измерительных средств; контроль за правильностью их функционирования не входит в круг вопросов, рассматриваемых метрологией, а относится к вопросам вычислительной техники.

Одной из тенденций в разработке современной аппаратуры для динамических измерений является ее миниатюризация. Миниатюризация делает аппаратуру более портативной и позволяет использовать ее на легких объектах, особенно на подвижных. Миниатюризация датчиков дает возможность измерения колебаний более легких объектов без опасения исказить результаты измерений обратным действием колебательной системы датчика на объект измерений [17, 18].

При малых габаритах виброметрических датчиков строже локализуется точка измерения на объекте и, кроме того, малогабаритные датчики позволяют выбирать точки измерения в таких участках объекта, которые недоступны для крупных датчиков.

В настоящее время находят применение пьезоэлектрические датчики, масса которых менее 2 г. Правда, это снижение массы датчиков происходит за счет уменьшения их чувствительности, но это компенсируется общим усовершенствованием усилительной, измерительной и регистрирующей аппаратуры. Можно ожидать еще дальнейшей миниатюризации датчиков, так как это необходимо для решения многих весьма важных для практики задач.

Внедрение бесконтактных методов измерения радикально устраняет погрешности измерения, связанные с нагружением объекта исследования более или менее тяжелым датчиком

(например, тонких оболочек, пленок, тросов, шнуров, нитей и т. п.), и облегчает проведение измерений в труднодоступных местах (например, в местах высоких температур, сильных излучений, вредных паров) [23, 30].

К бесконтактным методам, успешно применяемым для измерения параметров движения, можно отнести УЗ-методы [26], методы радиолокации, методы голографической интерферометрии [31, 35].

Использование эффекта Допплера дает возможность измерять скорости перемещения зеркальных поверхностей в диапазоне $10^{-6} \div 500$ м/сек и скорости незеркальных поверхностей в диапазоне $10^{-3} \div 500$ м/сек при удалении поверхности от измерительного прибора на несколько сотен метров.

Гармонический анализ сигнала биений, промодулированного по частоте вследствие эффекта Допплера, позволяет измерять амплитуды механических колебаний незеркальных поверхностей в диапазоне от нескольких микрометров до миллиметра на расстояниях до $10 \div 20$ м [22].

Применение лазера дает возможность распространить метод Допплера (обычно используемый с микроволновой техникой), используемый для динамических измерений путь — время и скорость — время, на оптический диапазон длин волн. Оптическое устройство, работающее на основе принципа Допплера, представляет собой интерферометр Майкельсона с He-Ne-лазером в качестве источника излучения. Допплеровский сигнал биения возникает на выходе ФЭУ в результате гетеродинирования референтного и объектного пучков. При этом частота сигнала биения f_D и составляющая скорости объекта v' связаны зависимостью $f_D = \frac{2v'}{\lambda}$,

где λ — длина волны излучения лазера [30].

В [23] описаны способы измерения скорости ракет, основанные на одном из следующих принципов: а) совмещение доплеровского сигнала смещения с таким же сигналом, но имеющим некоторую постоянную задержку по времени, в результате чего появляется возможность определения ускорения объекта по супергетеродинному сигналу; б) использование пассивного резонатора Фабри-Перо в качестве частотного дискриминатора. Основные различия между этими способами: а) первый — активный; фототранзистор и телеметрический передатчик установлены на ракете; б) второй — пассивный; после отражения от ракеты 2 световых пучка вызывают гетеродинирование на катоде ФЭУ.

В [24] описаны результаты эксперимента по исследованию вибраций турбинных лопаток методами голографической интерферометрии.

Помимо обычных методов голографической интерференции с двойной экспозицией и голографической интерферен-

ции в реальном масштабе времени для изучения фаз колебаний лопаток используются методы голографической интерференции со стробированием лазерного пучка на частоте, близкой к частоте вибраций объекта. При этом наблюдается картина интерференции между первичным состоянием объекта и состоянием в момент времени, определяемый моментом подачи лазерного излучения на объект. Если частота стробирования лазера слегка отличается от частоты вибраций, то фаза второго состояния непрерывно меняется и можно наблюдать изменение деформаций во времени, однако масштаб времени при этом зависит от сдвига частот. Для стробирования лазерного луча используются оптико-акустические затворы.

Для измерения параметров вибрации в производственных или лабораторных условиях, в частности вибрации вращающихся валов, применяются портативные бесконтактные щупы с емкостными или токовихревыми датчиками.

Большие удобства в производстве и применении многоцелевой измерительной аппаратуры обеспечивается изготовлением ее в виде отдельных функциональных блоков. Дело в том, что многие блоки выполняют одинаковые функции в аппаратуре различного назначения. В качестве примеров таких блоков можно назвать датчики с соединительными проводами и крепежными деталями; предварительные усилители или катодные повторители; автоматические или ручные коммутаторы, осуществляющие заданную программу измерений в различных точках; интегрирующие, дифференцирующие и другие счетно-решающие устройства; масштабные усилители, аттенюаторы, мостовые схемы, задающие генераторы, модуляторы, различные виды измерительных приборов или регистрирующих устройств, анализаторы; счетчики; сигнализаторы и пр.

Комплектация аппаратуры из функциональных блоков не только допускает ее более полное и гибкое использование, но и предоставляет больше чисто эксплуатационных удобств в отношении расположения, монтажа, замены и ремонта элементов и деталей.

Остановимся далее на тех новых направлениях, которые определились в деле метрологического обеспечения динамических измерений.

Совершенствование измерительной аппаратуры, широкое использование в ней средств автоматики и вычислительной техники само по себе недостаточно для обеспечения необходимой достоверности измерительной информации.

Аппаратура получает сущность измерительного средства только в результате метрологической операции — градуировки ее по образцовым мерам или образцовым приборам, предназначенным для воспроизведения с требуемой достовер-

ностью размера соответствующей единицы измерения.

У измерительного прибора среди многочисленных свойств наиболее существенным является его способность воспроизводить зависимость между значениями физической величины, подлежащей измерению, и показаниями прибора, выраженными в единицах отсчета. Именно это свойство прибора используется для выполнения измерения, т. е. перехода от измеряемой величины к результату измерения. Поэтому, чтобы характеризовать важнейшие метрологические свойства измерительного прибора, достаточно характеризовать свойства воплощенной в приборе зависимости между его показаниями и измеряемой величиной.

Общие метрологические требования к измерительному прибору (а также к измерительным системам) устанавливаются исходя из интересов потребителей измерительной техники.

Для потребителя измерительный прибор не цель, а всего лишь средство, с помощью которого он может в принятых единицах определить числовое значение интересующей его физической величины и оценить достоверность этого значения.

У результата измерений единственной качественной характеристикой служит его достоверность. Задача оценки достоверности результата измерений так же важна, как и задача получения самого результата.

При метрологических испытаниях прибора его градуировочную зависимость и ее важнейшие, подлежащие нормированию и контролю, свойства, такие, как нелинейность, правильность, точность, нестабильность, определяют экспериментально путем сравнения показаний испытуемого прибора с показаниями образцового прибора.

Метролог имеет дело с изучением свойств конкретного измерительного прибора; он не имеет возможности изменять эти свойства; ему известен вид функциональной зависимости между измеряемой величиной и показаниями прибора; ему известна также допустимая погрешность измерений, установленная для данного прибора; метролог, пользуясь образцовыми приборами, должен путем совместных измерений определить действительную зависимость между измеряемой величиной и показаниями прибора, оценить ее достоверность в нормальных условиях и в условиях применения прибора с тем, чтобы потребитель мог без дополнительных экспериментов оценивать достоверность результатов измерений, получаемых с помощью данного прибора.

У приборов для динамических измерений метрологические характеристики, подлежащие нормированию и контролю, существенно отличаются от характеристик приборов для статических измерений величин. Показания приборов для

динамических измерений зависят не только от размера измеряемой величины, но и от характера протекания того процесса, который характеризует измеряемая величина. Это обстоятельство значительно усложняет задачу метрологического обеспечения динамических измерений.

Градуировку приборов для динамических измерений производят обычно в режиме синусоидальных колебаний измеряемой величины с определенной частотой. Для определения возможных искажений результатов измерений у этих приборов путем совместных измерений находят амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики [33].

Регистрирующую измерительную аппаратуру для динамических измерений можно рассматривать как совмещение двух приборов, имеющего шкалу по оси ординат и хронометрического, имеющего шкалу по оси абсцисс.

Правильность результата совместных измерений, получаемого с помощью этой аппаратуры, обеспечивается не только правильностью градуировки приборов в соответствующих единицах, но и тем, насколько аппаратура обеспечивает совместность текущих значений измеряемых величин.

Так, например, при измерении изменяющегося во времени электрического напряжения переменная величина запаздывания сигнала будет нарушать совместность текущих значений e_i и t_i и вносить систематические погрешности в результат динамических измерений.

Аналогичный источник погрешности можно наблюдать при проведении совместных измерений температурных удлинений образца в тех случаях, когда не обеспечено соответствие показаний термометра действительной температуре образца.

Чтобы показать специфику методов и средств метрологического обеспечения динамических измерений, на конкретных примерах из области виброметрии [3] рассмотрим еще раз сущность динамических измерений.

Вибрацию характеризует зависимость между физическими величинами: смещение (l) и время (t).

Этот процесс обладает совокупностью элементарных свойств, каждое из которых может быть характеризовано величиной, производной от l и t , и измерено в соответствующих производных единицах. Величины l и t являются для вибрации основными.

Кроме величин, характеризующих отдельные свойства зависимости $l=f(t)$, могут быть величины, характеризующие различные свойства временных и частотных зависимостей производных величин (скорости, ускорения).

Таким образом для оценки различных свойств процесса на основе двух величин l и t можно образовать систему производных величин и соответственно систему их единиц измерения.

Современная виброизмерительная техника создает целое семейство приборов для измерения во взаимосвязи величин l и t , v и t и других, а также для прямых измерений отдельных параметров вибрации.

Возникает вопрос о поверочных средствах, с помощью которых у семейства виброизмерительных приборов можно обеспечить правильность и взаимную согласованность размеров производных единиц.

Есть ли необходимость для каждого измеряемого параметра вибрации создавать собственные поверочные средства или исходя из представлений о совместных измерениях можно при решении данной метрологической задачи ограничиться одной поверочной установкой для воспроизведения размеров единиц всех производных величин, характеризующих вибрацию, т. е. в данном случае для всего семейства виброизмерительных приборов.

Сопоставляя 2 однородные физические величины, делают вывод об их равенстве или неравенстве.

Сопоставляя 2 однородных процесса, характеризующих временной зависимостью одной и той же физической величины, говорят не о равенстве процессов, а об их эквивалентности по определенным параметрам.

У однородных процессов могут быть весьма различные соотношения между отдельными параметрами, характеризующими одинаковые свойства этих процессов. Это, в свою очередь, определяет разнообразие форм зависимостей, характеризующих однородные процессы.

Если известно уравнение, которое точно описывает воспроизводимый процесс, в данном случае вибрацию, то можно по измеренным значениям основных величин l и t вычислить значения всех производных величин, характеризующих различные свойства данного процесса, и оценить их достоверность.

В области виброметрии выполнить это условие наиболее доступно при воспроизведении синусоидальных вибраций.

Поверочная установка, состоящая из вибратора, воспроизводящего по синусоидальному закону однонаправленные вибрации, и оснащенная средствами для измерения с необходимой точностью амплитуды и периода колебаний, позволяет по измеренным значениям основных величин вычислить значения всех воспроизводимых производных величин, характеризующих вибрацию, и, следовательно, может служить для градуировки и проверки всего семейства виброизмерительных приборов [34, 36].

Приборы для прямых измерений отдельных параметров вибрации, отградуированные на поверочной виброизмерительной установке, могут использоваться в качестве образцовых для сличения с ними соответствующих рабочих приборов.

Поверочную виброизмерительную установку нельзя непосредственно поверить или отградуировать по другой поверочной установке; этот вид измерительных средств в отличие от приборов для прямых измерений не имеет градуировочной зависимости.

Поверочную установку подвергают метрологической аттестации, т. е. всестороннему изучению, позволяющему сделать вывод о соответствии установки своему назначению.

При исследовании поверочной виброизмерительной установки необходимо оценить, в какой мере воспроизводимые установкой колебания синусоидальные, фазоустойчивые, однонаправленные; в какой мере они стабильные по амплитуде и частоте; с какой точностью на установке можно производить прямые измерения амплитуды и периода колебаний и соответственно с какой точностью можно определять важнейшие производные величины, характеризующие вибрацию.

Если один и тот же виброизмерительный прибор, стабильный по своим показаниям, подвергнуть градуировке на двух различных поверочных установках, то сопоставление результатов градуировки позволит по данному параметру вибрации оценить согласуемость независимо воспроизведенных размеров единицы измерений.

Производные величины, характеризующие отдельные свойства процессов, например, эффективное значение виброускорения, эффективное значение переменного электрического напряжения, звуковое давление и т. п., некоторые авторы называют динамическими величинами.

Поверочные установки, предназначенные для воспроизведения размера единицы динамической величины, в некоторых случаях возводят в ранг эталонов. Примером этому может служить эталон единицы звукового давления [20], позволяющий осуществлять градуировку образцовых измерительных микрофонов в диапазоне частот от 2 гц до 100 кгц.

Эталон состоит из двух измерительных установок: первая — «Пистонфон» (что значит «звуковой поршень») и вторая — «Камеры малого объема и заглушенная камера». Эталон охватывает диапазон частот 2—125 гц для «Пистонфона» при звуковых давлениях от 2 до 80 Па; 20 гц — 100 кгц для «Камер малого объема» при звуковых давлениях от 0,05 до 2 Па; 1—100 кгц для «Заглушенной камеры» при звуковых давлениях от 0,05 до 2 Па. Среднеквадратическая погрешность воспроизведения единицы звукового давления 0,1 дб для «Пистонфона»; 0,07—0,2 дб для «Камер малого объема», 0,2—0,3 дб для «Заглушенной камеры».

В качестве примера поверочных виброизмерительных установок можно привести разработанные во ВНИИ метрологии установки типа ОВУ-1, ОИВУ-2 и В-150, работающие на электродинамическом принципе [34].

Поверочная инфразвуковая вибрационная установка типа ОИВУ-2 для обеспечения однонаправленных колебаний виброплатформы выполнена с двумя подвижными катушками, размещенными на расстоянии 1 м одна от другой, связанными между собой жестким стержнем и подвешенными на эластичных пружинах. Амплитуду от 1 до 1000 мкм измеряют микроскопом с погрешностью 0,8 мкм, а от 10^2 до 10^4 мкм — с помощью проекционного устройства. Боковые составляющие колебаний не превышают 1%. Рабочий диапазон частот $0,1 \div 100$ гц.

Установки ОВУ-1 и В-150 работают в звуковом диапазоне частот и построены по тому же принципу, что и установка ОИВУ-2, но имеют другие расстояния между подвижными катушками. Нелинейные искажения вибратора установки ОВУ-1 не превышают 3%.

В этом же НИИ на электродинамическом принципе разработана вибрационная установка типа В-1000. Установка создает колебания на дискретных резонансных частотах. В диапазоне частот $700 \div 1000$ гц создает колебания с амплитудой до 20 мкм. Измерение амплитуды колебаний производят интерференционным методом.

Вибратор типа ВОК-50К служит для возбуждения и измерения вибраций в УЗ-диапазоне частот $0,5 \div 50$ кгц. Поверочная установка состоит из набора пьезовибраторов, источников питания и измерительных устройств.

В метрологических лабораториях вибраторы, позволяющие производить плавное изменение частоты колебаний, применяют в основном при испытании виброметрической аппаратуры; градуировку же ее предпочитают производить на вибраторах, возбуждаемых в режиме резонанса [37, 38].

В заключение обзора считаем возможным отметить, что в области динамических измерений совершенствование методов измерений и измерительных средств значительно опережает развитие методов и средств метрологического обеспечения этого вида измерений [33].

Для обеспечения единства в этой области измерений необходимы нормативные документы, регламентирующие требования к метрологическим характеристикам стандартной аппаратуры для динамических измерений, типовая поверочная аппаратура и стандарты на методы поверки приборов для динамических измерений.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Агалецкий П. Н. Состояние и перспективы развития метрологии в СССР. «Итоги науки и техники. Метрология и измерительная техника. 1968». Москва, 1969
2. Агалецкий П. Н., Ащеулов Н. К., Никулин В. П. Классификация измерений и оценка точности измерительных приборов. «Измерит. техн.», 1964, № 3, 5—9

3. Агалецкий П. Н. Вопросы измерения зависимостей между величинами. «Измерит. техн.», 1968, № 6, 8—14
4. Агалецкий П. Н. Пути развития метрологии в области динамики и вопросы виброметрии. Издание Московского Дома Научно-технической пропаганды, Виброметрия, 1965, № 2
5. Иориш Ю. И. Современный уровень и тенденции развития виброметрии. «Измерит. техн.», 1966, № 1, 20—22
6. Арутюнов В. О., Пеллинец В. С., Шкаликов В. С. Современное состояние и перспективы развития техники измерения параметров вибрации и удара. «Измерит. техн.», 1970, № 4, 44—48
7. Metal Artur, Luchowski Adam. Historia rozwoju miernictwa dynamicznego — nowej galezi metrologii «Pomiary, Automat. Kontr.», 1970, 16, № 12, 503—505 (1971, 5.32.15) *
8. Государственный стандарт СССР 16263—70. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения
9. Долинский Е. Ф. Обработка результатов измерений по способу наименьших квадратов. Издательство стандартов, Москва, 1971
10. Дадашев Р. С., Парашин В. Б., Семенов Г. В. Методы и средства биомедицинских измерений. «Метрология», 1970, № 2, 5—50 (1971, 7.32.181)
11. Балуев Э. П., Дадашев Р. С., Парашин В. Б. Общая модель и погрешности измерения медико-биологических величин при диагностике. «Метрология», 1970, № 2, 50—58 (1971, 7.32.182)
12. Дадашев Р. С., Парашин В. Б. Методы оценки аппаратурных погрешностей медицинских диагностических приборов. «Метрология», 1970, № 2, 67—77 (1971, 7.32.183)
13. Tustin Wayne. Dynamics overview. «Environ Quart.» 1969, 15, № 4, 16—18 (1971, 5.32.566)
14. Maniewski Poman, Piatkiewicz Wojciech. Halotrótnowy przetwornik drgań mechanicznych. «Pomiary. Automat. Kontr.» 1971, 17, № 1, 21—27 (1971, 8.32.548)
15. Bis 650° C funktionsfähige Beschleunigungsaufnehmer. «VDI—Z», 1971, 113, № 1, 25 (1971, 5.32.567)
16. Вибрационная техника. Материалы Семинара. Сб. 2. [Моск. дом научно-техн. пропаганды], 1970, 156 стр. илл., 53 к. (1971, 1.32.432)
17. Gravel Charles L., Brosh Amnon. Subminiature solid state accelerometer. «Instrum. Aerospace Ind. Vob. 15» Pittsburgh, 1969, 368—372 (ЭИ, серия «Испытательные приборы и стенды», 1970, вып. 47, реф. 301)
18. Metzger E. H., Meldrum M. A. Miniature electrostatic accelerometer (MESA). «Proc. Nat. Aerospace Electron. Conf. Dayton, Ohio, 1967». Dayton, Ohio, s. a. 131—137 (ЭИ, серия «Испытательные приборы и стенды» 1970, вып. 44, реф. 276)
19. Krieger D. Der Stoßanalysator SM 30—ein universelles Gerät. «Feingätetechnik», 1970, 19, № 11, 499—50 (ЭИ, серия «Испытательные приборы и стенды» 1971, № 7, реф. 41)
20. Новые государственные эталоны СССР. «Измерит. техника», 1971, № 8, 7—9
21. Лупинский М. М., Савицкий Ф. С. Метод градуировки ударных акселерометров. «Измерит. техника», 1971, № 7, 21—23
22. Карташев А. И., Эцин И. Ш. Возможность применения, эффекта Допплера для измерения малых скоростей и амплитуд механических колебаний. «Тр. метрол. ин-тов СССР», 1970, вып. 114, (174)45—53 (1971, 1.32.419)

* Цифры в скобках показывают в каком году, в каком номере РЖ «Метрология и измерительная техника» (выпуск 32), за каким индексом опубликован реферат по данной статье.

23. Stein H. D. Vom, Rateau P., Schultze G., Koch B. New laser interferometry methods of measuring the velocity of high-speed model missiles. «Radio and Electron. Eng», 1970, 40, № 1, 45—48 (1971, 1.32.420)
24. Brandt G. B. Practical holography for vibration studies. «Opt. Spectra», 1970, 4, № 9, 26—31 (1971, 5.32.583)
25. Grall J. Analyseur de signaux, système serie 306. «Onde elec.», 1970, 50, № 6, 531—533 (1971, 8.32.553)
26. Sharpe R. S. Ultrasonic testing techniques «Chartered Mech. Eng», 1971, 18, № 2, 44—49 (1971, 8.32.556)
27. Агалецкий П. Н., Егоров К. Н., Марциняк А. И. Абсолютные определения ускорения силы тяжести в пункте ВНИИМ. «Труды ВНИИМ» выпуск 32(92), Стандартиз, 1958
28. Taroni Andrea, Prudenzeati Maria, Lanarini Gianni. Semiconductor Sensors. II. Piezoresistive devices. «IEEE trans. Ind. Electron. and Contr. Instrum.» 1970, 17, № 6, 415—421 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1971, вып. 14, реф. 105)
29. Zappe D. Vielkanal—Analysatoren fur Technik und Forschung. Messen—Steuern—Regeln, 1970, 13, № 1, 35—37, 1, II, III (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1970, вып. 17, реф. 126)
30. Stein H. D. vom, Pfeifer H. J., Koch B. Geschwindigkeitsmessungen an kurzzeitigen Stromungsvorgangen mittels Laser—Strahlung. Opt Commun, 1969, 1, № 5, 207—210 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1970, вып. 9, реф. 56)
31. Licht Torben. Vibration measurement by a laser interferometer. «Brüel and Kjaer Techn. Rev.», 1971, 18—25 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1971, вып. 29, реф. 233)
32. Halliwell G. Analogue equipment at R. F. L. Springfields. for the automatic analysis of random signals from vibration and acoustic experiments. React. Group. V. K. Atom. Energy Auth. Rept, 1970, № 1900(S) 54pp, ill. (ЭИ, серия «Испытательные приборы и стенды», 1970, вып. 37, реф. 236)
33. Агалецкий П. Н., Афанасьев В. С., Косицкая Г. И. Об установлении допуска на значение виброускорения при проведении виброиспытаний. «Измерит. техника», 1971, № 7, 23—25
34. Лассан В. Л., Шкаликов В. С. Исходные методы и средства виброметрии. «Измерит. техн.» 1967, № 11, 64—66
35. Roughton Norbert A. Method and apparatus for vibration analysis utilizing the Mössbauer effect. Пат. США, кл. 250—833, № 3454766 (ЭИ, серия «Испытательные приборы и стенды», 1970, вып. 28 (реф. 174)
36. Gareth M., Davenport Charles T. Accelerometer and method for its calibration. Пат. США, кл. 73—1, № 3464255. (ЭИ, серия «Испытательные приборы и стенды», 1970, вып. 28, реф. 173)
37. Sheehs Oliver Perry. Methods for the practical reciprocity calibration of piezoelectric accelerometers. Advances Test Measurement. Vol. 5. Pittsburgh, Pa, 1968, 581/1—581/7. (ЭИ, серия «Испытательные приборы и стенды», 1970, вып. 6, реф. 43)
38. Heinemann Stanley O. The modern servo control system for sine wave vibration testing. Inst. Environment. Sci. 14 th Annual Techn. Meet. Proc., 1968, Saint Louis, Mo. S. I., s. a., 401—405 (ЭИ, серия «Испытательные приборы и стенды», 1970, вып. 6, реф. 46)
39. Gottschall Wolfgang. ESMATIC — ein universelles System elektronischer Meßgeräte zur Meßwertaufnahme Meßwertaufbereitung Meßwertverarbeitung und Meßwertausgabe. «Impuls», (ГДР), 1971, 11, № 1, 22—25 (ЭИ, серия «Испытательные приборы и стенды», 1971, вып. 28, реф. 189)
40. Gates R. L. Reviewing the status of inertial sensors, «Contr. Eng. 1971, 18, № 3, 54—58 (ЭИ, серия «Испытательные приборы и стенды», 1971, вып. 28, реф. 188)

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАРУБЕЖНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

М. И. Меклер

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем обзоре рассматривается практика использования в зарубежной промышленности измерительных средств, широкое внедрение которых на отечественных предприятиях будет способствовать претворению в жизнь решений XXIV съезда КПСС.

Основными факторами, определяющими направления развития наиболее распространенных в машиностроении измерений длин, являются: повышение точности цеховых измерений; автоматизация измерительных процессов, в том числе в мелко- и среднесерийном производстве точных деталей и изделий сложной формы; расширение пределов высокоточных измерений до очень больших длин; повышение экономической эффективности производства путем обеспечения качества продукции с наименьшими затратами, т. е. путем профилактических мероприятий, вместо разбраковки готовой продукции и наиболее рационального использования квалификации человека в системе человек — машина.

Разработка и внедрение в производство гелий-неоновых лазеров, координатных измерительных машин и малых ЭВМ открыли принципиально новые и наиболее эффективные пути решения этих задач.

Поэтому при рассмотрении путей развития наиболее прогрессивных и перспективных средств линейных измерений мы ограничились этими группами измерительно-управляющих устройств.

1. ЛАЗЕРНЫЕ ПРИБОРЫ

В размерной метрологии применяются 2 типа лазерных приборов: лазерные интерферометры для измерения приращений длин и центрирующие лазеры, служащие для контроля и выставления прямолинейности и соосности. В обоих видах приборов применяются гелий-неоновые газовые лазеры, отличающиеся малой мощностью, что делает их безопасными в эксплуатации, высокой стабильностью частоты, обеспечивающей большую точность измерений, высокой когерентностью и малым углом расхождения пучка [1].

Все эти свойства гелий-неоновых лазеров — одна (монокроматическая) длина волны $\sim 0,6328$ мкм, видимый яркий красный свет и прямолинейность узкого пучка излучения на большом расстоянии — делают их идеальным измерительным средством для машиностроения.

Монокроматичность используется в интерферометрах, а видимый прямой луч применяется как базовая прямая при выставлении или контроле прямолинейности и соосности [2].

С помощью этих двух типов лазерных приборов можно построить любые системы, начиная с систем обратной связи для станков и кончая приборами для контроля шероховатости поверхности.

Центрирующий лазер является одним из наиболее простых, универсальных и широко распространенных лазерных устройств.

Он дает оптическую ось, длина и прямизна которой превосходят любую, даваемую другими приборами базу. Пучок от лазера абсолютно прямолинеен на длине до 45 м. Узкий пучок света падает на фотодетектор, разделенный на 4 квадранта. Оператор балансирует интенсивность света по этим квадрантам так, чтобы центр пучка попадал как раз в центр перекрестия.

Первые попытки промышленного применения центрирующих лазеров были сделаны в 1965 г. фирмой Perkin-Elmer (США). Инженеры этой фирмы опробовали образец такого лазера на ракетостроительной фирме Grumman Aerospace Corp. Первые пучки лазерного излучения были неустойчивы, содержали паразитные сигналы, разделялись на мишени на 2 пучка и более. Но основная идея прижилась и можно было предвидеть, что лазер вытеснит широко применявшиеся в то время при сборке станков и самолетов настроенные телескопы.

Ведь если другие электрооптические средства давали возможность точных измерений на расстояниях 1,5—3 м, то возможности лазеров казались безграничными и их стоимость одинакова при измеряемой длине 1,5 и 45 м. В те времена это казалось чем-то фантастическим, а в настоящее вре-

мя на той же фирме Grumman используется 20 центрирующих лазеров, а общее их количество достигает в США тысячи.

По словам одного из руководителей производственного отдела фирмы Grumman с помощью лазера время установки и выставления станка можно сократить на $1/3$ — $1/6$ и повысить точность машины по крайней мере в 10 раз [2].

При установке машин центрирующий лазер сначала используется для контроля, а затем настройки геометрической правильности осей x , y и z .

Шкалы индуктосина градуируются с помощью лазерного интерферометра. На станах холодной прокатки с программным управлением такие шкалы имеют длину свыше 30 м.

На фирме Grumman японские инженеры, устанавливая горизонтально-расточной станок фирмы Mitsubishi для деталей длиной 6 м, шириной 1,2 м и высотой 2,5 м, в течение семи рабочих дней довели его погрешность до 0,5 мм на длине хода 6 м, что не позволяет рационально использовать шкалы индуктосина, погрешность которых может составлять на этой длине 0,005 мм при температуре 24°С. Инженеры фирмы Grumman с помощью лазера за 3 рабочих дня выставили шкалы с погрешностью 0,018 мм. До появления лазеров длинные станины выставлялись секциями с помощью точных уровней. Однако для станины стана холодной проката длиной 36,5 м и шириной 3,65 м, имеющего 2 портала, такая техника оказалась непригодной и 3-недельная работа не дала результатов. Фирма Grumman за 3 дня выставила стан и одновременно проверила его работу в динамике путем измерения прогиба под нагрузкой при перемещении порталов.

«Техника выставления с помощью лазера внедрена уже 4 года — сказал Намар — глава фирмы Namar Laser Instruments, Inc [2]. При первом появлении этой техники многие считали, что это только несколько обновленный и улучшенный настроечный телескоп. Однако в действительности центрирующий лазер — это средство геометрических измерений небывалой точности и возможностей. В настоящее время можно купить за 7000 долл. лазер, который будет контролировать прямолинейность и перпендикулярность каждой поверхности и каждого движения станка. И лазер будет работать во время движения машины, обеспечивая динамические испытания».

Можно проверить полностью геометрию движения станка в динамике с помощью двух опорных баз. В качестве таковых служат визирные марки или фотоэлементы. Визирные марки, на которые падают лазерные лучи, можно расположить в любом месте станка, включая шпиндели, режущие кромки инструментов, столы или другие поверхности.

В качестве примера приводятся испытания карусельного станка с поворотным столом, на котором изготавлилась цилиндрическая деталь диаметром 0,6 м и длиной 1 м. Потребитель станка обнаружил у деталей бочкообразность в пределах 0,01 мм и конусность 0,018 мм.

Фирма Natar установила лазер параллельно верхней плоскости стола, направила лазерный пучок через пентапризму так, чтобы он преломился под прямым углом к столу вертикально вверх.

Визирная марка была помещена на острие инструмента и направлена рабочей поверхностью вниз к пентапризме. Затем была осуществлена нормальная подача инструмента. Выяснилось, что бочкообразность повторяет погрешность движения режущей кромки, а конусность — неперпендикулярность верхней плоскости стола оси вращения. Одна только экономия на потерях от брака могла бы полностью покрыть затраты на всю лазерную систему.

Центрирующие лазеры могут применяться не только в станкостроении. Их широко используют при укладке трубопроводов, изготовлении макетов самолетов, в космонавтике и при сборке реальных конструкций на специальных приспособлениях, а также в турбостроении. Фирма Natar Laser Instrument недавно разработала специальную лазерную развертывающую систему для измерения корпусов турбин на месте на заводах фирмы Westinghouse. В судостроении и в строительных работах также применяются центрирующие лазеры. При реконструкции 30 000-т танкер фирмы Sun Oil Co был поставлен в сухой док, разрезан на 2 части, разделен и снова собран с новой секцией длиной 13,5 м. Яркий красный луч лазера позволил сборщикам точно нанести меловые отметки по всей боковой стороне судна для последующей газовой резки. Во время резки тот же лазер использовался для регулирования осадки корпуса, что позволило ее компенсировать путем изменения заполнения резервуаров в сухом доке.

Хотя для многих областей применения точность центрирующего лазера значительно превосходит требуемую, в ряде случаев она недостаточно высока.

Например, станки фирмы Giddins & Lewis должны обрабатывать детали с допуском 8 мкм/м. По правилу 1:10 погрешность измерительного средства не должна превышать 0,8 мкм. Фирма использует для проверки станков 5 лазерных интерферометров, так как центрирующие лазеры в этом случае недостаточно точны.

Руководитель отдела качества фирмы считает [2], что центрирующий лазер сейчас находится на том уровне, на котором лазерные интерферометры были 5 лет назад.

Изготовители центрирующих лазеров работают над повышением их точности.

Некоторые потребители, например фирма Grumman Aero-space, разрабатывают свои системы.

Чувствительные элементы этой фирмы обеспечивают регулировку по четырем из шести «степеней свободы» лазерного пучка. Каждая степень свободы выражается в перемещении оси пучка в диапазоне $\sim 0,127$ мм. В настоящее время выявляются и регулируются линейные перемещения по осям x и y , а также угловые перемещения относительно этих осей.

Фирма работает над применением голографии для регулирования перемещения оси Z пучка и поворота вокруг этой оси.

Фирма Perkin—Elmer утверждает, что второе поколение центрирующих систем будет иметь погрешность в пределах $0,0025$ мм.

Лазерные интерферометры называют «домашним бюро эталонов». Это наиболее точное средство измерения длин и расстояний. Диаметр непрерывно генерируемого пучка ~ 10 мм, мощность $\sim 0,1$ мвт, длина волны в воздухе $0,6328$ мкм.

Все интерферометры основаны на схеме Майкельсона, но лазерные источники излучения позволили значительно упростить конструкцию оптических блоков интерференционных измерительных систем, расширить пределы измерения и область применения этих систем [3]. Наиболее полная лазерная интерференционная измерительная система состоит из стабилизированного гелий-неонового лазера, оптического блока, отражателя (его называют подвижным зеркалом, уголкового отражателем, мишенью, призмой, детектором и т. д.), фотоприемников, усилителя, реверсивного электронного счетчика, вычислительного устройства и преобразовательного блока с цифровым отсчетным устройством.

Оптический блок и лазер устанавливают неподвижно, например на станине контролируемого станка, а призмный отражатель закрепляют на контролируемой детали, например на суппорте.

Световой поток лазера проходит через оптический блок, делится на 2 пучка (референтный и измерительный) и направляется на подвижный отражатель.

Возвращенный отражателем пучок на разделительной пластине (или фотодетекторе) рекомбинируется с отраженным от неподвижного зеркала референтным пучком. Длина волны обоих пучков одинакова, но они сдвинуты по фазе из-за перемещения отражателя, так что пучки интерферируют и дают темные и светлые полосы. Ширина полос соответствует половине длины волны света ($\lambda/2 = \sim 0,3$ мкм). Смешанный световой поток попадает на фотоприемники, содержащие чув-

ствительные элементы. Каждая полоса может делиться на 4 части, увеличивая разрешающую способность до $1/8 \lambda$ (0,08 мкм).

Ширина полос умножается вычислительным устройством на поправочный коэффициент, компенсирующий влияние отклонений условий среды (давления, влажности, температуры воздуха и температуры детали). Счет полос преобразуется в мм и выдается в цифровой форме с погрешностью порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мм на 1 мм перемещения (1 мкм/м). Эта принципиальная схема несколько видоизменяется в лазерных интерферометрах отдельных фирм.

Рассмотрим преимущества и ограничения, свойственные всем схемам. Применение призмных отражателей позволяет значительно снизить требования к точности юстировки оптических элементов схемы и к точности их относительного положения в процессе перемещения контролируемого объекта.

Поскольку лазерные источники излучения позволяют получать яркие интерференционные картины, то значительно снижаются требования к фотоприемникам и увеличивается мощность их выходных сигналов. Большая мощность позволяет уменьшить коэффициент усиления усилителей и расширить их полосу пропускания до 1 МГц, что дает возможность увеличить допустимую скорость перемещения объекта до 300 мм/сек и значительно уменьшить влияние вибраций на точность измерений.

Однако турбулентность и загрязненность атмосферы влияет на интенсивность возвращаемого рефлектором пучка и это ограничивает возможности лазеров, основанных на непосредственном сравнении перемещений с длиной световой волны.

Разработка газовых лазеров с непрерывным излучением дала возможность использовать интерферометры не только в измерительных лабораториях, но и в качестве датчиков длины на точных обрабатывающих машинах [4].

Точность интерференционной системы линейных измерений зависит от воспроизводимости длины волны света от одной лазерной головки к другой. Многочисленные исследования показали, что при современном уровне техники эта воспроизводимость составляет $\sim 1 \cdot 10^{-6}$. Для возможности использования присущей лазерным интерферометрам точности для контроля стальных деталей температура этих деталей должна быть известна до тысячных долей градуса. Но даже если предельная точность лазерных интерферометров и не может быть использована для практических измерений, то все же они имеют огромные преимущества по сравнению с другими существующими измерительными системами.

До настоящего времени системы измерения перемещений на машинах были основаны на применении точных ходо-

вых винтов, дающих с помощью кулачковых корректирующих устройств погрешность порядка 2—3 мкм на 1 м, или различных шкальных устройств. Шкальные устройства могут основываться на оптическом, емкостном или индуктивном методах измерений. Преобразователи перемещений, использующие шкалы, точнее систем с ходовым винтом, но их накопленная погрешность значительно больше, чем у лазерных интерферометров.

Точность лазерных интерферометров в 10—100 раз выше, чем требуемая и не может быть полностью использована на обрабатывающих станках. Однако с учетом стоимости потерь, вызываемых отдельными источниками погрешностей, часто имеет смысл при небольшом повышении стоимости значительно повысить суммарную точность путем применения идеальных лазерных датчиков перемещений. Их использование позволяет снизить требования к тем областям, где возникают трудноустраняемые погрешности, и таким образом снизить стоимость системы или повысить эксплуатационные характеристики оборудования, или достичь того и другого. Преимуществом лазерных интерферометров является то, что на их точность не влияет температура машины и мало влияет температура окружающего воздуха. Кроме того, они обеспечивают прямые измерения с выходом на цифровые электронные устройства и отличаются конструктивной простотой.

В отличие от механических систем измерения перемещений кареток на лазерные интерферометры не влияют масляные пленки, люфты в направляющих и т. д. Кроме того, удобство монтажа узлов интерферометра на станке и соединение этих узлов только лазерным пучком очень облегчает соблюдение принципа Аббе и тем самым устраняет существенный источник погрешности.

Несмотря на то, что стоимость лазерного интерферометра в настоящее время выше стоимости индуктосина длиной 1,5—3 м и только к концу 1971 г. (а вернее к 1973 г.) фирмы-изготовители надеются уравнивать эти стоимости, все же при больших измеряемых длинах лазерные интерферометры дают и экономические преимущества.

Дело в том, что погрешность каждого участка винта и каждой секции шкалы должны быть меньше допустимой погрешности измерения на соответствующей длине и с увеличением измеряемой длины стоимость шкал и винтов сильно возрастает. В лазерном интерферометре требуется только точная обработка нескольких небольших стеклянных оптических деталей и изменение измеряемой длины от сантиметров к метрам не отражается на стоимости.

Встройка лазерного интерферометра в станок сводится к монтажу лазерной головки на станине и отражателя на подвижном элементе, тогда как при применении точных шкал,

собираемых по секциям, каждая секция монтируется в отдельности и процесс выставления шкал является трудоемким и длительным. Применение лазеров сокращает время монтажа с часов до минут [2].

При этом достигается повышение общей точности, например, благодаря возможности использования лазера, запрограммированного на компенсацию погрешности от температурного расширения направляющих, что позволяет уменьшить погрешность определения фактического положения инструмента.

Еще выше эффективность применения лазеров в измерительных машинах, точность которых часто должна быть на порядок выше точности станков.

Так, в машине Microlog 50 (она будет описана ниже), предназначенной для контроля крупногабаритных зубчатых колес, сочетание лазерной обратной связи, имеющей узел компенсации колебаний давления и температуры воздуха, с оптическим кодирующим устройством для управления вращением оси обеспечило разрешающую способность измерительной системы машины $\sim 0,08$ мкм.

Фирма Do All Co (США) уже 3 года выпускает измерительные машины с лазерными устройствами обратной связи, иногда в сочетании с ЭВМ. Одну из этих машин фирма IBM использует для поточечного контроля детали с 80 отверстиями с допуском отверстий 0,0025 мм с помощью оптического датчика.

Несмотря на очевидные преимущества лазерных интерферометров по сравнению с другими устройствами для измерения перемещений, встроенные в станки приборы еще не получили достаточно широкого распространения, хотя лазерные приборы для контроля качества продукции применяют уже ~ 100 фирм.

Для анализа причин, задерживающих широкое внедрение лазерной техники, следует рассмотреть влияние следующих факторов: простоты эксплуатации, надежности лазерных систем и их стоимости [4].

Основными областями применения лазерных интерферометров в машиностроении являются диагностика новых машин и периодическая проверка цехового оборудования, а также встройка в контрольное и в обрабатывающее оборудование.

Наиболее широкое распространение получили лазерные интерферометры для диагностики. В этом случае простота эксплуатации не играет существенной роли, так как требуется относительно небольшое число обученных операторов. Надежность также не имеет особенного значения, поскольку необходимость ремонта лазерных интерферометров может повлиять только на срок контроля отдельной машины. Вопросы

стоимости тоже не являются решающими, так как даже на крупных предприятиях достаточно 1—2 приборов.

Если лазерные интерферометры встраиваются в измерительные машины, то требуется уже большее количество обученного персонала. Вопросы надежности также приобретают большее значение, так как выход из строя измерительной машины на время ремонта лазера может вызвать простой станков, продукция которых проверяется на машине. Вопросы экономической эффективности приходится решать путем сравнения затрат на лазерные приборы и на другие измерительные устройства.

Если лазерные интерферометры используются для управления металлообрабатывающими станками, то все указанные проблемы приобретают большую остроту. Проблема простоты эксплуатации становится важнее, поскольку, как правило, квалифицированных операторов станков требуется больше, чем контролеров.

Очень большое значение приобретают надежность устройств, так как выход из строя лазера может выключить станок во время обработки дорогой детали и вызвать брак, а также стоимость, так как ее приходится оправдывать путем сравнения со значительно более дешевыми, хотя и менее точными датчиками перемещений.

Рассмотрим в этой связи каждый из влияющих на распространение лазеров параметр.

Простота эксплуатации. Современный лазерный интерферометр требует время от времени электронной поднастройки для компенсации ослабления излучения лазера или очистки наружных оптических поверхностей от пыли. Разработаны схемы для автоматической поднастройки, но они еще не опробованы в промышленности.

Кроме того, правда очень редко, требуется настройка частоты по провалу Лэмба. На простоту эксплуатации может влиять также необходимость введения поправки на барометрическое давление и иногда на температуру воздуха. Воспроизводимость длины волны лазера в вакуумы порядка $1 \cdot 10^{-7}$. Однако скорость света в воздухе (коэффициент преломления) влияет на длину волны, а следовательно, и на градуировку интерферометра. Погрешность от изменения атмосферного давления на 1 мм рт. ст. равна примерно $4 \cdot 10^{-7}$. Общая погрешность зависит от ожидаемого колебания давления в данном помещении. В нормальных условиях оно не превышает 25 мм рт. ст. [5] и в этом случае погрешность составит $\sim 0,01$ мм/м. Эта погрешность влияет не больше, чем изменение температуры стальной детали на 1°C .

Если требуемая точность измерения это допускает, то погрешностью от изменения давления просто пренебрегают. В противном случае поправку можно вводить вручную по по-

казанию барометра или автоматически с помощью датчика давления. Но опыт показал, что этот тип датчика ненадежен и может вносить труднообнаруживаемую погрешность.

Погрешность, вносимая колебаниями температуры воздуха, составляет $\sim 6 \cdot 10^{-7}$ на 1° . Даже в наиболее точных станках этой погрешностью можно пренебречь, так как она составляет 1/10 коэффициента линейного расширения стальной детали.

Надежность лазеров. В 1967 г. срок службы лазеров, применяемых в интерферометрах, был очень коротким [2], нормально порядка 300—400 ч. К 1971 г. он возрос до 8000 и даже 10 000 ч. В электронных схемах лазерных устройств проблема надежности обстоит так же, как и в обычных системах цифрового управления. Следует только учитывать, что сигналы приходится передавать по кабелям на довольно большое расстояние и здесь могут добавляться электрические помехи.

Стоимость лазерных интерферометров. По данным изготовителей лазерных систем, в настоящее время стоимость лазерного интерферометра для встройки в станок составляет при малых партиях ~ 8500 долл. для одной оси и $\sim 13\,000$ долл. для двух осей при одном лазере с разделителем. Если же интерферометры заказываются партиями в 100 шт. и более, то стоимость может быть на 30—50% ниже. Изготовители интерферометров считают, что к 1973 г. большие партии будут обходиться в 3000 долл. на одну ось и ~ 4000 долл. на 2 оси (с одним лазером).

В эту стоимость не включены затраты на отсчетное устройство или необходимые передачи на узлы цифрового управления, которые могут стоить 2000—3000 долл. на ось. Следует отметить, что большой удельный вес в этих затратах составляет стоимость лазерной головки, поэтому по возможности следует использовать одну головку на 2 оси.

Первое существенное снижение стоимости произошло в 1968 г., когда фирма Perkin—Elmer сумела создать лазерный интерферометр стоимостью 18 000 долл., в то время как интерферометры конкурирующих фирм стоили не менее 43 000 долл.

В начале 1970 г. стоимость системы обратной связи фирмы Do All для одной оси составляла 13 000 долл., а к середине года она снизилась до 5750 долл.

Если в 1968 г. только небольшое число крупных фирм могло применять лазерные интерферометры, то сейчас они стали значительно доступнее [2].

Следует отметить, что благодаря применению интегральных схем одновременно значительно уменьшились габариты электронных систем.

Рассматривая перспективы применения лазерных интерферометров в качестве датчиков перемещения [4], автор считает, что в будущем все прецизионные станки, измерительные ма-

шины и другое крупногабаритное оборудование будут оснащены такими датчиками.

Помимо собственной интерферометрам точности, которая превышает все требования производства, они позволяют также улучшить эксплуатационные характеристики машин и в некоторых случаях повысить их экономическую эффективность.

Рассмотрим некоторые наиболее типичные лазерные интерферометры, выпускаемые известными фирмами США, Англии, ФРГ, Швеции, для получения представления о том, в каком направлении работают фирмы для устранения недостатков лазерных систем, повышения их точности, надежности, расширения возможностей применения [6—43].

Основные усилия конструкторов и исследователей направлены на создание портативных, простых в обращении приборов, предназначенных для цехового применения, в частности для проверки станков.

Портативный интерферометр фирмы Rank Precision Industries (Англия) [6—7], состоит из гелий-неонового лазера, светоделительного блока, подвижного призмленного отражателя и цифрового отсчетного устройства. Лазер и светоделительный блок закрепляются неподвижно, а призмленный отражатель крепится к объекту, перемещение которого измеряется. При температуре 20° С, давлении 760 мм рт. ст. и влажности воздуха 50% погрешность измерения составляет ± 1 мкм на всем пределе измерения 5 м. Продолжительность работы трубки 1000 ч. При контроле перемещения суппортов станка отражатель может перемещаться со скоростью до 300 мм/сек. Установка на нуль в любой точке диапазона измерений. Результаты измерений выдаются непосредственно в цифровой форме по 7-значному счетчику. Допускается отклонение температуры от нормальной не более чем на $\pm 10^\circ$ С, в противном случае прибор автоматически выключается. С помощью промежуточных призм прибор может переключаться для измерения по разным осям. Он может применяться также для измерения неплоскостности, непрямолинейности, деформаций.

Портативный интерферометр Lasergage модели 5900 фирмы Perkin—Elmer предназначен для проверки станков с программным управлением [8—14]. Его разрешающая способность 0,02 мкм. Стабильность частоты лазера $3 \cdot 10^{-8}$ в сут. Пределы его измерений 0—4575 мм, погрешность $\pm 1 \cdot 10^{-6} \pm 1$ единица счета на длине 45 м. Световой луч проходит в интерферометре 4 раза, увеличивая тем самым чувствительность системы в 4 раза по сравнению с обычными интерферометрами. Измерение перемещений по одной оси станка через каждые 12,5 мм на длине 10 м занимают 30 мин. По данным фирмы, время наладки станков с программным управлением сокращается в 20 раз.

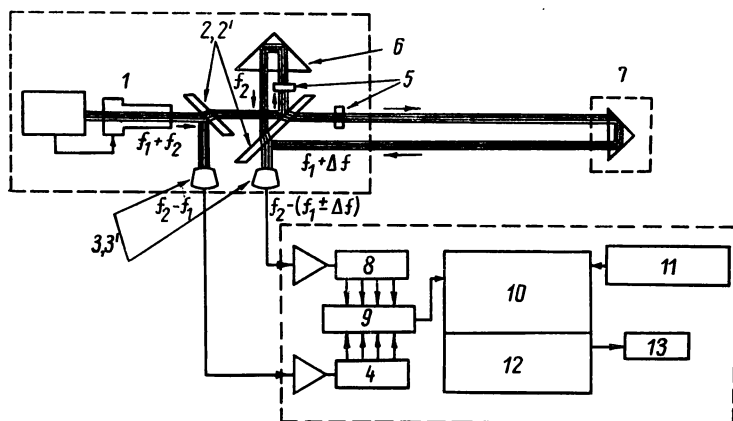
Фирма Cincinnati (США) применяет видоизмененный ею совместно с фирмой Perkin—Elmer прибор под названием Cincinnati Milacron для контроля выпускаемых фирмой станков с программным управлением. Процесс измерения может быть полностью запрограммирован. Время проверки станка сокращено на 90% (с 10 до 1 ч). Благодаря применению поворотных зеркал измерение можно производить по трем осям без перестановки прибора. Устройство может работать в условиях, сильно отличающихся от нормальных, так как встроенная ЭВМ позволяет вносить поправки на температуру и давление. Результаты выдаются на цифropечатающее устройство. Погрешность измерения $\pm 4,5$ мкм на длине до 45 м.

Лазерный интерферометр модели Mark 11 фирмы Cutler Hammer (США) [21] отличается низкой стоимостью, портативностью, возможностью отладки за несколько минут. Система построена по модульному принципу. Она может быть использована для проверки и наладки станков, измерения координат, для фотограмметрии, оптической настройки, поверки образцовых мер и т. п. Предусмотрено устройство, выдающее сигнал ошибки. Скорость перемещения отражателя 10 м/мин (~ 170 мм/сек). Устройство может использоваться для обратной связи на станках. Кубический отражатель смонтирован на магнитном основании, имеющем устройство для вертикальной и горизонтальной юстировки, но может быть снят с основания. В систему входят гелий-неоновый лазер, источник питания, прецизионная оптика, диодный детектор для счета полос с указанием направления. Разрешающая способность устройства 0,1 или 0,2 мкм. Возможно ручное или автоматическое введение поправки на условия среды.

Фирмы Leitz и Siemens на базе одномодового стабилизированного гелий-неонового лазера модели Siemens LG 65 построили лазерный интерферометр для измерения перемещений. Конструкция интерферометра отличается от обычных тем, что выходная фотоэлектрическая часть содержит 4 фотоприемника, расположенных относительно интерференционного поля так, что сигналы фототока у них сдвинуты на 90° . Сдвиг фототока между парами составляет 180° . Это позволяет построить систему реверсивного счета интерференционных полос и исключить влияние колебаний постоянной составляющей на результаты измерений. Интерферометр состоит из трех основных блоков: измерительной головки, отражателя и выходного электронного устройства. Пределы измерений длины 10 м, цена деления 0,1 мкм и при высокоточных измерениях 0,01 мкм. Погрешность измерения менее 1 мкм/м. В электронное устройство можно вводить поправки на изменение давления и температуры воздуха. Прибор выполнен из стандартных взаимозаменяемых блоков и к нему можно присоединить цифropечатающее устройство и перфоратор. Для наведения на

объект измерения и ввода входных данных применяется фотоэлектронный измерительный тубус, выдающий импульс совпадений. Угловой отражатель позволяет повернуть линию измерения на 90° и проводить измерения в вертикальной плоскости. В сочетании с компаратором Leitz 500 интерферометр позволяет выполнять контроль образцовых шкал, концевых мер и калибров [23—25].

Лазерные интерферометры фирмы Hewlett Packard (США) принципиально отличаются от всех описанных выше интерферометров [35—42]. В интерферометрах моделей HP5500А и HP5525А используется стабилизированный 2-частотный гелий-неоновый лазер 1 (см. рис.). Продольное маг-



Лазерные интерферометры фирмы Hewlett Packard

нитное поле, накладываемое на лазер, расщепляет спектральную линию атома неона из-за эффекта Зеемана. Две компоненты световой волны с противоположно направленной круговой поляризацией имеют оптические частоты f_1 и f_2 . Излучение лазера разделяется на пластине 2 и часть пучка направляется в 2-лучевой интерферометр, а другая — на вспомогательный фотоприемник 3. На фотоприемнике смешиваются (гетеродинируются) две оптические частоты, образуя на выходе промежуточную частоту в радиодиапазоне 1,8 МГц. Это частота является опорной и подается на счетчик 4. Попадающая в интерферометр часть пучка излучения разделяется разделителем поляризованных лучей 3 и фильтрами 5. Пучок с частотой f_2 отклоняется на неподвижное зеркало 6, а с частотой f_1 проходит к связанному с измеряемым объектом подвижному зеркалу 7.

Оба зеркала отражают соответствующие пучки на разделительную пластину 2', где они смешиваются и направляются интерферометром на выходной фотоприемник 3'. Если зер-

кало 7 перемещается, то вследствие эффекта Допплера оптическая частота f_1 , возвращенного в интерферометр пучка меняется. Это изменение Δf фиксируется фотоприемником 3', направляющим в счетчик 8 разность частот $f_2 - (f_1 \pm \Delta f)$. Счетчики 4 и 8 выдают на вычитающее устройство 9 два сигнала — один на опорной частоте 1,8 МГц, а другой на измерительной $(1,8 \pm \Delta f)$ МГц. Электронная схема содержит ЭВМ и преобразователь. В устройство 10 для преобразования импульсов в единицы длины подается от компенсатора 11 поправка на отклонения атмосферных условий и пересчитанное значение выдается выходным устройством 12 на цифровое табло 13. К выходу интерферометра могут быть подключены стандартное цифропечатающее устройство и графопостроитель, который дает возможность автоматически строить график погрешностей проверяемого станка или измерительной машины.

Описываемые интерферометры фирмы Hewlett Packard имеют ряд преимуществ перед другими лазерными интерферометрами.

Измерения производятся на переменном токе, что делает их менее чувствительными к колебаниям уровня сигнала. Если в других интерферометрах максимально допустимые потери интенсивности возвращающегося от рефлектора пучка составляют 50%, то 2-частотный интерферометр допускает потери до 95%, что делает его нечувствительным к турбулентности и загрязнению атмосферы и освобождает от необходимости периодической электрической поднастройки. Интерферометр не чувствителен к колебаниям сигнала при повороте подвижного отражателя, что позволяет использовать его для измерения динамических изменений длины шпинделя станка при нагреве подшипников. Пределы измерения интерферометра HP5525A 0—60 м, цена деления 0,001 мм, для метрологических работ 0,0001 мм. Погрешность измерения $1 \cdot 10^{-7}$.

Двухчастотный лазерный интерферометр модели HP5500A, состоящий из лазерной насадки, отражателя и счетной системы, имеет разрешающую способность 0,03 мкм, скорость счета 18 м/мин, погрешность измерения перемещений $5 \cdot 10^{-7}$.

Одномодовый 2-частотный лазер с внутренними зеркалами имеет термокомпенсированный в интервале температур 0—50° резонатор и не нуждается в прогреве.

Интерферометры фирмы Hewlett Packard особенно пригодны для контроля станков, так как они могут одновременно проверять точность позиционирования и скорость подачи. С помощью встроенного эталона времени эта скорость может измеряться в пределах до 320 мм/мин. Предусмотрен ноу-аут для настройки станка при повышенной температуре и

внесения соответствующей поправки. Достижением фирмы Hewlett Packard является создание так называемого вынесенного интерферометра (Remote interferometer), выполненного в виде кубика объемом $32,7 \text{ см}^3$ и позволяющего без дополнительных механических приспособлений с помощью соответствующих отражателя и отклоняющего устройства выполнять измерения в труднодоступных местах, например на остриях инструментов, измерять угловые перемещения, деформации, боковые смещения и перекосы кареток. Это достигается тем, что интерференционные полосы образуются не в лазерной головке, а на вынесенном интерферометре, что устраняет влияние «мертвого хода» (изменение расстояния между лазерной головкой и интерферометром) и позволяет устанавливать лазер в любом месте, не подверженном действию вибраций станка или теплового расширения, а также облегчает компенсацию изменений условий среды.

Если в вынесенном интерферометре вместо отражателя установить отклоняющее устройство, то оба компонента могут быть направлены параллельно и система может использоваться для измерения разности перемещения двух отражателей. Размеры отклоняющего устройства и разделителя подобраны так, что центры отражателей расположены на расстоянии $52,4 \text{ мм}$. В этих условиях разность перемещений $0,25 \text{ мкм}$ соответствует в малом диапазоне углу $1''$ и угловые смещения могут непосредственно отсчитываться по счетчику. При увеличении расстояния между параллельными пучками чувствительность угловых измерений пропорционально увеличивается. Для выполнения бесконтактных измерений на деталях с гладкой отражающей поверхностью на выходе лазерного излучения из разделителя устанавливается линза, образующая с отражающей поверхностью детали так называемый «кошачий глаз», при котором отраженный луч возвращается по траектории, параллельной падающему. Такое устройство позволяет измерять небольшие перемещения отражающей поверхности, например толщину движущейся пластмассовой ленты.

В метрологической практике интерферометры Hewlett Packard могут применяться для поверки эталонов длины, образцовых шкал, мерных лент длиной до 60 м , поверки измерительных микроскопов.

При несовпадении линии измерения лазерного интерферометра с плоскостью расположения измеряемой детали повороты подвижной каретки, вызванные непрямолинейностью направляющих, вносят погрешности, достигающие 10 мкм [44].

Для компенсации погрешности Аббе в Японии построен цифровой лазерный интерферометр, в основу которого положен лазер с внутренними зеркалами. При наложении про-

дольного магнитного поля на активный элемент лазера выходное излучение (из-за эффекта Зеемана) будет иметь 2 круговые поляризации, направленные встречно. Стабилизация лазера по частоте осуществляется термическим и пневматическим путем. Излучение лазера после поляризационной призмы разделяется на 2 канала с линейными взаимно перпендикулярными компонентами светового вектора. Один канал используется для фотоэлектрического автоколлиматора, другой для интерферометра со счетчиком полос. Плоское зеркало автоколлиматора связано с подвижной кареткой, перемещение которой определяет интерферометр. Излучение, отраженное от зеркала, поступает на вибратор с отверстием 30 $\mu\text{м}$ и фотоприемник. Аналоговый сигнал автоколлиматора, пропорциональный углу поворота каретки, поступает в электронную схему интерферометра.

Интерферометр построен по стандартной майкельсоновской схеме и имеет 4 выходных поля, сдвинутых на четверть полосы. Сигналы от фотоприемников, сдвинутые по фазе на 90° , поступают в формирующее устройство и затем по шинам сложения и вычитания в вычислительный блок. Здесь происходит умножение числа поступивших импульсов на значение длины волны с учетом поправки на температуру и давление воздуха и коэффициент линейного расширения измеряемой детали. Поправки поступают в вычислительное устройство от специального шифратора.

Одновременно на шины сложения или вычитания поступают импульсы от счетчика, связанного с фотоэлектрическим автоколлиматором. Поправка на погрешность Аббе вводится только при скоростях движения каретки менее 0,8 мм/сек , так как при быстром движении вносить поправки не имеет смысла. Для этой цели импульсы после формирующего устройства пропускают через низкочастотный фильтр с интервалом больше 100 мсек . Эти импульсы заполняют счетчик автоколлиматора и поступают в аналоговое компарирующее устройство. При совпадении сигналов от автоколлиматора и счетчика импульсы проходят в основное вычислительное устройство со знаком, зависящим от знака угла поворота. В вычислительном устройстве они суммируются с сигналами от интерферометра.

Испытание интерферометра проводилось на 3-м измерительной машине фирмы Zeiss. Известно, что для исключения погрешности Аббе в этой машине использован принцип Эппенштейна. Измерения на базах 1,4 и 1,7 м дали идеальное совпадение результатов по форме кривой, хотя отдельные измерения имели расхождения до 1 $\mu\text{км}$. Эти расхождения объясняются наличием вибрации зеркала автоколлиматора и остаточными деформациями каретки. Замечено, что непрямолинейность направляющей изменяется со временем и име-

ет разное значение при перемещении в прямом и обратном направлении. Эксперименты подтвердили необходимость автоматического введения поправки на погрешности Аббе.

Представитель фирмы Nuclear Division, Union Carbide Corp. (США) описал работы фирмы по использованию лазерных устройств. После приобретения опыта на нескольких опытных установках фирме удалось реализовать и ввести в эксплуатацию 4 промышленные установки [4].

Первый лазерный интерферометр для контроля деталей на станке был установлен на вертикальном револьверном 66-дюймовом станке King. Станок работает по принципу копирования. Один лазер обслуживает 2 оси станка. При совмещении оптической оси вертикального интерферометра и измерительной головки погрешность Аббе при измерении в вертикальном направлении была сведена до нуля, но большая погрешность появлялась из-за перекосов при горизонтальном перемещении. Для ее устранения был применен автоматический автоколлиматор, дающий сигнал поправки на выходе измерительной головки. Устройство работает успешно уже 6 лет на периодической проверке специальных деталей.

На координатно-расточном станке SIP-6A, используемом в качестве измерительной машины, было установлено 2 лазерных интерферометра. На станке для расширения пределов измерения смонтирован изготовленный на самом предприятии вертикальный ползун. Один из интерферометров используется для измерения перемещения этого ползуна. Он установлен так, что траектория лазерного пучка проходит через центр ползуна, что устраняет погрешности Аббе, вызываемые перекосом и рысканием при движении ползуна. Подвижный отражатель помещен на нижней части ползуна для уменьшения влияния теплового расширения на участке между измерительной головкой и отражателем. Поскольку применение лазера с разделителем на этом станке оказалось невозможным, другой покупной лазерный интерферометр был смонтирован для измерения горизонтального перемещения.

Первым станком, оснащенным устройством обратной связи от лазерного интерферометра, был вертикальный револьверный станок с программным управлением фирмы Gidding & Lewis. Оптическое устройство сходно с устройством на станке King. Погрешность Аббе для вертикального перемещения равнялась нулю, но для горизонтального перемещения она существенна и должна быть скорректирована с помощью дополнительной электрооптической системы. Точность станка после установки лазерного интерферометра значительно повысилась, особенно на вертикальной оси.

Второй станок с устройством лазерной обратной связи — это токарный станок с программным управлением Ex-Cell-O 922. Как и на станке SIP-6A, геометрия станка не позволя-

ет использовать лазер с разделителем и поэтому на каждой из двух осей перемещения было установлено по отдельному лазерному интерферометру.

На оси перемещения инструмента был использован покупной интерферометр, а на направляющих изделия (шпинделя) — изготовленная на фирме система. Подвижный отражатель смонтирован непосредственно за планшайбой для устранения погрешности Аббе от перекоса и исключения влияния теплового расширения шпинделя. Смещение Аббе от рыскания ограничено значением от нуля до радиуса обрабатываемой детали, так что этот источник погрешности также практически устранен.

Кроме лазерных интерферометров и центрирующих лазеров разработаны и используются в промышленности и другие устройства.

Недавно выпущен новый тип гелий-неоновых лазеров. Поставщики называют его лазерным пробником и его функция заключается в быстром «ощупывании» поверхности обработанной детали [2]. Для обработки сигналов, вырабатываемых при сканировании поверхности, требуется вычислительное устройство. Использование лазерных устройств для активного контроля является делом будущего. Иногда лазерные пробники применяются для контроля шероховатости поверхности или поверхностных дефектов на измерительных машинах с управлением от ЭВМ.

Фирма Bendix Advanced Products Div. (США) изготовила лазерный пробник и применила его для контроля качества поверхности отверстий в тормозных цилиндрах. Например, на фирме Kelsey Hayes пробник контролировал внутреннюю поверхность 3-ходовых клапанов. «Мы пытаемся одновременно контролировать чистоту поверхности в нескольких отверстиях — сказал директор производственного отдела этой фирмы. Нет другого способа быстрой проверки. При старом способе с использованием профилометра датчик проверяет только линейный участок поверхности» [2].

Лазерный пробник сканирует всю поверхность и выдает среднее значение шероховатости поверхности, а также данные о расположении и размерах поверхностных дефектов. Каждое значение автоматически сравнивается с образцом и дается сигнал о годности. Вся процедура занимает 8—10 сек. Быстродействие лазера позволяет контролировать очень большие поверхности. Он может быть использован для 100%-ного контроля и во много раз производительнее профилометра.

При работе лазерный пучок проецирует на поверхность детали пятно диаметром 1,5 мм. Отраженный от пятна луч дает 2-мерное изображение распределения и интенсивности света, которое может считываться ЭВМ. Оптическая система

пробника преобразует эту картину в электрические сигналы, обрабатываемые ЭВМ.

Руководитель производственного отдела фирмы Bendix Recognition Systems считает, что применять лазеры можно везде, где есть металлическая поверхность, которую надо проверить на наличие дефектов. Он проводил экспериментальное исследование по детектированию мест возникновения трещин, дефектов на роликах и опорных поверхностях колесчатых валов, а также на соплах ракет.

При исследованиях микроповерхностей лазерный микрометр, разработанный фирмой Laser Image Systems Inc. (США) дает топографию поверхности в пределах сотых микрометра. В таких устройствах используются запоминающие диски ЭВМ и интегральные схемы.

Совершенно новой областью применения гелий-неонового лазера является голографический метод неразрушающего контроля.

«Голография позволяет выполнять все то, что возможно с помощью интерферометрии, но не имеет ее ограничений. С помощью лазерной голографии на фирме Bausch & Lomb получают эталонное устройство для промышленного применения» [2].

В настоящее время голография используется в экспериментальных работах по определению термических и механических напряжений в металлических образцах, автомобильных зубчатых колесах и т. п. Голограмма запоминает данные для последующей обработки. Она показывает, где и как напряженная деталь отклоняется от своей формы при ненапряженном состоянии.

Можно отметить также лазерный дифракционный прибор для измерения диаметров проводов и тонких нитей [6]. Он содержит гелий-неоновый лазер и фотоэлектрическое регистрирующее устройство с позиционно-чувствительными приемниками. Контролируемый провод движется между лазером и фотоприемником. Характер дифракционных картин, образующихся на фотоприемниках, зависит от диаметра контролируемого провода. Выходные сигналы фотоприемников используются для регулирования технологического процесса и определения диаметра провода. Предел измерения прибора ~ 200 мкм.

На фирме Bendix Corp. (США) разработан прибор для измерения наружных и внутренних размеров точных деталей, например подшипников, в котором используется лазерный интерферометр [45—46]. Прибор содержит щуп на подшипниках с воздушной смазкой, устройство цифрового отсчета. Он прост в эксплуатации и в несколько раз производительнее обычных приборов для относительных измерений. При этом не требуется никаких мерных деталей. Измерение наружного

и внутреннего диаметров выполняется за 2 мин, включая время установки. Результаты измерений фиксируются на магнитной ленте, перфокарте или непосредственно вводятся в ЭВМ. Первый прибор серии имел пределы измерений по наружному диаметру 0—30 мм и по внутреннему 2—12,7 мм, отсчет 0,00254 мм и погрешность по всему пределу 0,001 мм. Щуп перемещается аксиально. Измерительное усилие может непрерывно регулироваться в пределах 10—50 гс. Стол прибора имеет настроечное вертикальное перемещение 4,76 мм и поперечное 1,6 мм. Разрабатываются модели с пределами измерения до 230 и 760 мм.

В электронной схеме предусмотрена автоматическая компенсация изменения длины волны лазера с изменением температуры, барометрического давления и влажности. Предусмотрена также автоматическая проверка электронной схемы. При работе лазерный пучок входит в боковое отверстие датчика и расщепляется разделителем. Одна часть пучка отражается зеркалом, укрепленным на заднем конце подвижного щупа. Отраженные от зеркала и разделителя пучки интерферируют на мишени, содержащей 4 фоточувствительных элемента и образуют последовательность темных и светлых полос. Фотоэлементы считают проходящие полосы со скоростью одна полоса за перемещение щупа на $1/4$ длины волны. Щуп перемещается вперед и назад с помощью переключателя, создающего вакуум или положительное давление в системе.

Лазерный интерферометр используется также для контроля координатных самописцев 728 Flatbed plotters, применяемых главным образом при нарезании пленок для интегральных схем [47]. Координатные самописцы имеют стержень длиной 1,6 м, расстояние между концами которого измеряется с высокой точностью с помощью лазерного интерферометра с угловой призмой, помещаемой на объект измерения. Измеряется и выставляется также прямолинейность стержня и перпендикулярность его торцов к оси.

В Японии создана машина для измерения контуров [48—49]. При применении контактных наконечников тонкие изделия могут быть повреждены, так как при весе наконечника 1 г и диаметре 10 мкм контактное давление на объект составляет $1,3 \text{ тс/см}^2$.

В машине вместо щупа используется световой луч, сфокусированный объективом на исследуемый объект. В качестве источника света применяется гелий-неоновый лазер с $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$ или излучающий диод $\lambda = 0,7700 \text{ мкм}$. Рассеянный объектом луч фокусируется на сканирующую диафрагму, за который установлен фотоприемник. Выходной сигнал приемника подается на электронную систему. Максимальный размер исследуемого образца $3 \times 2,5 \times 1,5 \text{ м}$, по-

решность измерения линейных отрезков $\pm 0,15$ мм/м. Машина предназначена для измерения контура больших деталей в промышленности.

Универсальный лазерный интерферометр Тваймана — Грина использует в качестве источника света лазер и применяется, например, для измерения радиусов кривизны оптических элементов. Для устранения паразитной интерференции от многочисленных оптических деталей и для независимой регулировки интенсивности в каждом плече интерферометра применен поляризационный метод. В оба плеча интерферометра вводятся вращающиеся кварцевые пластинки в $1/4\lambda$, а на выходе интерферометра устанавливают анализатор. Излучение источника линейно поляризовано [50].

Приведенные примеры показывают многообразие возможностей применения лазерной техники для измерения размерных параметров и то, что она далеко не исчерпала своих возможностей.

Продолжается изучение возможных активных сред для источников лазерного излучения, пригодных для измерения длин, например исследуется возможность применения лазера на CO_2 в интерферометрах для измерения больших длин [51]. Потенциально такие источники наиболее полно отвечают требованиям интерферометрии больших длин. Они работают в области длин волн порядка 10 мкм и теоретически предел измерения этих интерферометров \sim в 20 раз больше, чем у интерферометров с источниками, работающими в видимом свете. Лазеры на CO_2 позволяют измерять дробное число полос, при этом не требуется точной установки положения подвижного отражателя в процессе измерения. Уже изготовлен и исследован один интерферометр для работы в естественных условиях на длинах до 10 м, изготавливается интерферометр для длин до 50 м, который будет установлен в туннеле для аттестации геофизических мерных лент. Теоретическая погрешность интерферометров этого типа $1 \cdot 10^{-7}$. Основным источником погрешностей является погрешность определения длины волны лазерного излучения.

2. КООРДИНАТНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Появление координатных измерительных машин тесно связано с развитием станков с программным управлением. Оно вызвано необходимостью проверки этих станков, а также проверки высокоточных деталей сложной формы в мелко- и среднесерийном производстве, в частности в ракетостроении. Первые машины были созданы в 1961 г. Трехкоординатная машина фирмы Ferranti была построена на базе координатно-расточного станка. Насколько назрела потребность

в таких машинах показывает тот факт, что за первые 1½ года было продано 350 машин.

Первой специальной координатной измерительной машиной с программным управлением была машина Probograph фирмы Wagner & Swasey. Она управлялась перфолентой и результаты измерения записывались прибором Flexograph в прямоугольных и полярных координатах. Машина имела поворотный стол и использовалась для измерения сложных контуров, в частности носовой части ракет. Измерительная головка перемещалась по трем координатам и погрешность формы определялась путем вертикального перемещения щупа при продольном перемещении головки.

Первые машины были дорогими и сложными. Выпускались они, в основном, крупными фирмами, издавна специализировавшимися на производстве как прецизионных станков, так и измерительных приборов, как Brown & Sharpe, Sheffield, Pratt & Whitney (США), Ferranti (Англия), SIP (Швейцария) и т. п. Машины использовались, в основном, ракетостроительными и другими крупными фирмами, выпускающими сложные по форме изделия со многими отверстиями, расположение которых связано жесткими допусками.

Однако очень скоро представители промышленности убедились, что сам принцип координатных измерений таит в себе огромные возможности и он оправдывает себя и для сложных контурных измерений, и для поточечного контроля, причем не обязательно только при очень жестких допусках.

Появились значительно более дешевые, менее точные машины высокой производительности, которые предназначены для контроля поковок, отливок, разметки и проверки корпусных деталей.

Накопленный в промышленности опыт автоматического контроля показал, что специальные автоматы, предназначенные для контроля одного типа или даже типоразмера деталей, оправдывают себя при больших партиях деталей относительно простой формы. Для крупногабаритных деталей сложной формы транспортные устройства очень сложны и дороги. Стоимость транспортных устройств, которая колеблется в пределах 20—90% стоимости автоматов [52], при сложной форме деталей делает автоматы нерентабельными. Кроме того, установка тяжелых деталей сложной формы в положение измерения с требуемой точностью очень затруднительна, создание устройств для поворота деталей с целью измерения в нескольких направлениях технически трудно осуществимо. В настоящее время при автоматизации наметилась тенденция оптимально использовать и сбалансировать преимущества человека и машины: гибкость и приспособляемость человека, его способность ставить задачу и принимать решение; отсутствие утомления и появления ошибок при од-

нообразной работе, быстродействие, стабильность, надежность, возможность работы в агрессивных средах, возможность запоминания большого количества информации, свойственные машинам.

Координатные измерительные машины являются в области размерного контроля примером оптимального сочетания человека и машины. Их можно рассматривать как высшее достижение современной техники линейных и угловых измерений и как наиболее перспективные средства измерения размерных параметров вне станков на ближайшее будущее.

Немаловажными преимуществами координатных измерительных машин, предопределивших их широкое распространение на предприятиях и в цехах с мелкосерийным производством и широким ассортиментом продукции, являются универсальность машин, простота переналадки, отсутствие необходимости точной установки деталей, поскольку отсчет измеряемых размеров можно производить от любой точки в пределах диапазона измерений.

Многообразие решаемых с помощью машин задач измерений, разнообразие измеряемых деталей определяют многообразие технических характеристик машин и применяемых на машинах датчиков и позиционирующих устройств. Поэтому дать сколько-нибудь полное описание и даже перечисление разнообразных выпускаемых большим количеством фирм машин не представляется возможным. Мы приведем несколько типичных примеров машин с кратким указанием их основных технических характеристик и областей применения [53—67].

Машина фирмы Ferranti (Англия) имеет пределы измерения по трем осям 760, 500, 250 мм. Датчики сменные. Начало отсчета возможно от любой точки. Цена деления шкал 1 мкм, стабильность отсчета 2 мкм, погрешность измерений на всем пределе 7 мкм. Центрирование детали производится конусной пробкой.

Трехкоординатная измерительная машина фирмы Staiger (ФРГ) имеет пределы измерения по осям X , Y и Z соответственно 430, 310 и 70 мм. Установка на точки измерения производится автоматически с шагом по осям X и Y от 1 до 20 мм. Время автоматического измерения 1000 точек — 4 ч. При переключении на ручное управление можно выполнять измерения в любой точке. Отсчет и фиксация результатов измерений производятся в цифровой форме. Погрешности измерения по осям X и Y не более 0,02 мм, по оси Z не более 0,01 мм. В другой модели машины погрешности вдвое меньше. Измерительное усилие 2,5 гс, что позволяет измерять нежесткие детали и применять наконечники с малым радиусом закругления [56, 57]. Объектами измерения являются штампы, штампованные детали, детали кинескопов и др.

Координатная измерительная машина фирмы Mitsubischi Electric Corp. (Япония) имеет 3-координатное сканирующее устройство на гелий-неоновом лазере с диаметром луча 0,3 мм. Семизначная десятичная система отсчета обеспечивает выход на 8-канальную перфоленгу со скоростью 500 строк в 1 мин. Скорость сканирования 17 мм/сек. Пределы измерения машины 5500 мм по длине, 2000 мм по ширине и 1500 мм по высоте. Вес машины 2500 кг [59].

Большая координатная измерительная машина типа Cordax фирмы Bendix Automotive & Automation (США) имеет 3-секционный стол, подвижную измерительную головку, 2 измерительные системы, вычислительный блок, цифровое отсчетное устройство, печатающее устройство и перфоратор. Габариты каждой секции стола 1828×914 мм. Максимальный предел измерения первой измерительной системы 4572 мм, второй системы — 914 мм. Погрешность измерений в диапазоне 5486 мм не превышает 0,2 мм, а в диапазоне 914 мм — 0,015 мм. Максимальная скорость перемещения измерительной головки 51 мм/сек. Максимальные габариты контролируемых изделий 5486×762×609 мм, длина машины ~ 6 м, вес 15 т [60].

Трехкоординатная измерительная машина типа Inspector фирмы Olivetti (Италия) имеет встроенное вычислительное устройство типа Programma 102, цифровое отсчетное и печатающее устройство, круговой стол и разметочное приспособление. Вычислительное устройство имеет блок памяти и клавиатуру ввода данных. Оно позволяет обрабатывать результаты измерений, например вычислять расстояние между отверстиями, определять диаметры, преобразовывать данные из одной системы координат в другую и переводить результаты измерений из метрической системы в дюймовую. Вычислительное устройство позволяет сократить время контроля путем использования блока памяти, расширить область применения измерительной машины и сократить количество необходимой измерительной оснастки. Контроль типовых изделий производится с помощью стандартных программ [65].

Фирма LK Tool Co, Ltd (Англия) выпускает стандартную 2-координатную измерительную машину серии Maxi-Check и специальную 3-координатную той же серии. Стандартная машина имеет гранитный стол с размерами 1220×1220 мм, подвижную траверсу с цилиндрическими направляющими и двумя вертикальными стойками, каретку с измерительной головкой и электронный блок с цифровым отсчетным устройством. Одна вертикальная стойка установлена на точных цилиндрических направляющих, закрепленных на гранитном столе. Вторая стойка установлена на регулируемой воздушной опоре. Регулировка опоры осуществляется с помощью эксцентрикового механизма. Применение регулируемой воз-

душной опоры позволяет осуществлять точную юстировку траверсы относительно поверхности гранитного стола. Каретка с измерительной головкой установлена на траверсе. В процессе измерения траверса со стойками перемещается по столу, а каретка с измерительной головкой движется по траверсе. У специализированной 3-координатной машины стол имеет размеры 1220×2440 мм. Конструкция основных узлов этой машины аналогична конструкции узлов 2-координатной машины. В машинах серии Maxi-Chek применяются измерительные системы Paramatic с максимальным пределом измерений 9999,9 мм и разрешающей способностью 0,01 мм. Максимальная скорость перемещения измерительной головки 385 мм/сек [66].

В универсальной 3-координатной измерительной машине SIP 422M [53, 62] применена новая измерительная система со стальными шкалами, фотоэлектрическими считывающими головками и электронными интерполяторами. Погрешность измерительной системы $\sim 0,1$ мкм. Максимальный предел измерения по оси X 406 мм, по осям Y и Z — 203 мм. Размеры стола 600×320 мм. Максимальный диаметр измеряемого изделия 203 мм, расстояние между центрами 438 мм. Отсчет результатов измерений в цифровой форме до 0,1 мкм. Машина снабжена позиционирующим и цифроречатающим устройствами. Позиционирование производится вручную или автоматически от перфоленты.

Запатентованная фирмой Ford Motor [54] 3-координатная машина для контроля размерных параметров 3-мерных объектов, например моделей кузовов легковых машин в натуральную величину, набивки перфолент для изготовления шаблонов и штампов, имеет цифраторы перемещений с разрешающей способностью 0,025 мм.

Измерительные машины широко используются для составления вручную или машинным способом программ к станкам с программным управлением для обработки деталей сложной формы. Специальный щуп обводит все места обработки детали, выдавая в цифровой форме на позиционный указатель или через преобразователь в блоке программирования на перфоленту значения координат по трем осям. Информация о цикловых или вспомогательных командах может быть введена с пульта задания вручную посредством декадных или адресных переключателей.

Приведем несколько примеров, показывающих сокращение стоимости контроля с помощью координатных измерительных машин.

На заводе фирмы Cummins Engine Co. (США), выпускающем около половины всех используемых в дорожных машинах США дизелей и поставляющем их крупнейшим фирмам, установлены 4 координатные измерительные машины Picom

Mark I фирмы Potter Instrument Co [68]. Одна из координатных машин служит для инспектирования работы линии сборки и проверяет одну из каждых 50 деталей, тем самым контролируя годность используемых в линии приспособлений и контрольно-измерительных приборов, а также работу контролеров. Точность и производительность машины дают возможность измерять параметры, которые раньше не могли быть проверены. Машина выявила, что часть контрольного оборудования пропускала детали, размеры которых были на границах допуска. После настройки оборудования класс работы линии повысился. На центральном контрольном пункте работает 100 контролеров, 6 контрольных мастеров и старший мастер. Пункт обслуживает участок основных деталей двигателей, таких, как блок цилиндров, головка блока, корпус маховика, маховик, коробка передач. Машина запрограммирована на измерение по трем координатам с погрешностью $\pm 0,00127$ мм и заменяет не менее 15 контроллеров. Другим источником экономии является облегчение и повышение качества сборки благодаря своевременному выявлению дефектов деталей. Вторая координатная измерительная машина используется для 100 %-ного контроля деталей, изготавливаемых мелкими партиями (25—200 шт.), где нерационально применение специального или труднонастраиваемого универсального контрольного оборудования. Настройка координатной измерительной машины выполняется в 20 раз быстрее, чем настройка обычных приборов. Третья машина контролирует покупные детали и узлы, а четвертая — обслуживает 12—15 техников, занятых исследованием нового оборудования и процессов, а также деталей вновь разрабатываемой продукции. Это экономит средства на создание контрольного оборудования для экспериментальных деталей, которые впоследствии могут не быть запущены в серийное производство. Координатная измерительная машина Mark I может измерять детали весом до 900 кг и габаритами до $925 \times 1524 \times 822$ мм. Горизонтальные перемещения датчика 467×610 мм, вертикальное 89 или 179 мм. Разрешающая способность 0,005 мм по осям X и Y и 0,0127 мм по оси Z. Повторяемость результатов $\pm 0,005$ мм. Фирма Potter Instrument Co. выпускает несколько типоразмеров машин, в том числе машину, в систему которой входит ЭВМ, которая помимо контроля деталей может готовить ленты для программного управления.

При контроле деталей сложной формы они закрепляются на машине соосно с ее осями, причем для выставления служат датчики, цифровое отсчетное устройство и встроенное поворотное настроенное приспособление. Затем датчик вводится в одно из отверстий детали, служащее базой, и цифровое отсчетное устройство нажатием кнопки устанавливается на

нуль. При движении датчика от одного отверстия к другому 3 координаты отсчитываются на цифровом табло от базового отверстия. К машинам выпускаются стандартные и специальные сменные датчики.

Экономическую эффективность применения координатных измерительных машин можно иллюстрировать опытом фирмы Norden Division of United Aircraft Corp. (США), выпускающей электронное оборудование скоростных самолетов [69].

Перед приобретением координатной измерительной машины Voice Gages был произведен подсчет ожидаемого выигрыша времени контроля, который был оценен величиной 2,8:1, т. е. предполагалось, что контрольные операции, выполняемые на плите с применением микрометров, высоотомеров, штангенциркулей и т. д. за 2,8 ч займут на машине 1 ч. В действительности оказалось, что выигрыш времени составляет 5:1. Для переналадки на контроль разнообразных деталей требуется только смена датчиков. Максимальный предел измерения по оси X — 1016 мм, по оси Y — 610 мм, по оси Z — 203,2 мм. Максимальная высота детали 787,4 мм. Кроме цифрового отсчета машина обеспечивает печатание результатов измерения. Цена деления отсчетного устройства 2,5 мкм, повторяемость результатов также 2,5 мкм, погрешность ± 5 мкм. Датчик перемещается по осям X и Y вручную с помощью каретки на подшипниках с воздушной смазкой. Начало отсчета от любой точки. Для отсчета координаты Z может подниматься или опускаться как стол, так и датчик. Для центрирования детали служит конический пробник.

При предварительном подсчете экономии исходили из 2-сменной работы в течение 252 дней в году при стоимости одного рабочего часа 5 долл. При этих условиях экономия составила 36 961 долл. в год. Покупная стоимость координатной измерительной машины 20 950 долл. При 4-летней амортизации с учетом стоимости установки капиталовложение за первый год было определено равным 8038 долл. Таким образом расчетная экономия за год составила 28 653 долл. В действительности она оказалась значительно больше, как было установлено на основании контроля 16 типовых деталей. Кроме прямой экономии необходимо учитывать простой станка при измерении первой детали, сокращение брака, поскольку дефекты при текущем контроле обнаруживаются быстрее и можно сразу ввести поправки в процесс. Точность координатной измерительной машины выше точности ручного контроля, ее обслуживание и проверка несложны.

Подшипники с газовой смазкой обеспечивают легкость перемещения тяжелых деталей и защиту от вибраций. Сокращение количества необходимых контрольно-измерительных приборов уменьшило затраты на их поверку и обслуживание. На чертеже контролируемой детали приводится список конт-

ролируемых точек, например количество отверстий и их координаты. Оператор после установки детали на машину перемещает датчик в соответствии с заданными координатами X и Y. Результаты измерений печатаются. Учитывая успешную эксплуатацию первой машины, фирма приобрела вторую для входного контроля, а затем и третью.

На фирме Lockheed (США) благодаря установке в отделе контроля инструментов большой 3-координатной измерительной машины Check—Mate время контроля крупногабаритных, точных и сложных инструментов и приспособлений сокращено в 5 раз [70]. Особенно облегчена проверка штампов и шаблонов для деталей выпускаемых фирмой самолетов. Кроме ускорения контроля машина облегчает обращение с крупногабаритными изделиями размерами до $3280 \times 970 \times 300$ мм. Гранитная траверса мостового типа машины перемещается на воздушных подшипниках из пористой бронзы по доведенным гранитным направляющим. Такая конструкция облегчает ручные операции, устраняет необходимость смазки, а также устраняет влияние теплового расширения.

Для уменьшения вибраций машина смонтирована на мягких подкладках. Отсчетная система Display—Mate обеспечивает дистанционный цифровой отсчет положений, выполняемый с помощью фотоэлектрического кодирующего устройства, которое преобразует линейное перемещение по каждой из трех осей в усиленный электрический сигнал. Сигнал воздействует на цифровой индикатор перемещений с наименьшим отсчетом 0,0127 мм. Повторяемость показаний на всем диапазоне 0,005 мм.

Контроль производится с одной установки. Предусмотрены крепежные устройства и точная регулировка по всем трем осям. Разность веса разнообразных датчиков компенсируется вертикальным уравнивающим дифференциальным пневматическим устройством.

Операция по контролю инструментов, вызывавшая простой координатно-расточного станка в течение 2 ч 30 мин, в настоящее время производится за 30 мин.

В статье, посвященной ближайшему будущему координатных измерительных машин [71], рассматриваются требования к машинам и способы их осуществления. Автор, представитель фирмы Bendix Corp, указывает, что все повышающиеся требования к точности обработки изделий и приспособлений вызывают необходимость в универсальных измерительных машинах с погрешностями до 0,08 мкм на отдельную ось. При конструировании таких машин требуется обеспечить наибольшую эффективность работы оператора; изолировать машину от вредных воздействий окружающей среды; конструктивными мерами добиться плавных, точных и

воспроизводимых перемещений; обеспечить компенсацию погрешностей механизмов для получения максимальной точности.

Пути решения стоящих перед конструкторами проблем рассматриваются на примере конструирования 2-координатной измерительной машины с программным управлением. Перед конструктором стоит задача создать машину, на которой должны проверяться наружные и внутренние поверхности тел вращения и изделий различной формы, причем должен обеспечиваться непрерывный (контурный) и поточечный контроль.

Вдоль оси Y перемещается стол машины, а по оси Z — каретка, несущая датчик. Эти перемещения должны быть строго перпендикулярны.

Настройка машины по эталонам должна производиться автоматически непосредственно перед измерениями и после них, пока изделие еще находится на машине.

Устройство управления должно обеспечивать введение поправок для компенсации погрешностей машины и погрешностей центрирования изделий. Необходимо конструктивно обеспечить простоту управления машиной и наименьшее влияние квалификации оператора на результаты измерений.

Таким образом конструкция механической части машины должна иметь максимальную точность, а система управления автоматически вычислять поправку на оставшуюся часть погрешности. Поэтому допуски на механическую часть очень жестки. Так, некомпенсированная суммарная погрешность по оси Y не должна превышать $(4 + 2D \cdot 10^{-6})$ мкм, (где D расстояние в мм от датчика до нулевой точки), а погрешность по оси Z $(6 \text{ мкм} + 1D \cdot 10^{-6})$ мкм. После компенсации максимальная погрешность по оси Y должна быть не более $(0,8 + 1,5D \cdot 10^{-6})$ мкм, а по оси Z — $(0,8 + 1D \cdot 10^{-6})$ мкм.

Факторами среды, влияющими на работу машин, являются температура и влажность воздуха в кондиционируемом помещении, где работает машина; ее нагрев от освещения и других источников тепла; вибрации, которые ослабляются с помощью соответствующего фундамента; наличие оператора.

Очень важна стабильность температуры самого измерительного устройства, так как длинный стальной рычаг, несущий датчик, может внести существенную погрешность от температурного удлинения.

Должно соблюдаться равенство температуры изделия и эталона и поддерживаться их нормальная температура $20^\circ \text{C} \pm 0,05^\circ \text{C}$, ответственные узлы машины должны иметь стабильную температуру с максимальным изменением $0,025^\circ \text{C}$ в 1 ч. Отсюда вытекают требования к системе термостатирования помещения.

Чтобы пиковая амплитуда вибраций не превышала 0,6 мкм при частоте 5 гц, машину нужно установить на массивную плиту, поддерживаемую пневматическими опорами. Система должна самоустанавливаться в горизонтальном положении так, чтобы оно не менялось при установке и снятии изделия.

Системы управления и отсчета должны находиться в шкафу, примыкающем к машине и установленном вне зоны воздушного потока. В шкафу должен быть предусмотрен теплообменник для поддержания температуры 20° С.

Оператор должен установить контролирующую деталь на машину в пределах 0,25 мм от центра вращения стола, поскольку программой ЭВМ предусмотрено введение поправки на эксцентricитет. Перед измерением включается цикл проверки.

Первоочередной задачей является обеспечение максимальной точности перемещения подвижных частей машины. Для этого в ней должны применяться подшипники с воздушной смазкой, шариковая передача винт — гайка, жесткий рычаг, несущий датчик.

В приводе должны быть предусмотрены тахометры для регулирования скорости двигателей по линии обратной связи, система охлаждения двигателей и тахометров. Сервосистема должна обеспечить перемещение каретки со скоростью 2,5—1000 мм/мин и погрешность позиционирования порядка 1,25 мкм. Команды на измерительные операции и позиционирование должны закладываться в запоминающее устройство ЭВМ. Каждые 10 мсек ЭВМ должна выдавать измерительную команду, отсчитывать значение изменения положения по сравнению с предыдущим отсчетом, выдавать новую команду позиционирования, вычислять погрешность, выдавать ее значение во внешнее буферное, запоминающее устройство, откуда после преобразования из цифровой в аналоговую форму сигнал поступает в устройство регулирования скорости привода. В ЭВМ поступают данные от автоматического автоколлиматора, измеряющего перекося кареток с погрешностью 0,1", в виде аналогового сигнала; от лазерного интерферометра с разрешающей способностью 0,127 мкм; от центрирующего интерферометра, контролирующего прямолинейность перемещения кареток с погрешностью 0,25 мкм, в виде аналогового сигнала напряжения; от лазерного датчика, контролирующего внешний контур с погрешностью 0,127 мкм; от дифференциального трансформаторного датчика, контролирующего внутреннюю поверхность с пределами измерения $\pm 0,05$ мм. Кроме того, из запоминающего устройства вводятся данные для компенсации погрешностей положения стола, непрямолинейности и перекося направляющих по обеим осям.

На выходе системы можно получить визуальный отсчет размеров и положения поверхностей, запись на ленте многоканального самописца, магнитную запись. ЭВМ производит 5 видов операций: настроечные (определение положения центра детали относительно стола и коэффициента преобразования счета полос в мм); расчет положения по осям; расчет поправки на геометрию; сравнение полученных данных с заданными технической документацией; преобразование выходных данных в двоично-десятичный код.

Количество операций, которые должны быть выполнены ЭВМ за время цикла servосистемы, равно 10 мсек, таково, что ее быстродействие должно обеспечить полный цикл этих операций в пределах 1 мсек. Требуются следующие периферийные устройства: пишущая машинка, высокоскоростной перфоратор, высокоскоростное считывающее устройство, аналого-цифровой преобразователь.

Представитель фирмы SIP (Швейцария) рассматривает требования, предъявляемые к точным измерительным машинам, и практические пути осуществления этих требований на примере машины Trioptic, выпускаемой фирмой [72]. При конструировании машины надо добиваться компромисса между требованиями точности, универсальности, удобства эксплуатации, относительной простоты изготовления и доступной цены.

Большое внимание уделяется жесткости и стабильности размеров станины, которую фирма изготавливает из чугуна с нервюрами и подвергает искусственному старению, прямолинейности и взаимной перпендикулярности направляющих, устранению заеданий и т. д.

Фирма Union Carbide Corp. (США) переделала координатно расточной станок SIP-6A в точную измерительную машину с пределами измерения 762×1016 мм [73]. Модификация заключалась в основном в установке подшипников с воздушной смазкой для перемещения ползуна по оси Z и встройке лазерного интерферометра для измерения по осям X и Y. Прямолинейность перемещения ползуна обеспечена в пределах 2 мкм на длине 762 мм, погрешность измерительной системы при условии кондиционирования 1,27 мкм, разрешающая способность 0,4 мкм. Девятимесячная эксплуатация машины почти без обслуживания доказала надежность машины.

Современный уровень развития электроники, измерительной и вычислительной техники обеспечивают необходимую точность, надежность и быстродействие измерительных и управляющих систем координатных измерительных машин. Основные трудности связаны с выполнением механических узлов, поэтому фирмы уделяют им большое внимание.

Фирма Shelton Metrology Laboratory включила недавно в производственную программу координатную измерительную машину, рассчитанную на нагрузку до 4,5 т на поворотный стол диаметром 2,7 м [74]. Сама машина весит 45 т и ее суммарная погрешность не должна превышать $\pm 0,025$ мм. Кроме поворота стола машина обеспечивает перемещение по трем взаимно перпендикулярным осям. Продольное перемещение равно 1270 мм, поперечное 1524 мм и вертикальное 1016 мм.

Фирма стремится создать универсальную машину, легко приспособляемую для специфических нужд потребителей. В качестве основного материала выбран гранит. Из него изготовлены поворотный стол и портал машины. Кроме возможности получения больших глыб и низкой стоимости гранит обладает стабильностью, износостойкостью, антикоррозионными свойствами, низким коэффициентом линейного расширения.

Очень большое внимание уделено обеспечению геометрической точности: прямолинейности, перпендикулярности, отсутствию сдвигов и заеданий. По мнению фирмы, необходимо стремиться свести к минимуму геометрические погрешности, не надеясь на системы электронной их компенсации. Инженеры фирмы сами сконструировали подшипники с воздушной смазкой, в которых обеспечен предварительный натяг. Была разработана специальная испытательная машина для имитирования нагрузок на подшипники. Удалось добиться такой легкости перемещения, что портал весом 3 т может быть сдвинут при приложении усилия к каждой колонне 60 гс. Но основным преимуществом подшипников является их надежная работа при различной толщине пленки. Путем изменения толщины пленки производится выставление в малых пределах прямолинейности и перпендикулярности.

Поворотный стол, весящий без нагрузки 2,7 т, а с нагрузкой 7,2 т, покоится на 32 плоских подшипниках. Разработана специальная технология сборки. Для проверки горизонтальности применяется ртутный уровень в виде сообщающихся сосудов. Для контроля прямолинейности перемещений разработана система Veritas, содержащая вращающийся в воздушных подшипниках вал и дифференциальный преобразователь с двумя вихретоковыми датчиками и цифровым отсчетным устройством. Погрешность системы $\pm 2,5$ мкм/м.

Фирма Brown & Sharpe, разработавшая координатную измерительную машину Validator-100 для деталей с габаритами до $914 \times 610 \times 457$ мм и весом до 1360 кг, также использует в ней подшипники с воздушной смазкой и поэтому уделила большое внимание достижению легкости движущихся узлов в сочетании с их жесткостью [75—78]. Машина предназначена для измерения координат и размеров отверстий

в деталях сложной формы, обрабатываемых на станках с программным управлением, в том числе в отливках с грубыми поверхностями. Для уменьшения веса подвижных элементов, уменьшения усилия и повышения точности перемещений эти элементы выполнены сварными из стальных листов с пластмассовыми сотовыми заполнителями. Поскольку пенопласт увеличивается при затвердевании примерно в 30 раз, то во избежание деформаций в процессе затвердевания стальные детали на это время обшивались фанерой и подвешивались на стальных лентах.

Машина содержит стальную шлифованную с плоскостностью 5 мкм станину, в которой смонтированы подшипники с воздушной смазкой, служащие опорой и направлением для траверсы, каретки, перемещающуюся по траверсе по аэро-статическим направляющим, и ползун, перемещающийся вверх и вниз на воздушных опорах каретки. Стол с пазами для крепления детали смонтирован на стальной плите и может поворачиваться на $\pm 2^\circ$ относительно центральной оси для выставления детали вручную относительно поперечных осей траверсы и каретки (осей Y и X).

Для поворота стола предусмотрено 2 микрометрических винта. Плита, на которой смонтирован стол, может быть поднята или опущена на 254 мм шагами через 63,5 мм. Перемещение осуществляется по четырем шлифованным точным колонкам с трапецеидальными пазами, отстоящими на 63,5 мм один от другого. В пазы с помощью пневмоцилиндров вводятся скользящие пластины, причем расположение и параллельность верхних плоскостей пазов гарантируют параллельность верхней плоскости стола плоскости $X-Y$ в пределах $\pm 1,27$ мкм на всем диапазоне вертикального перемещения. Предусмотрена система блокировок. По всем трем осям отсчет перемещений производится по стеклянным шкалам с металлическим покрытием и градуировкой 1250 делений на 25,4 мкм с помощью считывающего устройства с решающей способностью 1,27 мкм. Погрешность измерения $\pm 0,0025 + 0,00038 L$, где L длина перемещения в мм. Максимальная суммарная погрешность 0,0127 мм, повторяемость $\pm 0,0025$ мм.

Диаметры отверстий в диапазоне 12,7—61 мм, а также их координаты могут измеряться с помощью укрепляемых на ползуне микрометрических нутромеров и аналого-цифровых преобразователей угловых перемещений. Цена деления нутромеров 1,27 мкм, погрешность измерения ± 5 мкм.

Машина снабжена автономными цифровым отсчетным и вычислительным устройствами, а также телетайпом. Вычислительная машина типа PDP-8/1 и телетайп 33-ASR используются для обработки результатов измерений, хранения ин-

формации, печатания результатов подготовки программ для станков и могут применяться как самостоятельные блоки.

Созданная фирмой Fellows Corp. измерительная машина Microlog 50 предназначена для автоматического контроля крупногабаритных прямо- и косозубых колес, колес с зацеплением Новикова, червячных колес, кулачков, турбинных лопаток и может использоваться для подготовки программ для станков с цифровым программным управлением [79—80]. Автоматическое управление циклом контроля осуществляется ЭВМ. Машина имеет основание, поворотный стол с вертикальным шпинделем, вертикальную стойку с горизонтальными направляющими, каретку с вертикальными направляющими, каретку с измерительной головкой, лазерный интерферометр, фотоэлектрический аналого-цифровой преобразователь угловых перемещений, цифровое отсчетное устройство и цифропечатающее устройство.

Стол установлен на основании, расположенном на трех регулируемых воздушных опорах. Основание изготовлено из гранита с высоким содержанием кварца. Вес основания ~7 т. Стойка с горизонтальными направляющими также расположена на основании. Каретка с вертикальными направляющими установлена на горизонтальных направляющих, а каретка с измерительной головкой — на вертикальных. Стол, стойка с горизонтальными направляющими и обе каретки имеют независимые приводы. Максимальная скорость вращения стола 2 об/мин. Максимальная скорость перемещения стойки и кареток 1,14 м/мин. Лазерный интерферометр используется в качестве элемента обратной связи системы измерения линейных перемещений, а фотоэлектрический аналого-цифровой преобразователь — системы измерения угловых перемещений. Контролируемые колеса устанавливаются на столе машины. В процессе измерения зубчатое колесо последовательно поворачивается на соответствующий угол, а измерительная головка позиционируется по вертикальной и горизонтальной координатам с помощью программного устройства. Погрешность позиционирования по линейным координатам не более 0,075 мкм, а по угловым не более 0,62°.

Основные программы заложены в запоминающее устройство ЭВМ, текущие данные по всем координатам вводятся по телетайпу. Величины перемещений отдельно по всем линейным и угловой координатам отсчитываются также по табло с цифровыми индикаторами, имеющим 7 цифр и знаки + и —.

Все рабочие перемещения в машине осуществляются по аэростатическим направляющим. Машина может с высокой производительностью последовательно измерять 6 параметров колес диаметром до 1270 мм, углом зацепления до 30°,

винтовой линией от 1,25 мм до бесконечности и весом 3 г: профиль, винтовую линию, окружной шаг, длину линии раз-
вертывания, некрутость, биение.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН В РАЗМЕРНОМ КОНТРОЛЕ

При рассмотрении измерительных машин мы уже описывали функции используемых в сочетании с ними встроенных или автономных ЭВМ.

Можно привести еще ряд примеров [81—84], но важно отметить, что вычислительная техника, которая до последнего времени применялась в непрерывных процессах, стала успешно использоваться теперь при измерении отдельных деталей.

ЭВМ применяются при контроле в процессе производства, при послеоперационном и окончательном контроле [85].

В качестве примеров контроля в процессе производства можно напомнить о применении ЭВМ в лазерных интерферометрах, встраиваемых в измерительные машины. Для получения достоверных данных необходимо в каждом положении выполнять 4 вычисления, практически непрерывно (30 раз в 1 сек): перевод длины волны в количество полос на единицу длины; поправку на барометрическое давление, поправку на влажность; поправку на температуру среды.

Другим примером является адаптивное регулирование геометрических погрешностей измерительных машин. Так, в измерительной машине IBM используется ЭВМ, которая по линии обратной связи вводит поправку на погрешности, вызываемые непрямолинейностью направляющих, смещением линии измерения от оси измерительной системы и другие присутствующие измерительной машине погрешности. ЭВМ в этой системе обеспечивает поточечный контроль в процессе производства путем подачи команд в устройство программного управления.

При послеоперационном контроле вычисления часто выполнялись и раньше, например при селекционной сборке, при учете износа инструмента для подналадки станков. Однако использование ЭВМ позволяет производить не только более сложные расчеты, повысить их производительность, но и выполнять управление по собранным данным, например готовить перфоленты для обработки на станках с программным управлением деталей сложной формы. Процесс подготовки ленты на машине Sheffield Cordax начинается с того, что щуп, диаметр которого равен диаметру режущего инструмента станка, описывает контур образцового кулачка. Координаты точек передаются на промежуточное запоминающее устройство ЭВМ, затем избыточная информация отобра-

сывается и только те данные, которые определяют профиль кулачка, печатаются и пробиваются. Плотность данных выбирается автоматически для линейной интерполяции так, чтобы при соединении последовательных точек прямыми линиями погрешности от разности длин хорды и кривой была не более допустимой (например, 0,1 мм) и на сложных участках было много точек, а на гладких мало. На ленте печатаются соответствующие ходы и скорости подачи, так что она может непосредственно использоваться на станке для обработки контура кулачка.

При окончательном приемочном контроле ЭВМ применяется для сбора и запоминания данных, а также для расчета погрешностей, причем максимально используются выходные печатающие устройства.

Необходимость применения вычислительной техники связана с повышением производительности обработки благодаря применению станков с программным управлением.

ЭВМ используется при статистическом контроле и для анализа качества продукции.

Например, статистический расчет точности координатной измерительной машины Cordax выполняется по результатам 5-кратного измерения отверстий в специальной контрольной плите. Всего делается 170 отсчетов. Выполненный ЭВМ анализ данных используется в качестве критерия при приемке изготовленных фирмой Bendix координатных измерительных машин.

При анализе качества продукции, контролируемой на измерительной машине со встроенной ЭВМ, за 2 ч выполняется отсчет по 795 точкам, производится 265 вычислений и печатаются все данные. При ручной обработке данных эти операции требовали 125 ч.

Фирма Digital Electronic Automation Sp A (Италия) выпускает универсальную ЭВМ типа DEAC 1001, предназначенную для эксплуатации в машиностроительных цехах, в частности для управления координатными измерительными машинами, выпускаемыми фирмой.

В машине широко используются односторонние запоминающие устройства, построенные на магнитных сердечниках. Во внешних устройствах машины применяются магнитные ленты и перфоленты. Стандартное запоминающее устройство позволяет хранить 148 команд, но максимальное число команд доходит до 256. При создании машины много внимания было обращено на обеспечение простоты обслуживания, устранение возможности ошибок недостаточно квалифицированных операторов, обеспечение надежности работы в цеховых условиях, возможность обработки данных измерений крупногабаритных деталей, универсальность машины, простоту смены команд и т. д.

Первый опыт применения ЭВМ для управления контрольным пунктом, оснащенным многочисленными контрольными устройствами, осуществлен английской фирмой Raleigh Industries Ltd, выпускающей 100 видов продукции большими партиями [86]. В системе используются датчики, непосредственно связанные с ЭВМ, запрограммированной на обработку поступающих данных и выдачу на световое табло данных о годности или браке деталей. ЭВМ, кроме того, печатает результаты измерений всех размеров и по накопленным данным строит гистограмму, по которой можно определить смещение настройки станков. Это смещение сигнализируется в цех для введения коррекции до выхода размеров за пределы допуска.

Проверив надежность системы путем 18-месячной эксплуатации, фирма Raleigh разработала 12 специальных контрольных устройств, связав их с ЭВМ фирмы Elliott Automation ARCH 102, оснащенной печатающим устройством IBM 735 и телетайпом Greed 75. ЭВМ принимает сигналы от восьми устройств одновременно. Фирма Raleigh считает, что на любом заводе, имеющем не менее 100 станков, система окупится за 3 года.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА *

1. Weber H. Der Laser als Messinstrument. Teil 1. «Messen und Prüfen», 1971, 7, № 1, 1721, A6 (1971, 6.32.239)
2. Sandford J. E. Laser Metrology Sharpens its Costs. «Iron Age», 1971, 207, № 14, 57—62 (1971, 9.32.346)
3. Rowley W. R. C., Stanley V. W. Practical Consideration in the use of laser measurement techniques with machine tools. «Advances Machine Tool Design and Research, 1967, part 2, «Oxford et al., 1968, 1225—1232 (1970, 5.32.249)
4. Schede Robert W. Add Laser interferometer to your production machines. «Automation», 1971, 18, № 3, 50—53 (1971, 9.12.348)
5. Langenmessungen mit dem Laser—Interferometer W. S. «Maschine», 1971, 25, № 2, 61 (1971, 7.32.304)
6. Cooper B. K. Laser Optics—an invisible check on workshop accuracy. «Engineer» (England), 1969, 229, № 5943, 5944, 25—27 (1970, 5.32.250)
7. Sachs. Werkstatt—Laser—Interferometer für Langen messungen. «Werkstattstechnik», 1970, 60, № 7, 341 (1970, 12.32.221)
8. Etalonnage accéléré au moyen d'un interféromètre à laser. «Revue polytechnique», 1970, № 1275, 291, 293 (1970, 9.32.255)
9. Etalonnage accéléré grâce au «lasergage» transportable. «InterTECNIC», 1969, nov., 999—100 (1970, 4.32.284)

* При отсутствии других ссылок, цифры в скобках показывают, в каком году, в каком номере РЖ «Метрология и измерительная техника» (выпуск 32), за каким индексом опубликован реферат по данной статье.

10. Calibrazione piu rapide con il «lasergage» portatile. «Industria vernice», 1969, 23, № 10. Laboratoria, 14, № 15, 6—7 (1970, 4.32.285)
11. New laser interferometer. «Tooling», 1969, 23, № 9, 58—59 (1969, 12.32.317)
12. Laser interferometer for tool calibration (United Kingdom) «Interavia Air Letter», 1969, № 6792, 6 (1969, 12.32.318)
13. Rascheres Kalibrieren mit fahrbare Lasermessgerät. «Maschine», 1969, 23, № 10, 70 (1970, 3.32.252)
14. New Perkin—Elmer lasergage interferometer permit 3/4 microinch resolution. «Instrument News. Perkin—Elmer Corp.», 1970, 20, № 3, 2, 7 (1971, 1.32.265)
15. Sachs. Laser—Längen—Interferometer fur Werkstattmessungen. «Draht», 1970, 21, № 10, 794—795 (1971, 2.32.372)
16. Bonfig K. W., Greis P. Anwendung des LASER in der Längenmessung und Holographie. «Archiv für technisches Messen», 1970, 416, 193—198 (ЭИ «Контрольно-измерительная техника», 1970, вып. 48, реф. 324)
17. Laser—Interferenzmesser mit digitaler Anzeige und Messwertdrucker. «Vermessungstechnische Rundschau», 1970, 32, № 8, 309—310 (1970, 12.32.223)
18. Weber H. Der Laser als Messinstrument. Teil 2. «Messen und Prüfen», 1971, № 2, 57—61, 65, A8 (1971, 7.32.301)
19. Laser interferometer direct readout for machine tool calibration. «Machine Market», 1969, № 3583, 19—20 (1969, 12.32.319)
20. Laserinterferometer mit digitale Messwertausgabe. «Werkstatt und Betrieb», 1969, № 11, 826 (1970, 3.32.348)
21. Low-cost modular laser interferometer made for machine shop precision requirements. «Western Machine and Steel World», 1970, 61, № 4, 46, 50 (1970, 12.32.222)
22. Interferometer laserowy. «Mechanik», 1970, 43, № 1, 27—29 (1970, 10.32.216)
23. Ohly Joahim K. Frequenzstabilisiertes Laser—Interferometer für Feinmessungen, «Messen und Prüfen», 1970, 6, № 9, 713—714 (1971, 2.32.377)
24. Hock Fromund, Kindl Helmut, Latzin Waltrand, Sauter Gerhard. Laser—Interferometer, ein Gerät zum Ausmessen und Justieren von Werkzeugmaschinen. «Siemens—Bauteile—Information», 1970, 8, № 5, 140—145 (1971, 4.32.306)
25. Frequenzstabiles Helium—Neon—Laserggerät. «Werkstatt und Betrieb», 1970, 103, № 11, 842, 1, 2 (1971, 4.32.307)
26. Barringer B. W., Bonner A. J. A commercial laser interferometer for length measurement by fringe counting. «Radio and Electronic Engineer», 1970, 40, № 1, 49—55 (1971, 1.32.264)
27. Laserstrahl Messverfahren rationalisiert die Überprüfung von Werkzeugmaschinen. «Industrie Rundschau», 1970, № 12, 41 (1971, 5.32.340)
28. Laserstrahl Messverfahren rationalisiert die Überprüfung von Werkzeugmaschinen. «Werk und Technik», 1971, 11, № 1, 4—5 (1971, 6.32.242)
29. Reduction du temps de contrôle des machines grâce à la technique de mesure par laser. «Revue technique européenne», 1971, № 1, 21 (1971, 6.32.243)
30. Programiertes Prüfen mit Laser—Geräten. «Werkstatt und Betrieb», 1971, 104, № 3, 172, 3, 4 (1971, 8.32.326)
31. Laserstrahl Messverfahren rationalisiert die Überprüfung von Werkzeugmaschinen. «WO—Maschinenfunk», 1971, 22, № 3, 24—26 (1971, 7.32.307)
32. Barker A. J. Laser interferometer for checking Giddings and Lewis—Fräser machines. «Machine and Production Engineering», 1971, 118, № 3046, 495—498 (1971, 8.32.325)

33. Long path difference interferometry using a simple gas laser. «Applied Optic», 1970, 9, № 12, 2809—2810 (1971, 5.32.342)
34. Neues Laser—Interferometer für Präzisionsmessungen. «Feinwerktechnik», 1970, 74, № 12, 523 (1971, 5.32.338)
35. Dual frequency interferometer ready to work for industrie. «Production Engineer», 1970, 41, № 11, 112—113 (1970, 12.32.1315)
36. Rudé A. L. Interféromètre à laser bifréquence et ses application au contrôle et à l'étalonnage des machine-outils. «Electronique industrielle», 1970, № 138, 685—689 (1971, 4.32.308)
37. Interféromètre à laser. «Machine—Outil française», 1970, 35, № 269, 171, 173, 175, 177 (1971, 4.32.309)
38. Interféromètre à laser à chauffage instatane et lecture immédiate. «Instrument et laboratoire», 1970, № 54, 31 (1971, 4.32.310)
39. Laser—Interferenzmeter zum ultragenauen Messen von Distanzen und Geschwindigkeit. «Schweizer Maschinenmarkt», 1970, № 49, 51 (1971, 4.32.311)
40. New laser interferometer needs no warm—up period. «Optical Spectra», 1970, 4, № 6, 62—63 (1971, 2.32.375)
41. Bell Sally Ann. To the latest microinch. Laser Interferometer. «Western Machine and Steel World», 1971, 62, № 6, 4—7 (1971, 12.32.319)
42. Fellner—Feldegg Hugo. Längenmessung mit Lasern. «Umschau», 1971, № 12, 433 (1971, 11.32.372)
43. Laser—Interferometer für Präzisionsmessungen. «Elektronik», 1971, 20, № 2, 48 (1971, 7.32.305)
44. Morokumo Tadashi, Aihara Momoru, Fukuoka Kenji, Koyama Makoto, Sukigara Shigeo. Laser length measarement with automatic compensation for Abbe's error. «Bulletin Japan Society of Precision Engineer», 1970, 4, № 4, 101—104 (1971, 7.32.303)
45. Laser gage... many time faster «Automatic Machines», 1969, 30, № 10, 42 (1970, 3.32.244)
46. Bendix gauge with laser interferometer transducer. «Machinery and Production Engineering», 1969, 115, № 2968, 544—545 (1970, 3.32.245)
47. Laser interferometer helps build precision into flatbed plotters. «Western Machine and Steel World», 1970, 61, № 10, 25—26 (1971, 6.32.241)
48. Ando Shigeru, Taniquchi Ichiro, Okada Kazuo. Laser—Profiliermaschine für Konturenmessungen. «Laser», 1970, 2, № 2, 9—12 (1971, 1.32.274)
49. Ando Shigeru, Sato Kazunari, Aoki Masao, Okada Kazuo, Kukichi Makoto, Sugano Tsutomu. An application of the laser in contour measurement. «Record 10th Symposium Electron, Ion and Laser Beam Technology, Gaithersburg, Md 1969», San Francisco, Calif. 1969, 249—258 (1971, 1.32.275)
50. Brunning J. H., Herriott D. R. A versatile laser interferometer. «Applied Optic», 1970, 9, № 9, 2180—2182 (1971, 1.32.263)
51. Turner R., Pfitzer E. K. Practical application of the Laser to long distance measurement by interferometry. «Metrologia», 1970, 6, № 3, 94—97 (ЭИ «Контрольно-измерительная техника», 1970, вып. 44, реф. 297)
52. Mannette Arthur W., Jr. Tips in Selecting dimensional gaging Systems. «Automation» (USA), 1971, 18, № 2, 46—50 (1971, 9.32.260)
53. New SIP universal measuring machine «Machinery and production engineering», 1970, 117, № 3030, 954 (1971, 4.32.316)
54. Stevenson Earle H. Surface scanner for measuring of point on a three—dimensional surface [Ford Motor Co]. Пат. США, кл. 33—174 (601 b 7/28), № 3531868, заявл. 18.04.68, опубл. 16.10.70. (1971, 6.32.227)
55. Numerical Messmaschine für drei Achsen K. H. «Industriekurier. Technik und Forschung», 1969, 22, № 17, 310 (1969, 11.32.281)

56. Dreikoordinaten—Messautomat. «Konstruktion Elemente Methoden», 1969, 4, № 5, 48, 53 (1969, 11.32.279)
57. Dreikoordinaten—Messautomat. «Feinwerktechnik», 1969, 73, № 6, 287 (1969, 11.32.280)
58. Laser and Computer speed NC programming. «Machinery» (USA), 1969, № 6, 54—55 (1970, 2.32.272)
59. Ito Saburo. Laser model measuring machine «Technical Japan», 1969, 1, № 3, 74—75 (1969, 9.32.168)
60. Large Sheffield Cordax measuring machine. «Machine and Production Engineer», 1970, 116, № 2988, 249 (1970, 8.32.206)
61. Dreidimensionale Messmaschine «Feinwerktechnik», 1971, 75, № 3, 136 (1971, 9.32.351)
62. Universal Messmaschine. «Konstruktion Element Methoden» 1971, 8, № 4, 82, 87 (1971, 9.32.350)
63. Schulz H. On-line—Kupplung mit einem Kleincomputer—Neue Einsatzmöglichkeit für Messmaschinen. «Werkstatt und Betrieb», 1970, 103, № 9, 733—737 (1971, 1.32.268)
64. Messmaschine mit Kleincomputer. «Feinwerktechnik», 1970, 74, № 8, 358 (1971, 1.32.269)
65. Messmaschine mit Kleincomputer. «Ingenieur Digest», 1970, 9, № 11, 96 (1971, 4.32.317)
66. Astrop A. W. Maxi-Check 3D and 2D inspection equipment. «Machinery and Production Engineering», 1971, 118, № 3039, 209—210 (1971, 8.32.327)
67. Programmierung mit der Messmaschine. «Industrie Anzeiger», 1970, 92, № 70—71, 1686 (1971, 2.32.371)
68. Coordinate measuring machines cut inspection costs. «Machinery» (USA), 1971, 77, № 5, 45—49 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1971, вып. 36, реф. 280)
69. Old «Jo» replaced by a machine — for faster inspection «Tooling and Production», 1969, 35, № 3, 102—104 (1969, 11.32.278)
70. Harrel J. D. Big coordinate measuring machine speeds tool checking at Lockheed. «Western Machine and Steel World» 1970, 61, № 10, 22—23 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1971, вып. 9, реф. 77)
71. Arnold William C. Tomorrow's inspection machines. «Machine Design & Control», 1970, 8, Febr. 26—29 (1970, 8.32.205)
72. Petsch C. Caractéristique d'une machine de précision. «L'ingenieur et le technicien de l'enseignement technique», 1969, 24, № 144, 29—32, 41 (1971, 4.32.315)
73. Woodall N. D. Application of air bearing and laser interferometry to an inspection machine. «Paper ASME», 1970, N. WA/Prod — 29, 9 pp., ill. (1971, 11.32.372)
74. Schaffer George. CMMs come in all sizes. «American Machinist», 1971, 115, № 15, 43—46 (1971, 12.32.330)
75. Measuring system speeds inspection. «Tooling and Production», 1969, 35, № 2, 2, 60—61 (1969, 12.32.311)
76. A system approach to coordinate measurement. «Tool and Manufacturing Engineer», 1969, 62, № 5, 56—57 (1969, 12.32.312)
77. Machine tool are lighter and easier to use when polyurethane replaces die casting. «Iron Age», 1969, 203, № 13, 88—89 (1969, 12.32.315)
78. Sidder P. A. Brown & Sharpe Validator—100. «Machinery and Production Engineering», 1970, 117, № 3012, 211—215 (1970, 12.32.216)
79. Van Cleave Dave. Big gear are accurately measured with computer controlled system. «Production Engineer», 1970, 41, № 25, 42—43 (1971, 6.32.265)
80. Metrological six-pack. «Tooling and Production», 1970, 30, № 8, 59 (1971, 6.32.366)

81. Ashley F. R., Miss Murphy E. B., Savard H. J., Jr. A computer controlled coordinate measuring machine. «Bell System Technical Journal», 1970, 49, № 9, 2193—2202 (1971, 6.32.225)
 82. Barker A. J. A highly-versatile computer for workshop applications. «Machinery and Production Engineering», 1970, 117, № 3031, 979—982 (1971, 6.32.226)
 83. Mullins P. J. Trends in digital inspection. «Iron Age Metal working International», 1971, 10, № 5, 46, РЖ «Вопросы технического прогресса и организации производства в машиностроении», 1971, 10.35.177
 84. Computer boosts use of CMM. «American Machinist», 1971, 115, № 9, 52—53. РЖ «Вопросы технического прогресса и организации производства в машиностроении», 1971, 10.35.178
 85. Birrell Kirk E. Computers are being applied to dimensional measurement in production of discrete parts. «SAE Journal», 1969, 77, № 11, 33—38. (1970, 5.32.203)
 86. Astrop A. W. The Raleigh computirized inspection System. «Machinery and Production Engineering», 1969, 114, № 2943, 562—566 (1969, 11.32.227)
-

СОВМЕЩЕНИЕ ХРОМАТОГРАФОВ С МАСС-СПЕКТРОМЕТРАМИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

В. С. Краснова

Для повышения эффективности научно-исследовательских и аналитических работ в институтских и заводских лабораториях требуется оснастить их современным оборудованием, модернизировать устаревшие приборы или заменить их новыми, повышающими точность физико-химического исследования качественного и количественного состава веществ при **одновременном ускорении** получения результатов и резком повышении эффективности и качества работы химиков-аналитиков. В настоящее время лаборатория не может ограничиться простыми процессами анализа, а должна прибегать к нескольким методам одновременного анализа для получения однозначного ответа на поставленные вопросы. Применение математических методов обработки полученных результатов эксперимента с помощью вычислительной техники позволяет сократить количество опытов, ускорить обработку данных, точно и объективно выявить взаимозависимость параметров технологического процесса или свойств вещества. Одними из перспективных установок, применяемых для исследования, контроля и управления процессами в химической промышленности, являются хроматографы, совмещенные с масс-спектрометрами, используемыми в качестве детекторов, и с ЭВМ для расчета и регулирования процессов. На симпозиуме по газовой хроматографии (Лондон, 10 апреля 1970 г.) [1] в числе других вопросов обсуждались ограничения, связанные с применением небольших ЭВМ в системах хроматограф — ЭВМ, рассматривались требования, предъявляемые к ЭВМ, используемым совместно с хроматографом для количественного анализа в лабораториях научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий: возможность превра-

щения аналоговых сигналов в цифровую форму, обработки полученных данных и передачи их на центральную ЭВМ, обеспечение с помощью обратной связи управления вводом проб, переключения колонок и клапанов, регулирования расходов, чувствительности приборов. В качестве примера приведены результаты применения системы хроматограф — ЭВМ для определения летучести бензина. Использовалась хроматографическая колонка с программированием температуры от 5 до 105° С за 13 мин. Продолжительность анализа одной пробы составляла 20 мин. С использованием хроматограммы и градуировочной кривой можно определить температуру кипения бензина. В обзоре основных тенденций развития аналитического приборостроения [2] отмечается значительное расширение применения ЭВМ в аналитических системах.

Указывается, что современная ЭВМ может обслуживать большое число хроматографов для расчета результатов анализа, повышения точности расчета в 20—100 раз, контроля функционирования приборов. Возможность автоматической коррекции отклонений измеряемых параметров от заданных величин позволяет на основании вычисленных средних данных использовать ЭВМ для регулирования процессов, в том числе и с замкнутой цепью. Датчики составов с блочной или модульной конструкцией, используемые совместно с ЭВМ [3], должны быть надежными, точными, быстродействующими, высокочувствительными. Выходной сигнал детектора должен быть непрерывным и пригодным для последующей обработки с помощью ЭВМ и контроллера. Для оценки работы хроматографической колонки разработана цифровая логическая система точного регулирования временных последовательностей до $1 \cdot 10^{-5}$ и времени отбора и ввода проб со среднеквадратическим отклонением 380 мксек [47, 70].

Случайные ошибки измерения времени удерживания компонентов в хроматографической колонке обуславливаются, в основном, нестабильностью условий эксперимента (колебания температуры, перепад давления в колонке, давления на выходе колонки, широкий диапазон хроматографических пиков, обуславливающий неопределенность установления начала и конца хронометрирования их).

В результате теоретических и экспериментальных исследований получено уравнение, связывающее условия проведения эксперимента с временем удерживания. Для достижения сходимости в повторных определениях времени удерживания в пределах 1% необходимо поддержание давления на входе в колонку с погрешностью 0,5%, а постоянство температуры с погрешностью $\pm 0,4^\circ$ С, погрешность измерения времени по хронометру должна быть не более 0,5%. Для обеспечения сходимости 0,01% температура должна выдерживаться с

погрешностью, не превышающей $0,0035^{\circ}\text{C}$, для вычисления результатов необходимо использование ЭВМ [22].

Система отбора данных должна содержать измеритель времени, работающий в истинном масштабе времени, аналого-цифровой преобразователь с запоминающим устройством, преобразующий аналоговый сигнал напряжения в диапазоне от 0 до 10,23 в в двоичный код. Программа работы ЭВМ содержит выбор типа пробоотборного клапана и регулирование его работы, связь с оператором через телетайп до установления начальных параметров, отбор данных со скоростью, задаваемой аналого-цифровым преобразователем, определение начала, конца и площади пика, результаты анализа эталонного образца с целью обеспечения ЭВМ данных для оценки пика и вычисления концентраций, выбор данных для нанесения их на перфоленту.

Использование замкнутой цепи хроматограф — ЭВМ повышает сходимость результатов измерения площади и высоты пиков, определяемых путем повторных анализов сложных смесей органических соединений [4, 5, 6, 7, 29, 30].

В простейшей схеме связи хроматографа с ЦВМ [18] датчик хроматографа подключается к аналоговому входу цифровой управляющей машины через нормирующий преобразователь. По сигналу «Начало анализа» ЭВМ начинает предварительную обработку поступающей информации, прекращает ее по сигналу «Конец анализа» и начинает полную обработку. Эта схема может быть использована в случае, если центральная управляющая ЭВМ (ЦУВМ) обладает быстродействующим аналого-цифровым преобразователем и не требуется автоматического переключения чувствительности детектора или возможно программное переключение таймера хроматографа. Возможно осуществление связи хроматограф — ЦУВМ через цифровое устройство предварительной обработки, осуществляющей коррекцию нуля, выбор пиков и интегрирование их. Устройство предварительной обработки связано с ЦВМ по каналам прерывания, по которым поступают сигналы «максимум» для идентификации пиков и сигналы «готов», по которым ЦУВМ начинает обработку накопленных данных. Эта схема связи может использоваться при четком разделении пиков. В противном случае необходимо учитывать возникновение дополнительных погрешностей. Детектирование, коррекция и интегрирование основной линии совмещенных пиков осуществляются в истинных масштабах времени. Вычисление составов производится с использованием внутренних и внешних стандартов или по значениям коэффициентов чувствительности [18].

Фирма Hewlett Packard [7] разработала установку, совмещающую автоматический газовый хроматограф модели 7600 А с ЭВМ, которая имеет 4 цикла работы: ввод пробы,

анализ ее состава, выход сигналов в аналоговой или цифровой форме и их обработка.

Для автоматической обработки данных газового хроматографа фирма Симадзу Сэйсакусе (Япония) [10] предлагает осуществлять сочетание измерителя пиков с запоминающим устройством и селектором ЭВМ. Газовые хроматографы могут быть совмещены с различными вычислительными машинами, например пневматического типа [11], содержащими формирователь импульсов, анализатор пиков, счетчик импульсов, блоки запоминания максимумов, выбора пиков, оперативной памяти, ввода пиков, командный и выходной блоки.

В литературе отмечается, что могут быть использованы различные типы ЭВМ: как IBC 1800 [12; 13, 14, 16]; IBM 1800/I [17]; IBM 360/67 [19]; IBM 360/75 [20]; PDP-8 [21, 24]; PDP-8/I [22]; Varian Aerograph mod 210—8 и 210—12 [6]; Varian Dark 620i [8]; Hewlett Packard mod 2115 A [7]; 2114—BHP [4]; EAY-640 [23]; FACON [29] и др. Описана система обработки данных, поступающих из 25 независимых лабораторий от 70 хроматографов с использованием ЭВМ типа IBM 1801 [17].

ЭВМ имеет 32-разрядную оперативную память на дисках с 2,5 млн. слов. Ввод и вывод данных обеспечивается четырьмя устройствами цифropечати, тремя устройствами ручного ввода данных и перфоратором типа IBM 1442. В централизованной системе обработки результатов анализов газовые хроматографы являются основными приборами и для них разработаны универсальные программы, а все остальные устройства — вспомогательными со специализированными программами, предусматривающими выполнение операций, нужных данному потребителю. Предусмотрена возможность подключения к системе любого прибора без перерыва в работе хроматографа. Предусмотрены ежедневный резерв в полтора часа для разработки новых применений, усовершенствования системы и устранения дефектов программ. На физической выставке (Англия, 1970 г.) [25] в числе экспонатов представлена установка, разработанная промышленным химическим исследовательским центром BP Chemical Ltd, включающая в себя вычислительное устройство для непрерывной обработки данных хроматографического анализа. На выставке демонстрировалось применение установки для вычисления по записанным на ленту хроматограммам точки застывания газойля с выдачей результатов в цифровой форме. Фирма Celunese Chemical Company (США) [23] в лаборатории контроля качества и научно-исследовательской лаборатории использует систему, содержащую газовый хроматограф — ЦВМ типа EAI-640 с запоминающим устройством на сердечниках на 16 384 знака, длиной кода 17 бит; аналого-цифровой преобразователь с рабочим диапазоном 5 мкс — 10 в и 3 независимо

работающих телетайпа. Система снабжена пультами переключения типа телефонного коммутатора, с помощью которого 20 из 60 (или 84) газовых хроматографов могут быстро подключаться к ЭВМ. В запоминающее устройство ЭВМ вводится программа, записанная на перфоленте, содержащая параметры, устанавливающие условия детектирования пика, корректировки дрейфа основной линии и распределения площадей в совмещенных пиках и градуировочные данные.

ЭВМ выдает результаты обработки данных на печатном бланке, указывающем компонент, время его удерживания, концентрацию (в %), площади пиков, коэффициент чувствительности, код для типа пика. Точность и сходимость результатов анализа, вычисленные с помощью ЭВМ, на порядок лучше, чем при ручной обработке.

Фирма Phillips Petroleum Applied Automation Inc [21] применяет систему хроматограф — ЦВМ PDP-8 для анализа продуктов процесса риформинга. Работа хроматографа полностью управляется ЦВМ с запоминающим устройством. ЦВМ выполняет функции переключения потока и клапанов хроматографа, обработки результатов анализа. Помимо результатов анализа в ЦВМ могут быть введены данные о температуре, давлении, расходе, удельном весе, содержании H_2O и HCl , полученные с помощью других аналитических измерительных приборов для вычисления параметров процесса, например соотношения компонентов сырья и продукта, кривых разгонки и т. п. Продолжительность хроматографического анализа составляет 20 мин, для обработки полученных результатов требуется еще 10 мин. Результаты анализа выдаются в печатном виде и содержат наименование компонента и его содержание (в об. %), суммарное содержание парафинов, нафтенов и др. компонентов, октановое число, плотность получаемого продукта.

Система [23] позволяет производить анализ пяти потоков бензина, каждый из которых содержит свыше 100 компонентов: выбор потока и ввод пробы; получение и хранение четырех хроматограмм; их объединение в одну эквивалентную хроматограмму. ЭВМ выдает сведения о действительном и ожидаемом выходе продукта; стандартных массовых и объемных расходах; мольных соотношениях компонентов сырья и продукта и др. Применение ЭВМ на выходе промышленного хроматографа повышает точность анализа до 1% измеряемой концентрации при сокращении продолжительности анализа с 1—2 ч до 15—20 мин, вырабатывает поправки и снижает воздействие переменных факторов на работу колонки [25, 26].

При сочетании газового хроматографа и масс-спектрометра достигаются наиболее эффективные результаты в разделении компонентов смесей, установлении их структур, высокая чув-

ствительность и линейность характеристик при большом диапазоне измерений. На Международном симпозиуме по хромато-масс-спектрометрии (Москва, 21—28 мая 1968 г. [31] были представлены 29 докладов, освещающих вопросы, связанные с идентификацией компонентов смесей методами хромато-масс-спектрометрии [32, 33, 34], качественного и количественного определения их содержания в исследуемом веществе [35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42], цифрового преобразования, регистрации и обработки результатов с использованием счетно-решающих устройств [43, 44, 45, 46]. Описаны конкретные типы хромато-масс-спектрометрических приборов [47, 48, 49, 50, 51], в частности прибор типа «хромасс-2», с использованием отностительных сечений ионизации [52, 53, 54, 55, 56].

В СССР работы в области хромато-масс-спектрометрии направлены в основном, на создание компактных приборов с использованием простых методов идентификации индивидуальных веществ, за рубежом — на создание больших универсальных приборов. В последнее время в СССР разработана хроматографическая приставка к масс-спектрометру, превратившая его в универсальный хромато-масс-спектрометр [53]. Одновременно с симпозиумом была организована выставка, на которой демонстрировались 4 советские модели, приборы фирмы LKB-Producer (Швеция), Varian (ФРГ) [69].

На симпозиуме по газовой хроматографии (Лондон, 10 апреля 1970) [1] и 6-м Международном симпозиуме (Miami Beach, Флорида, 2—5 июня 1970) [57] обсуждались вопросы, связанные с применением газовых хроматографов в сочетании с масс-спектрометрами для анализа лунных пород и определения незначительных концентраций примесей в мясе, обуславливающих его запах.

В существующих установках газовый хроматограф и масс-спектрометр связываются между собой нагреваемой линией, в которой поддерживается температура $\sim 250^\circ\text{C}$, для предотвращения потерь за счет конденсации более тяжелых компонентов [56, 57], выходящих из газового хроматографа. В систему напуска, рассчитанную на поток газа от 20 до 100 мл/мин, должен быть включен сепаратор газа-носителя того или другого типа [58, 59]. Может быть использована дифференциальная откачка переходного объема газовый хроматограф-масс-спектрометр с помощью механического и диффузионного насосов (до 0,001 мм рт. ст.) При этом легкие молекулы гелия не попадают во входное отверстие мундштука сепаратора [60], коэффициент обогащения достигает 100—300 и значительно снижается рабочее давление в ионном источнике масс-спектрометра. Между выходом хроматографа и масс-спектрометром может быть расположен герметически уплотненный фланец [61], содержащий полимерную мембрану [47], проникаемую для всех газов, кроме перманентных (с температурой

кипения ниже 0°C). Для облегчения диффузии газов через мембрану создается перепад давления при помощи соединения фланца концом, обращенным к масс-спектрометру, с вакуумным насосом. Идентификация веществ в хроматографических пиках может быть осуществлена непосредственным сравнением спектров известных и неизвестных веществ с помощью ЭВМ [44, 45].

Хроматограммы могут быть использованы не только для количественного определения отдельных компонентов, но и для идентификации их функциональных групп [62].

Приемник ионов содержит коллектор для измерения полного ионного тока группы линий масс-спектра в диапазоне 16—31 *а. е. м.* и 2 малых коллектора для одновременного измерения двух отдельных масс-спектральных линий 16—62 *а. е. м.* Шкала прибора может быть проградуирована в единицах массы. Для определения молекулярных весов, качественного и количественного анализа в аналитических и промышленных лабораториях ряд фирм предлагает установки, содержащие газовые хроматографы-масс-спектрометры.

Так, фирмы Varian (ФРГ) [69] и AEU Scientific Apparatus Ltd [63, 64, 65, 67] совмещают масс-спектрометры с газовым хроматографом. На установках, предназначенных для анализа нефтехимических, фармацевтических продуктов, полимеров, медико-биологических препаратов, проводят одновременно анализ двух образцов или один масс-спектрометр анализирует элюаты газового хроматографа, а другой — непосредственно производит анализы. Фирма Perkin Elmer Corp. [49, 68] для анализа термически и каталитически чувствительных соединений предлагает установку, содержащую газовый хроматограф и масс-спектрометр модели 270—GC—DF.

Для повышения точности анализа рекомендуется в колонке хроматографа осуществлять программированное повышение температуры от 200 до 250°C . Все металлические детали хроматографа должны выполняться из специальных сортов нержавеющей стали и тщательно очищаться перед введением образца для анализа. Для ввода элюатов в ионный источник масс-спектрометра используются специальные зонды.

Японская фирма Shimadzu [70, 71] сообщает о разработке установки, включающей газовый хроматограф-масс-спектрометр типа LKB 9000. Колонка хроматографа обеспечена программированным температурным режимом от 25° до 400°C , изотермическим или со скоростью нагрева 20 *град/мин*. Система напуска элюата имеет подогрев и снабжена молекулярным сепаратором. На выходе имеется 14-ступенчатый электронный умножитель с регулируемым усилением 10^3 — 10^7 . Самописец многоканальный с тремя разными чувствительностями: при использовании капиллярных колонн менее 0,01 *мкг*,

при колоннах с наполнителем менее 0,1 $\mu\text{кг}$, при анализе твердых органических веществ порядка 10^{-12} г.

Для полной автоматизации аппаратуры, предназначенной для анализа сложных смесей органических соединений, фирма Thomson—CSF [72] разработала 2 установки. Система TOSCA содержит газовый хроматограф, совмещенный с масс-спектрометром, программированный процессор для сбора и обработки данных с выдачей на телетайп приведенных масс-спектров анализируемых смесей. Устройство связи работает в истинном масштабе времени, преобразуя сигналы масс-спектрометра в цифровые сигналы, совместимые с устройством ввода — вывода данных процессора. Система ASMDEE предназначена для определения процентного содержания различных изотопов в уране, стронции, рубидии и др. Вычислительное устройство системы осуществляет программированное управление ускоряющим напряжением масс-спектрометра, сбор и хранение данных. Для цифровой записи результатов анализа используются установки, совмещающие газовый хроматограф — вычислительную машину [43, 44, 45, 46].

Установка осуществляет напуск образца в ионный источник масс-спектрометра, непрерывную запись масс-спектра, отбор проб, снятие сигнала, запись его в цифровой форме. Система записи состоит из цепи памяти аналоговых пиков, преобразователя аналоговых пиков в цифровую форму, системы контроля входных и выходных данных для системы отбора и системы цифровой или магнитной записи с максимальной скоростью 650 знаков в 1 сек. При использовании печатающих устройств с большой скоростью печати скорость разверстки может быть увеличена. Цифровая запись может быть передана в ЭВМ и в этом случае окончательные данные представлены в виде таблиц и графиков. Таблица строится за 10 сек, график — за 3 мин.

Фирма Union Carbide Co. [73] применяет более 400 газовых хроматографов для контроля и управления на ее установках. На восьми лабораторных хроматографах в среднем возможно выполнить более 3000 анализов в месяц, такое же количество анализов можно провести на двух хроматографах, совмещенных с одним масс-спектрометром. Основной проблемой при использовании газовых хроматографов в системах регулирования в замкнутых циклах является относительно большое время удерживания, превышающее постоянную времени процесса.

Использование каскадного регулирования, аналоговых ЭВМ и пропорциональных интегральных контроллеров устраняет влияние этих факторов. В 1964 г. в поточных линиях было использовано 3500—4000 газовых хроматографов. В настоящее время количество их значительно возросло. Относитель-

ная стоимость использования ЭВМ для расчета данных хроматографического анализа приведена в табл.

Условия проведения анализа	Стоимость использования ЭВМ для расчета данных хроматографического анализа	
	Один оператор на хроматограф. Анализ образцов, поступающих из любой точки реактора	Один оператор на 3 хроматографа. Централизованная обработка результатов анализа
1. Стандартный анализ с получением процентного состава пробы	1,0	1,0
2. Ручное управление всеми процессами	3,0	4,8
3. Автоматическое управление всеми процессами	1,7	1,4
4. Использование цифрового вольтметра, однопоточная система	1,8	1,6
5. Использование цифрового вольтметра, многопоточная система	1,6	1,4

С большой вероятностью можно ожидать значительного увеличения в ближайшее время применения имеющихся и вновь конструируемых совмещенных установок (газовый хроматограф, масс-спектрометр, ЭВМ) в исследовательских и промышленных лабораториях для решения ряда задач (качественный и количественный анализ смесей, идентификация компонентов смесей, определение молекулярных весов, кинетики и направления хода реакций и т. п.) и для регулирования и управления процессами на потоке в различных отраслях химической промышленности.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА *

1. Informal Symposium of the gas chromatography. Discussion group, London, 10 April, 1970 (Rep.). «Journal of Chromatographic Sciences», 1970, 8, № 10, 555—559 (1971, 5.32.1100)
2. Thomason E. Trends to watch in process analytical instrumentation. «Canadian Controls and Instrumentation», 1970, 9, № 1, 28—29 (1970, 7.32.914)
3. Davis R., Kipiniak W., Fraade D. Computer controle van proceschromatografen. «Polytechnisch Tijdschrift», 1969, E24, № 25, 874—880 (1970, 4.32.978)
4. Traitement par ordinateur des signaux de chromatographe «3360 A» «Instruments et Laboratoires», 1970, № 52, 32—33 (1970, 11.32.949)
5. Glenn Tom H., Cram S. A digital logic system for the evaluation

* Цифры в скобках показывают, в каком году, в каком номере РЖ «Метрология и измерительная техника» (выпуск 32), за каким индексом опубликован реферат по данной статье.

- of instrumental contribution to chromatographic band broadening. «Journal of Chromatographic Science», 1970, 8, № 1, 46—56 (1970, 10.32.906)
6. Baumann R., Brown A., Mitchell M. Chromatographer and the computer-non routine GS laboratory application. «Journal of Chromatographic Science», 1970, 8, № 1, 20—31 (1970, 10.32.901)
 7. Burke M., Thurman R. Use of a dedicated computer for realtime control of gas chromatographic measurements. «Journal of Chromatographic Science», 1970, 8, № 1, 39—45 (1970, 10.32.903)
 8. —Automated gas chromatography system puts analysis on-line. «Process Engineering, Plant and Control», 1970, Sept, 104 (1971, 2.32.1331)
 9. — Automatic chromatography, «Instrumentation Technology», 1969, 16, № 9, 56—58 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1970, вып. 2, реф. 11)
 10. Нисикава Макото. Измеритель амплитуды пиков и связанного с ним оборудования. «Симадзу хёрон, Shimadzu Review», 1969, 26, № 2, 129—139 (1970, 3.32.972)
 11. Анисимов А., Бобылева К., Будочев А., Закатов В., Маркелов В., Машбиц А. Пневматическое вычислительное устройство для хроматографа. Авт. св. СССР, кл. 42m², 1/00, (9 06 d), № 231889, заявл. 21.06.67, опубл. 15.05.69 (1970, 10.32.904П).
 12. Ryan W. Tailoring chromatographs to a monitoring computer. «Instrumentation Technology», 1969, 16, № 11, 57—62 (1970, 5.32.1061)
 13. Ryan W. Design of chromatographs and digital monitoring systems. «Advances in Instruments, Vol. 24, part 1», Pittsburgh, Pa, 1969, 517/1—517/7 (1971, 2.32.1332)
 14. Raymond A., Lawrey D., Mayer T. Acquisition and processing of a gas chromatographic data using a time- shared computer. «Journal of Chromatographic Science», 1970, 8, № 1, 1—12 (1970, 10.32.902)
 15. Fowler L. Process chromatography. «Instrumentation Technology», 1969, 16, № 9, 46—51 (1970, 4.32.976)
 16. Tivin F. Routine and research compadility in computer assisted gas chromatography. «Journal of Chromatographic Science», 1970, 8, № 1, 13—19 (1970, 10.32.900)
 17. Levine J., Sutton W. Total lab. automation. «Proceedings Tex. A an 24th Annual Symposium Instrum. Process, Industrial College Station, Tex., 1969». College Station Tex., S. a., 23—37 (1970, 9.32.858)
 18. Коломышев Л., Холопов В. О выборе рациональной схемы связи хроматографических датчиков с цифровыми управляющими машинами. «Автоматизация и контрольно-измерительные приборы. Науч.-техн. сб.» 1971, № 6, 4—8
 19. Anderson A., Gibb T., Littlewood B. Computer resolution an-resolved ges-chromatographic peaks. «Journal of Chromatographic Science», 1970, 8, № 11, 640—646 (1971, 6.32.881)
 20. Patee H., Wiser E., Singleton J. Collection, storage and processing data dy digital integrated—paper tape punch computer system «Journal of Chromatographic Science», 1970, 8, № 11, 668—672 (1971, 6.32.880)
 21. Mc Coy R., Ayres R. On — line stream: analysis with a chromatograph «Control Engineering», 1970, 17, № 7, 44—49 (1971, 2.32.1333)
 22. Stevens D., Villalobos R. A large—side integrated computer-controlled process chromatograph systems. «ISA Transactions», 1970, 9, № 1, 61—67 (1970, 11.32.948)
 23. Wilson W., Price J. Installation and operation of similar gas chromatography-computer systems in R and D and quality control laboratories. «Journal of Chromatographic Science», 1970, 8, № 1, 31—38 (1970, 10.32.899)
 24. Mc Coy R., Roof L., Ayers R. On—line computer controlled chroma-tograph for the analysis of catalytic reformer streams. «Proceeding

- 252th Annual Symposium Instrum. Process, Indust. College Station Tex. 1970», College Station, 1970, 20—26
25. — New instruments at the physics exhibition. — «Chemical Process», (Gr. Brit.), 1970, 16, № 6, 38—43 (1970, 12.32.795)
 26. Goedert M., Guichon G. Sources of errors in measurement of retention times. «Analytical Chemistry», 1970, 42, № 9, 962—968 (1970, 12.32.845)
 27. Churchus P. There is a need for better metering. «Electronics Weekly», 1969, № 478, 118 (1970, 4.32.952)
 28. — Advances process chromatograph and modern petroleum plant analysis control requirements. «Automat. Analyz. and Quality Control Petroleum Industry». Philadelphia, Pa., 1968, 16—23 (1970, 9.32.865)
 29. Кигути Варо. Измерительные системы, сочетающие анализатор с вычислительной системой. «Дзиси Кэйсоку», 1970, 10, № 7, 55—59 (1971, 4.32.966)
 30. Жуковичкий А., Сазонов М., Ким С. Количественный анализ методом проявительной хроматографии без газа носителя. «Заводская лаборатория», 1969, 35, № 9, 1027—1031 (1970, 2.32.883)
 31. Труды Международного симпозиума по хромато-масс-спектрометрии, 21—28 мая 1968 г. — М., 1969, 268 (1970, 4.32.986)
 32. Тальрозе В., Резников В., Танцырев Г. Проблемы идентификации компонентов смеси при хромато-масс-спектрометрическом анализе. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». М. 1969, 5—17 (1970, 4.32.987)
 33. Александров А., Рабинович А., Скоп С. Комбинированный хромато-масс-спектрометрический метод идентификации органических соединений. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». М. 1969, 77—87 (1970, 4.32.993)
 34. Скурат В., Карцов Г., Тальрозе В. О применении масс-спектрометрического детектора в жидкостной хроматографии. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 87—95 (1970, 4.32.994)
 35. Танцырев Г., Козлов С. Качественный анализ сложных смесей на приборе типа «Хромасс-2». В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии» — М. 1969, 17—31 (1970, 4.32.988)
 36. Танцырев Г. Количественный хромато-масс-спектрометрический анализ без использования дополнительных хроматографических детекторов. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 32—40 (1970, 4.32.989)
 37. Горшков В., Козлов С. Хромато-масс-спектрометрический анализ микропримесей. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии» — М. 1969, 40—47 (1970, 4.32.990)
 38. Полякова А., Сосулина А., Лукашенко И., Липштейн А. Хромато-масс-спектрометрический анализ с использованием относительных сечений ионизации. — В кн.: «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 57—64 (1970, 4.32.988)
 39. Якубов Т., Журавлев А. Исследование адсорбции бинарных смесей хромато-масс-спектрометрическим методом. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии» — М. 1969, 110—115 (1970, 4.32.997)
 40. Поздняков О., Вершинина М. Применение хроматографического и масс-спектрометрического методов для исследования механической и термической деструкции полимеров. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 178—184 (1970, 4.32.1002)
 41. Левин Р., Гессер Х., Хаугер Р. Уменьшение влияния фона колонки при высоких чувствительностях в газовой хроматографии с

- программированной температурой в хромато-масс-спектрометрии. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии» — М., 1969, 188—192 (1970, 4.32.1003)
42. Тен Новер де Броу М., Шуи К., Бреди. Анализ табачного дыма с помощью комбинированной хромато-масс-спектрометрии. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». М. 1969, 214—220 (1970, 4.32.1007)
 43. Янсон П., Мелькерсон С., Рихаге Р., Викстрем С. Цифровые преобразования и регистрация масс-спектров в комбинации газовой хроматограф-масс-спектрометр. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии» — М. 1969, 47—57 (1970, 4.32.991)
 44. Биман К., Хайте Р. Непосредственно связанная система газовой хроматограф-масс-спектрометр-счетно-решающее устройство и ее применение для решения химических проблем. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии» — М. 1969, 115—134 (1970, 4.32.998)
 45. Чепмен Дж., Ф. Эванс С., Пауэр П., Ричардсон У. Автоматическое получение и обработка масс-спектров газохроматографических потоков. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 134—151 (1970, 4.32.999)
 46. Барлингем А. Роль комбинации счетно-решающей техники и масс-спектрометра высокого разрешения в изучении структуры молекул. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 248—266 (1970, 4.32.1010)
 47. Озеров Л., Павленко В., Танцырев Г. Хромато-масс-спектрометры типа «Хромасс-2» (MX 1307 и MX 1307M). — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 95—107 (1970, 4.32.995)
 48. Орлов В. Дозатор для хромато-масс-спектрометра с капиллярной колонкой. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 107—110 (1970, 4.32.996)
 49. Аверилл У. Требования, предъявляемые к колонке при комбинированном использовании хроматографического и масс-спектрального методов. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 160—169 (1970, 4.32.1000)
 50. Романдер Л. Хромато-масс-спектрометр LKB—9000. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 169—178 (1970, 4.32.1001)
 51. Шуи К. Масс-спектрометр MAT GD—150 в комбинации с газовым хроматографом — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии». — М. 1969, 225—236 (1970, 4.32.1008)
 52. Тальрозе В., Гришин Н. Сочетание хромато-масс-спектрометрического и эффузиометрического методов анализа. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии.» — М. 1969, 192—199 (1970, 4.32.1004)
 53. Цымберов М., Нечаева Н., Шерешевский А. Универсальная хромато-эффузиометрическая приставка к аналитическим масс-спектрометрам. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии.» М. 1969, 207—214 (1970, 4.32.1006)
 54. Гришин Н., Цымберов М., Рафальсон А. Хроматограф MX 1312 (Хромато-эффузио-масс-спектрометр). — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии.» — М. 1969, 200—207 (1970, 4.32.1005)
 55. Кузьмин А., Рафальсон А., Шутов М. Масс-спектрометр с циклоидаальной фокусировкой в комбинации с хромато-эффузионной и капиллярной системой введения жидкости. — В кн. «Труды Международного симпозиума по газовой хроматографии.» — М. 1969, 236—247 (1970, 4.32.1009)

56. Зеленцов В. Хромато-эффузио-масс-спектрометр MX1312. «Приборы и техника эксперимента», 1970, № 1, 255 (1970, 8.32.897)
57. 6th International symposium advances in chromatography. «Chromatographia», 1970, № 3, 125—126 (1970, 8.32.877)
58. —In—line gas chromatograph. «Mining and Mineral Engineering», 1970, 6, № 4, 26 (1970, 9.32.800)
59. —Ein neues Massenspektrometer. — «Regelungstechnik und Prozess — Datenverarbeitung», 1971, 19, № 1, 42—43 (1971, 6.32.882)
60. Svob V. Kombinacija plinskog kromatografij s spektrometri masa i njena primjena a naftnoj industriji, «Nafta» (Jugosl.), 1969, 20, № 11, 557—562 (1970, 3.32.977)
61. Kampf G. Kleine Massenspektrometer als flexible Substanzspezifische Detektoren für Gaschromatographie, Differential thermoanalyse und Thermogravimetrie. «Messtechnik», 1970, 78, № 11, 215—221 (1971, 5.32.1112)
62. Regnier F., Huang J. Identification of some oxygen-containing functional groups by reaction gas chromatography. «Journal of Chromatographic Science», 1970, № 5, 267—271 (1970, 12.32.833)
63. —Anordning för analys av organisk-kemiska föreningar omfattande en gaskromatograf, er molekylseparator och en masspektrometer. — Швед. пат., кл. 42 1, 4/16, (g 01 n, 31/08), № 325726, заявл. 21.04.69, опубл. 6.07.70 (1971, 6.32.883 П)
64. Llewellyn P. Gas inlet system for gas analyzers and gas analysing employing same. — Пат. США, кл. 58—158. (B01d, G01n), № 3421292, заявл. 6.06.66, опубл. 14.01.69 (1970, 3.32.976 П)
65. — Inspection equipment and automatic gas controls available. — «Petroleum Times», 1970, 74, № 1889, 16 (1970, 7.32.963)
66. — Zweistrahl—Massenspektrografie — ein neue Methode zur Analyse organischer Stoffe. — «Metall—Reinig. und Vorbehandlung», 1970, 19, № 9, 314, 316 (1971, 2.32.1330)
67. — Spectromètre de masse «Organic—20». — «Instruments et Laboratoires», 1970, № 53, 18 (1970, 2.32.1329)
68. Averill W. Analysis thermally and catalytically sensitive compounds with the Perkin—Elmer Model 270 GC—DF mass spectrometer. — «Instrument News (Perkin—Elmer Corp.)», 1970, 20, № 3, 12—14 (1971, 2.32.1328)
69. — Nachschau auf dieACHEMA—Ausstellungstagung 1970. «Messtechnik», 1970, 78, № 8, 168—174 (1971, 2.32.1334)
70. То я ма Кэ и д з и р о. Изменения в применяемых аналитических приборах. «Симадзу хёрон, Shimadzu Review», 1969, 26, № 3, 209—212 (1971, 3.32.890)
71. Shimadzu—LKB 9000 gas chromatograph—mass spectrometer. «Симадзу хёрон. Shimadzu Review», 1969, 26, № 3, 364—366
72. Merlivat J., Sigelle R. Conduite automatique des procedes analytiques et traitement des resultats en instrumentation scientifiques. «Mesures, Régulation, Automation», 1969, 34, № 10, 101—115. C—115 (1970, 5.32.1018)
73. Mac Willeiam J. Instrumentation in gas analysis: gas chromatography. «Australian Journal of Instrum. and Control», 1971, 27, № 2, 24—30

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РАСХОДОМЕТРИИ

С. С. Кивилис

ВВЕДЕНИЕ

Измерения расхода разнообразных по физико-химическим свойствам веществ (жидкостей; пульп и других многофазных сред; газов; паров; сыпучих материалов), протекающих по закрытым трубопроводам, играют первостепенную роль в науке и технике. Расход вещества является одной из важнейших величин, определяющих правильность ведения технологических процессов и управления ими. Измерения расхода широко применяются при осуществлении различных учетных и торговых операций, приемо-сдаточных и других испытаний и исследований различных машин, агрегатов и систем.

Развитие большинства важнейших отраслей промышленности, в частности химической, нефтяной, энергетической, металлургической и др., а также новой техники в значительной мере связано с возможностью точных и надежных измерений расхода веществ.

О значимости этой области измерительной техники можно судить по тому, что в промышленно развитых странах на измерение и регулирование расхода приходится примерно 60% всех видов измерений, производимых в промышленных условиях при контроле и автоматизации технологических процессов [1].

Современная техника измерений расхода характеризуется большим разнообразием применяемых методов и средств, причем быстрое развитие получают методы измерений, основанные на новых физических принципах.

За последние годы существенно повысились требования, предъявляемые к расходомерной аппаратуре [2]. Удовлетворение этих требований ведется по двум направлениям:

— непрерывное развитие и совершенствование приборов, основанных на старых («классических») методах измерения расхода;

— интенсивные исследования с целью разработки новых методов и приборов, базирующихся на различных физических принципах.

Ниже рассматриваются современное состояние и перспективы развития некоторых из указанных новых разработок по основным группам расходомерной аппаратуры.

Глава I.

КОНТАКТНАЯ РАСХОДОМЕТРИЯ*

1. Расходомеры переменного перепада давления

Расходомер переменного перепада давления (комплект из сужающего устройства, дифманометра, соединительных линий и дополнительных принадлежностей) представляет собой основное общепромышленное средство измерения расхода однофазных сред — жидкостей, газов и паров, что обусловлено рядом преимуществ этих приборов. Так, например, в Англии 90% всех находящихся в эксплуатации расходомеров составляют дифманометры-расходомеры [3].

Во всех промышленно развитых странах систематически ведутся работы по совершенствованию дифманометров-расходомеров путем изыскания новых типов сужающих устройств и улучшения характеристик дифманометров с целью дальнейшего расширения области использования этих приборов.

Исследования и разработка сужающих устройств направлены на то, чтобы сократить остаточную потерю давления, вызываемую введением этих устройств в трубопровод, а также уменьшить нижнее значение числа Рейнольдса, при котором коэффициент расхода еще остается постоянным.

Данные проведенного теоретического исследования коэффициента расхода диафрагм с коническим входом и сопел с профилем «1/4 окружности» после сопоставления с результатами ранее проведенных экспериментов позволили сделать вывод, что коэффициент расхода при ламинарном потоке является функцией отношения длины прямого участка трубы на входе к числу Рейнольдса [4].

* В настоящей работе термины «контактная расходометрия» и «неконтактная расходометрия» применяются в зависимости от того, создают ли соответствующие приборы препятствия движению потока измеряемой среды.

Следует отметить выполненные в ПНР [5] и США [6] экспериментальные исследования метрологических характеристик кольцевой диафрагмы*, которая в ряде случаев обладает преимуществами по сравнению с обычной стандартной диафрагмой. По данным [5] кольцевая диафрагма пригодна для измерения расхода как чистых, так и запыленных газов и загрязненных жидкостей в трубопроводах диаметром более 100 мм.

Запатентованное в США [7] сужающее устройство характеризуется малой потерей давления. Оно выполнено в виде кольца, зажимаемого между фланцами трубопровода, и содержит на внутренней поверхности несколько расположенных в пограничном слое выступов, имеющих форму параллелепипеда. Торцы выступов перпендикулярны оси трубопровода. Ширина заднего по потоку торца больше, чем переднего. Отбор давлений производится у торцов через трубки, выходящие в кольцевые камеры корпуса устройства.

Двухконусное сужающее устройство (без соединительного цилиндра между конусами), предусмотренное патентом Англии [8], обладает в 6 раз большей чувствительностью, чем труба Вентури. Это позволяет измерять скорость потока менее 15 см/сек.

В ПНР проведено исследование [9] диафрагмы с дополнительным направляющим кольцом на переднем торце; такая диафрагма имеет увеличенный коэффициент расхода, что является ее важным преимуществом.

Заслуживают внимания сообщения [10, 11] о разработке конструкции и серийном выпуске усовершенствованной расходомерной трубы, которая вдвое короче трубы Вентури, причем ее коэффициент расхода не зависит от степени сужения, диаметра трубопровода, ее чистоты поверхности и вязкости контролируемого потока. Погрешность при серийном выпуске составляет $\pm 0,75\%$, а при индивидуальной градуировке $\pm 0,25\%$.

В связи с широким применением в теплоэнергетических установках СССР сварных расходомерных сопел весьма интересным представляется информация крупнейшего специалиста США по расходомерии проф. Бейтлера [12], который предостерегает от применения этих сопел. Он указывает, что при сварке сопел возникают серьезные проблемы, в связи с чем даже специальные мероприятия не могут гарантировать от деформации сопел; проверка же качества сварки внутри трубопровода, как правило, невозможна.

Как показала выборочная экспериментальная проверка 20 сварных сопел диаметром более 100 мм, у половины из них

* Такая диафрагма выполнена в виде сплошного диска, установленного по оси трубопровода и образующего кольцевой проход у стенки трубопровода.

коэффициент расхода отклонился от расчетного значения на 1—1,5%. При другой проверке коэффициент расхода сопла после 5-летней эксплуатации в паропроводе изменился на 6%.

Последние годы характеризуются интенсивным развитием работ по применению ЭВМ для расчета стандартных сужающих устройств. Разработанные программы и методики расчета на ЭВМ [13—20] позволяют сократить трудоемкость и длительность расчетов при высокой точности, что играет первостепенную роль в массовом производстве сужающих устройств.

Результаты расчета на ЭВМ расхода водяного пара и воды по программе, составленной на языке АЛГОЛ 60, отличаются от результатов, полученных графо-аналитическим методом, не более чем на 0,1% [20].

Развитие дифманометров идет по линии создания мембранных и сильфонных приборов с силовой компенсацией, обладающих повышенной точностью и улучшенными динамическими характеристиками [21—26].

Разрабатываются дифманометры с автоматической компенсацией изменения плотности (или давления и температуры) измеряемой среды [25, 26].

2. Расходомеры постоянного перепада давления

Из расходомеров постоянного перепада давления наиболее широкое распространение получили ротаметры, обладающие рядом сравнительных преимуществ перед расходомерами других систем.

Для устранения одного из основных недостатков ротаметров, связанного с зависимостью показаний от свойств (вязкости, плотности) измеряемой среды, ведутся разработки методики градуировки ротаметров на жидкостях-заменителях, которая бы обеспечила возможность использования этих приборов практически для любых однофазных сред. Согласно одному из новых исследований в этой области показания ротаметра определяются пятью безразмерными критериями подобия, которые при определенных упрощениях позволяют производить пересчет с одной измеряемой среды на другую [27].

С целью изучения пульсационной погрешности ротаметра проведено его исследование [28] при пульсациях давления газа, имеющих вид импульсов прямоугольной формы. Экспериментальные исследования проводились при различной частоте (1—24 гц), различных значениях скорости и плотности газа и массы поплавка, а также при разном количестве газа в системе между источником пульсаций и ротаметром.

Установлено, что колебания поплавок уменьшаются с увеличением частоты пульсаций давления, что соответствует результатам, полученным на ЭЦВМ при использовании упрощенного алгоритма расчета. Пульсации приводили к завышенным показаниям расхода — погрешность до 100%. В некоторых случаях погрешность была значительной даже тогда, когда поплавки были почти неподвижны. Погрешность уменьшалась по мере увеличения количества газа в системе между источником пульсаций и прибором. Установлено эмпирическое соотношение между погрешностью и переменными величинами эксперимента. Полученные результаты сравнивались с теоретическими и ранее опубликованными данными, а также с результатами, полученными на ЭЦВМ с помощью упрощенного алгоритма решения уравнений движения поплавка. Решение по упрощенному алгоритму, основанному на допущении о квазистационарности потока, позволяет предсказывать погрешность с удовлетворительной точностью в случае значительного демпфирующего объема газа между источником пульсаций и ротаметром и при отсутствии колебаний поплавка. Изучению работы ротаметров в пульсационном режиме посвящена также работа [29].

Значительный интерес представляет теоретическое исследование ротаметров, выполненное в Японии [30, 31]. Отмечается, что в связи с повышением точности изготовления конических трубок стоит задача снизить погрешность ротаметра до значения менее 1%. Для достижения этого данные теоретических исследований, опубликованные ранее, недостаточны. Обращается внимание на неосвещенные моменты в предыдущих исследованиях, рассматривавших гидродинамику потока в зазоре между поплавком и конусом. Дан метод теоретического определения коэффициента сопротивления поплавка, позволяющий при конструировании выбирать оптимальную форму конуса.

Указано, что характер потока в нижней и верхней частях зазора различается; анализ потока в обеих частях дан в отдельности. В пределах применимости характеристического коэффициента, зависящего от геометрии поплавка и числа Re потока, отмечено расхождение теоретических и экспериментальных данных и указаны причины этого расхождения, а также выведено более общее уравнение условий высокой точности ротаметра.

На основе интегрального уравнения момента количества движения для анализа потока в нижней части зазора найдена оптимальная эпюра скоростей в пограничном слое потока.

В работе [32] изложены результаты исследования формы и размеров поплавка ротаметра для измерения малых расходов вязких жидкостей.

3. Турбинные расходомеры

Среди турбинных расходомеров наибольшее распространение получили приборы с легкой аксиальной или тангенциальной крыльчаткой (турбиной), угловая скорость которой преобразуется в электрический сигнал с помощью индукционного, фотоэлектрического или другого устройства; частота выходного сигнала измеряется частотомером. Частотный сигнал обеспечивает простоту и точность передачи показаний на расстояние.

Совершенствование турбинных расходомеров ведется путем устранения (уменьшения) трения в турбине с целью улучшения динамических характеристик и повышения срока службы приборов, а также путем создания устройств для автоматической коррекции показаний на изменение свойств и параметров состояния измеряемой среды.

Представляет интерес расходомер, в цилиндрической камере которого свободно, с зазорами, помещен ротор в виде цилиндрического диска. Жидкость подводится в камеру по тангенциальным каналам, а отводится по соосному каналу. Из каналов жидкость поступает в радиальный зазор между камерой и наружной поверхностью ротора, течет по торцовым зазорам к центру так, что частицы жидкости описывают спирали, а затем покидает камеру в осевом направлении. Ротор вращается под действием сил вязкостного трения; уравнивающие его гидравлические силы возникают при нарушении симметрии торцовых и радиальных зазоров между камерой и ротором подобно тому, как это происходит в гидростатическом подшипнике. В одном из вариантов ротор снабжен двумя рядами радиальных лопаток [33].

Конструкция одного из датчиков характеризуется тем, что в ней достигнута компенсация осевой силы, действующей на турбину [34].

Согласно патенту США [35] устройство для автоматического введения температурной поправки представляет собой расположенную перед турбиной систему поворотных направляющих лопаток, которые под действием биметаллических пластин в зависимости от температуры поворачиваются, изменяя угол входа потока в турбину, т. е. скорость ее вращения.

Тот же эффект может быть достигнут с помощью термоэлемента в виде цилиндрического сосуда со специальной жидкостью, помещенного в пазухе корпуса расходомера. Пазуха сообщается с проточной частью вблизи турбины, ниже ее по потоку. Термоэлемент с помощью рычажно-зубчатого механизма связан с поворотной лопаткой, расположенной выше турбины по потоку. При изменении температуры жидко-

сти изменяется давление в сосуде, термоэлемент перемещается и воздействует на лопатку [36].

Турбинные расходомеры с «плавающим» ротором, в которых осевое усилие компенсируется динамическими силами потока, имеют следующие основные технические характеристики: погрешность $\pm 0,2\%$; верхний предел измерений до $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ при диаметре до 400 мм ; постоянная времени до $0,01 \text{ сек}$; давление до 1000 ат ; рабочая температура от -250 до $+530^\circ \text{ С}$; вязкость жидкости до 5 сПз [37].

Институтом авиации ПНР [38] разработан турбинный расходомер с гидростатическими подшипниками, обладающий линейной характеристикой расход — частота в диапазоне $1500\text{—}3750 \text{ л/ч}$ с отклонением $\pm 1\%$ в зависимости от положения датчика в пространстве.

Хорошие результаты при измерении расхода агрессивных жидкостей и пылегазовых сред показал турбинный расходомер с турбиной из тефлона, подшипники которой разгружены от осевой силы [39].

Турбинный расходомер со сниженным влиянием трения в опорах турбины на точность измерений отличается наличием двух венцов лопаток. Кроме того, для компенсации влияния вязкости жидкости перед турбиной устанавливается вспомогательная вертушка, вращающаяся в противоположную сторону под действием потока, благодаря чему компенсируется действие момента сил жидкостного трения [40].

В Японии запатентован [41] турбинный расходомер с автоматической коррекцией сигнала на изменение окружающей температуры. Схема коррекции содержит суммирующую — вычитающую цепь для сравнения входных и корректирующих импульсов; цепь выработки аналогового токового сигнала, соответствующего изменению окружающей температуры; цепь определения знака разности между выходом суммирующей цепи и опорным постоянным сигналом; интегрирующую цепь, выходной сигнал которой корректирует сигнал расходомера.

Глава II.

НЕКОНТАКТНАЯ РАСХОДОМЕТРИЯ

1. Электромагнитные расходомеры

К электромагнитным расходомерам относят приборы, действие которых основано на явлении электромагнитной индукции. Из них наибольшее распространение получили расходомеры, в которых измеряется индуктированное электрическое поле и съем наведенного сигнала осуществляется при непо-

средственном контакте приемных элементов (электродов) с контролируемым потоком жидкости.

Благодаря ряду преимуществ электромагнитных расходомеров во всех промышленно развитых странах интенсивно ведутся работы, направленные на дальнейшие углубленные теоретические и экспериментальные исследования этого метода измерения расхода, а также на совершенствование схем и конструкций приборов, повышение их точности и надежности, расширение области использования [42].

Теоретические и экспериментальные исследования

Прежде всего следует остановиться на вопросе о зависимости выходного сигнала расходомера от эюры скоростей при использовании прибора с точечными электродами. Как известно, впервые основы теории влияния асимметрии профиля скоростей на показания электромагнитного расходомера с однородным магнитным полем разработал (в двумерном приближении) Шерклиф [42]. Затем Кетельсеном и Руммелем [43, 44, 46, 47] для устранения влияния асимметричного распределения скорости было предложено применить неоднородное магнитное поле такой конфигурации, которая обеспечивает в каждой точке поперечного сечения трубы постоянное произведение соответствующей компоненты магнитной индукции на «весовую» функцию, которая характеризует вклад сигнала, генерируемого в данной точке, в общий сигнал на электродах, т. е. влияние локального положения элементарного объема потока относительно электродов и стенок трубы. Весовая функция представляет собой сравнительную меру влияния силы электрического поля, индуцируемого (вследствие движения элемента объема) перпендикулярно основному направлению измеряемого потока жидкости и направлению главного магнитного поля, на сигнал напряжения, снимаемый с электродов.

На основании указанного предложения был разработан и серийно освоен расходомер со следующими характеристиками: при верхнем пределе измерений, соответствующем скорости 1—10 м/сек, погрешность показаний $\pm 1\%$, а при 0,8—1 м/сек $\pm 2\%$; воспроизводимость $\pm 0,25\%$ верхнего предела измерений при скорости жидкости от 1 до 10 м/сек; диаметр трубы датчика 50—2000 мм; рабочее давление до 350 ат; потребляемая мощность для диаметра до 1000 мм составляет 50—200 вт [45—47, 87].

В этом приборе для создания магнитного поля требуемой конфигурации применяются эллиптические или ромбовидные катушки возбуждения, помещенные по обе стороны трубы симметрично плоскости электродов. Длинные оси катушек расположены параллельно оси электродов, а короткие — пер-

пендикулярно этой оси. Отношение средней ширины катушек к средней длине должно быть 0,5—0,7. Если длина катушки приблизительно равна диаметру трубопровода, то указанное отношение должно быть примерно 0,6. Для создания большого эффекта неоднородности магнитного поля используются железные сердечники.

В статье [48], посвященной теории электромагнитных расходомеров, значительное внимание уделено представлению сигнала датчика через весовые функции и, в частности, показаны недостатки подхода Кетельсена к проблеме создания датчика для измерения потоков с несимметричным профилем скорости.

Влияние асимметрии профиля скоростей потока на выходной сигнал расходомера оказалось более сложным, чем это полагали ранее [83].

В 1967—1968 гг. в Англии [52, 56] и СССР [49, 50, 55] на основе решения задачи в 3-мерном приближении разработана теория электромагнитных расходомеров, обеспечивающих практическую независимость сигнала от эпюры скорости, и основы методики инженерного расчета систем возбуждения неоднородного магнитного поля таких расходомеров.

Полученные в СССР теоретические результаты подтверждены экспериментами на воде и гидросмесях [50, 57]. Они позволили разработать расходомеры с неоднородным магнитным полем, удовлетворяющие заданным условиям [53, 54].

Особое значение эти приборы имеют при неконтролируемых искажениях профиля скоростей, которые, в частности, наблюдаются в потоке пульпы. Применение неоднородного магнитного поля позволяет также значительно сократить длину датчика (до двух диаметров), что очень важно для трубопроводов большого диаметра.

Электромагнитные расходомеры с неоднородным магнитным полем рассмотрены также в [59, 60, 84, 86].

Необходимо отметить ряд других важных направлений, по которым идет развитие теории электромагнитных расходомеров.

Основы теории электромагнитных расходомеров, работающих в пульсирующих потоках, представлены в [61].

Вывод уравнения весовой функции для электромагнитных расходомеров с прямоугольным и круглым каналом и поперечным магнитным полем излагается в [62]. Весовая функция, характеризующая долю напряжения, возникающего на электродах, по сравнению с индуцированным в потоке жидкости, определяется геометрией канала и относительными размерами электродов. Для нахождения весовой функции автор использовал теорему Грина и метод конформных отображений. Полученная весовая функция для двумерного прямоугольного канала позволила путем конформных отображений найти ре-

шения для двух практически крайних случаев: расходомер с круглым каналом и расходомер с прямоугольным каналом и определенной длиной электродов. Для обоих этих случаев построены графики весовой функции для круглого канала при угле раствора электродов 5; 45 и 90°, для прямоугольного — при отношении длины электрода к ширине 0,01; 0,1 и 1,0.

Исследовано также влияние профиля скорости на показания расходомера [66, 67]. Характеристики датчика рассматриваются с помощью весового вектора W и соответствующих весовых функций. Весовой вектор вводится в выражение для напряжения U , индуцируемого на электродах датчика, так, что U пропорционально $v \omega dt$, где v — скорость движения жидкости и t — объем жидкости, которая дает вклад в сигнал.

Автором /Bevir M. K./ предложен способ конструирования коротких расходомеров для потоков с неизвестным осесимметричным профилем скорости.

Как известно, расчет и конструирование электромагнитных расходомеров малых калибров связаны с определенными трудностями. С этой точки зрения заслуживают внимания работы В. И. Межбурда [51, 63], в которых предложен метод расчета электромагнитных расходомеров для трубопроводов малых диаметров.

Для прямоугольной трубы чувствительность расходомера представляет собой функцию от числа Гартмана, отношения длин сторон сечения трубы и изменения свойств жидкости [64].

Представляет интерес теоретическое исследование, в котором рассматривается влияние неоднородной электропроводности жидкости в сечении, перпендикулярном оси потока, на показания расходомера [65]. Полученные процентные соотношения чувствительности расходомера для сочетания заданных условий, свидетельствуют о том, что показания прибора неизменны при однородном профиле скорости; максимальное изменение показаний достигает 16,6% для ламинарного профиля и неоднородного магнитного поля.

Заслуживают внимания теоретическое исследование и метод расчета электромагнитного расходомера, в котором мерой расхода является величина магнитного поля, индуцируемого токами, которые возникают в среде (жидкий металл, ионизированный газ), движущейся в магнитном поле [68].

С целью расширения области применения электромагнитных расходомеров ведутся исследования по созданию расходомеров для плохопроводящих и диэлектрических жидкостей [58].

Большое значение имеют исследования, проводимые с целью использования электромагнитных расходомеров в си-

стемах измерения массового расхода твердого вещества при напорном гидротранспорте [69, 70, 78].

Теоретический анализ влияния осадка, отлагающегося на стенках трубопровода, на выходной сигнал электромагнитного расходомера, показал, что применение приборов с нагруженной измерительной цепью позволяет существенно снизить влияние осадка на показания расходомера и может обеспечить приемлемую точность измерения расхода жидкостей, дающих значительные осадки [72].

Теоретически исследованы показания электромагнитных расходомеров с опорным напряжением, пропорциональным напряжению питания магнита или току в магнитной системе преобразователя, в зависимости от изменений магнитных свойств железорудных пульп. Для существенного снижения (до нескольких процентов) этой зависимости предлагается использовать в электромагнитных расходомерах опорное напряжение, пропорциональное непосредственно магнитному потоку в рабочем зазоре преобразователя [71].

Ряд исследований посвящен изучению конечного эффекта в электромагнитных расходомерах [73, 75, 77].

При рассмотрении конечного эффекта электромагнитных расходомеров общепромышленного назначения, предназначенных для сред с ионной проводимостью, получено аналитическое выражение для коэффициента, характеризующего влияние конечных эффектов в уравнении разности потенциалов между электродами датчика расхода [73].

Экспериментальное исследование расходомеров с датчиками круглого сечения при постоянном магнитном поле показало, что чувствительность расходомера не зависит от протяженности поля, если последняя превышает диаметр канала датчика не менее чем в 3 раза [77].

Проведенное теоретическое и экспериментальное исследование влияния конечного эффекта на показания расходомера с постоянным магнитом для жидкого натрия позволило разработать методику расчета влияния конечного эффекта на выходной сигнал прибора [80, 81].

При рассмотрении теории электромагнитного метода измерения скорости плазмы отмечено, что в отличие от жидких сред, у которых скорости элементарных частиц одинаковы, в плазме возможно значительное различие скоростей электронов, ионов и нейтралов. Кроме того, в плазме возникает слой пространственного заряда у поверхности электродов, что влияет на измеряемую разность потенциалов. В плазме иногда играют большую роль также градиенты давлений и температур. Влияние указанных выше факторов на показания расходомера исследовано аналитически для случая, когда размеры электродов значительно превышают длину свободного

пробега. При этом не учитывалось влияние пограничного слоя на электродах [74].

В работе [76] приводится теоретический анализ зависимости эдс, возникающей в измерительной цепи расходомеров с круглым каналом, от расхода жидкости. Предлагаемая формула позволяет приближенно определить ослабление сигнала и факторы, характеризующие зависимость выходного сигнала от конструктивных размеров датчика, что дает возможность разработать методику расчета датчиков расходомеров круглого сечения.

Поскольку в настоящее время все еще отсутствуют научно обоснованные критерии для выбора магнитных систем датчиков электромагнитных расходомеров, равно как и методика их инженерного расчета, для восполнения этого пробела проведено теоретическое и экспериментальное исследование магнитных систем методами электрического моделирования [79]. На основании результатов исследования сделано заключение о преимуществах систем с прямоугольным магнитопроводом и сектообразными катушками.

Особое направление в исследовании электромагнитного метода измерения расхода связано с созданием специальных приборов для измерения расхода крови. Работы в этой области ведутся весьма интенсивно.

На основе сравнительного анализа электромагнитных расходомеров крови с постоянным, прямоугольным и синусоидальным магнитным полем установлена целесообразность применения синусоидального поля [82]. В качестве примера расходомера с синусоидальным полем рассматривается прибор, в котором применено поле частотой 800 гц при токе подмагничивания 0,4 а. Набор датчиков расхода обеспечивает измерение в кровеносных сосудах диаметром 1—20 мм. Входной дифференциальный усилитель имеет чувствительность 1 мкв полезного сигнала на всю шкалу. Частотная характеристика малоинерционного выхода 0—150 гц разбита на поддиапазоны. Интегрирующая цепь выхода среднего расхода имеет постоянную времени 1—10 сек (плавная регулировка). Выходной сигнал ± 10 в. Для наблюдения за пульсациями крови встроен осциллоскоп.

В расходомерах крови манжетного типа возникают специфические проблемы [85]. Вследствие взаимного влияния (электромагнитного и электростатического) возбуждающей и приемной цепей возникает дрейф нуля. Описаны 2 метода стабилизации нуля: настройкой электрических цепей и уменьшением электрического импеданса электродов. Рассмотрено влияние свойств крови на чувствительность расходомера, а также влияние неравномерного распределения плотности магнитного потока, электропроводности кровеносных сосудов и др.

Присутствие кровеносного сосуда внутри электромагнитного расходомера крови изменяет чувствительность последнего. Кровь, текущая по кровеносному сосуду, окружена стационарным слоем жидкости (например, жидкой тканью), находящимися на внутренних стенках трубки расходомера [90]. Электроды в диаметрально противоположных точках служат для того, чтобы снимать разность потенциалов, вызванную взаимодействием движущейся крови с магнитным полем, нормальным к линии электродов.

В зависимости от соотношения электропроводностей крови, сосуда и слоя (пленки) жидкости, а также от геометрических размеров совместное влияние сосуда и пленки может обусловить повышение, понижение или неизменность чувствительности расходомера.

Для измерения расхода крови в кровеносных сосудах используются также электромагнитные расходомеры с вставными датчиками типа катетера, предложенные в 1966 г. Для них было определено распределение потенциала в жидкости в предположении симметричного профиля скорости и постоянного вдоль оси трубы магнитного поля. Это решение обобщено и на случай любых осесимметричных профилей скорости [91].

Электромагнитные приборы получают все большее применение для измерения скорости открытых потоков. Наиболее слабо разработана теория приборов с обтекающим потоком, в которых определение скорости сводится к измерению разности потенциалов жидкости, обтекающей тело заданной формы в присутствии внешнего магнитного поля. В работе [88] дан теоретический анализ принципа действия приборов подобного рода, получены формулы для вычисления чувствительности по исходным данным и проведено сравнение аналитических выводов с результатами испытаний экспериментального образца. Прибор представляет собой круглую цилиндрическую трубку, внутри которой расположена катушка возбуждения, питаемая переменным током. На боковой поверхности трубки помещены электроды, между которыми появляется разность потенциалов, если вектор скорости потока не совпадает с осью трубки и катушка возбуждения создает на поверхности трубки магнитное поле. Задача вычисления разности потенциалов между электродами сводится к решению уравнения Максвелла по заданному распределению поля скоростей на поверхности цилиндра и магнитного поля.

Электромагнитные приборы для измерения скорости безнапорных потоков используются также для измерения морских течений [89].

Дальнейшее улучшение технических характеристик электромагнитных расходомеров связано с разработкой новых измерительных схем.

С целью создания расходомера повышенной точности путем исключения влияния нестабильности магнитного поля, потерь в соединительной линии от датчика до электронного блока и погрешностей, вызванных нагрузкой в цепи выходного сигнала, предложена схема, в которой вместе с полезным сигналом, возникающим на электродах датчика, подается дополнительное напряжение, используемое для контроля стабильности усилительного тракта [92]. В качестве дополнительного используется напряжение трансформаторной помехи. Особое внимание обращено на подавление напряжения емкостной помехи; высшие гармоники из сети питания устранены с помощью конденсатора настройкой в резонанс на частоте 50 *Гц* катушек возбуждения.

Электронный блок содержит дифференциальный усилитель с большим входным сопротивлением, селективный и регулируемый усилители, 2 фазочувствительных детектора, настроенных соответственно на полезный сигнал и на напряжение трансформаторной помехи. Опорные напряжения подаются на детекторы от широкополосного фазовращателя через разделительные усилители. Выделенное детектором напряжение помехи сравнивается с опорным напряжением, и сигнал разбаланса через регулятор управляет регулируемым усилителем, чем поддерживается стабильность тракта. Изменение напряжения сети на $\pm 30\%$ вызывает погрешность $\pm 0,5\%$.

В США запатентован [93] электромагнитный расходомер с измерительной схемой, преобразующей сигнал датчика в частоту. В компенсационной схеме за усилителем переменного тока следуют синхронный детектор и генератор с управляемой частотой генерации, а в цепи обратной связи частотный сигнал преобразуется в напряжение переменного тока, которое компенсирует сигнал датчика. Преобразование осуществляется ключевой схемой, коммутирующей опорный сигнал с частотой выходного сигнала, и последующей фильтрацией низкочастотной составляющей. Аналогичная схема используется для непрерывной компенсации квадратурной помехи датчика.

Во французском патенте [94] предложен частотно-амплитудный преобразователь для электромагнитного расходомера. Электрический сигнал, генерируемый мощным внешним переменным магнитным полем в движущейся токопроводящей жидкости, преобразуется в сигнал переменного тока повышенной частоты с амплитудой, пропорциональной частоте входного сигнала, снимаемого с электродов. Преобразователь

содержит генератор прямоугольных импульсов переменной частоты, который автоматически подстраивается под частоту входного сигнала, модулятора и компенсаторов фазы напряжения и тока. Преобразователь полностью смонтирован на транзисторах и обеспечивает линейную зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты входного сигнала в широком диапазоне изменения последнего, независимо от изменений окружающей температуры и напряжения питания.

Согласно японскому патенту [95] выходной электрический сигнал не зависит от изменения напряжения и частоты источника питания. Напряжение, снимаемое с электродов, усиливается, выпрямляется и подается на делитель в виде напряжения E_x . В цепь источника питания и катушки введена первичная обмотка трансформатора так, что напряжение E_y , снимаемое с его вторичной обмотки и выпрямляемое, пропорционально току источника питания, т. е. магнитному потоку. Это напряжение подается на тот же делитель, с выхода которого снимается отношение E_x/E_y в виде тока I_0 , пропорционального скорости потока жидкости. Чтобы учесть изменение частоты и нейтрализовать ее влияние на ток I_0 , в цепь источника питания и катушки вводится индуктивность, напряжение с которой, пропорциональное току источника и его частоте, после выпрямления вводится в величину E_y и за счет подбора индуктивности частотная характеристика E_y становится идентичной частотной характеристике всего датчика.

Новый принцип предложен в электромагнитном расходомере, в датчике которого вместо однородного магнитного поля применяется концентрированный лучеобразный магнитный поток [96].

Интенсивно ведутся изыскания схем, обеспечивающих автоматическое подавление различных помех. Схема, основанная на применении низкочастотного переменного магнитного поля прямоугольной формы, позволяет при кратковременном расходе рассматривать прибор как расходомер с постоянным магнитным полем, а при длительном — как расходомер с переменным магнитным полем низкой частоты [98].

В докладе на конференции ISA (США) сообщалось об измерительной схеме расходомера с автоматической компенсацией квадратурной помехи и с частотным выходом, позволяющим с высокой точностью получить интеграл расхода. Контуры компенсации полезной и квадратурной составляющих сигнала построены по одинаковой схеме, содержащей общий для обоих контуров нуль-усилитель, синхронный детектор, блокинг-генератор с частотой, управляемой сигналом постоянного тока, и преобразователь частоты в переменное напряжение. Схема построена на транзисторах, имеет трансформаторный вход и весьма низкий уровень шумов входного каскада (ниже 0,03 мкв) [99].

По экспериментальным данным прибор имеет следующие характеристики: линейность $\pm 0,5\%$; влияние изменения напряжения на $\pm 10\%$ составляет $\pm 0,08\%$; влияние изменения частоты на 5% равно $\pm 0,11\%$; постоянная времени 200 мсек .

В ЧССР предложены расходомер с компенсацией емкостной помехи, а также схема расходомера с автоматической компенсацией напряжения трансформаторной помехи. Схема отличается наличием контура, содержащего фазовый детектор, соединенный с выходом усилителя, который выделяет из усиленного сигнала составляющую, сдвинутую по фазе на 90° по отношению к полезному сигналу [27, 101].

В США запатентованы [102, 104] расходомеры с существенно сниженным дрейфом нуля. Контакты датчика находятся в углублениях в стенке трубы. Между жидкостью и контактами находится водопроницаемый материал (ткань, вата и др.). Датчик может содержать множество контактных пар. Приводится расчетное обоснование данного метода снижения дрейфа.

Схема, предложенная в патенте США [103], превосходит существующие комплексным подавлением всех составляющих помехи.

В ЧССР запатентована схема контура для автоматической компенсации колебаний напряжения сети, содержащая делитель напряжения, включенный в цепь обратной связи. В контур входят сопротивление, накальная электролампа и потенциометр. Один конец лампы присоединен к движку потенциометра, а другой соединен с источником напряжения, пропорционального напряжению сети. Концы потенциометра подключены к отводам повышающей обмотки трансформатора, симметричным относительно нулевого потенциала [105].

В расходомере с устройством для подавления трансформаторной помехи предлагается в качестве источника компенсационного напряжения экранированный трансформатор, вторичная обмотка которого включена последовательно с одним из электродов датчика, в то время как первичная обмотка питается от фазовращателя, настроенного так, чтобы во вторичной обмотке возникало напряжение, равное трансформаторной помехе, но обратное ей по фазе [106].

Схема расходомера со сниженным уровнем помех содержит дополнительный экранированный трансформатор и фазовый мост, обеспечивающие комплексное подавление напряжения помех, поступающих с датчика, и нейтрализацию влияния емкости соединительных кабелей, ведущих от датчика к усилителю [107].

Как известно, при работе расходомеров с переменным полем наличие диэлектрических примесей в пограничном с электродами слое жидкости создает дрейф нуля и увеличивает погрешность. Предполагается, что причиной этого слу-

жит непроводящий слой, образующийся у поверхности электродов из-за присутствия в потоке поляризованных молекул и увеличивающий сопротивление генератора (им является расходомер). Для устранения этого эффекта рекомендуется между электродами и жидкостью прикладывать отрицательное постоянное напряжение до 1 в через нагрузочный резистор и делитель, состоящий из двух резисторов. Все резисторы по 10 Мом образуют высокоомный вход усилителя напряжения, индуктированного на электродах [108].

Для устранения влияния помех от вихревых токов расходомер по патенту США [109] снабжен тремя электродами, 2 из которых расположены вдоль оси трубы на одной стороне, а третий — на противоположной стороне. Для исключения из выходного сигнала напряжений, создаваемых токами Фуко, предлагается электрический способ симметрирования электродов с помощью переменных сопротивлений, включенных в виде потенциометрических делителей.

Все большее развитие получают схемы расходомеров, содержащие датчики Холла. В СССР запатентован [110] расходомер с датчиком Холла, обеспечивающий автоматическое непрерывное подавление трансформаторной э. д. с.

В ФРГ создан расходомер с усилителем Холла, предназначенным для окружающей температуры от -25 до $+55^{\circ}\text{C}$ [111].

В схеме компенсации помехи, осуществляемой дифференциальным трансформатором с генератором Холла, помещенным в магнитное поле датчика, сигнал управляющего тока посылается в фазочувствительный выпрямитель, компенсирующий помеху. Преимущество этой схемы — независимость ее работы от температуры [112].

Широкое применение в электромагнитных расходомерах получают схемы на полупроводниках. Кроме рассмотренных выше, можно отметить следующие схемы.

Разработанная в СССР измерительная схема расходомера на полупроводниках позволила уменьшить вес прибора более чем в 2 раза и габариты примерно на 50%; среднее время безотказной работы повысилось вдвое [113].

В патенте США [114] предлагается транзисторная схема для преобразования сигналов расходомера. Схема состоит из входного трансформатора, усилителя переменного напряжения, двух синхронных демодуляторов, тороидального трансформатора опорных сигналов, двух блокинг-генераторов, усилителя постоянного тока и преобразователя импульсов в выходные сигналы постоянного тока.

В расходомере с дифференциальным входным каскадом на транзисторах вход построен по схеме с последовательным включением $p-n-p$ и $n-p-n$ транзисторов или параллельным включением транзисторов одного типа [115].

Большое внимание уделяется разработке измерительных схем расходомеров, предназначенных для измерения расхода плохопроводящих и диэлектрических жидкостей.

Датчик расходомера для жидких диэлектриков с электропроводностью от 10^{-12} до $18^{-18} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ выполнен из диэлектрической трубы, у которой отношение наружного диаметра к внутреннему составляет не менее трех. Материал трубы (синтан С-8, тефлон) имеет весьма высокое удельное сопротивление и диэлектрическую постоянную, близкую к двум. Измерительная схема представляет собой симметричный усилитель с весьма высоким входным сопротивлением и синхронным детектором на выходе. В качестве синхронного детектора использован датчик Холла. Обмотка намагничивания включена последовательно с обмоткой датчика расхода, чем обеспечивается фазирование детектора. Постоянная составляющая усиленного выходного сигнала детектора выделяется фильтром и измеряется вольтметром постоянного тока [116].

В патенте США [117] описаны схемы расходомеров для диэлектрических и слабо электропроводных жидкостей: криогенных жидкостей, нефтепродуктов, а также многих химических продуктов в жидкой фазе.

Размещение вдоль оси устройства [118], по которому течет измеряемая жидкость, специального экрана обеспечивает независимость показаний прибора от электрических характеристик материалов, находящихся вне экрана. Независимость от электрических характеристик жидкости достигается обеспечением прямого контакта измеряемой среды с экраном; независимость сохраняется при нанесении на экран очень тонкого покрытия или установке в нем тонкостенной трубки.

В расходомерах для диэлектрических жидкостей датчик имеет высокоомный и низкоомный измерительные электроды секторообразной конфигурации большой площади. Оба электрода окружены экранирующими электродами, устраняющими шунтирующее влияние окружающего пространства [119, 120].

В институте НИИТеплоприбор [121] предложен расходомер для сред с электропроводностью до $10^{-7} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Разработан расходомер для жидкостей с сопротивлением до 1 Мом , причем имеются модификации прибора на 700 и 830 ат [122].

Отличительной особенностью расходомера для измерения массового расхода диэлектрических неполярных жидкостей, в том числе имеющих газообразные и твердые включения, а также поляризующихся жидкостей с учетом температурной поправки, является шунтирование измерительных электродов датчика конденсатором. Емкость конденсатора равна удвоенной межэлектродной емкости незаполненного датчика. Это

обеспечивает получение с электродов сигнала, пропорционального массовому расходу [197].

Расходомер, предназначенный для жидкостей с малой электропроводностью и для других случаев измерения расхода при большом уровне помех в датчике, отличается наличием специальной опорной системы отсчета, в которой базисное напряжение практически не зависит от электрических токов в измеряемой жидкости и напряжений в трубопроводе. Система содержит неинвертирующие преобразователи импеданса и входы, на экран которых подано управляющее напряжение [123].

Предложено 2 варианта новой системы компенсации квадратурной помехи, действующей между измерительными электродами. В одном варианте последовательно в цепи низкоомного и защитного электродов вводится компенсирующий сигнал, взятый от специальной катушки, которая расположена в магнитном поле. Во втором варианте провода, идущие к низкоомному и защитному электродам, выполнены в виде проводящих полос, положение которых в магнитном поле можно регулировать. Система обеспечивает независимость компенсации от изменений свойств измеряемой жидкости и диэлектрического покрытия трубы датчика [124].

Среди разработок новых измерительных схем электромагнитных расходомеров крови можно прежде всего отметить следующие. Измерительная схема расходомера с прямоугольно-импульсным магнитным полем представляет собой дифференциальный усилитель с синхронным детектированием выходного сигнала. В цепи обратной связи усилителя имеется коммутирующее устройство, синхронизированное с магнитным полем [125].

Электромагнитная система возбуждает импульсное магнитное поле, пронизывающее сечение кровеносного сосуда [126]. В цепи электродов, смонтированных в сосуд в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, генерируется э. д. с., пропорциональная скорости потока крови и величине магнитного поля.

В цепи электродов, помимо полезного сигнала, наводится сигнал помехи, обусловленный трансформаторным эффектом. Суммарный сигнал подается на вход комбинированной переключающей схемы, где он разветвляется по двум каналам и подвергается импульсным преобразованиям. С выхода одного канала снимается преобразованный суммарный сигнал, а с выхода другого — выделенный сигнал помехи. Указанные импульсы интегрируются и алгебраически складываются, после чего отсеивается сигнал помехи. Результирующий сигнал поступает на показывающий прибор.

Предусмотрена схема ручной или автоматической компенсации сигнала ошибки, возникающего в результате сцепления

магнитного потока с петлеобразными выводами электродов и изменения эффективного тока между электродами.

В работе [127] описан расходомер, в котором отсутствует взаимовлияние нескольких одновременно включенных датчиков расхода. В нем применено пульсирующее магнитное поле.

Подавление трансформаторной помехи осуществляется с помощью петли в магнитном поле датчика и потенциометра, а синфазной помехи — механическим перемещением двух источников магнитного поля вдоль оси датчика относительно его электродов.

Специфические требования к схемным решениям предъявляются при использовании электромагнитных расходомеров для открытых потоков. Возможно определение расхода на основе имеющихся схем, дополненных пересчетным устройством [128]. Датчик выполняется в виде части канала. Система возбуждения однородного магнитного поля встраивается в стенки канала или в землю.

В качестве измерительных электродов используются линейнообразные металлические прутки, ограничивающие поперечное сечение канала и имеющие протяженность от верхнего края канала до дна. Э. д. с., индуцированная в контуре, образованном электродами, жидкостью и соединительными проводами, пропорциональна площади этого контура и линейно изменяется при изменении уровня воды в канале. Вторая э. д. с. на электродах, сдвинутая на 90° относительно трансформаторной, пропорциональна только скорости жидкости.

Оба напряжения поступают на вход измерительного блока, являющегося самоуравновешивающимся компенсатором переменного напряжения. После общего усилителя имеются 2 независимые компенсационные системы, позволяющие производить независимый отсчет скорости и уровня воды в канале. Определение расхода производится простым электрическим устройством, осуществляющим перемножение скорости и высоты уровня с учетом заданной ширины канала.

Усовершенствование конструкций

С целью расширения диапазона измерений в сторону малых скоростей потока жидкости предложен расходомер, датчик которого представляет собой вставку из немагнитного материала, имеющую относительно узкую горловину для увеличения скорости потока. Во вставку вмонтирована магнитная система, а в горловину — электроды, так что магнитный поток перпендикулярен оси электродов и направлению потока. Для снижения скорости потока до первоначальной величины вставка может иметь диффузор. Вставка снабжается кольцевым фланцем для монтажа на технологический трубопровод [129].

Та же цель достигается при выполнении датчика в виде втулки с двумя каналами прямоугольного сечения, расположенными вдоль образующей [130].

Интересен расходомер для трубопроводов с относительно большой площадью поперечного сечения. Магнитное поле охватывает только часть площади сечения трубопровода и измеряется э. д. с., индуцируемая в этой части сечения потоком жидкости [131].

В Англии запатентован расходомер, датчик которого содержит трубу-вставку из изоляционного немагнитного материала (пластмасса, керамика), расположенную внутри трубы из немагнитного электропроводящего материала. Один электрод находится в стенке вставки и электрически изолирован от наружной трубы. Другой электрод заземлен и находится в стенке трубы диаметрально противоположно первому; электрический контакт второго электрода с протекающей жидкостью осуществляется через наружную трубу на границах вставки. Возникающие в трубе датчика круговые токи взаимно уравниваются и не создают помех. Расходомер имеет следящую систему, соединенную с выходными клеммами датчика [132].

Запатентованный во Франции расходомер содержит трубу, выполненную из немагнитного антикоррозионного материала без внутренней футеровки. Внешний контур трубы представляет собой эллипс, а внутренний — окружность, так что толщина стенки трубы неравномерная — вдоль длинной оси эллипса больше, чем вдоль короткой оси. В толстой части стенки выполнен канал, в который проложены 2 провода с электродами на концах, выведенными во внутренний канал трубы [133].

Японская фирма Хокусин запатентовала в США [134] датчик расходомера, основными преимуществами которого являются возможность замены патрубков, через который течет измеряемая жидкость, а также разгрузка патрубков от усилий, возникающих в трубопроводе.

При высоких давлениях в трубопроводе, когда его стенки приходится выполнять значительно утолщенными, возникают вихревые токи в стенках, создающие шумы. Эти токи удается существенно ослабить созданием на наружной поверхности трубы углублений различной конфигурации, глубины и расположения [135].

Для труб малого диаметра (менее 12 мм), где наблюдается накопление пузырьков газа, растворенного в измеряемой жидкости на поверхности электродов, предложен датчик, содержащий толстостенный изоляционный патрубок с прямоугольными отверстиями, находящимися одно против другого, и 2 электрода, изготовленные из металлического листа и расположенные в указанных отверстиях, причем по-

верхности, контактирующие с измеряемой средой, удлинены в осевом направлении. Патрубок расположен в металлическом немагнитном блоке, имеющем боковые отверстия и центральное углубление для электродов; блок залит изоляционным (например, эпоксидным) компаундом. Увеличенная поверхность электродов предохраняет от излишнего накопления газа (пузырьки смываются до того, как они могут покрыть всю поверхность) [136].

Одним из последних достижений в области конструирования электромагнитных расходомеров является монтаж электронного блока на датчике, что освобождает от необходимости применения специальных соединительных кабелей между датчиком и вторичным прибором, а также экономит место на щите [140].

Конструктивному усовершенствованию узла электрода как одного из существенных элементов расходомера посвящен ряд работ.

Электрод для применения в трубах с изолирующей футеровкой, обладающей хладотекучестью (например, фторопласт), представляет собой стержень со шляпкой, имеющей по периферии кольцевой ободок, обращенный к изоляционному покрытию. В отверстие в трубе вставлена изоляционная втулка, через которую проходит стержень электрода. Один концевой втулки упирается в основное изоляционное покрытие трубы, другой — поджимается гайкой, наворачиваемой на стержень электрода; благодаря этому обеспечивается герметизация вывода. Монтаж узла электрода может осуществляться при повышенной температуре [137].

Для сохранения высокого сопротивления электродов относительно корпуса, что необходимо для измерения жидкости со сравнительно малой электропроводностью, предложено наружные концы электродов и связанные с ними выходные проводники герметично изолировать от воздействия окружающей среды, благодаря чему удается увеличить сопротивление изоляции между электродами до 20 000 *Мом*. Остальная часть датчика выполняется открытой (без кожуха), что сокращает размеры, снижает стоимость изготовления и уменьшает нагрев датчика за счет лучшего теплообмена с окружающей средой [138, 139, 142].

Усовершенствование узла электрода расходомеров предложено в авторском свидетельстве СССР [141]. Одной из актуальнейших проблем является защита электродов от изоляции пленкой или осадком. Предлагается применять трубчатый электрод со щеткой, вставляемой в полость трубки, электроды, сильно выступающие в поток, периодическую подачу на электроды высокого напряжения промышленной частоты, механический скрепер, также поворачиваемый через полый электрод, обогреваемый токами Фуко расходомера,

детали которого выполнены, например, из алюминия [140]. Последним достижением в этой области является УЗ-очистка, осуществляемая непрерывно без отключения прибора [143, 145].

Запатентованный в ФРГ [143] способ непрерывной очистки датчиков расходомеров от образующегося осадка состоит в том, что головка электрода связана с УЗ-генератором (через толкатель) или облучается УЗ-волнами от специального излучателя.

Предлагается для очистки электродов подавать в канал-датчик расходомера поток жидкости с большой скоростью. При этом происходит очистка рабочей поверхности электродов и восстановление их первоначальных свойств.

Требуемая скорость, при которой происходит очистка электродов, определяется экспериментально, но обычно бывает достаточно протекания жидкости со скоростью порядка 9 м/сек. Для создания такой скорости датчик устанавливается на участке трубопровода большего диаметра, чем датчик, а соединение его с трубопроводом осуществляется с помощью переходных конусов [144].

К числу важных вопросов разработки электромагнитных расходомеров относится конструирование магнитных систем. Поскольку создание однородного магнитного поля в канале датчика большого диаметра с помощью известных магнитных систем невозможно, разработан расходомер, у которого катушки представляют собой секции секторообразного сечения с постоянной плотностью намотки, угловые размеры которых определяются порядковыми номерами пространственных гармоник, устраняемых из спектра вектора магнитной индукции. Для исключения влияния остаточной неоднородности магнитного поля один из электродов установлен относительно другого под углом, определяемым порядковым номером неустраненной пространственной гармоники [146].

В СССР [147] запатентован датчик, намагничивающая обмотка которого выполнена из плоской шины в виде двух витков, расположенных параллельно наружной стенке трубы и включенных в качестве вторичной обмотки силового (питающего) трансформатора. Магнитная система круглая, с явно выраженными полюсами. По сравнению с Ш-образной и эллипсовидными магнитными системами в предложенной конструкции достигаются минимальные размеры, вес, поток рассеяния и мощность намагничивания при хорошей однородности магнитного поля датчика.

Согласно английскому патенту [148] обмотки датчика соединены между собой так, что магнитные потоки, создаваемые в магнитопроводе, направлены встречно, в результате чего на сторонах магнитопровода между обмотками образуется магнитный поток, проходящий через трубу. Эта систе-

ма пригодна для создания как однородного, так и неоднородного магнитного поля.

Предложенный в СССР [149] датчик расходомера содержит магнитную систему, выполненную в виде одной катушки, расположенной по одну сторону от электродов. Ось катушки перпендикулярна межэлектродной оси. Наличие одной катушки исключает погрешности от неидентичности изготовления катушек и неточности их сборки. Распределение магнитного потока в сечении канала датчика неоднородно.

В датчике, запатентованном во Франции [150], предусмотрен магнитопровод в виде цилиндрического сердечника из ферромагнитного провода, намотанного на обмотку возбуждения и покрывающего ее.

Предложенный в США [151] расходомер с улучшенной структурой магнитного поля в датчике содержит обмотки, состоящие из множества седлообразных витков, боковые стороны которых размещены около периферии трубы параллельно ее оси. Число ампервитков в каждой обмотке изменяется пропорционально косинусу угла между боковыми сторонами катушки и линией, соединяющей электроды, причем боковые части обмоток с наибольшим числом ампервитков лежат над электродами. Боковые стороны витков образуют цилиндрические секции, расположенные на теле трубы или на каких-либо кольцевых устройствах в пространстве около трубы. Отсутствие сердечника позволяет экранировать обмотки трансформаторным железом от магнитного поля Земли или влияния других внешних магнитных полей.

Среди новых конструкций электромагнитных расходомеров следует отдельно остановиться на разработках, связанных с усовершенствованием футеровки датчика.

Для обеспечения длительной работы расходомеров на абразивных и агрессивных жидкостях предложено футеровку датчика выполнять из двух слоев с уложенными между ними электрически изолированными от жидкости и трубопровода пластинами, которые при износе футеровки контактируют с жидкостью, благодаря чему подается сигнал о достижении предельного износа. Для повышения долговечности прибора внутренний слой футеровки выполнен в виде сменной гильзы [152].

Для измерения расхода щелочной или кислотной суспензии с pH от 1 до 12 разработан агрессивностойкий датчик, снабженный покрытием из кислото-щелочностойкой эмали [153].

Разработаны конструкции датчиков со съёмной футеровкой. Жидкость течет через трубу-вставку, снабженную на внутренней поверхности абразивостойким изоляционным покрытием и двумя электродами, обеспечивающими электрический контакт с измеряемой средой. Труба имеет на одном

конце основной фланец для соединения с технологическим трубопроводом, вспомогательный фланец на небольшом удалении от основного для соединения с цилиндрической вставкой и съемный фланец на втором конце. Средней частью труба входит в цилиндрическую оправку, на которой расположена магнитная система.

Конструкция допускает аксиальный монтаж и демонтаж трубы без разборки оправки или магнитной системы [154, 155].

Градуировка и поверка

Разработка сравнительно простых, но вместе с тем надежных методов и средств градуировки (поверки) электромагнитных расходомеров приобретает все большее значение, во-первых, в связи с непрерывно увеличивающимся верхним пределом измерений и, во-вторых, из-за необходимости осуществления поверки расходомеров на месте их эксплуатации.

Наряду с применением расходомерных установок башенного типа, выполненных по «классическим» схемам (подробнее см. главу III) ведутся исследования с целью создания различных устройств, которые позволили бы отказаться от дорогостоящих и громоздких башенных расходомерных установок. Особое направление связано с разработкой методов и средств безжидкостной градуировки (поверки).

Схема объемной установки для поверки электромагнитных расходомеров описана в работе [156].

Согласно японским данным [157] расходомеры диаметром до 2300 мм (расход до 25 м³/сек) градуируются с помощью башенной установки, оснащенной напорным баком с уровнем воды над полом 29 м.

Вместе с тем при выпуске расходомеров большого диаметра (до 2300 мм) для водопроводных и канализационных систем применяется специальный метод градуировки [158]. При экспериментальной проверке этого метода путем градуировки расходомера с использованием отстойного бассейна оказалось, что для датчика диаметром 2300 мм расхождение результатов не превысило $\pm 0,3\%$.

Вопросы градуировки приборов большого диаметра изложены также в работе Вада [159].

Разработанный в СССР метод градуировки расходомеров без испытаний в потоке жидкости основан на преобразовании индукции магнитного поля в электрический сигнал, равный по своим параметрам (фазе и амплитуде) электрическому сигналу на электродах, индуцируемому при соответствующих расходах протекающей жидкости [160].

Для безжидкостной градуировки и поверки расходомеров предложено устройство, в котором обмотки возбуждения датчика включены последовательно с аттестованным соленоидом и питаются одним и тем же током. Определив векторное соотношение между током и магнитным потоком, можно градуировать расходомер [161].

Расходомеры, применяемые в системе охлаждения атомного реактора Э. Ферми на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением, потребовали разработки специального метода градуировки для случая, когда имеются 2 параллельные ветви, в каждой из которых содержится расходомер, а в одной ветви, кроме того, гидравлическое сопротивление с известной характеристикой. Поправка к показаниям расходомера определяется по формуле и графику [162]. Экспериментальная проверка этого метода способом теплового баланса дала хорошее совпадение с расчетными данными. Однако метод теплового баланса не равноценен полной поверке прибора, так как определение теплового баланса на реакторе осуществляется в ограниченной области.

При использовании расходомера, предназначенного для эксплуатации в активной зоне реактора при температуре потока натрия 650°C , градуировка производилась на установке, состоящей из двух сосудов и замкнутой магистрали между ними, в которую встраивают испытуемый прибор. Один из сосудов заполняется дозированным объемом натрия, который нагревается до заданной температуры электронагревателем и перекачивается в другой сосуд насосом [163].

Возможна градуировка расходомеров крови с применением соленой воды в качестве заменителя крови, а также непосредственно в живом организме [164].

Стенд для полуавтоматической градуировки расходомеров крови снабжен резервуаром, содержащим электроды из нержавеющей стали и релейное устройство. Резервуар изготовлен из органического стекла и внутри имеет строго правильную форму. Через дно резервуара проходит нулевой электрод, выступающий на 1 см и соприкасающийся с жидкостью. Сверху в резервуар введены электроды, нижний торец которых расположен на разной высоте, причем каждая соответствует определенному объему жидкости в резервуаре.

Чувствительность поверяемого датчика рассчитывается по интегралу его выходных сигналов и известному объему крови (или другой проводящей жидкости), заполняющему полость между торцами электродов. Мерный объем может меняться подключением того или иного электрода.

Реле автоматически регулирует время суммирования, выполняемого с помощью интегрирующего предусилителя обычного регистрирующего прибора [165].

2. Ультразвуковые расходомеры

Принцип действия УЗ-расходомеров основан на том, что при распространении УЗ-колебаний в движущейся среде под некоторым острым углом к оси потока скорость ультразвука относительно трубопровода является функцией объемного расхода контролируемой среды. Наибольшее распространение получили расходомеры, выполненные по импульсным, фазовым и частотным схемам.

Теоретические и экспериментальные исследования [166—172]

С целью повышения точности и расширения диапазона измерений УЗ-расходомеров проводятся исследования, направленные на устранение или компенсацию погрешностей, обусловленных различными влияниями. Так, в работе Н. И. Бражникова и И. Н. Каневского [166] рассмотрены источники погрешностей, обусловленных реверберационными явлениями и нестабильностью фронтов УЗ-импульсов. Даются рекомендации по выбору и расчету основных параметров импульсного расходомера.

Новый способ компенсации концентрационных погрешностей 2-канальных фазовых расходомеров как при необходимости нарушения целостности стенок трубопровода, так и без нарушения предложен в СССР [167].

Как известно, для коррекции показаний УЗ-расходомеров, учитывающей эпюру скоростей жидкости в цилиндрическом трубопроводе, можно применять аналитически определяемые коэффициенты. Эти коэффициенты рассчитаны при ламинарном и турбулентном потоках в гладких и шероховатых трубопроводах; экспериментально получены значения коэффициентов в переходной области потока жидкости в трубопроводах, для профиля скоростей которой не имеется математического описания [168].

Проведены теоретические и экспериментальные исследования метода устранения погрешностей доплеровского расходомера, обусловленных переходом от ламинарного к турбулентному потоку применительно к трубопроводам малых диаметров (~ 20 мм) с расположением излучателя и приемника УЗ-колебаний по обе стороны трубопровода [169].

Действие этого расходомера основано на измерении сдвига частоты колебаний при доплеровском отражении их от твердых частиц, движущихся с потоком. Показано, что для суспензий или эмульсий, обладающих свойствами ньютоновской жидкости, теоретическая характеристика расходомера не изменяется при переходе от ламинарного к турбулентному течению, если активная зона излучения и приема у прямоугольных пьезоэлементов простирается в плоскости симметрии

трубы от стенки на расстояние примерно 0,64 радиуса по направлению к оси.

Предложена и теоретически рассмотрена новая компоновка датчика с расположением излучающего и приемного пьезоэлементов на одной стороне трубы; такое расположение открывает возможность измерения скорости потока в трубах большого диаметра, а также в кровеносных сосудах без повреждения кожи. Результаты ряда исследований УЗ-расходомеров рассмотрены в работах [170—172].

Разработка новых схем

В СССР разработан одноканальный расходомер, в котором выходы импульсного генератора соединены с пьезоэлементами и через приемные усилители со входами формирователей коротких импульсов. Вторые входы формирователей подключены к генератору через расширитель импульсов, а их выходы — к входам измерителя интервалов времени. Такая схема позволяет повысить точность расходомера и его быстродействие [173].

Предложенная в СССР [174] схема измерения отличается тем, что УЗ-сигнал пропускают в одну сторону через жидкость, а затем УЗ-колебания, преобразованные приемником в электрические, усиливают и вновь подают на излучатель. Повторяя этот процесс, о скорости жидкости судят по числу циклов прохождения УЗ-импульсом слоя жидкости и требующемуся для этого времени.

В США разработан расходомер по одноканальной импульсной схеме с одновременной коммутацией [175, 176]. Мерой расхода служит разность времен прохождения УЗ-импульсов, одновременно излучаемых пьезопреобразователями навстречу друг другу под углом к потоку и принимаемых теми же преобразователями. Измерение производится по переднему фронту принятых импульсов. Предусмотрена компенсация погрешностей, обусловленных изменениями скорости ультразвука.

Для измерения скорости потока воды в реках создан прибор с тремя УЗ-преобразователями: один (приемо-передающий) устанавливается на одном берегу реки, а 2 — на другом. Скорость измеряется по разности времен прохождения колебаний, которая преобразуется в амплитуду переменного напряжения. Прибор имеет 2 диапазона измерений $\pm 1,40$ и $\pm 3,5$ м/сек. Максимальная погрешность измерений средних скоростей $\pm 1\%$. Для измерений используется частота 100 кГц. Температурный диапазон от 0 до 30° С, компенсация температурных погрешностей осуществляется вручную.

Преобразователи могут выдерживать давление до 5 ат [177].

В одноканальном расходомере, предназначенном для исследования турбулентности потока в реке с целью удлинения акустического пути при сохранении небольших габаритов датчика импульс с излучающего элемента направляется под углом 45° на рефлектор в виде диска из нержавеющей стали диаметром 7 мм и после отражения попадает на приемный элемент. Импульсы в противоположных направлениях распространяются попеременно, возбуждение генератора импульсов производится принятыми импульсами [178].

Особенностью одноканальной схемы является то, что измерения проводятся только по передним фронтам импульсов, что позволяет уменьшить ошибки, вызываемые многократными отражениями и гидродинамическими возмущениями. Поправка на скорость распространения звука учитывается автоматически. Диапазон измерений от 3 до 30 м/сек при скорости звука в измеряемой среде 1380 м/сек. Погрешность измерений до 1%. В расходомере с двумя генераторными схемами частота генератора одной из них определяется скоростью прохождения звука по потоку, а другой — скоростью против потока. Погрешность измерения 0,25% без введения поправки на скорость распространения звука. При введении поправки погрешность может быть снижена до 0,1% [179].

Интересно отметить, что примененный в этом расходомере принцип может быть использован и для измерения расхода газов [180].

В 2-канальной схеме усиленный выходной сигнал приемного пьезоэлемента создает положительную обратную связь УЗ-генератора. Высокочастотные сигналы поступают в смеситель, и биение частоты преобразуется в ток, который пропорционален скорости потока [181].

Разработан одноканальный расходомер, преобразователь которого устроен так, что импульсы поступают на приемный пьезоэлемент до тех пор, пока он не начнет преобразовывать импульсы в обратном направлении. Конструкция пьезоэлементов позволяет перемещать их в направлении один к другому [182].

Ультразвуковой эхо — метод применяется для измерения расхода воды в водоводе ГЭС [183]. Сигнал непрерывно передается от одного пьезоэлемента другому и обратно в течение определенного промежутка времени. Если пренебречь временем прохождения ультразвука через стенку трубопровода, то средняя скорость потока определяется только разностью периодов распространения звука в прямом и обратном направлении, измеряемой преобразователем и умножителем частоты. Для исключения влияния температуры воды эта разность периодов подсчитывается двумя способами с помощью реверсивного электронного счетчика.

В патентах США [184, 185] предложены одноканальные схемы с коррекцией показаний на скорость ультразвука в жидкости. Разработанный в Японии 2-канальный расходомер предназначен для трубопроводов больших диаметров (800—5000 мм) при скоростях потока до 10 м/сек. Погрешность измерения $\pm 2\%$ [186].

Одноканальная схема [187] отличается тем, что поскольку синхронизация обеспечивает одновременность генерации обоими пьезоэлементами УЗ-импульса, а моменты приема импульса сдвинуты во времени на интервал Δt , пропорциональный скорости потока, оба пьезоэлемента соединены с двумя синхронизированными генераторами импульсов, а также с блоком измерения интервала времени Δt через контакты 2-позиционного релейного переключателя. При изменении позиции контактов каждый пьезоэлемент оказывается присоединенным к другому генератору и к другому входу блока определения Δt . В результате двух последовательных измерений, выполняемых с такой перекоммутацией цепей между измерениями, определяется точное значение Δt и расхода с полной компенсацией ошибки измерения.

Патентом США [188] предусмотрен расходомер газа, действие которого основано на том, что по потоку и против потока поочередно излучаются ударные импульсы, вырабатываемые генераторами, которые установлены в патрубках, расположенных наискось на противоположных стенках трубопровода. Требуемое направление импульсов обеспечивается угловыми отражателями, установленными в патрубках в местах соединения с трубопроводом. Мерой расхода служит разность периодов прохождения импульсов по потоку и против него, измеряемых пьезоэлектрическими детекторами, расположенными рядом с источниками импульсов.

Для фазовых расходомеров с равнофазным излучением и приемом УЗ-колебаний предложен способ компенсации температурных погрешностей [189, 190]. Излучение и прием УЗ-колебаний с периодом, равным удвоенному максимуму времени их распространения в потоке жидкости или газа, производятся через звукопроводы, скорость ультразвука в которых в рабочем диапазоне температур постоянна; время распространения в них устанавливают равным максимальному температурному изменению времени прохождения ультразвука в потоке.

Двухканальный расходомер по фазовой схеме с температурной коррекцией имеет погрешность измерения $\sim 0,1\%$ при отсутствии возмущений потока. Выходной сигнал выдается в цифровой форме [191].

В ФРГ [192] запатентован способ измерения расхода жидкости или газа, основанный на определении разности фаз УЗ-колебаний прямоугольной формы, излучаемых одним ис-

точником по направлению и против направления потока и воспринимаемых двумя преобразователями, установленными на равном удалении от излучателя. Приемники связаны через трансформаторы с усилителями, выходы которых подключены к выпрямительному мосту. Выпрямленное напряжение на выходе моста прямо пропорционально разности фаз принимаемых сигналов.

Расходомер крови, выполненный по одноканальной фазовой схеме без коммутации, характерен тем, что излучение и прием УЗ-колебаний по потоку и против потока производятся непрерывно на двух близких частотах (6 и 6,01 МГц) одними и теми же пьезоэлементами. Принятые сигналы с каждого пьезоэлемента вместе с колебаниями с излучающих генераторов поступают на электронную схему, в которой вырабатывается напряжение, пропорциональное разности сдвигов фаз УЗ-колебаний по потоку и против потока [193].

Прошел стендовые испытания пакет расходомера по одноканальной фазовой схеме с одновременной коммутацией для измерения скорости крови в крупных кровеносных сосудах. Датчик типа катетера вводится внутрь контролируемого сосуда. Определены зависимости результатов измерений от температуры, положения датчика по отношению к оси потока и содержания эритроцитов в крови. Нелинейность характеристики не превышает $\pm 10\%$, нестабильность показаний в течение 8 ч не более $\pm 5\%$, зависимость от содержания эритроцитов и температуры незначительная [194].

Расходомер крови, разработанный во Франции, основан на преобразовании разности периодов прохождения УЗ-колебаниями расстояния между двумя точками в смещение фаз двух сигналов переменного направления низкой частоты. В качестве излучателей-приемников служат 2 пьезопреобразователя из титаната бария, прикладываемые снаружи к кровеносному сосуду [195].

Двухканальный расходомер для газов, несущих порошковый материал (например, в системах пневмотранспорта), содержит герметичные магнитострикционные преобразователи, которые могут работать при температуре от -50 до $+105^\circ\text{C}$. Их возбуждение производится синусоидальным напряжением с амплитудой 20 в. При этом максимальная длина акустического пути может достигать 2 м.

Длина волны излучаемых УЗ-колебаний (~ 1 см) по крайней мере на порядок больше диаметра твердых частиц в потоке [196, 197].

Способ коррекции нуля фазовых расходомеров предложен в СССР [198].

В СССР разработан прибор для измерения расхода агрессивных жидкостей при высоких давлениях в трубопроводах малого диаметра [199].

В одноканальной схеме расходомера [200] преобразователи возбуждаются в противофазе с помощью генератора импульсов и трансформатора, средняя точка вторичной обмотки которого заземлена. Каждый преобразователь соединяется с крайним контактом потенциометра, движок которого подается на вход усилителя. При каждом импульсе возбуждения преобразователи передают в жидкость пакеты затухающих ВЧ-импульсов. Пакет, излучаемый одним преобразователем, принимается другим. При отсутствии потока прием обоих пакетов будет одновременным; система может быть настроена так, что сигнал на выходе усилителя равен нулю. Когда скорость не равна нулю, оба пакета принимаются со сдвигом во времени, вызывающим сдвиг по фазе обоих сигналов. Амплитуда суммарного напряжения является функцией сдвига по фазе, т. е. мерой расхода.

В одноканальной схеме с одновременной коммутацией [201] на пьезопреобразователи подаются прямоугольные пакеты синусоидальных колебаний с частотой 2—5 Мгц, излучаемых генератором, который управляется импульсами синхронизирующего генератора с частотой повторения 2—8 кгц. Принятые по потоку и против потока 2-серии пакетов, разность фаз между которыми пропорциональна скорости потока, усиливаются и преобразуются триггерами Шмитта в пакеты прямоугольных импульсов.

Для компенсации начального сдвига фаз предусмотрен фазовращатель. Коррекция температурных погрешностей осуществляется с помощью термистора.

С целью улучшения метрологических характеристик и повышения надежности одноканального частотно-импульсного расходомера предложено [202, 203] между частотомером и смесителем включить интегрирующее звено и генератор синусоидальных колебаний с варикапами в колебательном контуре для осуществления непрерывной автоматической подстройки его частоты по схеме статического регулирования. Звено и генератор образует цепь отрицательной обратной связи по постоянной составляющей частот следования.

С той же целью разработан частотно-импульсный расходомер, выполненный по одноканальной схеме, содержащей следящую систему в качестве запоминающего устройства [204].

В СССР исследован [205] 2-канальный частотно-импульсный УЗ-метод контроля расхода жидкостей без нарушения сечения трубопровода. Изучена зависимость разностной частоты расходомера от параметров измерительного преобразователя и контролируемой среды при использовании двух преломляющих поверхностей и жидкостных внешних волноводов.

Двухканальный расходомер [206] отличается тем, что каждая пара преобразователей включена в цепь своего автогенератора релаксационных колебаний. Цепь релаксации замыкается в жидкости между генератором и приемником колебаний. Частоты повторения импульсов, снимаемые с двух релаксаторов, работающих с самовозбуждением, обратно пропорциональны времени прохождения звуковыми импульсами расстояния между преобразователями соответственно по течению и против него. Разность этих частот, зависящая от скорости жидкости, измеряется и выводится на показывающий прибор.

Запатентованный во Франции [207] расходомер содержит 2 блока, каждый из которых состоит из генерирующей и приемной частей, соединенных между собой линией блокирования сигнала. Когда УЗ-колебания, создаваемые генерирующей частью, достигают приемной части, генерация колебаний блокируется. По окончании приема серии колебаний блокировка снимается, генерация колебаний возобновляется и т. д.

В США запатентована [208] схема, в которой каждый предыдущий излученный импульс, пройдя n раз фиксированное расстояние туда и обратно, принимается тем же преобразователем и служит сигналом для излучения следующего импульса. Принятый импульс обычно состоит из 20—30 периодов колебаний на резонансной частоте преобразователя.

Недостатком существующих одноканальных расходомеров является низкая точность измерений, вызванная незначительностью изменения (Δf) частоты сигнала при изменении скорости потока (порядка 10 μ ц для сигнала с частотой 1500 μ ц), а также сильным влиянием температуры на сигнал. Применение двух излучателей с различными частотами f_1 и f_2 [209] позволяет измерять изменение Δf частоты от скорости потока не на фоне большой величины f_1 , а на фоне разности частот, т. е. расходомер работает на биениях, что обеспечивает высокую точность измерений и автоматическую компенсацию влияния температуры, так как оно одинаково сказывается на обеих частотах и аннулируется при вычитании частот в смесительном устройстве.

Представляет интерес двухканальный частотно-импульсный расходомер, состоящий из трех блоков: датчика, детектора и индикатора. В датчике, кроме трех пар пьезоэлементов для измерения двух взаимно-перпендикулярных компонент скорости потока, расположены усилители мощности импульсов, подаваемых на элементы, и входные усилители принятых импульсов. В детекторе находятся усилители и триггеры, образующие синхрокольца. Пределы измерений 0—1; 0—2; 0—4 м/сек. Верхняя граница частотного диапазона — 100 μ ц. Для уменьшения реверберационных погрешностей УЗ — пу-

чок концентрируется под углом 15° с помощью сферической линзы [178].

Для измерения скорости корабля в ФРГ [210] предложена разновидность частотно-импульсного расходомера. Генератор импульсов, излучатель и приемник, установленный поперек движения на небольшом расстоянии от излучателя, образуют синхрокольцо, частота повторения импульсов в котором не зависит от движения корабля. Этот же генератор одновременно возбуждает импульсы, посылаемые по направлению движения и против него, причем приемники установлены на равных расстояниях, значительно превышающих базу синхрокольца. Частота повторения импульсов с синхрокольца после умножения в большое число раз образует последовательность счетных импульсов, которые подаются на селектор, открываемый каждым импульсом, принятым по потоку, и запираемый каждым импульсом, принятым против потока. Счетные импульсы, прошедшие через селектор, подаются на счетчик, и число импульсов в единицу времени является мерой скорости. Для исключения влияния боковых течений предусмотрена установка двух приемников по обе стороны от излучателя с автоматическим поочередным подключением в схему.

В США разработан расходомер по 2-канальной частотно-импульсной схеме с угловыми преобразователями, у которого мерой расхода служит разность частот повторения импульсов, распространяющихся по потоку и против потока с самозапуском генераторов принятыми импульсами.

Предусмотрена проверка нуля без остановки потока. Погрешность расходомера не превышает 0,3%. Постоянная времени 0,001 сек. Диапазон температур контролируемой среды от криогенных до 300°C [211].

Расходомер по патенту США [212] состоит из излучателя для направления УЗ-луча поперек потока жидкости; двух приемников, смонтированных напротив излучателя на некотором расстоянии один от другого и расположенных вдоль потока; электронного преобразователя. Если труба заполнена жидкостью, но скорость потока равна нулю, то УЗ-луч, посылаемый излучателем, не отклоняется от перпендикуляра к оси потока и не попадает на приемник, если же скорость не равна нулю, то луч отклоняется и попадает на один из приемников в зависимости от того, куда направлен поток.

Излучатель питается от специального генератора, а выходные сигналы приемников подаются на вычитающее устройство; разность сигналов пропорциональна смещению луча, т. е. расходу. Аналогичный расходомер основан на смещении луча, направленного по диаметру сечения трубопровода, потоком жидкости. На противоположной стенке трубопровода помещен преобразователь дифференциального типа с дву-

мя приемниками, настроенный так, чтобы при неподвижной жидкости воспринимаемая энергия распределялась поровну между приемниками. Смещение луча нарушает это равновесие и служит мерой расхода [213].

Для измерения расхода агрессивного газа в СССР [214] предложен расходомер, основанный на зависимости звукового давления акустического поля, возникающего при прохождении газа через слой жидкости, от расхода газа.

Усовершенствование конструкций

Особенность 2-канального расходомера [215] состоит в том, что в одном из акустических каналов пьезоэлектрический излучатель соединен через переключатель и регулятор временного сдвига с измерительным прибором, а приемник соединен через переключатель с генератором. Данная схема обеспечивает настройку прибора на нуль без остановки потока жидкости.

Предложенный в СССР [216] расходомер содержит 2 пьезоэлемента со звукопроводами, выполненными в виде многогранника с зеркально-отражающими поверхностями из твердого материала, обладающего пониженной скоростью распространения ультразвука в нем и повышенным коэффициентом затухания.

Второй особенностью прибора является то, что к фазовому детектору через амплитудные ограничители и оконечные каскады подключены селекторные усилители.

Двухканальный расходомер для контроля расхода воздуха в шахтных выработках [217] содержит 2 магнитострикционных УЗ-излучателя, расположенных на одной стенке выработки и направленных в разные стороны — по движению потока и навстречу ему. На одинаковых расстояниях от излучателей на противоположной стенке выработки установлены 2 приемника. Излучатели посылают импульсы одновременно. Измерительный блок прибора выполнен на полупроводниках. В СССР предложен [218] одноканальный расходомер, у которого между генератором и пьезоэлементами (последовательно с ними) включены диоды.

В Японии запатентована [219] улучшенная конструкция приемного элемента УЗ-преобразователя, в котором электрод с вибратором крепится на опорной пластинке не при помощи клея, а непосредственно, что заметно снижает коэффициент преобразователя (0,44 вместо 0,49).

Согласно патенту ФРГ [220] предложен одноканальный расходомер, у которого напротив излучателя помещен отражатель, направляющий УЗ-волны вдоль датчика (к приемнику). Отражатель может перемещаться относительно излу-

чателя, что позволяет установить его так, чтобы при отсутствии потока в зоне измерения образовались стоячие волны.

Градуировка и поверка

Ряд работ, проведенных в последние годы, направлен на изыскание методов безжидкостной градуировки УЗ-расходомеров. Для повышения точности этой градуировки с помощью моделирующего устройства — электрического аналога акустического преобразователя расходомера — предложено [221] вводить поправку к основному фазовому сдвигу, определяя дополнительный фазовый сдвиг, обусловленный формой эпюры скоростей в трубопроводе, в функции отношения диаметров излученного пучка УЗ-лучей и трубопровода.

В работе Н. И. Бражникова [222] рассматриваются особенности распространения волны в движущейся жидкости при вводе высокочастотных УЗ-колебаний бесконтактным способом, исключающим возникновение локальных гидродинамических возмущений. Отмечается практическая возможность расчетной градуировки УЗ-расходомеров по существующим теоретическим соотношениям и обосновывается необходимость ввода поправочного акустико-гидродинамического коэффициента.

Для поверки динамических параметров УЗ-расходомеров предложено специальное устройство [223].

3. Ядерно-резонансные расходомеры

В ядерно-резонансных расходомерах используется зависимость сигнала ядерно-магнитного резонанса от скорости жидкости в патрубке из немагнитного и неэлектропроводного материала, помещенного в поле магнита. Этот метод применим для широкой номенклатуры жидкостей с большим гиромагнитным отношением, в том числе для диэлектриков (например, для нефти и нефтепродуктов) и неньютоновых жидкостей. Перспективность ядерно-резонансных расходомеров связана и с тем, что в принципе могут быть созданы приборы, показания которых не зависят от температуры, вязкости, плотности жидкости и содержания в ней посторонних включений.

Датчик разработанного в США расходомера [224—232] содержит трубу из керамики или пропилена, на которой последовательно расположены постоянный магнит, радиочастотная и приемная катушки. Катушки установлены внутри литого кожуха. Намагничивающее поле образуется керамическими постоянными магнитами; внешний стальной корпус

замыкает магнитный поток. Все катушки залиты керамической массой или эпоксидным компаундом, что обеспечивает жесткость конструкции и исключает микрофонный эффект. Корпус датчика изготовлен из толстостенной трубы.

При движении жидкости через постоянное магнитное поле ядра жидкости поляризуются. Для большинства жидкостей время релаксации составляет 50 мсек до 3 сек. Для жидкостей с большим временем релаксации применяется предварительная намагничивающая камера. Радиочастотное поле заставляет прецессировать вектор суммарной намагниченности жидкости с частотой, определяемой характеристикой поля. Вектор, кроме того, поворачивается в положение, при котором индукция приемной катушки максимальна.

Для «маркировки» жидкости применяется модулирующий сигнал, который ослабляет магнитную ориентацию в малых сегментах жидкости, образуя в ней размагнитненные окна. Эти окна обнаруживает приемная катушка.

Угол сдвига вектора намагниченности в зоне приемной катушки относительно его положения в зоне радиочастотной катушки фиксируется фазовым компаратором. Сигнал рассогласования, являющийся мерой расхода жидкости, управляет генератором высокой частоты, восстанавливающим начальный сдвиг по фазе между модулирующим и детектированным сигналами; одновременно регулятором напряжения вырабатываются импульсы для запуска блоков, показывающих или записывающих расход. Каждый импульс соответствует дискретному объему жидкости, проходящей через прибор. Импульсы могут быть использованы для выработки аналогового токового сигнала для диаграммных регистраторов, указателей расхода и других приборов.

Основная частота зависит от объема жидкости в трубе датчика между модулирующей и приемной катушками, который меняется от 1 см³ в датчике калибром 2,5 мм до 218 см³ в датчике 150 мм. Разрешающая способность следящего устройства может быть улучшена до желаемого значения при помощи делителей частоты между регулятором частоты и модулятором.

Основным выходным устройством является 7-разрядный электронный счетчик количества с возможностью сброса показаний и повторного счета. Выходная частота измерительной схемы подается на счетчик в виде последовательности импульсов напряжением 12 в постоянного тока. На выходе измерительной схемы имеется также токовый выход 4—20 ма, пропорциональный расходу. Этот ток измеряется миллиамперметром постоянного тока.

О размерах датчика можно судить по данным для калибра 25 мм: диаметр 115 мм, длина 725 мм.

Температура измеряемой жидкости от -40 до $+300^{\circ}\text{C}$, окружающей среды от -40 до $+150^{\circ}\text{C}$; давление до 42 ат. Диаметр трубопровода от 10 до 150 мм.

Воспроизводимость показаний и нелинейность составляют $\pm 0,2\%$ верхнего предела измерений в диапазоне 20:1 и не зависят от температуры и вязкости жидкости.

Модель расходомера диаметром 150 мм разработана специально для нефтепродуктов [233]; имеется также модель [228] для жидкого водорода (температура -253°C).

В расходомере [234] предложен отличающийся от выше описанного способ измерения расхода, также основанный на ядерно-магнитном резонансе. Расходомер содержит устройство для импульсной поляризации сильным однонаправленным полем некоторого объема жидкости. Созданная магнитная метка детектируется на небольшом расстоянии ниже по течению с помощью комплекта катушек. Метка генерирует в одной из катушек импульс, переключающий поляризующее устройство так, что возникает непрерывная и самостоятельная генерация. Каждый импульс соответствует прохождению единичной порции жидкости, равной объему между поляризующим и детектирующим устройствами. Сумма импульсов за единицу времени пропорциональна средней скорости жидкости.

Преимущество импульсного способа состоит в отсутствии специального поляризатора, содержащего большие магниты и увеличивающего габариты прибора.

Теоретический анализ и экспериментальное исследование [235, 236] по выбору оптимальных характеристик детектора сигнала ядерно-магнитного резонанса позволили установить следующие недостатки детекторов существующих расходомеров с модуляцией постоянного магнитного поля H_0 . Низкая частота модуляции ограничивает количество информации второй гармоникой модулирующей частоты, уменьшая разрешающую способность датчика. Одновременно возникает сильная некогерентность диполей, приводящая к ослаблению сигнала. Применение слабого переменного поля H_1 также существенно уменьшает ширину линии.

По результатам указанных исследований предложены детекторы, свободные от перечисленных недостатков. В первом устройстве поле H_0 имеет градиент по направлению потока. Это достигается непараллельностью полюсов магнитов, причем требуемая величина H_0 обеспечивается током в катушках, намотанных на полюсе. Условие резонанса выполнено в середине полюсов. Градиент поля изменяется по направлению скорости потока жидкости так медленно, чтобы было выполнено условие адиабатичности при прохождении метки через детектор.

Во втором детекторе поле H_0 постоянно во всех направлениях, а переменное поле H_1 , создаваемое катушкой седлообразной конструкции, имеет градиент по направлению потока, так что максимальная величина поля достигается в центре детектора. Частота H_1 близка к ларморовской частоте. Градиент переменного поля медленно изменяется по направлению скорости потока так, чтобы выполнялось условие адиабатичности в детекторе.

Экспериментально установлено условие максимума сигнала, определяемое соотношением $2\pi\Delta f/H_1=0,2$, где Δf — отклонение от ларморовской частоты в герцах. Эффект неоднородности H_0 , который в ранее применявшихся детекторах был причиной низкого отношения сигнал/шум устранен использованием относительно большого поля H_1 .

На основании теоретической оценки погрешности ядерно-резонансного расходомера установлено, что при выполнении некоторых условий погрешность, обусловленная релаксацией ядерной намагниченности уменьшается с ростом величины магнитного поля датчика [237].

Ряд проведенных работ посвящен повышению точности и улучшению других метрологических характеристик ядерно-магнитных расходомеров. В СССР предложен [238] расходомер, который на участке трубопровода между поляризующим магнитом и датчиком резонанса содержит катушки, питаемые постоянным током. Катушки создают вспомогательное магнитное поле, полярность которого обратна поляризующему полю, благодаря чему показания прибора не зависят от времени релаксации и температуры жидкости. Для обеспечения равенства нулю амплитуды сигнала ядерно-магнитного резонанса при изменении расхода предусмотрены реверсивный двигатель, соединенный с движком реостата в цепи питания катушек, и измерительный прибор, связанный с валом двигателя.

Расходомер повышенной точности [239] снабжен схемой, осуществляющей пилообразную временную развертку магнитного поля, на вход которой подключен выход фазочувствительного детектора, а на выход — частотомер, показания которого служат мерой расхода.

В СССР предложен [240] способ измерения расхода, отличающийся тем, что зона, в которой поддерживается резонансное значение напряженности поля, перемещается вдоль оси трубы, причем с помощью схемы слежения обеспечивается равенство скоростей жидкости и поля. Благодаря этому во все моменты времени наблюдается сигнал резонанса от одного и того же объема жидкости, что позволяет стабилизировать форму и интенсивность метки ядерно-магнитного резонанса. О скорости жидкости судят по скорости перемеще-

ния поля, которую определяют при помощи измерительной схемы, связанной со схемой слежения.

Некоторые из созданных в СССР за последние годы моделей ядерно-резонансных расходомеров описаны также в [241, 242].

4. Лазерные расходомеры

Среди оптических расходомеров, основанных на зависимости оптического эффекта в контролируемом потоке от расхода вещества, необходимо прежде всего отметить как наиболее перспективные лазерные расходомеры, развитие которых существенно продвинулось в связи с успехами лазерной техники. К числу преимуществ этих приборов относятся высокая чувствительность, практически неограниченный диапазон измерений (от 10^{-6} м/сек до сверхзвуковых скоростей) и малая инерционность, позволяющая измерять пульсирующие потоки.

Согласно одной из схем, действие расходомера основано на том, что непрерывное излучение газового лазера через прозрачные окна в трубопроводе одновременно направляется по потоку и против потока контролируемой среды, которая входит в оптическую резонансную систему лазера. Скорость распространения излучения по потоку увеличивается, против потока — уменьшается. Соответственно в тонкой структуре излучения лазера по условию оптического резонанса увеличивается и уменьшается частота излучения. В детекторе выделяется разностная частота, пропорциональная скорости потока. Для газов и криогенных жидкостей разностная частота пропорциональна их плотности. В этом случае прибор является массовым расходомером [243].

Макет расходомера газов разработан на основе гелий-неонового лазера. При лабораторных испытаниях на воздухе под давлением до 7 кгс/см^2 получены воспроизводимость и линейность не хуже 0,5%. Для предотвращения конденсации паров и загрязнения вся резонансная оптическая система с окнами в трубопроводе герметизирована и вакуумирована.

Модификация описанной схемы разработана применительно к измерению пульсирующего расхода агрессивных топлив и окислителей для ракетных двигателей. Расчет влияния профиля потока показал наличие однозначной зависимости между расходом и выходным сигналом расходомера для данных значений температуры и давления. Для предотвращения захватывания близких частот оптических каналов при низких скоростях потока в оптическую резонансную систему включена ячейка Фарадея, обеспечивающая регулируемую начальную разностную частоту. Предусмотрена следящая система для поддержания постоянства периметра оптической

системы при изменениях температуры или вибрациях. Одно из зеркал укреплено на пьезоэлементе, с помощью которого осуществляется синусоидальная модуляция длины оптической системы. Посредством вспомогательного фотодиода-приемника излучения и фазового детектора вырабатывается сигнал рассогласования, пропорциональный отклонению частоты лазера от середины его флуоресцентной линии. При стендовых испытаниях на воде в режиме постоянного тока средняя квадратичная погрешность составила 0,7%.

Оптическая схема прибора [245] для измерения местной скорости потока в аэродинамической трубе состоит из гелий-неонового лазера, системы двух линз и призмы, которая делит лазерный луч на 2 составляющих луча одинаковой интенсивности. Эти лучи проходят в рабочую часть трубы перпендикулярно направлению потока и попадают на фотоумножитель, который фиксирует моменты прохождения мелких пылевидных частиц, имеющих в потоке, через оба луча. Измеряя время между двумя импульсами и зная расстояние между лучами, вычисляют скорость движения частицы в потоке.

Высокочувствительный расходомер [246], измеряющий нарастание сигнала за время менее 10 мсек (теоретически возможно измерение нарастания сигнала длительностью до 10 мсек), предназначен для измерения импульсов расхода агрессивных ракетных топлив и окислителей. Кольцевой лазер представляет собой оптический генератор, частота которого определяется периметром оптического резонатора. Две противоположно направленные бегущие волны образуют в резонаторе стоячую волну. Любое движение среды на оптическом пути увеличивает скорость одной бегущей волны и уменьшает скорость другой, что приводит к возникновению разности частот между двумя волнами. При наложении двух волн в смесителе появляется оптический сигнал, пропорциональный разности частот. Оптический сигнал преобразуется в выходной электрический сигнал, пропорциональный скорости потока.

Оптический путь резонатора имеет форму прямоугольника со сторонами 50,8 и 7,6 см. Расходомер работает с видимым красным или ИК-светом. На каждом из углов прямоугольника установлены зеркала. На длинных сторонах прямоугольника помещены газоразрядные трубки. В одной из коротких сторон установлен чувствительный к расходу элемент в виде трубки с внутренним диаметром 8 мм, имеющей окно для прохождения лазерного луча.

Эффект изменения скорости света в потоке жидкости (газа) используется для определения эпюры скоростей потока с помощью кольцевого гелий-неонового лазера [247]. Измерения проводились в трубах круглого сечения с различным

диаметром при числах Re , соответствующих ламинарному и турбулентному режимам потока газа.

В Англии [248] предложен способ измерения скорости потока, основанный на том, что луч лазера при помощи лучерасщепителя разделяется на 2 когерентных луча, которые с помощью соответствующих оптических систем пересекаются в контролируемой точке потока, где образуется интерференционная картина. При рассеянии на частицах, находящихся в потоке, происходит синусоидальное колебание интенсивности интерференционных полос, частота которого является мерой скорости потока.

Прибор для определения среднеквадратичных значений флуктуаций скорости турбулентного потока [249] содержит гелий-неоновый лазер мощностью 1 мвт, луч которого расширяется и коллимируется двумя цилиндрическими линзами, после чего направляется на маску с двумя квадратными отверстиями, которые служат лучерасщепителем. Сферическая линза фокусирует оба луча в исследуемой точке в прямоугольном водоводе, направленном перпендикулярно оптической оси системы. Частицы, проходящие в жидкости через интерференционные полосы образовавшейся 3-мерной интерференционной картины, вызывают периодически изменения интенсивности света, который собирается сферической линзой на фотодиоде.

Особое развитие получили лазерные расходомеры, основанные на использовании эффекта доплеровского сдвига частоты лазерного излучения, рассеиваемого взвешенными в контролируемом потоке посторонними частицами, размеры которых соизмеримы с длиной волны излучения. К числу существенных преимуществ доплеровского метода прежде всего относятся высокое пространственное и временное разрешение, возможность простой интерпретации результатов измерения благодаря однозначной зависимости выходной величины прибора от одного параметра — скорости потока.

В приборе [250—252] применен гетеродинный метод выделения сигнала от доплеровского смещения частоты, предусматривающий одновременную подачу на вход фотумножителя или полупроводникового детектора, используемых в качестве приемников, когерентных во времени и пространстве рассеянного и опорного световых пучков. Выходные колебания приемника с шириной частотного спектра до 200 Мгц (при исследовании потоков, движущихся со сверхзвуковыми скоростями) имеют частотно-модулированные составляющие, характеризующие турбулентность потока, с девиацией частоты, равной 100 кгц и более.

Для регистрации трех составляющих скорости предусмотрены 3 независимых измерительных канала, расположенных под определенными углами к падающему лучу. Монохромни-

ческий луч с длиной волны 4880 Å, излучаемый аргоновым лазером, фокусируется линзой и через окошко поступает во внутреннюю полость трубы с исследуемым потоком. Рассеянные лучи проходят через собирающие линзы и поступают на входы фотоумножителей, где они смешиваются с опорными оптическими сигналами, выходящими из призмленного расщепителя.

В качестве рассеивающих частиц могут использоваться шарики из полиэтилена диаметром 0,5 мкм. В зависимости от направления скорости частота опорного сигнала может быть большей или меньшей, чем частота рассеянного сигнала. Для определения знака этой разности в опорный сигнал вводится составляющая, формируемая модулятором с одной боковой полосой. Выходные сигналы фотоумножителей усиливаются широкополосными усилителями и поступают на входы частотных детекторов с отрицательной обратной связью. Выходные напряжения детекторов, регистрируемые самописцами, имеют постоянные составляющие, соответствующие центральной частоте спектра колебаний, и переменные составляющие, характеризующие турбулентность потока. Результаты измерений обрабатываются с помощью ЭВМ.

В схеме расходомера [253] луч лазера расщепляется на 2 луча, один из которых направляется непосредственно в фотоумножитель, а другой — в контролируемый поток жидкости. Рассеянный свет с доплеровским сдвигом частоты собирается линзой и также направляется в фотоумножитель, где выделяется разностная частота, пропорциональная скорости потока. Стандартный спектроанализатор, используемый в макете расходомера, имеет разрешающую способность, приведенную к скорости потока, до 0,1 мм/сек. Диаметр исследуемого объема жидкости составляет 0,04 мм.

По этой же схеме работает расходомер [254], который при исследовании профиля скоростей потока воды показал хорошее согласование с теорией (среднее расхождение равно 0,24%).

В схеме [255] расходомера на основе газового лазера мощностью 0,5 мвт предусмотрен объектив, преобразующий параллельный пучок лазера в расходящийся, чтобы осветить маску с двумя щелями, перед которыми стоит линза, фокусирующая 2 пучка излучения, прошедшие щели, в трубу с исследуемой средой; пучки интерферируют, после чего излучение, прошедшее среду, фокусируется линзой на фотодиод, сигналы с которого предварительно усиливаются и подаются на интегрирующий и записывающий спектроанализатор. Теория разрешающей способности этого расходомера рассмотрена в [256].

Схема 2-лучевого расходомера [257, 258], разработанная применительно к жидкометаллическим МГД-генераторам, от-

личается тем, что лазерный луч расщепляется на 2 луча, которые направляются в одну точку потока под разными углами и одновременно рассеиваются на частицах. При этом в соответствии с эффектом Доплера меняется частота пропорционально компоненте скорости частицы в направлении луча. Образуются 2 рассеянных световых поля, которые интерферируют в каждой точке окружающего пространства. В приемнике выделяется разностная частота биений, пропорциональная скорости частиц.

Двухлучевой метод дает существенное повышение точности и помехоустойчивости измерений. Распространение метода на 3 некомпланарных луча в принципе обеспечивает возможность векторных измерений.

Рассмотрено также применение двухлучевого расходомера для измерения расхода воды [259].

Устройство [260] для измерения трех составляющих вектора средней скорости и турбулентных флуктуаций потока жидкости характеризуется тем, что измерения производятся с помощью трех независимых оптических систем, сфокусированных на контролируемую точку потока. В каждой из них рассеянное излучение лазера смешивается на фотоумножителе с частью первичного излучения, частота которого для определения направления скорости сдвинута при помощи однополосного модулятора на величину, превышающую максимальный ожидаемый доплеровский сдвиг частоты. Выходные сигналы фотоумножителя, содержащие сигналы скорости потока, демодулируются по частоте при помощи преобразователя частоты в напряжение, на выходе которого получаются постоянное и переменное напряжения, соответствующие средней скорости и турбулентным флуктуациям.

Для улучшения отношения сигнал/шум и сужения спектра получаемых доплеровских частот, определяющего искомую скорость, можно применить симметричный метод оптического гетеродинирования, который состоит в том, что на исследуемую область потока направляются 2 симметричных (относительно перпендикуляра к направлению скорости) луча. Ось фотоумножителя не совпадает с направлением лучей [261].

В расходомере [262] на основе гелий-неонового лазера мощностью 0,1 мвт луч расщепляется на 2 части, одна из которых рассеивается на твердых частицах, а другая отводится в сторону и впоследствии (с помощью системы зеркал и линз) смешивается с рассеянным лучом, в результате чего возникает интерференционная картина. При пропускании смешанного света через диафрагму с отверстием, более узким, чем ширина интерференционной полосы, приемный фотоэлемент воспринимает сигнал биений и определяется его частота, пропорциональная скорости потока. Для измерения час-

тоты биений использовался частотный анализатор с диапазоном от 50 кгц до 1 Мгц.

Теоретические и экспериментальные исследования доплеровского расходомера в сверхзвуковом потоке показали [263], что наибольший размер частиц, воспринимающих не менее 90% скорости потока, составляет 0,1 мкм. Так как интенсивность рассеянного света пропорциональна квадрату их диаметра, то для ввода в поток нужно получать частицы, распределение которых по размерам имеет резкую границу при максимально допустимом диаметре. Из числа рассмотренных методов получения аэрозолей наиболее перспективным оказался метод распыления жидкостей, в частности воды.

Для получения требуемой интенсивности доплеровского сигнала достаточно $0,13 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ частиц, что соответствует 0,2% аэрозоля в основном потоке.

Проведено теоретическое исследование с целью определения оптимальных размеров рассеивающих частиц в потоке, требуемых для работы доплеровского расходомера [264].

Делаются попытки применить гелий — неоновый лазер для измерения расхода крови по доплеровской частоте, получаемой при интерференции двух разделенных лучей. Выделение доплеровской частоты производится на катоде нелинейного фотоумножителя. Погрешность не превышает 5% [265].

В работе [266] рассмотрено измерение пульсирующего потока жидкости расходомером, в котором частота света в опорном луче сдвинута на постоянную величину, в результате чего при нулевой скорости получается постоянный сигнал и доплеровские сдвиги частоты измеряются относительно этого сигнала. Постоянный сдвиг частоты производится оптическим однополосным модулятором, основанным на использовании вращающейся дифракционной решетки, состоящей из 5000 радиальных линий. При вращении со скоростью 7200 об/мин получается сдвиг частоты на 600 кгц.

В Швейцарии проведены исследования с целью создания доплеровского расходомера на основе гелий-неонового лазера [267, 268].

5. Корреляционные расходомеры

Широкие исследования ведутся в области развития различных меточных методов измерения расхода [269]. При этом одно из новейших направлений связано с разработкой корреляционного метода, который основан на определении интервала времени, необходимого для того, чтобы флуктуация какого-либо параметра, возникшая в одной точке контролируемого потока, была перенесена им в другую точку ниже по

потоку. Определение этого интервала времени производится с помощью взаимной корреляционной функции.

Корреляционный метод практически может быть использован во всех случаях, независимо от свойств и параметров состояния потока. Этот метод обладает особым преимуществом в тех случаях, когда непосредственное измерение расхода неосуществимо, но возможно измерение какого-либо другого параметра (например, в атомных реакторах).

В корреляционных расходомерах могут быть использованы различного рода метки — оптические, тепловые и др.

Результаты измерений расхода воды в прямоугольном канале путем корреляционного анализа оптических сигналов от двух точек потока сравнивались со значениями, полученными частотным методом; полученные данные совпадают в пределах $\pm 2,7\%$ [270].

Оптические метки могут создаваться при помощи лазера [271].

Если измерена турбулентность в двух точках вдоль потока, то время прохождения жидкости равно времени запаздывания, являющемуся взаимной корреляционной функцией максимума турбулентности [272]. Скорость потока определяется этим временем и расстоянием между двумя точками. Проведен ряд опытов, в которых турбулентность воздушного потока определялась проволочными термоанемометрами, расположенными в двух различных точках на центральной оси кольцевой трубки. Значения времени прохождения, полученного методом корреляции и измеренного трубкой Пито, хорошо совпадают.

Корреляционный расходомер с тепловыми метками от вспомогательного нагревателя [273, 274] позволяет измерять сравнительно большие и быстрые флуктуации скоростей в условиях ламинарного и турбулентного потоков. Прохождение меток определяется по показаниям двух термпар, расположенных внутри трубы на расстоянии 0,6 м одна от другой. Тепловые метки создаются путем периодической подачи питания на электрический нагреватель, установленный перед первой термпарой (по потоку). Режим работы цепи нагрева определяется задающим генератором.

Метод измерения расхода жидкости с помощью автокорреляционной функции изменений суммы сигналов, выходящих из двух точек потока, позволяет определять расход при невозможности применения коррелятора, непосредственно соединенного с контролируруемыми точками. Одновременное получение автокорреляционной и взаимной корреляционной функций дает возможность измерять расход и плотность. Применяя коррелятор, можно получить результат в течение нескольких сек, т. е. измерение можно считать непрерывным [275].

Исследовано влияние динамических свойств системы и статистических свойств последовательности флуктуаций на точность измерения расхода корреляционным методом. Показано, что положение максимума взаимной корреляционной функции будет точной мерой транспортного времени только в случае симметричности импульсной переходной функции системы. Проанализированы температурные флуктуации в ламинарном потоке жидкости. Получены рекомендации, позволяющие выбрать расстояние между точками измерения, с учетом требуемой точности в зависимости от размеров трубы, свойств жидкости и ожидаемой скорости [276].

Глава III.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГРАДУИРОВКИ И ПОВЕРКИ РАСХОДОМЕРОВ

Последние годы характеризуются проведением в СССР и других промышленно развитых странах работ, направленных на изыскание новых схем расходомерных установок объемного и весового типов с целью повышения их точности, расширения номенклатуры измеряемых сред и пределов измерений в сторону больших и малых расходов, высоких давлений, высоких и низких температур, а также создания широкой сети образцовых расходомерных установок, работающих на различных средах — жидкостях, газах, пульпах, сжиженных газах, жидких металлах, сыпучих материалах и др.

1. Образцовые жидкостные установки

Работы по созданию и исследованиям образцовых расходомерных установок для жидкостей получили значительное развитие. Ряд новых установок для различных жидкостей описан в работе [277].

Представляют интерес весовые установки для весьма малых расходов жидкостей ($2,5—2500 \text{ мг/сек}$) [278], для гидросмесей (до $300 \text{ м}^3/\text{ч}$) [279], пульп (до 100 т/ч) и сыпучих материалов (до 80 т/ч) [280].

Большое значение приобретают компактные установки для больших расходов, не требующие больших капитальных затрат. Подобного рода установка [281] содержит набор образцовых расходомеров с малым верхним пределом измерений, которые могут быть аттестованы на существующих малых расходомерных установках. Высокая точность измерений достигается благодаря тому, что образцовые расходомеры работают вблизи верхнего предела измерений и поэтому могут быть соответственно отградуированы.

Большое внимание уделяется изысканию схем безбашенных установок, преимущества которых перед башенными очевидны. Описаны конструкция и принцип действия пневмомеханического стабилизатора напора для безбашенных расходомерных установок, даны расчетные предпосылки осуществимости астатической характеристики узла стабилизатора — регулятора давления [282, 283].

В расходомерии агрессивных, токсичных, криогенных и других специальных жидкостей важную роль играют установки с полностью закрытой гидравлической системой [284, 285]. Особыми преимуществами обладает установка [285], позволяющая вести испытания при высоких давлениях, причем с низконапорным насосом. Установка оснащена специальным измерительным баком, обеспечивающим независимость объема мерной камеры от давления и температуры.

Анализ различных методов градуировки расходомеров и типовых схем расходомерных установок объемного и весового типов провел Zanker K. J. [286, 287].

Расходомерная установка и методика градуировки и поверки электромагнитных расходомеров описаны в [288].

Созданная в США установка для градуировки и поверки расходомеров и счетчиков жидкости [289—291] оснащена шестью центробежными насосами общей производительностью $58 \text{ м}^3/\text{мин}$ при давлении 4 ат, которые подают воду из подземного резервуара емкостью 3800 м^3 в испытательную линию. Вода, прошедшая испытуемый прибор, поступает в единый коллектор и далее через струеотсекающее устройство в один из двух весовых баков на 4,5 и 22,5 т. Имеются три отсекающих устройства: первое рассчитано на расход до $3,8 \text{ м}^3/\text{мин}$ (работает с меньшим баком), второе — до $13 \text{ м}^3/\text{мин}$ (работает с обоими баками) и третье — до $58 \text{ м}^3/\text{мин}$ (работает с большим баком).

Конструктивно отсекатель выполнен в виде прямоугольной в сечении сопловой насадки над подвижным распределителем, имеющим форму 3-гранной призмы, обращенной к насадке острой кромкой. Вода с одной грани призмы стекает в резервуар, а с другой — во взвешиваемый бак. По мере пересечения распределителем плоской струи изменяется соотношение потоков, направляющихся в резервуар и бак. Отсчет времени измерения начинается и кончается при равенстве указанных потоков (центральное положение призмы относительно насадки).

В установке предусмотрен также канал, питающийся от тех же насосов, для испытания расходомеров, применяемых в открытых потоках, по контрольному электромагнитному расходомеру.

В США [292] запатентованы метод и аппаратура для градуировки и поверки расходомеров непосредственно в рабочем

трубопроводе. Метод основан на фиксации двух последовательных микропорций флуоресцирующего вещества, вводимых дискретно в калиброванный участок трубы за определенный промежуток времени. Расходомер устанавливается до этого участка трубы и генерирует электрические импульсы, которые регистрируются двумя счетчиками. Флуоресцирующее вещество вводится в определенной точке в начале участка и фиксируется специальным прибором в заданной точке в конце участка. Объем жидкости, прошедшей через расходомер за выбранный промежуток времени, сравнивается с объемом жидкости, прошедшей через контрольный участок за то же время. Операции повторяются несколько раз. Воспроизводимость 0,01 %.

Значительное развитие в последние годы получили трубопоршневые расходомерные установки [293—297].

2. Образцовые газовые установки

При разработке методов точного измерения расхода газов и основанных на этих методах схем и конструкций образцовых расходомерных установок промышленного типа возникают существенные трудности, в связи с чем эта область точной расходомерии все еще отстает от растущих нужд науки и техники.

Для градуировки и поверки расходомеров газа с успехом может быть использована универсальная установка [285], о которой уже говорилось выше. Возможность использования ее для газовых сред — одно из важных преимуществ этой установки.

Некоторые образцовые газовые установки рассмотрены в [286, 287].

По аналогии с трубопоршневыми установками для жидкостей делаются попытки [298] создать такую же установку для газов. При этом особое внимание уделялось способу ввода в поток газа и выводу из него шарового поршня без нарушения установившегося режима работы поверяемого прибора. Для съема показаний поверяемого прибора разработан фотоэлектронный повторитель с механическим и электронным счетчиками.

Представляет определенный интерес разработанная в Англии [299] образцовая расходомерная установка для газов. Воздух, подаваемый с постоянным расходом через трубу, в течение фиксированного промежутка времени поступает в мешок из пластика. Из мешка воздух с небольшим расходом пропускается через барабанный газосчетчик. Искомый объемный расход в трубе вычисляется по известному объему воздуха, находившегося в мешке, и времени его заполнения.

Установка позволяет измерять расход сухих и влажных газов свыше 3000 л/мин с погрешностью менее 0,2% (при доверительной вероятности 0,95).

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА *

1. Cane C. S. Industrial fluid-flow measurement and control. «Automation» (Engl.), 1969, 4, № 10, 35—37, 39—40 (1970, 4,32,881)
2. Кивилис С. С. Современное состояние и направления развития автоматического контроля расхода веществ. В сб. «Методы и приборы автоматического контроля и регулирования», МДНТП, М., 1971, 63—77 (1971, 8,32,705)
3. Spencer R. A. Flow measurement at the National Engineering Laboratory. «Process Engineering», 1968, Aug, 53—57 (1969, 1,32,810)
4. Eujen E. Die Durchflußmessung mit Drosselgeräten bei laminarer Rohrströmung. «Brennstoff—Wärme—Kraft», 1969, 21, № 12, 628—630 (1970, 5,32,955)
5. Stańda J., Teisseyre M. Wytyczne do mormalizacji kryzy tarczowej. «Pr. nauk. Inst. miern., automatyz. i bud. urzad. termoenergiczn. PWr. Ser. Stud. i mater.», 1970, 1, № 2, 51—60 (1971, 5,32,856)
6. Guerrieri G. Annular orifice measurements. «Instrum. and Control Syst.», 1969, 42, № 11, 95—96 (1970, 7,32,826П)
7. Brown W. R. Ring—tape flow meter. Пат. США, кл. 73—212, № 3449954, заявл. 23.05.67, опубл. 17.06.69 (1970, 8,32,750П)
8. Reed R. D. Apparatus for developing differential pressures in a conduit line. Англ. пат., кл. G1R, № 1173964, заявл. 16.03.67, опубл. 10.12.69 (1970, 9,32,750П)
9. Aulich J. Zwiększenie współczynnika przepływu i poprawa własności metrologicznych kryz ostrobrzecznych. «Pomiary, automat., kontrola», 1969, 15, № 4, 160—162 (1969, 9,32,651)
10. Liquid/gas flow metered to 0,25% accuracy. «Chem. Process.» (USA), 1970, 33, № 12, 51 (1971, 7,32,716)
11. Halmi D. Universal venturi developed. «Water and Wastes Eng.», 1971, 8, № 1, A24—A25 (1971, 7,32,717)
12. Beitler S. R. Present state of the art of flow measurement in the power industry. «Paper. Amer. Soc. Mech. Eng.», 1968, № WA/PTC—7 (1970, 1,32,692)
13. Дашевский Л. Н., Гудрит Е. Р., Семернина С. Д. Расчет стандартных диафрагм на вычислительной машине. В сб. «Методы и приборы для измерения расходов и количеств жидкости, газа и пара», ЦНИИТЭИПриборостроения, 1967, 32—35
14. Инженерные расчеты в газовой промышленности. Методика и программа расчета на ЭЦВМ «Минск-22» стандартных диафрагм для измерения расхода жидкостей, газов и пара. АН УССР. Ин-т газа, Респ. фонд алгоритмов и программ. Киев, 1970 (1971, 1,32,666)
15. Sasiadek M., Kabza Z., Rutkowski E. Obliczanie na maszynach cyfrowych natężenia przepływu płynów mierzonego metodą zwężkową. «Pomiary, automat., kontrola», 1968, 14, № 9, 393—395 (1969, 3,32,767)
16. First service for automated computer calculation of meter orifice coefficient of bore size. «Ind. Heat.», 1970, 37, № 2, 246, 248 (1970, 11,32,838)

* Цифры в скобках показывают, в каком году, в каком номере РЖ «Метрология и измерительная техника» (выпуск 32), за каким индексом опубликован реферат по данной статье или патенту.

17. Jacobsen R. S. Computerized calculation of orifice meter constants. «Pipe Line Ind.», 1970, 32, № 5, 65—67 (1970, 12.32.710)
18. Sasiadek M., Kabza Z., Rutkowski E. Obliczanie liczby przepływu zweek mierniczych na maszynach cyfrowych. «Pr. nauk. Inst. miern., automatyz. i bud. urzad. termoeenergetyczn. PWr. Ser. stud. i mater.», 1970, 1, № 2, 23—28 (1971, 5.32.855)
19. Sasiadek M., Kabza Z., Rutkowski E. Zastosowanie maszyn cyfrowych ODR4 1003 i 1013 do obliczeń natężenia przepływu płynów mierzonego metoda zweekową. «Pr. nauk. Inst. miern., automatyz. i bud. urzad. termoeenergetyczn. PWr. Ser. stud. i mater.» 1970, 1, № 2, 3—21 (1971, 5.32.852)
20. Leiti R., Votava V., Konečný O. Vyhodnoceni měření průtoku přehřáté vodní páry a napájeci vody u bloků 50, 110 a 200 MW na samočinném počítači ICT 1905. «Automatizace», 1969, 12, № 11, 302—306 (1970, 6.32.629)
21. Zitgler H. Elektrische Differenzdruckmeßeinrichtung. Пат. ФРГ, кл. 42e, 23/20, № 1262626, заявл. 11.04.63, опубл. 30.01.69 (1970, 2.32.681П)
22. Robinson R. J. Static pressure alignment means for differential pressure measuring instrument. Пат. США, кл. 73—407, № 3440885, заявл. 8.09.67, опубл. 29.04.69 (1970, 5.32.910П)
23. Britall W., Borchers E. Kraftkompensierender Differenzdruck—Meßumformer. Пат. ГДР, кл. 42k, 12/06, № 69959, заявл. 21.12.67, опубл. 20.11.69 (1970, 10.32.667П)
24. Britall W. Ergänzungen der Kraftmeßumformer—Reihen im «Ursamat» System. «Techn. Inform.», 1970, 8, № 1—2, 78—83 (1970, 11.32.834)
25. Каханович В. С. Измерение расхода вещества и тепла при переменных параметрах. Изд-во «Энергия», 1970
26. Postolache A. Verificarea debitmetrelor diferentiale cu corecție automată a parametrilor de stare. «Metrol. apl.», 1970, 17, № 2, 58—63 (1971, 1.32.606)
27. Bender D. Ähnlichkeitsparameter und Durchflußgleichungen für Schwebekörperdurchflußmesser. «Arch. techn. Messen», 1968, № 391, R97—R102
28. Baird M. H. I., Cheema M. A. Pulsation error in a rotameter. «Canad. J. Chem. Eng.», 1969, 47, № 3, 226—232 (1970, 3.32.782)
29. Dijstelbergen H. H. Rotameters and turbine flowmeters in pulsating flow measurement. «Meas. and Contr.», 1970, 3, № 12, T197—T204 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1971, вып. 12, реф. 96)
30. Маки Х., Мори Я. «Нихон кикай гаккай ромбунсю, Trans. Jap. Soc. Mech. Eng.», 1970, 36, № 283, 415—425. Discuss., 425—429 (1971, 1.32.667)
31. Maki H., Mori Y. On the theoretical investigations of float-area-type flow meters. «Bull. JSME», 1970, 13, № 65, 1316—1327. Discuss., 1327—1330 (1971, 6.32.609)
32. Аикава Н., Симабэ К., Исикава М. «Сэйгё когаку, U. Jap. Assoc. Automat. Contr. Eng.», 1970, 14, № 1, 51—56 (1970, 10.32.745)
33. McNabb G. C. Bearingless flowmeter employing fluid support for rotor. Пат. США, кл. 73—229, № 3447373, заявл. 7.09.66, опубл. 3.06.69 (1970, 6.32.607П)
34. Serocka J., Odziemkowski W. Nadajnik przepływomierza turbinkowego. Пат. ПНР, кл. 42e, 23/05, № 56525, заявл. 19.01.68, опубл. 10.12.68 (1970, 6.32.608П)
35. Kovats Z. Temperature compensating apparatus for fluid flow meters. Пат. США, кл. 73—230, № 3440877, заявл. 18.05.66, опубл. 29.04.69 (1970, 6.32.609П)

36. Farrell T. C. Temperature compensating apparatus for fluid flow meters. Пат. США, кл. 73—230, № 3439538, заявл. 21.06.66, опубл. 22.04.69 (1970, 6.32.610)
37. Оно Масааки. «Хайкан, Piping», 1969, 4, № 12, 29—39 (1970, 7.32.794П)
38. Seroka J. Badania czujnika turbinkowego z łożyskiem hydraulicznym do pomiaru przepływu cieczy. «Prace Inst. lotn», 1969, № 39, 7—11 (1970, 8.32.729)
39. Lehmann W. Durchfluß—Meßgerät mit Turbine aus Teflon PTFE. «Antriebstechnik», 1970, 9, № 3, 107—108 (1970, 9.32.722)
40. Brooking R. A. Improvements in or relating to rotary fluid—flow meters. Англ. пат., кл. F1F, № 1207964, заявл. 10.11.67, опубл. 7.10.70 (1971, 5.32.814П)
41. Асаи И. Куроками Т. Япон. пат., кл. 108D2, № 11566, заявл. 25.12.67, опубл. 25.04.70 (1971, 8.32.724П)
42. Shercliff J. A. The theory of electromagnetic flow measurement, 1962. (Русский перевод: Шерклиф Дж. Теория электромагнитного измерения расхода. «Мир», 1965)
43. Rummel T., Ketelsen B. Inhomogenes Magnetfeld ermöglicht induktive Durchflußmessung bei allen in der Praxis vorkommenden Strömungsprofilen. «Regelungstechnik», 1966, № 6, 262—267
44. Ketelsen B. Induktive Durchflußmesser für alle in der Praxis vorkommenden Strömungsverteilungen. «Messen—Steuern—Regeln», 1967, 10, № 2, «Automatisierungspraxis», 29—30
45. Induktiver Durchflußmesser in Kurzbauform. «Chem. Ind.», 1966, 18, Jahresschau Dtsch. Ind., 1966, K30—K31
46. Ketelsen B., Rummel T. Moderne induktive Durchflußmesser. «Elektr. Ausrüst.», 1968, 9, № 5, 131—133 (1969, 4.32.832)
47. Ketelsen B. L. Electromagnetic flowmeter. Пат. США № 3373608, заявл. 8.03.66, опубл. 19.03.68 (1969, 5.32.816П)
48. Babaud J., Loeb J. Sur la théorie des débit—mètres électromagnétiques «Mesurora 67 Congr. internat. Paris, 1967». S. 1, s. a. 21—A—6/1—21—A—6/16. Discuss., 21—A—6/17—21—A—6/18 (1969, 2.32.830)
49. Гаммерман М. Я., Межбурд В. И. К вопросу о разработке расходомеров с сигналом, не зависящим от профиля скорости «Сборник материалов к IV Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам», Таллин, 1969, 31—34
50. Гаммерман М. Я., Межбурд В. И. К вопросу об экспериментальной проверке оптимальных систем возбуждения магнитного поля в электромагнитных расходомерах. Там же, 72—76
51. Вырк Р. X., Межбурд В. И. Особенности расчета магнитных систем расходомеров малых диаметров. Там же, 77—80
52. Шерклиф Дж. Исследования по магнитной гидродинамике и электромагнитному измерению расхода, проводимые в Уорвикском университете «Магнитная гидродинамика», 1967, № 4, 17—23
53. Гаммерман М. Я. и др. Электромагнитный расходомер с неоднородным магнитным полем возбуждения. Авт. св. СССР № 246102, заявл. 25.01.68, опубл. 12.11.69 (1970, 7.32.798)
54. Гаммерман М. Я., Межбурд В. И. Датчик электромагнитного расходомера. Авт. св. СССР № 265480, заявл. 24.02.69, опубл. 17.06.70 (1971, 1.32.646)
55. Гаммерман М. Я. и др. Влияние асимметрии потока в активной зоне на показания электромагнитных расходомеров. В сб. «Материалы 6-го рижского совещания по магнитной гидродинамике», вып. III, Рига, изд-во «Зинатне», 1968, 145—146
56. Bevir M. K. Theory of electromagnetic flowmeters with non-uniform fields. Там же, 151—152
57. Мороховский А. С., Фикс И. Г. Измерение расхода гидросме-

- сей с неравномерным профилем скоростей электромагнитным методом. «Сборник материалов к IV Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам», вып. III, том I, Таллин, 1970, 4—12
58. Мейстер А. А. Измерение скорости диэлектрических жидкостей электромагнитным методом. «Сборник материалов к IV Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам», вып. III, том I, Таллин, 1970, 69—74 (1970, 9.32.710)
 59. Karlson L. C. Magnetic flow metering. «Can. Contr. and Instrum.», 1970, 9, № 12, 27, 30 (1971, 7.32.705)
 60. Bonfig K. W. Induktive Durchflußmessung. «Messen und Prüfen», 1971, 7, № 1, 23—25 (1971, 7.32.706)
 61. Bevir M. K. Induced voltage electromagnetic flowmeters for pulsating flows. «Meas. and Contr.» 1970, 3, № 12, T193—T196 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1971, вып. 12, реф. 95)
 62. Smyth C. C. Derivation of weight functions for the circular and rectangular channel magnetic flowmeters, by means of Green's theorem and conformal mapping. «J. Phys. E: Sci. Instrum.», 1971, 4, № 1, 29—34 (1971, 9.32.938)
 63. Межбурд В. И. Соотношения между основными характеристиками электромагнитных расходомеров малых диаметров и параметрами их магнитных систем. «Сб. науч.-техн. статей. Н.-и. и проектно-технол. ин-т систем планир. и упр. в электропром-сти», 1971, вып. 13, 152—160 (1971, 6.32.585)
 64. Thomson W. J., Bopp G. R. The effect of variable fluid properties on the sensitivity of MHD flowmeter. «Rev. Scient. Instrum.», 1969, 40, № 12, 1609—1613 (1970, 5.32.929)
 65. Baker R. C. Effects of non-uniform conductivity fluids in electromagnetic flowmeters. «J. Phys.», 1970, D3, № 4, 637—639 (1970, 10.32.737)
 66. Bevir M. K. The theory of induced voltage electromagnetic flowmeters. «J. Fluid Mech.», 1970, 43, № 3, 577—590 (1971, 2.32.895)
 67. Bevir M. K. Theory of induced voltage electromagnetic flowmeasurement. «IEEE Trans. Magn.», 1970, 6, № 2, 315—320 (1971, 4.32.676)
 68. Baker R. C. Linearity of motioninduced magnetic field flowmeter. «Proc. Inst. Elec. Eng.», 1970, 117, № 3, 629—633 (1970, 11.32.803)
 69. Зарецкий Л. И. Основные направления в развитии средств измерения расхода гидросмеси и твердого при напорном гидротранспорте. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ», вып. 122 (182), 1970, 35—41 (1970, 9.32.740)
 70. Мороховский А. С., Фикс И. Г. Измерение расхода и количества вещества, переносимого потоком жидкости. «Сборник материалов к IV Таллинскому совещанию по электромагнитным расходомерам», вып. III, том II, Таллин, 1970, 13—20
 71. Корсунский Л. М. О применении электромагнитных расходомеров для измерения железорудных пульп. «Тр. Донецкий н.-и. ин-т черн. металлургии», 1967, № 6, 452—460
 72. Корсунский Л. М., Бендерский В. М. О влиянии осадка на показания электромагнитных расходомеров. Там же, 461—468
 73. Большаков В. Б., Корсунский Л. М. Об оптимальной протяженности полюсов магнитной системы электромагнитных расходомеров. В сб. «Магнитн. гидродинамика», Вып I, Рига, «Зинатне», 1968, 141—146
 74. Прошкин В. В. К теории индукционного метода измерения скорости плазмы. Там же, 147—149
 75. Петрищев В. С., Турчин Н. М., Шолохов А. А. Расчет конечного эффекта в магнитных расходомерах. «Магнитная гидродинамика», 1969, № 4, 149—152 (1970, 6.32.603)
 76. Olendski S. Wyznaczenia współczynnika osłabienia sygnału w czujnikach przepływomierzy indukcyjnych o przekroju kołowym z

- wykladzina izolacyjna. «Pomiary, automat., kontrola», 1968, 14, № 9, 399—401 (1969, 3.32.746)
77. Логинов Н. И. О влиянии концевых эффектов на чувствительность расходомера. «Магнитн. гидродинамика», 1969, № 1, 146—147
 78. Charles R. E. Slurry metering techniques. «Minerals Process.», 1969, 10, № 2, 12—15 (1969, 11.32.778)
 79. Фикс И. Г. Исследование магнитных систем датчиков электромагнитных расходомеров на электролитической модели. «Тр. Донецкого н.-и. угольн. ин-та», 1969, сб. 40, 39—56
 80. Кобаяси К., Кудо А. «Нихон гэнсирёку гаккайси, Nihon ginshiryoki gakkaishi, J. Atom. Energy Soc. Jap.», 1969, 11, № 11, 669—675 (1970, 10.32.735)
 81. Кобаяси К. и др. Там же, 1969, 11, № 12, 716—720 (1970, 10.32.736)
 82. Wotton P. The MBI electromagnetic blood flowmeter. «Bio—Med. Engng.», 1969, 4, № 9, 413—414, 422 (1970, 4.32.812)
 83. Гаммерман М. Я. и др. Влияние асимметрии потока в активной зоне на показания электромагнитных расходомеров. «Магнитная гидродинамика», 1969, № 4, 152—153 (1970, 4.32.819)
 84. Bonfig K. W. Grundlagen der induktiven Durchflußmessung. «Steuerungstechnik», 1970, 3, № 10, 336—338 (1971, 4.32.681)
 85. Канаи Х., «Кэйсоку то сэйрё, J. Soc. Instrum. and Contr. Eng.», 1970, 9, № 9, 643—658 (1971, 5.32.804)
 86. Kiene W. Induktive Durchfluß—Meßtechnik. «Verfahrenstechnik», 1970, 4, № 12, 563—567 (1971, 6.32.581)
 87. Межбурд В. И. Весовые функции расходомера с произвольным расположением электродов. «Магнитн. гидродинамика», 1970, № 4, 145—147 (1971, 4.32.692)
 88. Schommartz C. Der elektrodynamische Vorbeiflussmesser zur Messung freier Strömungen. «Acta IMEKO, 1967, т. 2», Budapest, 1968, 219—229
 89. Хагивара К. Электромагнитный прибор для измерений океанских течений. «Киндзоку дзайрё. Metals Engng.», 1969, 9, № 1, 126—130
 90. Wyatt D. G. Dependence of electromagnetic flowmeter sensitivity upon encircled media. «Phys. Med. and Biol.», 1968, 13, № 4, 529—534 (1969, 2.32.833)
 91. Baker R. C. Solutions of the electromagnetic flowmeter equation for cylindrical geometries. «J. Phys. (Brit. J. Appl. Phys.)», 1968, D1, № 7, 895—899 (1969, 1.32.835)
 92. Neuenfeldt D. Induktiver Durchflusssmesser mit Störgrössenausregelung. «Radio—Fernsehen—Elektronik», 1969, 18, № 12, 386—388 (1970, 1.32.704)
 93. Schmoock R. F. Electromagnetic flowmeter measuring apparatus. Пат. США, кл. 73—194, № 3260109, заявл. 24.04.62, опубл. 12.07.66 (1967, 11.32.655)
 94. Débitmètre. Франц. пат., № 1452143, заявл. 16.7.65, опубл. 1.8.66 (1967, 11.32.657)
 95. Сато М., Судзуки Т. Японск. пат., кл. 108Д25, № 10013, заявл. 62.05.67, опубл. 10.04.70 (1971, 5.32.802П)
 96. Wada I. Induction liquid flowmeters. Пат. США, кл. 73—194, № 3490282, заявл. 25.07.67, опубл. 20.01.70 (1971, 3.32.697)
 97. Cushing V. J. Electromagnetic mass flowmeter. Пат. США, кл. 73—194, № 3489007, заявл. 6.05.68, опубл. 13.01.70 (1971, 2.32.896)
 98. Бальсон М. Р., Скалабан А. В. Прибор для измерения и регистрации расхода электропроводящих жидкостей с малой постоянной времени типа ИР-4 «[Тр.] Гос. ин-т прикл. химии», 1970, вып. 63, 15—17 (1971, 5.32.833)
 99. Schmoock R. F. High accuracy electromagnetic flowmeter integration. «19th Annual ISA Conf. Proc., New York, 1964. Vol. 19 Part 3», Pittsburgh, 1964, № 8, 1/3, 1—7

100. Škopek J. Magnetický průtokoměr s kompenzací kapacitní složky rušivého napětí. Пат. ЧССР, № 122794, заявл. 11.01.66, опубл. 15.04.67
101. Škopek J. Magnetický průtokoměr s kompenzací kolmé složky rušivého napětí. Пат. ЧССР № 122778, заявл. 23.12.65, опубл. 15.04.67. (1969, 4.32.833П)
102. Colvin A. D., Warnick A. Electromagnetic flowmeter. Пат. США, № 3299703, заявл. 22.07.63, опубл. 24.01.67 (1968, 6.32.628)
103. Coia Psco A., Turtle Quentin C. Noise nulling network for magnetic flowmeter. Пат. США, № 3377855, заявл. 29.06.66, опубл. 16.04.68 (1968, 8.32.606)
104. Ham D. L. Magnetic flowmeter. Пат. США, № 3397575, заявл. 17.02.65, опубл. 20.08.68 (1969, 9.32.625)
105. Jeniček Josef. Zapojení kompenzační elektroického obvodu. Пат. ЧССР, № 125155, заявл. 21.06.65, опубл. 15.12.67 (1969, 10.32.628)
106. Bohata S. Zapojení indukčního průtokoměru. Пат. ЧССР, кл. 42e, 23/05, № 128627, заявл. 5.02.66, опубл. 15.08.68 (1970, 6.32.602)
107. Bohata S. Zapojení indukčního průtokoměru. Пат. ЧССР, кл. 42e, 23—05, № 129644, заявл. 20.02.67, опубл. 15.11.68 (1970, 7.32.796)
108. Nazareth A. A. C. magnetic flowmeter with D. C. bias on electrodes. Пат. США, кл. 73—194, № 3530713, заявл. 26.12.67, опубл. 29.09.70 (1971, 7.37.704)
109. Westersten A. Flowmeter. Пат. США, кл. 73—194, № 3449951, заявл. 8.09.66, опубл. 17.06.69 (1970, 8.32.721)
110. Мейстер А. А., Иыгевест Ю. Ю., Гаммерман М. Я. Авт. св. СССР, № 183420, заявл. 2.11.64, опубл. 19.08.66 (1967, 12.32.606)
111. Кнапп Е., Schlott P. Teleperm—Verstärker M758, ein Verstärker mit Hallmultiplikatoren für die induktive Durchflussmessung. «Siemens—Z.», 1967, № 12, 972—975
112. Galle R. Induktive Durchflussmessung. «Technica», (Suisse), 1967, 16, № 12, 1169—1173
113. Рийпс А. Р. и др. Полупроводниковый измерительный автокомпенсатор. В сб. «Вопросы гидравлической добычи угля». Тр. ВНИИ-Гидроуголь, вып. XIII, Новокузнецк, 1968, вып. 13, 118—122 (1969, 4.32.840)
114. Schmoock R. F. Measuring apparatus. Пат. США, кл. 307—88,5, № 3254243, заявл. 22.08.63, опубл. 31.05.66. (1967, 11.32.656)
115. Birnstingl D. W., Stapleton D. Improvements in or relating to electromagnetic flowmeters. Англ. пат., № 1052412, заявл. 10.9.63, опубл. 21.12.66 (1967, 9.32.807)
116. Krishanswamy P. Ham D. L., Fath J. P. Magnetic flow meter. Пат. США, кл. 73—194, № 3263500, заявл. 27.08.62, опубл. 2.08.66 (1968, 1.32.904)
117. Cushing V. J. Electromagnetic flowmeter. Пат. США, кл. 73—194, № 3274831, заявл. 14.04.65, опубл. 27.09.66 (1968, 2.32.906)
118. Cushing V. J. Screened electromagnetic flowmeter. Пат. США, № 3329020, заявл. 25.07.66, опубл. 4.07.67 (1968, 11.32.1120)
119. Cushing V. J. Electromagnetic volumetric flowmeter. Пат. США, № 3411355, заявл. 17.06.66, опубл. 19.11.68
120. Cushing V. J. Screened electromagnetic flowmeters. Англ. пат., № 1164302, заявл. 19.09.66, опубл. 17.09.69 (1970, 5.32.928)
121. Никитин Б. И. и др. Электромагнитный расходомер. Авт. св. СССР, № 220541, заявл. 21.12.66, опубл. 8.10.68 (1969, 5.32.819)
122. Elektromagnetischer Durchflußmesser DEBIMAG «AM—R», 1971, № 3, 76 (1971, 9.32.935)
123. Bailey J. E. Magnetic flowmeter reference system. Пат. США, кл. 73/194, № 3491593, заявл. 26.01.68, опубл. 27.01.70 (1971, 3.32.699)
124. Cushing V. J. Electromagnetic flowmeter including hum compensation means. Пат. США, кл. 73—194, № 3479871, заявл. 6.03.68, опубл. 25.11.69. (1971, 3.32.898)

125. Hognestad H. Device for electromagnetic flow measurement. Пат. США, № 3329018, заявл. 10.06.64, опублик. 4.07.67 (1968, 11.32.1114)
126. Westersten A. S. Apparatus and process for measuring fluid. Пат. США, кл. 73—194, № 3316762, заявл. 28.08.63, опублик. 2.05.67
127. Westersten A. S. и др. A balanced field-type electromagnetic flowmeter. «J. Appl. Physiol.» 1969, 26, № 4, 497—500 (1969, 12.32.868)
128. Engel L. Über ein induktives Verfahren zur Durchflussmessung in offenen Gerinnen. «Acta IMEKO, T. 2», Budapest, 1968, 261—274
129. Rohmann C. P. Magnetic flowmeter of improved linearity. Пат. США, № 3406569, заявл. 7.07.65, опублик. 22.10.68 (1969, 12.33.869)
130. Mannherz E. D., Rohmann C. P., Hermanns H. Magnetic flowmeters for low flow rates. Пат. США, № 3387492, заявл. 2.05.66, опублик. 11.06.68 (1969, 7.32.675)
131. Mannherz E. D. Side—saddle magnetic flowmeter. Пат. США, № 3372589, заявл. 12.06.65, опублик. 12.03.68 (1969, 5.32.817)
132. Romanowski A. F. Improved fluid-flow measuring apparatus. Англ. пат., № 1101495, заявл. 8.06.65, опублик. 31.01.68. (1969, 1.32.831)
133. Babaud J., Loks J. Perfectionnements aus débitmètres électromagnétiques. Франц. пат., № 1518823, заявл. 7.2.63, опублик. 29.3.68 (1969, 3.32.742)
134. Miyamichi S. Transmitter for an electromagnetic flowmeter. Пат. США, № 3334518, заявл. 25.09.64, опублик. 8.08.67, приор. 30.09.63 (1968, 11.32.1118)
135. Wada I. Flow detection signal generator for electromagnetic flowmeters. Пат. США, кл. 73—194, № 3465585, заявл. 25.05.67, опублик. 9.09.69, приор. 31.05.66, Япония (1970, 10.32.738)
136. Birnstingl D. W. Improvements in or relating to electromagnetic flowmeter heads. Англ. пат., № 1206953, заявл. 29.01.68, опублик. 30.09.70 (1971, 5.32.801)
137. Hunt D. R. Improvements in or relating to electrode assemblies. Англ. пат., № 1070833, заявл. 21.09.65, опублик. 7.06.67 (1968, 6.32.629)
138. Wada I. Mesureur de débit électromagnétique. Франц. пат., № 1523976, заявл. 25.05.67, опублик. 25.03.68. (1969, 5.32.822)
139. Birnstingl D. W. Improvements in or relating to sealing arrangements for electrodes. Англ. пат., № 1153295, заявл. 25.08.66, опублик. 29.05.69 (1969, 4.32.836)
140. Ellis P. F. Advancements in magnetic flowmetering. «ISA Trans», 1968(1969), 7, № 4, 332—337
141. Стрелков В. В. и др. Узел электрода датчика индукционного расходомера. Авт. св. СССР, кл. 42е, 23/05, № 283618, заявл. 23.04.69, опублик. 30.12.70 (1971, 9.32.941)
142. Wada I. Electromagnetic flow meter. Пат. США, кл. 73—194, № 3486376, заявл. 22.05.67, опублик. 30.12.69, приор. 26.05.66 Япония (1971, 3.32.698)
143. Engel L. Verfahren zur Reinhaltung von Meßelektroden. Пат. ФРГ, № 1208902, заявл. 18.03.64, опублик. 21.07.66 (1967, 12.32.614)
144. Voigtman E. W. Self-cleaning magnetic flowmeter. «Instrum. Technol.», 1968, 15, № 12, 62 (1969, 7.32.672)
145. Hermanns H. Self-cleaning electrodes. Пат. США, кл. 73—194, № 3479873, заявл. 13.11.67, опублик. 25.11.69 (1971, 2.32.899)
146. Фикс И. Г. Датчик электромагнитного расходомера. Авт. св. СССР, № 187342, заявл. 1.02.65, опублик. 10.11.66 (1967, 12.32.609)
147. Našek J. Indukční průtokoměr. Пат. ЧССР, № 116979, заявл. 7.09.63, опублик. 15.12.65 (1967, 9.32.811)
148. Harrison D. N. Improvements in or relating to flowmeters. Англ. пат., № 1095915, заявл. 23.03.66, опублик. 20.12.67 (1968, 11.32.1122)
149. Фикс И. Г., Мороховский А. С. Датчик электромагнитного расходомера. Авт. св. СССР, № 203960, заявл. 5.08.66, опублик. 15.01.68 (1968, 11.32.1198)

150. Wada I. Debitmetre electromagnetique. Франц. пат., № 1559544, заявл. 12.04.68, опублик. 27.01.69 (1970, 2.32.737)
151. Heascke A. C. Electromagnetic flowmeter. Пат. США, кл. 73—194, № 3412608, заявл. 21.05.65, опублик. 26.11.68 (1970, 2.32.735)
152. Фикс И. Г., Мороховский А. С., Кравец А. И. Датчик электромагнитного расходомера. Авт. св. СССР, № 187344, заявл. 26.07.65, опублик. 10.11.66 (1967, 12.32.612)
153. Шалаев И. Н., Медведовский В. Б., Корнюхина В. И. Агрессивностойкий датчик индукционного расходомера «Приборы и системы упр.», 1968, № 2, 43
154. Birnstingl D. S., Bennett L. M. Improvements in or relating to measuring instruments. Англ. пат., № 1119055, заявл. 7.10.65, опублик. 3.07.68 (1969, 4.32.836)
155. Relineable flowmeter. «S. A. Elec. Rev.» 1970, 61, № 621, 24 (1970, 8.32.722)
156. Popescu P. P. Metoda de verificare a justetei indicațiilor debitmetrelor electromagnetice. «Metrol. apl.», 1969, 16, № 5, 213—218 (1970, 2.32.741)
157. Эдамото А. Measurement of large flow rate using electro-magnetic flowmeter. «Нихон кикай гаккайси, J. Japan Soc. Mech. Engrs.» 1967, 70, № 583, 1143—1146
158. Хама Т. Электромагнитный расходомер диаметром 2.000 мм «Кэйсо. Instrumentation», 1967, 10, № 7, 40—41
159. Вада И. и др. Recent industrial measuring instruments. «Тосиба ревю, Toshiba Rev.», 1967, 22, № 5, 604—610
160. Вавилов О. С. и др. Безжидкостный метод градуировки и поверки электромагнитных расходомеров. «Измерит. техника», 1970, № 3, 37—38 (1970, 8.32.748)
161. Ватанабэ К., Сакамото А. Inspection and graduating device for electromagnetic flowmeter. Японск. пат., № 11780, заявл. 24.10.61, опублик. 4.07.67
162. Meshii T., Ford J. A. Calibration of electromagnetic flowmeters in the Enrico Fermi Atomic Power Plant. «Nucl. Applic. and Technol.», 1969, 7, № 1, 76—83 (1970, 2.32.743)
163. Glass M. C., Popper G. F. The calibration and stability of a 1200°F permanent magnet. «IEEE Trans. Nucl. Sci.», 1968, 15, № 1; 37—40
164. Wyatt D. G. The electromagnetic blood flowmeter. J. Phys./J. Scient. Instrum., 1968, E1, № 12, 1046—1052 (1969, 5.32.820)
165. Wolfson S. K., Icöz M. V., Surur F., Pritchard M. Semi-automatic calibration technique for electromagnetic flowmeter probes. «Med. Res. Eng.», 1968, 7, № 4, 37—41
166. Бражников Н. И., Каневский И. Н. Импульсный ультразвуковой метод исследования и контроля малых потоков жидкостей. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 172—177 (1970, 10.32.724)
167. Бражников Н. И., Полянский А. А. Компенсация концентрационных погрешностей двухканальных фазовых ультразвуковых расходомеров. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 158—161 (1970, 9.32.744)
168. Froněk V. Opravne koeficienty při ultrazvukovém měření průtoku. «Strojírenství», 1970, 20, № 10, 624—629 (1971, 5.32.813)
169. Pfau B. Erweiterung des Meßbereiches eines Ultraschalldurchflußmessers unter Ausnutzung des Doppler-Effektes «Chem.—Ing.—Techn.» 1970, 42, № 17, 1103—1109, A1563 (1971, 2.32.901)
170. Pégonneau P. и др. Vélocimètre sanguin par effet Doppler à émission ultrasonore pulsée. A description de l'appareil — résultats «Onde élec.», 1970, 50, № 5, 369—389 (1971, 8.32.756)
171. Комия К. Техника измерения расхода (газа или жидкости) и пер-

- спективы ее использования. «Кэйсо, Instrumentation» 1968, 11, № 3, 6—12
172. Mesure de vitesse et de débit par ultrasons. «Rev. prat. contrôle industr. 1969, 8, № 38, 9—17 (1970, 3.32.753)
 173. Бражников Н. И. и др. Импульсный одноканальный ультразвуковой расходомер. Авт. св. СССР, № 210404, заявл. 30.12.65, опубл. 10.04.68 (1969, 3.32.747)
 174. Денисюк В. П. Ультразвуковой способ измерения скорости и ускорения движения жидкости. Авт. св. СССР, № 210502, заявл. 16.03.77, опубл. 1.04.68
 175. Hastings C. R. LE — Flowmeter- A new device for measuring liquid flow rates. «Westinghouse Engr.» 1968, 28, № 6, 183—186 (1969, 5.32.812)
 176. Hastings C. R. New device for measuring flow rates. «Water a. Wastes Eng.», 1969, 6, № 8, 54—54 (1970, 3.32.755)
 177. Миндзава Х. Применение ультразвукового водоизмерителя. «Доброу гидзюцу», 1967, № 22, № 9, 60—66
 178. Ishihara Y. Yokosi S. Ultrasonic flowmeters for measuring river turbulence. «Bull. Disaster Prevent. Res. Inst.», 1969, 18, № 3, 49—64 (1970, 1.32.713)
 179. Acoustical measurement of fluid flow. «J. Acoust. Soc. America», 1967, 41, № 2, 532—536
 180. Ebdon S. F. Ultrasonic flowmeter developments. «Gas», 1967, Jan., 28
 181. Yamamoto M. Ultrasonic flow speed measuring apparatus. Пат. США, кл. 73—194, № 3282101, заявл. 29.02.64, опубл. 1.11.66, приор. 27.02.63, Япония
 182. Yamamoto M., Arai Y., Arai T. Ultrasonic flow quantity measuring apparatus. Пат. США, № 3329017, заявл. 29.04.64, опубл. 4.07.67
 183. Suzuki H., Nakabori H., Yamamoto M. Ultrasonic method of flow measurement. «Water Power», 1968, 20, № 7, 266—269
 184. Hayes W., E. Calhoun C. D. Flowmeter frequency control system. Пат. США, кл. 73—194, № 3440876, заявл. 31.10.66, опубл. 29.04.69 (1970, 5.32.924)
 185. Geonagan K. P., Jr. Hunt. D. W., Erickson G. P. Fluid velocity measuring system. Пат. США, кл. 73—194, № 3537309, заявл. 26.11.68, опубл. 3.11.70 (1971, 7.32.708)
 186. Иосияма Ю. и др. Ультразвуковой расходомер для труб большого диаметра «Мицубиси дэнки гихо, Mitsubishi denki giho», 1969, 43, № 10, 1366—1369 (1970, 5.32.923)
 187. Débitmètre a ultra-sons. Франц. пат., № 1564728, заявл. 26.02.68, опубл. 17.03.69 (1970, 4.32.798)
 188. Moffatt E. M. Gas flow measuring system Пат. США, кл. 73—194, № 3469445, заявл. 20.07.67, опубл. 30.09.69 (1970, 10.32.721)
 189. Бражников Н. И., Полянский А. А. Способ компенсации температурных погрешностей фазовых ультразвуковых расходомеров. Авт. св. СССР, № 239593, заявл. 9.10.67, опубл. 1.08.69 (1970, 3.32.754)
 190. Бражников Н. И., Полянский А. А. Ультразвуковой фазовый контроль скорости потока жидкости или газа. В сб. «Точное измерение расходов и количеств вещества». Вып. 122(182) Москва—Казань, 1970, 162—166 (1970, 9.32.760)
 191. Biggi V., Courty A. Un debitmètre à ultrasons à sortie numérique pour la mesure très précise des débits liquides. «Mesucora 67. Congr. Internat. Paris 1967». S. I., s. a., 21—A—7/1—21—A—7/7. Discuss. 21—A—7/8 (1969, 1.32.837)
 192. Baum E. Verfahren zum Messen der Strömungsgeschwindigkeit bzw. des Gewichtes oder des Volumens pro Zeiteinheit von Gasen oder Flüssigkeiten. Пат. ФРГ, № 1234076, заявл. 20.10.61., опубл. 17.08.67 (1968, 8.32.914)
 193. Noble F. W. Dual frequency ultrasonic fluid flowmeter «Rev. Scient. Instrum.», 1968, 39, № 9, 1327—1331 (1969, 3.32.749)

194. Studer U., Fricke G., Scheu H. Testing of an improved ultrasound flowmeter: technical description and results of testing in vitro. «Cardiov Res.» 1970, 4, № 3, 380—387 (1971, 1.32.648)
195. Girard J. P. Débitmètre ultrasonore à déphasage; application au débit sanguin. «Onde élec.», 1970, 50, № 5, 390—394 (1971, 8.32.757)
196. Parkinson M. J. Measurement of the mass flow rate of airborne powdered material in a duct. «J. Phys. (J. Scient. Instrum)», 1968, E1, № 8, 823—824 (1969, 1.32.841)
197. Parkinson M. J. Hiorns F. J. Mass flowmeter for gasborne powders. «Instrum. Practice», 1969, 23, № 3, 197—200 (1969, 9.32.623)
198. Чузо Н. Н., Прохоров В. С. Способ коррекции нуля фазовых одноканальных ультразвуковых расходомеров. Авт. св. СССР, № 239592, заявл. 10.09.66, опубл. 11.08.69 (1970, 10.32.719)
199. Дюдин Б. В., Кипнис И. А., Колмаков В. А. Измерение расхода жидкостей с помощью ультразвука в трубопроводах малого диаметра. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 166—171 (1970, 10.32.722)
200. Débitmètre à ultra-sons. Франц. пат., № 95411, заявл. 19.06.68, опубл. 6.11.70 (1971, 8.32.713)
201. Yoshiyama Y., Ezawa T. Ultrasonic flowmeter system. Пат. США, кл. 73—194, № 3473378, заявл. 29.12.66, опубл. 21.10.69, приор. 10.01.66, Япония (1971, 3.32.692)
202. Журавлев Л. И., Крысанова Е. С. Одноканальный частотно-импульсный расходомер. Авт. св. СССР, № 226879, заявл. 27.03.67, опубл. 27.01.69 (1969, 10.32.752)
203. Журавлев Л. И., Крысанова Е. С. Одноканальный частотно-импульсный ультразвуковой расходомер. Авт. св. СССР, № 248269, заявл. 2.02.68, опубл. 29.12.69 (1970, 8.32.725)
204. Шафрановская З. М. и др. Ультразвуковой расходомер. Авт. св. СССР, № 191155, заявл. 6.10.62, опубл. 15.03.67
205. Бражников Н. И., Вавилов О. С., Оганесов А. С. Ультразвуковой двухканальный частотно-импульсный метод бесконтактного контроля скорости потока жидкости. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 141—145 (1970, 10.32.723)
206. Dispositif pour la mesure du débit d'une veine fluide. Франц. пат., № 1444922, заявл. 28.05.65, опубл. 31.05.66 (1967, 9.32.816)
207. Procédé et appareil de mesure de la vitesse d'écoulement de fluides. Франц. пат., № 1550300, заявл. 6.11.67, опубл. 12.11.68 (1970, 1.32.715)
208. Anderson L. G. Sing around velocimeter. Пат. США, № 3327806, заявл. 26.04.66, опубл. 27.06.67 (1968, 10.32.941)
209. Ямамото И., Ито К. Японск. пат., № 16583, заявл. 26.02.66, опубл. 12.07.68 (1969, 8.32.604)
210. Stedtitz W., Thiede H. Anordnung zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten oder Gasen sowie des im Medium zurückgelegten Weges oder der am Meßplatz vorbeiströmenden Menge. Пат. ФРГ, № 1296849, заявл. 22.04.66, опубл. 22.01.70 (1970, 10.32.717)
211. Brown A. E. Today's ultrasonic flowmeter is a versatile measuring tool. «Oil and Gas. J.», 1969, 67, № 34, 92—95 (1970, 3.32.752)
212. Roth W. Ultrasonic flowmeter. Пат. США, кл. 73—194, № 3283574, заявл. 21.09.64, опубл. 8.11.66 (1968, 5.32.807)
213. Martin H. R. Some instruments suitable for measuring unsteady flow. «Hydraul. Pneumat. Power», 1968, 14, № 167, 690—694
214. Балабудкин М. А., Барам А. А., Коган В. Б. Способ контроля расхода газов. Авт. св. СССР, № 216307, заявл. 14.02.66, опубл. 12.07.68 (1969, 3.32.771)
215. Бражников Н. И. Ультразвуковой расходомер. Авт. св. СССР, № 210402, заявл. 1.10.66, опубл. 10.04.68 (1969, 3.32.748)

216. Тунанов М. А. и др. Одноканальный ультразвуковой расходомер жидкости. Авт. св. СССР, № 211813, заявл. 18.06.65, опубл. 24.04.68 (1969, 1.32.836)
217. Гуманюк М. Н. и др. Ультразвуковой расходомер воздуха в шахтных выработках. В сб. «Автоматика и техн. кибернет. на шахтах и рудниках». Киев, «Техника», 1969, 63—68 (1970, 1.32.714)
218. Чузо Н. Н., Прохоров В. С. Одноканальный ультразвуковой расходомер. Авт. св. СССР, № 198000, заявл. 7.06.63, опубл. 3.08.67
219. Фудзи Т., Сато С. Ultrasonic wave detecting contactor. Японск. пат., № 29919, заявл. 16.08.65, опубл. 21.12.68
220. Baum E. Einrichtung zum Messen der Strömungsgeschwindigkeit von Gasen oder Flüssigkeiten durch Schallwellen. Пат. ФРГ, № 1228835, заявл. 20.10.61, опубл. 1.06.67
221. Бражников Н. И. Способ беспроточной градуировки фазовых ультразвуковых расходомеров. Авт. св. СССР, № 209783, заявл. 23.11.66, опубл. 3.04.68 (1969, 1.32.838)
222. Бражников Н. И. Метод градуировки фазовых ультразвуковых расходомеров без натурной проливки. В сб. «Точное измерение расходов и количеств». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 150—153 (1970, 10.32.720)
223. Бражников Н. И., Иванов А. А., Оганесов А. С. Устройство для проверки динамических характеристик ультразвуковых расходомеров. Авт. св. СССР, № 287336, заявл. 31.07.69, опубл. 1.02.71 (1971, 9.32.931)
224. Battocletti J. H. Magnetic resonance flowmeter for LNG and LPG, «Pipe Line Ind.», 1968, 29, № 6, 61—64 (1969, 9.32.635)
225. Corrosives, abrasives, viscous polymers handled by flowmeter. «Chem. Process.» (USA), 1969, 32, № 2, 47 (1969, 10.32.644)
226. Magnetic resonance flowmeter. «Rev. Scient. Instrum.», 1969, 40, № 3, 520—521 (1969, 8.32.603)
227. Flowmeter handles corrosive chemicals. «Oil. a. Gas J.», 1968, 66, № 52, 92 (1969, 7.32.681)
228. Genthe W. K. и др. NMR applied to flow measurement. An obstructionless, digital flowmeter. «Instrum. Technol.», 1968, 15, № 11, 53—58 (1969, 6.32.676)
229. Flowmeter uses magnetic resonance. «Electronics.», 1968, 41, № 22, 165—166. (1969, 4.32.824)
230. NMR meter offers better flow control. «Canad. Chem. Process.», 1969, 53, № 2, 34 (1969, 12.32.870)
231. Nuclear magnetic resonance measures flow. «Canad. Controls and Instrument.», 1968, 6, № 11, 36—37
232. Genthe W. K. и др. The magnetic resonance flowmeter. «Advances Instrument. Vol. 23. Pt. 1», Pittsburgh. Pa. 1968, 864/1—864/16 (1970, 4.32.800)
233. Flowmeter handles corrosive chemicals. «Oil and Gas. J.» 1968, 66, № 52, 92 (1969, 7.32.681)
234. Genthe W. K., Vander H. W. H., Strobel D. H. NMR flowmeter employing pulsed magnetization. Пат. США, № 3419795, заявл. 3.08.66, опубл. 31.12.68 (1970, 4.32.799)
235. McCormick W. S., Birkemeier W. P. Optimum detectors for the NMR flowmeter. «Rev. Scient. Instrum.», 1969, 40, № 2, 346—353 (1969, 9.32.634)
236. McCormick W. S. NMR detection apparatus for use in fluid flowmeters. Пат. США, кл. 324—5, № 3473108, заявл. 9.10.67, опубл. 14.10.69 (1970, 11.32.804)
237. Дмитриев Ю. И., Маноилов В. Е. Влияние величины магнитного поля индикатора на погрешность измерений в ЯМР — расходомерах жидкости. «Изв. высш. учебн. заведений. Приборостроение», 1969, 12, № 8, 10—15

238. Жерновой А. И., Поляков А. И., Яковлев Г. И. Устройство для измерения расхода жидкостей. Авт. св. СССР, № 212564, заявл. 4.07.63, опубл. 7.05.68 (1969, 2.32.836)
239. Беспалов Г. П. и др. Расходомер, основанный на использовании явления ядерного магнитного резонанса. Авт. св. СССР, № 226872, заявл. 21.09.67, опубл. 30.01.69
240. Беспалов Г. П. и др. Способ измерения скорости (расхода) жидкости. Авт. св. СССР, № 208985, заявл. 1.04.66, опубл. 7.03.68
241. Ламп Ю. Ю., Сандер Х. Я. Ядерно-магнитный расходомер. В сб. «Методы и приборы автомат. контроля и регулир.», М., 1971, 110—112 (1971, 8.32.730)
242. Корепанов В. Д., Терентьев А. Т. Измерение скорости потока жидкостей импульсным методом ядерного магнитного резонанса. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 146—149 (1970, 10.32.702)
243. Blazey R. N., Schneider J. R. The laser flowmeter today. «Oil and Gas. J.», 1969, 67, № 32, 145—147 (1970, 3.32.747)
244. Blazey R. N., Schneider J. R. Characteristics of a high response laser flowmeter. «Advances Instrument. Vol. 23P. 1.» Pittsburgh, Pa, 1968, 869/1—898/8 (1970, 4.32.795)
245. Tanner L. H., Thompson D. H. Measurement of fluid velocity and refractive index gradient using lasers. «Opt. Technol.», 1969, 1, № 2, 92—96 (1969, 12.32.872)
246. Ring laser flowmeter measures 10-ms rise at high repeatability. «Laser Focus», 1969, 5, № 1, 15—16
247. Fenster P., Kahn K. An optical technique for measurement of gas flow profiles utilizing a ring laser. «Appl Optics», 1968, 7, № 12, 2383—2391
248. Drain L. E. Improvements in or relating to fluid flow measurements. Англ. пат., № 1222177, заявл. 22.10.69, опубл. 10.02.71 (1971, 9.32.947)
249. Greated C. Measurement of Reynolds stresses using an improved laser flowmeter. «J. Phys. E: Sci. Instrum.» 1970, 3, № 10, 753—756 (1971, 3.32.690)
250. Fridman J. D., Huffaker R. M., Kinnard R. F. Laser Doppler system measures three-dimensional vector velocity and turbulence. «Laser Focus», 1968, 4, № 21, 34—38
251. Pike E. R., Jackson D. A., Bourke P. J., Page D. I. Measurement of turbulent velocities from the doppler shift in scattered laser light. «J. Phys. (J. Scient. Instrum)», 1968, E1, № 7, 727—730
252. Thompson D. H. A tracer-particle fluid velocity meter incorporating a laser. «J. Phys. (J. Scient. Instrum)», 1968, E1, № 9, 929—932
253. Edwards R. Y., Angus J. C., Morrow D. L. Flow measurements with Doppler shifted laser light. «Advances Instrument. Vol. 23. P. 1.» Pittsburgh, Pa, 1968, 868/1—868/5 (1970, 3.32.797)
254. Angus J. C., Morrow D. L., Dunning J. W., Jr, French M. J. Motion measurement by laser Doppler techniques. «Ind. and Eng. 1969, 61, № 2, 8—20 (1969, 9.32.636)
255. Rudd M. J. The laser Dopplermeter a practical instrument. «Opt. Technol.», 1969, 1, № 5, 264—265 (1970, 4.32.796)
256. Wilmshurst T. H. Resolution of the laser fluid-flow velocimeter. «J. Phys. E: Sci Instrum», 1971, 4, № 2, 77—80 (1971, 9.32.949)
257. Lehmann B. Geschwindigkeitsmessung mit Laser—Dopplerverfahren. «Wiss. Ber. AEG—Telefunken», 1968, 41, № 3, 141—145 (1969, 8.32.596)
258. Lehman B. An optical method for measuring local particle velocities in two-phase flows. «Electr. MHD, 1968. Vol. 3» Vienna, 1968, 1341—1354
256. Deelen W. van, Lüning O. W. Debietmeting met behulp van de laser doppler snelheidsmeter. «Verwarm. en vent», 1971, 28, № 4, 283—285 (1971, 9.32.948)

260. Rolf E., Kinnard K. F., Huffaker R. M. Laser doppler system for measuring three dimensional vector velocity. Пат. США, кл. 356—28, № 3532427, заявл. 22.04.69, опубли. 6.10.70 (1971, 8.32.711)
261. Mazumder M. K., Wankum D. I. SNR and spectral broadening in turbulence structure measurement using a cw laser. «Appl. Opt.», 1970, 9, № 3, 633—637 (1970, 9.32.761)
262. Измерение расхода жидкости с помощью лазера. — «Кйэрэкэн нюсу», 1969, 17, № 5, 3—5 (1970, 12.32.706)
263. Yanta W. J., Gates D. F., Brown F. W. The use of a laser Doppler velocimeter in supersonic flow. «AIAA Paper», 1971, № 287, 8, pp. (1971, 9.32.945)
264. Meyers J. F. Investigation of basic parameters for the application of a laser Doppler velocimeter. «AIAA Paper.», 1971, № 288, 8 pp. (1971, 9.32.946)
265. Morikawa S., Salel A., Ofstad J. M. A proposed laser Doppler blood flowmeter. «Proc. 8th. Internal. Conf. Med. and Biol. Engng. (incl. 4th Annual Meet. AAMI), Chicago, III, 1969» Chicago, 1969 (1970, 8.32.764)
266. Denison E. B., Stevenson W. H. Oscillatory flow measurements with a directionally sensitive laser velocimeter. «Rev. Sci. Instrum.», 1970, 41, № 10, 1475—1478 (1971, 8.32.755)
267. Flow measurement by laser. «Elektron. Weekly», 1970, № 528, 10 (1971, 3.32.691)
268. Berührungslose Messung von Strömungsgeschwindigkeiten mit Laserstrahlung. «Schweiz. Techn.», 1970, № 3, 60—61 (1971, 4.32.714—4.32.717)
269. Ильинский В. М. Бесконтактное измерение расходов. «Энергия», 1970
270. Деревянко Н. Ф., Латышев В. М., Трохан А. М. Исследование течений жидкости оптическим корреляционным методом. «Измерит. техника», 1969, № 4, 34—36
271. Stein H. D., Pfeifer H. J., Koch B. Korrelationsmessungen an Gasströmungen mit Hilfe von Laserstrahlung. «Z. angew. Phys.», 1970, 30, № 2—3, 174—176 (ЭИ, «Контрольно-измерительная техника», 1971, вып. 8, реф. 68)
272. Комия К. Измерение скорости потока с помощью корреляции турбулентности. «Кэйрё кенкюсё хококу, Rept. Nat. Res. Lab. Metrol.», 1970, 19, № 1, 10—16 (1971, 5.32.825)
273. Abeyssekera S. A., Beck M. S. Crosscorrelation techniques applied to pulsating flow measurement. «Meas. and Contr.», 1970, 3, № 6, T1109—T1112 (1970, 12.32.759)
274. Abeyssekera S. A., Beck M. S. Crosscorrelation techniques for flow measurement. «Prod. Des. Eng.» (Gr. Brit.), 1970, 9, July, 20—22 (ЭИ, серия «Контрольно-измерит. техника», 1970, вып. 39, реф. 264)
275. Plaskowski A. Metoda korelacyjna pomiaru natężenia przepływu. Zastosowanie funkcji autokorelacji sumy dwóch sygnałów. «Przem. Chem.», 1970, 49, № 12, 720—721 (1971, 5.32.824)
276. Dikov I. M. Analysis of some possible error sources of the method for fluid flow measurement using correlation techniques. «Arch. automat. i telemekh.», 1970, 15, № 3, 345—352 (1971, 5.32.826)
277. Иващенко В. В., Федоров В. А. Создание средств для исследований и испытаний датчиков расхода на различные среды. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 18—22 (1970, 10.32.759)
278. Шишкин З. А., Никифоров В. Д. Установка для градуировки микрорасходомеров жидкости и ее аттестация. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182) Москва—Казань, 1970, 89—94 (1970, 9.32.753)
279. Зарецкий Л. И. Основные направления в развитии средств измерения расхода гидросмеси и твердого при напорном гидротранспорте.

- В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 35—41 (1970, 9.32.740)
280. Кос Ю. Ю. Массовые расходомеры сыпучих и пульповидных материалов и оборудование для их поверки. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 28—34 (1970, 10.32.742)
 281. Данилов М. А., Зарецкий Л. И. Образцовая установка для поверки расходомеров с верхним пределом 1000 м³/ч. «Тр. ВНИИГидроуля», 1969, сб. 8, 39—45 (1970, 11.32.821)
 282. Заря Ю. И. Пневмомеханический способ стабилизации напора жидкости для образцовых расходомерных установок. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ», Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 115—118 (1970, 9.32.707)
 283. Заря Ю. И. Пневмомеханический способ стабилизации напора жидкости. «Изв. высш. учебн. заведений. Машиностроение», 1969, № 5, 87—91 (1970, 1.32.726)
 284. Якин П. В., Зазерский В. Д. Образцовая расходомерная установка с закрытой гидравлической системой для специальных жидкостей. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 60—64 (1970, 10.32.708)
 285. Гаммерман М. Я., Кивилис С. С., Данилов М. А. Установка для градуирования, поверки и испытания расходомеров жидкостей. Авт. св. СССР, № 301549, заявл. 7.07.69, опубл. 21.04.71
 286. Zanker K. J. Cost effectiveness of calibrating flowmeters. Part 1. «Process Eng.», 1970, Oct. 55—59 (1971, 4.32.703)
 287. Zanker K. J. Cost effectiveness of calibrating flowmeters. Part. 2. «Process Eng.», 1970, 25th Nov., (1971, 4.32.704)
 288. Сэкимото К. «Kэйсо, Instrumentation», 1970, 13, № 7, 26—31 (1971, 1.32.644)
 289. Miller R. W. Hydraulic calibration laboratory. «Instrum. and Control Syst.», 1969, 42, № 3, 95—98 (1970, 1.32.731)
 290. Miller R. W. A large hydraulic laboratory designed to meet today's calibration needs. «Advances Instrument. Vol. 3. P. 1», Pittsburgh, 1968, 866/1—866/9 (1970, 4.32.811)
 291. Miller R. W. Precise measurement of differential pressure when calibrating a head class flow meter. «Paper. Amer. Soc. Mech. Eng.», 1969, NWA/FM—7 (1970, 10.32.671)
 292. Champ F. F. Calibration and proving of meters. Пат. США, кл. 73—3, № 3455143, заявл. 31.10.66, опубл. 15.07.69 (1970, 7.32.820)
 293. Тупиченков А. А., Меньшиков Б. Н., Бусыгин А. Н. О возможности использования трубопоршневых установок для поверки расходомеров. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182), 1970, 111—114 (1970, 9.32.745)
 294. Тупиченков А. А., Меньшиков Б. Н., Валенцович Е. И. Некоторые вопросы гидродинамики трубопоршневых расходомерных установок. Там же, 51—56 (1970, 10.32.711)
 295. Ives G. O. Proving liquid turbine meters. «Pipeline and Gas. J.», 1970, 197, № 10, 56—57, 60—61 (1971, 2.32.910)
 296. Layhe M. Improvements in and relating to uni-directional meter provers. Англ. пат., кл. G1 R., № 1166850, заявл. 13.12.67, опубл. 8.10.69 (1970, 7.32.827)
 297. Developments in flow-metering equipment. «Water Power», 1971, 23, № 4, 150 (1971, 9.32.970)
 298. Бродин И. С., Лесишин В. М., Праскова З. М. Шаропоршневая газомерная установка. В сб. «Точное измерение расходов и количеств веществ». Вып. 122 (182). Москва—Казань, 1970, 57—59 (1970, 10.32.757)
 299. Evans G. V., Spackmann R., Gardiner J. C. A primary standard of gas-flow measurement. «Res. Group. U. K. Atomic Energy Auth.», 1969, № AERE—R6011 (1970, 7.32.807)

ЭЛЕКТРОМЕТРИЯ. СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

А. М. Илюкович

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений развития современной электроизмерительной техники является повышение чувствительности применяемых методов и аппаратуры. В частности, в последние годы большое внимание уделяется измерению малых и медленно меняющихся электрических сигналов в высокоомных цепях, так называемой электрометрии. С помощью электрометрических методов и средств удастся измерять напряжения на уровне десятков микровольт от источников с внутренним сопротивлением до 10^{12} — 10^{14} ом, токи порядка 10^{-17} а, заряды до 10^{-16} к, а также весьма большие сопротивления — до 10^{17} — 10^{18} ом [1, 2].

Области применения [2, 3]. Электрометрическая аппаратура широко используется в таких важных областях науки и техники, как физика, химия, биология, метеорология, астрономия, космические исследования, электроника, электротехника и т. п. Перечислим основные виды датчиков и объектов, при работе с которыми применяется электрометрическая аппаратура.

Электрометрические измерители напряжений используются со стеклянными электродами при измерениях рН, со стеклянными ультрамикрорезисторами при измерениях внутриклеточных потенциалов биологических объектов, с проводящими зондами для измерения параметров электростатических полей [4—11], при исследованиях высокоомных электрохимических систем и высокоомных физических объектов (диэлектрических и полупроводниковых) [12], при измерениях потенциалов в высокоомных электрических цепях, в частности на запоминающих конденсаторах, и т. п.

Электрометрические измерители токов используются с ионизационными камерами [13], в ионизационных вакуумметрах, в ионизационных измерителях параметров электростатических полей [14, 15], с аргоновыми и ионизационно-пламенными детекторами в газовой хроматографии, при метеорологических измерениях электрических токов в атмосфере [16], в аспирационных счетчиках аэроионов [17]. Все эти типы датчиков являются газовыми или воздушными. Кроме того, электрометрические измерители токов применяются с вакуумными объектами, в частности в масс-спектрометрии, в гелиевых масс-спектрометрических течеискателях, в электронографии для регистрации интенсивности рассеянных электронов, для измерения токов вакуумных фотоэлементов, электронных и фотоэлектронных умножителей [18], с вакуумными камерами для измерения больших доз рентгеновского и γ -излучения, с ионными ловушками при измерениях солнечного ветра в космическом пространстве, с электростатическими анализаторами, при измерениях токов и геометрии пучков в циклотронах, бетатронах, электронных микроскопах, рентгеновских анализаторах и пр. Измерители малых постоянных токов необходимы и при работе с твердотельными объектами [19, 20], в частности для измерения обратных токов полупроводниковых диодов и триодов, токов затворов полевых транзисторов, входных токов интегральных линейных усилителей, сеточных токов электронных ламп и т. п. Из жидкостных источников весьма малых токов можно назвать полярографическую ячейку для электрохимического измерения парциального давления кислорода в электролите.

Наиболее распространенными типами датчиков малых электрических зарядов являются пьезоэлектрические преобразователи и ячейка Фарадея [21]. Последняя применяется для измерения зарядов отдельных частиц при метеорологических, физических и других исследованиях [22], при исследовании электризации жидких, сыпучих и других непроводящих тел [23, 24] и т. п. Измерители малых зарядов применяются также при определении интегральных значений малых сигналов, например в радиоактивных дозиметрах, ионизационно-пламенных детекторах и пр.

Электрометрические измерители сопротивлений используются при определении сопротивлений диэлектрических и полупроводниковых материалов [25], при определении сопротивления изоляции электротехнической и электронной аппаратуры, в физическом эксперименте, в частности при низких температурах [26], при метеорологических исследованиях проводимости атмосферы, при производстве и использовании высокоомных резисторов и пр.

Требования к электрометрической аппаратуре [2, 27]. Многообразие областей использования электрометрической аппа-

ратуры предопределяет широкий диапазон требований к ней по чувствительности, точности (от сотых долей процента до десятков процентов), условиям эксплуатации (от лабораторных до космических) и особенно по функциональным возможностям. Электрометрические измерители сигналов выполняются быстродействующими, широкодиапазонными (с логарифмической характеристикой), дифференциальными (для измерения разности двух величин), компараторными (для измерения отношения двух величин), интегрирующими, самопишущими и т. п.

Шумы электрометрических объектов [1]. Предельная чувствительность тех или иных измерений с помощью электрометрической аппаратуры определяется шумами исследуемого объекта и уровнем помех самой измерительной аппаратуры. Основными составляющими шумов электрометрических объектов являются тепловые шумы, которые велики вследствие высокоомности цепей, дробовые шумы, вызываемые дискретной природой электрических токов, паразитные токи изоляторов [28], обычно составляющие не менее 10^{-15} — 10^{-17} а, радиационный фон, электростатические наводки, фликкер-шумы в твердотельных объектах, флуктуации контактной разности потенциалов, электрохимические, термоэлектрические и пьезоэлектрические потенциалы и т. п.

Качество электрометрического объекта можно оценивать коэффициентом шума, т. е. отношением фактического шума к теоретическому, определяемому тепловыми и дробовыми шумами. В лучшем случае шумы электрометрических объектов лежат на уровне порядка 10^{-5} в, 10^{-17} а, 10^{-16} к.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЯХ

Основным узлом подавляющего большинства электрометрической аппаратуры является электрометрический усилитель напряжения (ЭМУ) [3]. Исключение составляют только относительно редко встречающиеся системы с запоминающим конденсатором, которые используются для измерения малых токов. В этом случае напряжение на конденсаторе определяется без помощи ЭМУ. В системах с ЭМУ вне зависимости от того, какой параметр сигнала или цепи (напряжение, ток, заряд, сопротивление) измеряется, к ЭМУ предъявляются требования возможно большего входного сопротивления и малого уровня помех по напряжению и по току.

Электрометрические преобразователи напряжения [2, 3]. Входным элементом любого ЭМУ служит электрометрический преобразователь напряжения, основными отличительными особенностями которого являются способность работать без потребления энергии от контролируемого источника в уста-

новившемся режиме (преобразователь управляется электрическим полем) и возможно меньший уровень собственных помех. Существует 2 типа таких преобразователей: параметрические и непараметрические. В первых с помощью вспомогательного сигнала изменяется какой-либо параметр преобразователя, определяющий связь между выходным и входным напряжениями преобразователя. В таких преобразователях нельзя получить усиление сигнала (напряжения) по уровню, а только по мощности. В непараметрических преобразователях входное напряжение управляет каким-либо параметром преобразователя, определяющим связь между источником вспомогательного сигнала и выходным напряжением. В них можно получить усиление сигнала не только по мощности, но и по уровню.

Из параметрических преобразователей в электрометрии широко применяются преобразователи с динамическим конденсатором (высококачественной воздушной емкостью, периодически изменяющейся с помощью источника вспомогательного возбуждения). Использование сегнетоэлектриков позволяет создать динамический конденсатор на твердом теле, однако выполнить такие системы с малым уровнем помех пока не удается.

Шире распространены непараметрические преобразователи. Электростатические преобразователи позволяют преобразовать напряжение в угол поворота подвижной части, который, в свою очередь, снова преобразуется в постоянный или переменный электрический сигнал. Из других электромеханических преобразователей можно отметить пьезоэлектрические преобразователи напряжения в перемещение [29—31], однако они пока не обеспечивают высокой чувствительности. Непараметрические преобразователи на «управляемых сопротивлениях» представлены электрометрическими лампами и недавно освоенными полевыми транзисторами с изолированным затвором. С их выхода обычно снимается сигнал постоянного тока, однако в принципе возможно и преобразование постоянного тока в переменный. Непараметрические преобразователи на «управляемых емкостях» используют на входе емкостные полупроводниковые диоды со структурой металл — диэлектрик — полупроводник. К этому же типу относятся сегнетоэлектрические преобразователи с выходом на второй гармонике.

Полуэлектрометрические преобразователи [27, 32]. В тех случаях, когда не требуется предельной чувствительности, с успехом применяются полуэлектрометрические преобразователи, которые, хотя и не могут работать без потребления энергии от источника сигнала, но все же обеспечивают высокую чувствительность по току [1]. К ним относятся электромеханические вибропреобразователи, фоторезистивные и маг-

ниторезистивные [33—35] модуляторы, а также преобразователи на полевых транзисторах с р—п-переходом и емкостных полупроводниковых диодах с р—п-переходом.

Высокочувствительные преобразователи, управляемые током [32]. Во всех рассмотренных электрометрических и полупроводниковых преобразователях входным сигналом являлось напряжение. Существуют еще такие преобразователи, в которых входным сигналом является ток. Наибольшую чувствительность по току среди них имеют гальванометрические усилители [36], преобразователи на биполярных транзисторах и магнитные усилители [37]. Порог чувствительности по току при этом не может быть лучше 10^{-11} — 10^{-12} а, так как входное сопротивление невелико и, следовательно, шумы по току велики [38, 39].

Источники помех электрометрических преобразователей напряжения. Любой электрометрический преобразователь не является идеальным [1]. Реальное значение его входного сопротивления определяется утечками по изоляции. Наиболее просто обеспечивается высокое входное сопротивление в электромеханических системах — динамическом конденсаторе и электростатической. Наиболее сложна эта задача для твердотельных электрометрических преобразователей (полевых транзисторов, варикапов, сегнетоэлектриков), однако современная технология позволяет и в этих случаях получать очень большие входные сопротивления.

Источники помех по напряжению в электрометрических преобразователях разнообразны и зависят от вида преобразователя. Наиболее типичными являются дрейф контактной разности потенциалов, внутренние электростатические наводки, фликкер-шумы, тепловые шумы. Источниками помех по току являются паразитные токи изоляторов, токи утечек по изоляции, токи ионизации внутренним радиоактивным загрязнением материалов и внешними излучениями, пьезоэффект [40].

Сравнение ЭМУ с преобразованием постоянного тока в переменный и без него [27, 41]. От вида электрического сигнала на выходе электрометрического преобразователя напряжения (постоянный или переменный) существенно зависят свойства ЭМУ в целом. Основными преимуществами ЭМУ без преобразования постоянного тока в переменный являются простота и широкий частотный диапазон. Основным недостатком — повышенный дрейф нулевого уровня. ЭМУ с преобразованием постоянного тока в переменный имеют малый дрейф, но узкий частотный диапазон, худшие условия устойчивости при введении обратных связей (вследствие большего количества инерционных звеньев) и более сложную схему.

Совместное использование ЭМУ с модуляцией и с непосредственными связями. Совместное параллельное или последовательно-параллельное включение обоих типов ЭМУ позволяет совместить широкую полосу пропускания одного с малым дрейфом нуля второго. Однако такие системы сложны и встречаются редко.

Периодическая коррекция дрейфа нуля [42]. Уменьшить дрейф нуля ЭМУ без преобразования постоянного тока в переменный можно, используя периодическую коррекцию с запоминающим элементом в виде конденсатора или управляемого реверсивным двигателем реохорда. Сложность таких решений мешает их широкому практическому применению.

Виды отрицательных обратных связей [2, 43, 44]. ЭМУ без отрицательной обратной связи в последние годы почти не применяются, хотя и отличаются простотой. Введение отрицательной обратной связи стабилизирует коэффициент передачи, повышает быстродействие и увеличивает входное сопротивление. В ЭМУ используется 2 вида отрицательных обратных связей по напряжению: параллельная и последовательная.

При измерении напряжений ЭМУ охватывается последовательной обратной связью, при измерении токов и зарядов — параллельной. В качестве пассивных электрометрических преобразователей «ток — напряжение» при измерении токов служат или высокоомный резистор, или логарифмирующий элемент, или конденсатор. Последний также используется при измерении зарядов в качестве пассивного электрометрического преобразователя «заряд — напряжение». Измерение сопротивлений сводится к определению напряжений или токов.

ЭМУ с симметричным входом. В последние годы были созданы и стали широко распространяться так называемые ЭМУ с симметричным входом, которые имеют 2 электрометрических входа и один общий [2, 45]. Это позволяет выполнять дифференциальные электрометрические измерители напряжений и токов, облегчает борьбу с наводками на входе, расширяет области применения. Обычно ЭМУ с симметричным входом выполняются на полевых транзисторах с изолированным затвором.

Проявление помех в ЭМУ с обратной связью. Любой ЭМУ характеризуется входным импедансом $Z_{вх}$ (параллельное соединение $R_{вх}$ и $C_{вх}$), коэффициентом усиления K и уровнем помех по напряжению e_n и по току i_n . Источник e_n включен последовательно со входом ЭМУ, i_n — параллельно. Все эти параметры являются функцией частоты или времени.

Введение отрицательной обратной связи может изменить уровень помех ЭМУ. Результирующие помехи ЭМУ на его выходе как при последовательной, так и при параллельной

обратной связи выражаются при $K \gg 1$ уравнением $U_{\text{п}} = e_{\text{п}}(1 + Z_2/Z_1) + i_{\text{п}}Z_2$, где Z_1 и Z_2 — импедансы на входе и в цепи обратной связи ЭМУ. При последовательной обратной связи $Z_1 = Z_{\text{вх}}$, а Z_2 представлено внутренним сопротивлением контролируемого источника напряжения. При параллельной обратной связи Z_1 представлено параллельным соединением $Z_{\text{вх}}$ и внутреннего сопротивления контролируемого источника тока или заряда, а Z_2 — импедансом элемента обратной связи (высокоомного резистора, логарифмирующего элемента или конденсатора).

Отношение Z_2/Z_1 в некоторых случаях электрометрической практики может быть значительным, что приводит к существенному повышению уровня помех. В широкополосной электрометрической аппаратуре емкостная составляющая Z_1 может резко повышать высокочастотные шумы.

Применение эквипотенциальной защиты в ЭМУ. Напряжение на входных зажимах ЭМУ близко к нулю, напряжение на зажимах обратной связи значительно. Под влиянием последнего могут возникать токи утечки (например, по изоляции коммутирующих ключей и т. п.), что увеличивает уровень помех по току $i_{\text{п}}$. Во избежание этого пользуются методами эквипотенциального экранирования, разделяя опасную изоляцию экраном и соединяя этот экран с общим зажимом ЭМУ. Хотя при этом может снизиться Z_1 , но возможные утечки предупреждаются. Такая защита может быть применена не только в коммутирующих элементах, но и в воздушных конденсаторах, для баллонов высокоомных резисторов, в высокоомных кабелях. Иногда достаточна защита только от поверхностных токов утечки.

2. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Роль пассивных электрометрических преобразователей [2]. Только при измерении напряжений качество электрометрической аппаратуры целиком определяется свойствами самого ЭМУ. При измерении токов, зарядов и сопротивлений существенное влияние на характеристики измерителя, особенно на его точностные параметры, оказывают свойства используемых при этом пассивных электрометрических преобразователей: высокоомных резисторов, логарифмирующих элементов и конденсаторов.

Высокоомные резисторы. Проволочные (точнее микропроволочные) манганиновые резисторы изготавливаются на номинальные значения не выше 10^9 ом и могут быть использованы в электрометрии только при сравнительно низких уровнях чувствительности [46]. Гораздо шире распространены непроволочные композиционные резисторы, которые за рубе-

жом выпускаются на номинальные значения до 10^{13} — 10^{14} ом (в нашей стране только до 10^{12} ом — типы КВМ и КЛМ).

Длительная стабильность таких резисторов тем хуже, чем больше сопротивление, и зависит от условий хранения, она может быть повышена искусственным старением температурными циклами и т. п. За рубежом выпускаются резисторы с нестабильностью менее 0,5—1% в год, качество отечественных резисторов значительно хуже [47].

Температурный коэффициент сопротивления современных высокоомных резисторов составляет 0,1—0,4% на 1°C , зависимость от приложенного напряжения до 0,1—0,2% на 1 в, поведение резисторов при малых (до 1 в) напряжениях до сих пор не исследовано. Радиоактивное излучение оказывает на них как обратимые, так и необратимые воздействия. Собственная емкость композиционных резисторов составляет 0,1—0,2 пф. Композиционные высокоомные резисторы имеют значительные виброшумы [48], избыточные (токовые) шумы, вызываемые прохождением тока через резистор, пока совершенно не изучены, равно как и собственные паразитные токи резисторов (при отсутствии напряжения).

Логарифмирующие элементы [49, 50]. Напряжение на логарифмирующем элементе пропорционально логарифму проходящего через него тока, таким образом достигается функциональное преобразование, широкий динамический диапазон, постоянство относительной погрешности во всем диапазоне. В электрометрии используются электровакуумные логарифмирующие элементы (логарифмирующие лампы) и полупроводниковые (диоды и триоды). В первом случае используется логарифмическая зависимость между напряжением и током диода при отрицательных и небольших положительных напряжениях на аноде, во втором — между напряжением и током электроннодырочного перехода в прямом направлении.

Электровакуумные логарифмирующие диоды выпускаются за рубежом серийно и имеют крутизну характеристики 0,2—0,25 в на декаду тока. Трехэлектродные электрометрические лампы могут быть использованы в качестве логарифмирующего диода, если их анод и катод соединить вместе, однако лучшие результаты дает 3-зажимное включение, когда логарифмирующим служит участок сетка — катод, а анод поддерживается под потенциалом, близким к потенциалу сетки. Нижний предел логарифмической характеристики электровакуумных элементов определяется токами утечки и составляет 10^{-13} — 10^{-14} а, логарифмический диапазон может достигать до 8—10 порядков, он существенно зависит от режима лампы. Характеристики электровакуумных логарифмирующих элементов, кроме того, сильно зависят от температуры, времени включения лампы и пр.

Логарифмический диапазон кремниевых электроннодырочных переходов (диодов или отдельных переходов транзисторов) обычно составляет 10^{-11} — 10^{-4} а, относительная нелинейность по напряжению достигает 10—20% и выше. Существенно лучшие результаты дает 3-зажимное включение транзисторов, когда логарифмирующим служит участок эмиттер — коллектор, а база поддерживается под потенциалом, близким к потенциалу эмиттера. Рабочий диапазон в этом режиме составляет 10^{-12} — 10^{-4} а, относительная погрешность по напряжению не превышает нескольких процентов, крутизна составляет (75—85 мв) на декаду тока. Характеристики полупроводниковых логарифмирующих элементов сильно зависят от температуры.

Конденсаторы с большим сопротивлением утечки имеют наилучшие точностные характеристики из существующих пассивных электрометрических преобразователей. Они используются для преобразования токов и зарядов в напряжение. Из серийных конденсаторов с диэлектриком наиболее пригодны для целей электрометрии фторопластовые и полистирольные. Постоянная времени саморазряда у них составляет 10^4 — 10^6 сек, коэффициент абсорбции не превышает десятых долей процента, годовая нестабильность емкости может не превышать сотых долей процента, температурный коэффициент емкости не хуже $0,02\%/^{\circ}\text{C}$.

Конденсаторы с малой емкостью (100 пф и менее) изготавливаются воздушными. При этом, используя рациональную конструкцию и технологию, можно получить очень высокие характеристики [51].

Источники малых токов [3] используются при некоторых методах измерения больших сопротивлений, при компенсационном методе измерения малых токов, а также для градуировки, калибровки и поверки измерителей малых токов.

Наиболее широко распространены ионизационные источники [52], представляющие собой ионизационную камеру со встроенным радиоактивным препаратом. Чаще всего используются α - и β -излучатели. Погрешность ионизационных источников лежит на уровне 0,1—1%. Они отличаются большим сроком службы, малыми габаритами и весом, простотой эксплуатации. За рубежом ионизационные источники выпускаются серийно.

Для поверки и при некоторых экспериментах применяются емкостные источники малых токов, состоящие из источника линейно изменяющегося напряжения и дифференцирующей емкости. В них легко обеспечиваются любая дискретность установившегося тока в очень широком диапазоне (10^{-15} — 10^{-8} а) и высокая точность (погрешность до 0,1%).

В ряде случаев, когда не требуются высокая точность и возможность получения предельно малых токов, удобными

оказываются резистивные источники малых токов, представляющие собой сочетание источника постоянных напряжений и высокоомных резисторов. За рубежом они выпускаются серийно [53].

Из других возможных типов источников малых токов можно отметить радиоактивные с непосредственным переносом заряда (вакуумированные), источники на фотоэлементах, термоэлектронные, источники на пьезоэффекте и емкостные с линейно изменяющейся емкостью.

Изоляторы для электрометрической аппаратуры [1]. К материалам изоляторов электрометрической аппаратуры предъявляются очень высокие требования в отношении сопротивления изоляции и паразитного тока. В отношении механических свойств требования могут быть различными: изоляторы, несущие конструктивные элементы, должны быть жесткими, для проходных изоляторов материал должен обладать вязкостью.

Наилучшим материалом для изоляторов электрометров считается сапфир, за рубежом он используется в серийных приборах с предельной чувствительностью по току. Неплохие свойства имеют янтарь и эскапон [51]. При не очень высоких чувствительностях могут использоваться фторопласт, полистирол, радиокерамика и пр.

Коммутационные электрометрические элементы [51, 54]. В многофункциональной или многопредельной электрометрической аппаратуре обязательными конструктивными элементами являются коммутаторы: переключатели, ключи, реле. К таким элементам предъявляются жесткие требования в отношении сопротивления утечки (возможно использование принципов эквипотенциальной защиты), паразитного тока изоляторов, емкости контактов и ее вариаций, наброса заряда при коммутации, иногда — в отношении дребезга контактов.

Серийные коммутирующие элементы обычно не могут удовлетворить таким требованиям и для этих целей разрабатывают специальные элементы.

Кабели для электрометрической аппаратуры [1, 2, 55]. В практике использования электрометрических приборов нередки случаи, когда непосредственное соединение контролируемого объекта с прибором невозможно или нежелательно. В таких случаях приходится применять кабели. Чаще всего используют радиочастотные коаксиальные кабели с полиэтиленовой или фторопластовой изоляцией. Паразитные токи таких кабелей могут составлять 10^{-14} — 10^{-15} а, они имеют высокие низкочастотные шумы. Причиной шумов являются электрические заряды на внешней поверхности изоляции кабеля, возникающие при отходе защитной металлической оплетки от поверхности изоляции. Для устранения этого яв-

ния изоляцию покрывают проводящим слоем, обычно графитом. Паразитные токи и низкочастотные шумы таких кабелей существенно меньше, чем обычных.

3. ТИПЫ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Ламповые ЭМУ [1, 56]. Еще несколько лет назад ламповые ЭМУ были самыми распространенными. За последнее время они частично вытеснены ЭМУ на полевых транзисторах, но все еще применяются достаточно широко. Им свойственны те преимущества, которые характерны для усилителей с непосредственными связями каскадов — простота и широкий частотный диапазон. Ламповые ЭМУ хорошо выдерживают перегрузки на входе. При использовании удвоенных электрометрических ламп ламповые ЭМУ легко могут быть выполнены с симметричным входом. Наиболее чувствительные пределы измерения ламповых ЭМУ обычно лежат на уровне 30—100 мВ по напряжению и 10^{-13} — 10^{-12} А по току.

Электрометрические лампы [56]. Свойства ЭМУ в значительной мере определяются свойствами входного электрометрического преобразователя напряжения. В ламповых ЭМУ таким преобразователем служит электрометрическая лампа. Стремление получить в электрометрической лампе малый сеточный ток накладывает отпечаток на все ее характеристики. Малое анодное напряжение и малая температура катода приводят к тому, что коэффициент усиления невелик — порядка единицы. Крутизна обычно лежит в пределах 20—100 мкА/В. Чаще всего применяются электрометрические тетроды, которые имеют наиболее удовлетворительную совокупность характеристик. Реже применяются триоды, иногда обращенные триоды (электрометрические или обычные). Все шире используются электрометрические пентоды, которые имеют большой коэффициент усиления, хотя и не обеспечивают предельно малых токов сетки. В связи с тем, что рынок хорошо насыщен различными электрометрическими лампами, использование обычных ламп в электрометрических режимах, ранее широко практиковавшееся, сейчас встречается редко. Режим свободной сетки, при котором сеточный ток равен нулю, также в настоящее время почти не используется, во всяком случае в серийных приборах.

Сеточный ток электрометрических ламп [56]. Составляющими сеточного тока являются: электронный ток, обусловленный прохождением электронов с высокой энергией с катода на сетку; токи утечки по баллону лампы; ионный ток, возникающий при ионизации молекул остаточного газа электроном, горячим катодом и космическим и радиоактивным излучением, а также из-за термоэлектронной и фотоэлектронной

эмиссии сетки и, особенно рентгеновского излучения с анода; кроме того, токи поляризации и т. п. Суммарный сеточный ток электрометрической лампы в лучшем случае составляет $(1 \div 5) \times 10^{-15}$ а, при определенных условиях он мало зависит от отрицательного напряжения на управляющей сетке.

Шумы электрометрических ламп [57]. Основным источником шумов лампы по току (на эквивалентной схеме этот источник включается параллельно ее входным зажимам) являются дробовые шумы сеточного тока. Среднеквадратичное значение этих шумов пропорционально сумме электронной и ионной составляющих сеточного тока и полосе пропускания, в которой они измеряются.

Основным источником шумов лампы по напряжению являются фликкер-шумы, возникающие вследствие хаотического изменения эмиссионной способности отдельных участков катода. Кроме того, проявляются дробовые шумы анодного тока лампы, тепловые шумы на внутреннем сопротивлении лампы и т. п. Зависимость шумов по напряжению от частоты может быть дана следующим выражением для эквивалентного шумового сопротивления $R'_{\text{экр}} = R_{\text{экр}}(1 + f_0/f)$, где f_0 — частота, при которой фликкер-шумы, пропорциональные $1/f$, становятся равными тепловым шумам. Современные электрометрические лампы имеют $R_{\text{экр}} \approx 2 \cdot 10^6$ ом и $f_0 = 500$ гц. Следовательно, при $f \ll f_0$ справедливо $R'_{\text{экр}} = 10^9/f$. Лампы могут иметь существенные виброшумы.

Методы измерения низкочастотных шумов [58, 59]. Если на выходе электрометрической лампы использовать малошумящий усилитель постоянного тока, то спектральный состав шумов может быть определен одним из двух способов: графическим анализом записи выходного сигнала усилителя и с помощью анализатора спектра, использующего низкочастотные полосовые фильтры. Для очень низких частот (до 10^{-4} — 10^{-5} гц) анализаторы выполнить трудно, поэтому иногда практикуется запись шумов на магнитофон с последующим ее воспроизведением при больших скоростях ленты.

Дрейф нуля ламповых ЭМУ [56, 60] определяется временной нестабильностью характеристик самой лампы, колебаниями питающих напряжений, изменениями окружающей температуры, дрейфом нуля вторичного усилителя и т. п. Для уменьшения собственного дрейфа электрометрические лампы предварительно тренируют, защищают от перегрузок, обеспечивают рациональный режим. Хорошие результаты дает использование двойных (спаренных) электрометрических ламп. В современных ламповых ЭМУ удается снизить дрейф до $0,1$ — 1 мв/ч.

Ламповые ЭМУ с преобразованием постоянного тока в переменный [61]. Хотя электрометрическая лампа в принципе может быть использована в качестве электрометрического

преобразователя напряжения с преобразованием постоянного тока в переменный, но широкого распространения такие системы не получили. По-видимому, это связано с трудностью хорошего разделения входных цепей и цепей управления, что объясняется большими межэлектродными емкостями лампы и нелинейностью ее характеристик.

ЭМУ на полевых транзисторах с изолированным затвором [2, 62, 63] в последние годы получили очень интенсивное развитие. За рубежом многими фирмами освоен серийный выпуск таких ЭМУ [64—69]. Они близки по чувствительности к ламповым ЭМУ, но имеют несомненные преимущества в отношении устойчивости к механическим воздействиям, габаритов и потребляемой от источников питания мощности.

Ток затвора [70] у транзисторов с изолированным затвором зависит от геометрических размеров затвора, удельной проводимости материала изолирующей пленки и напряжения на затворе. В ЭМУ используются полевые транзисторы с током затвора 10^{-14} — 10^{-15} а и менее. Существенно меньшие токи затвора позволяют получить транзисторы с эквипотенциальной защитой затвора от токов утечки, однако широкого применения они не получили.

Шумы полевых транзисторов [71]. В полевых транзисторах имеется 3 основных источника шумов: шум от дробового эффекта тока затвора, тепловой шум сопротивления проводящей части канала, фликкер-шумы, вызываемые генерационно-рекомбинационными эффектами. Зависимость эквивалентного шумового сопротивления от частоты выражается тем же уравнением, что и для ламп, причем в среднем $R_{\text{экв}} = 10^3$ ом, а $f_0 = 5 \cdot 10^5$ гц. При $f \ll f_0$ имеем $R'_{\text{экв}} = 10^9/f$, т. е. то же самое, что и для электрометрических ламп.

Дрейф нуля. Основными причинами дрейфа нуля ЭМУ на полевых транзисторах с изолированным затвором являются старение транзисторов, сверхнизкочастотные фликкер-шумы, колебания питающих напряжений и изменения окружающей температуры. Старение обычно проявляется в снижении тока насыщения и увеличении тока затвора. Кроме того, нестабильность может возрасти при загрязнении оксидного слоя затвора положительными ионами. Обычно собственный дрейф полевых транзисторов с изолированным затвором принимается равным ~ 100 мкв/ч. Для уменьшения влияния колебаний питающих напряжений и окружающей температуры используют балансные каскады, особенно хороши в этом отношении спаренные в одном корпусе транзисторы. Уменьшить влияние температуры можно и выбором рабочей точки транзистора.

Защита от перегрузок [66, 72]. Полевые транзисторы с изолированным затвором выходят из строя при перегрузках уже в несколько десятков вольт. Это некоторое время сдерживало их использование в серийных приборах. В последние

годы вопрос был решен с помощью специальных средств защиты. Обычно для этой цели используются кремниевые стабилитроны с малыми токами утечки. Освоен серийный выпуск таких стабилитронов.

ЭМУ с динамическим конденсатором [27, 73] обеспечивают наивысшую чувствительность по току (на уровне 10^{-17} а) и по напряжению (20—50 мкв), их входное сопротивление может достигать 10^{15} — 10^{16} ом. Наиболее распространенными являются конденсаторы с электромагнитным возбуждением, хотя в принципе возможны системы с звуковым возбуждением, механическим, пьезоэлектрическим и т. п. [17, 74]. В последние годы появились конденсаторы с электростатическим возбуждением. Конденсаторы с электромагнитным возбуждением имеют статическую емкость 20—40 пф, коэффициент модуляции 0,2—0,3.

Расчет входной цепи. Электрическое состояние входной цепи ЭМУ с динамическим конденсатором описывается дифференциальным уравнением с периодически изменяющимися коэффициентами, решение которого нельзя простым способом выразить через элементарные функции. Наиболее подходящим для расчета таких преобразователей является использование метода комплексного исчисления, с помощью которого можно рассчитать любую по сложности схему преобразователя с динамическим конденсатором и определить ее коэффициент преобразования и спектр выходного сигнала [75].

Конструкции конденсаторов с электромагнитным возбуждением. Практическое использование получили 2 конструкции: мембранная [76, 77] и язычковая [51]. В первом случае подвижным электродом является упругая мембрана, плотно закрепленная по окружности, во втором — консольно закрепленная пластина (язычок). Эти конструкции не имеют решающих преимуществ одна перед другой. Язычковая обеспечивает несколько больший коэффициент преобразования, в ней сравнительно простым путем можно предусмотреть обмотки обратной связи с тем, чтобы включить конденсатор в цепь положительной обратной связи генератора возбуждения и тем самым обеспечить возбуждение на частоте собственного резонанса подвижной пластины.

Схемы ЭМУ с динамическим конденсатором [78]. Обязательными узлами таких ЭМУ являются входной преобразователь, усилитель (часто избирательный) переменного тока, входной каскад которого по условиям согласования с выходом преобразователя выполняется на электрометрической лампе или полевом транзисторе, фазочувствительный выпрямитель и сглаживающий фильтр. В последнее время после фильтра нередко используют дополнительный усилитель постоянного тока.

Паразитный ток и шумы [27, 79]. Паразитный ток ЭМУ с динамическим конденсатором представлен только паразитным током входных изоляторов и поэтому может быть очень малым — до 10^{-17} а [51]. Дробовые шумы этого тока также малы. Шумы по напряжению имеют следующие составляющие: тепловые и избыточные шумы входного резистора (этот резистор включен между входом ЭМУ и электрометрической обкладкой динамического конденсатора для того, чтобы предупредить разряд конденсатора через внутреннее сопротивление источника сигнала), шумы резисторов фильтра входного преобразователя, дробовые, тепловые и прочие шумы входного каскада усилителя переменного тока. Каждая из этих составляющих, за исключением дробовых шумов анодного тока первого усилительного каскада, состоит из двух частей: непосредственного шума, частотный спектр которого совпадает с полосой пропускания избирательного усилителя, и косвенного шума, частотный спектр которого лежит ниже частоты модуляции преобразователя, но в полосе пропускания электрометра в целом.

Преобразователи с двойными динамическими конденсаторами [80, 81]. Исключить влияние некоторых из рассмотренных составляющих шумов можно с помощью двойного динамического конденсатора, суммарная емкость которого не изменяется и тем самым шумы на ней не модулируются. С помощью двойного динамического конденсатора можно также существенно снизить требования к входному каскаду усилителя переменного тока.

Наводки из системы возбуждения. Различного рода паразитные емкостные связи в самом динамическом конденсаторе могут приводить к проникновению сигнала возбуждения в канал преобразования измеряемого сигнала. Борьбаться с этим можно тщательным экранированием системы возбуждения от канала преобразования. Хорошие результаты получаются также, если частота возбуждения и частота преобразования различны, как это, например, имеет место в конденсаторе с электромагнитным возбуждением без поляризующего магнита.

Технология изготовления и дрейф нуля [27]. Основным источником дрейфа нуля динамического конденсатора является изменение во времени и при колебаниях температуры контактной разности потенциалов между рабочими поверхностями его пластин, например вследствие диффузии основного металла в покрытие, поглощения газов, осаждения влаги, загрязнений, химических реакций, изменения структуры материалов вследствие старения и т. п.

С целью уменьшения влияния этих явлений пластины изготавливаются не только из одинакового материала (нержавеющей стали), но и из одного и того же куска, тщательно по-

лируются, очищаются и покрываются тонким слоем золота. Камера конденсатора герметизируется и заполняется инертным газом или вакуумируется. В последние годы освоена технология, не требующая золочения пластин [51]. В лучших образцах конденсаторов дрейф не превышает 100 мкв за 24 ч, температурный дрейф составляет 20—50 мкв/град.

Конденсаторы с электростатическим возбуждением позволяют получить самую высокую чувствительность по напряжению. Пластины таких конденсаторов выполнены из стекла, покрытого тонким слоем металла, возбуждение осуществляется на резонансной частоте пластин силами электростатического притяжения. При этом удается получить высокую частоту преобразования, 6 кГц против 200—300 Гц в конденсаторах с электромагнитным возбуждением. Это позволяет резко уменьшить сопротивление входного добавочного резистора и тем самым существенно снизить шумы. Большая частота преобразования облегчает согласование преобразователя с усилителем переменного тока, что также снижает шумы. При электростатическом возбуждении удачно решается вопрос о разделении частот преобразования и возбуждения, что исключает наводки из системы возбуждения. Эквивалентное шумовое сопротивление преобразователя на конденсаторе с электростатическим возбуждением составляет всего лишь $\sim 10^8$ ом, в то время как при электромагнитном возбуждении только одно входное добавочное сопротивление обычно равно 10^9 ом.

Конструкция конденсатора с электростатическим возбуждением допускает весьма рациональную технологию, в частности прокаливание с целью обезгаживания материалов и вакуумирование, что предопределяет малый дрейф контактной разности потенциалов. Серийный электрометр модели 640 фирмы Keithley [2] на конденсаторе с электростатическим возбуждением имеет порог чувствительности по напряжению 2 мкв, по току 10^{-17} а, по заряду $5 \cdot 10^{-16}$ к, наиболее чувствительные пределы измерения (полная шкала) 30 мкв и 10^{-15} а, дрейф нуля 20 мкв и $5 \cdot 10^{-17}$ а за 24 ч, входное сопротивление 10^{16} ом.

ЭМУ с преобразователями на варикапах [82—86] используют свойство полупроводникового диода изменять свою емкость под влиянием приложенного постоянного напряжения. Наиболее перспективны для электрометрии поверхностные варикапы, т. е. диоды со структурой металл—диэлектрик—полупроводник [87, 88]. Однако они пока находятся в стадии экспериментальных исследований. Гораздо шире применяются варикапы с электронно-дырочным переходом [89], но неизбежный в этом случае обратный ток перехода не позволяет получить высокой чувствительности по току и очень большого входного сопротивления.

Поверхностные варикапы [88] имеют входное сопротивление 10^{13} — 10^{14} *ом* против 10^{11} *ом* у обычных, их емкости при нулевом смещении соответственно составляют 50—100 и 25—35 *пф*, крутизна вольтфарадных характеристик 1—5 и 0,1—0,5 в^{-1} , напряжение шумов 1 и 200—100 *мкв*, температурный коэффициент емкости $(0,5\text{—}3) \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{С}$.

Схемы преобразователей на варикапах можно разделить на 3 большие группы.

1. Преобразователи с амплитудной модуляцией, в которых изменение входного сигнала вызывает изменение амплитуды выходного сигнала переменного тока [82].

2. Преобразователи с частотной модуляцией, в которых изменение входного сигнала постоянного тока вызывает изменение частоты выходного сигнала переменного тока.

3. Автогенераторные преобразователи, в которых мост на управляемых варикапах включен в цепь положительной обратной связи усилителя переменного тока и тем самым входной сигнал управляет амплитудой автоколебаний этой генераторной цепи [88, 90, 91].

Автогенераторный электрометр на поверхностном варикапе [88] является наиболее интересным из известных приборов на варикапах. Он имеет следующие характеристики: частота преобразования 465 *кГц*, сопротивления измерительных резисторов от $3,3 \cdot 10^8$ до 10^{11} *ом*, пределы измерения от 10^{-12} до $3 \cdot 10^{-9}$ *а*, порог чувствительности по току не хуже 10^{-14} *а*, дрейф нуля при температуре $20 \pm 5^\circ\text{С}$ порядка $2,5 \cdot 10^{-14}$ *а* за 24 *ч*, уровень шумов на выходе на наиболее чувствительном пределе измерения порядка 0,5 %.

ЭМУ с сегнетоэлектрическими преобразователями основаны на зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля. Такие управляемые емкости могут использоваться в тех же схемах, что и варикапы. На базе сегнетоэлектрических преобразователей с управлением поперечным электрическим полем, которые имеют разделенные цепи преобразования и управления, можно выполнить динамический конденсатор на твердом теле. Перспективны также сегнетоэлектрические преобразователи с выходом на второй гармонике. Они основываются на свойстве нечетности кривой поляризации сегнетоконденсатора. При синусоидальном питающем напряжении ток через такой конденсатор будет содержать только нечетные гармоники. Четные гармоники появятся лишь в том случае, если одновременно с синусоидальным будет приложено постоянное напряжение. Амплитуда второй гармоники при этом пропорциональна постоянному напряжению, а фаза изменяется на 180° при изменении его полярности.

Высокочувствительный ЭМУ с сегнетоэлектрическим модулятором на второй гармонике. По ряду причин до послед-

него времени от сегнетоэлектрических преобразователей не удавалось получить высоких характеристик. Эта задача решена в [92]. Модулирующий элемент при этом изготовлялся из кристалла триглицинсульфата размером $4 \times 4 \times 0,2$ мм, на который напылялись золотые электроды, соединенные с подводными проводниками серебряной пастой. Кристалл монтировался на слюдяной пластинке и помещался в вакуумированный баллон. Были приняты меры, чтобы механические напряжения и химические изменения в местах соединения проводников с кристаллом не влияли на характеристики элемента. Было найдено, что наиболее удачные характеристики получаются, если кристалл работает при температуре, несколько превышающей температуру точки Кюри.

ЭМУ на таком преобразователе имел входное сопротивление 10^{13} ом, дрейф нуля 10 мкв/день, шумы (двойное амплитудное значение) 6 мкв при входном сопротивлении 1 Мом и полосе пропускания $0-1$ гц, частоту модуляции 50 кГц. По-видимому, это направление электрометрии в дальнейшем получит существенное развитие.

Электростатические электрометры [93—95], когда-то использовавшиеся чрезвычайно широко сейчас выходят из употребления, так как не выдерживают конкуренции с другими типами электрометров в отношении устойчивости к механическим воздействиям, простоты обслуживания и т. п. Попытки улучшить эти характеристики привели к созданию электростатических электрометров с переменным возбуждающим полем [96]. Некоторое внимание уделяется электростатическим ЭМУ [97, 98], однако промышленного использования такие системы не получили.

4. ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЙ

Классификация электрометрических методов измерения напряжений [3]. Выше были рассмотрены принципы построения ЭМУ, теперь перейдем к методам использования ЭМУ для измерения параметров сигналов и цепей электрометрического диапазона. Методы измерения напряжений можно разделить на 3 группы: непосредственного отсчета, компенсационные и с запоминающим конденсатором. В настоящее время на практике используются только компенсационные методы. К ним относятся компенсаторы с ручным уравниванием, ЭМУ с последовательной отрицательной обратной связью и самопишущие автокомпенсаторы.

Прямопоказывающие измерители напряжений. В таких измерителях на выходе ЭМУ, охваченного последовательной отрицательной обратной связью, включается измерительный

прибор постоянного тока со стрелочным или световым индикатором. Кроме того, предусматриваются зажимы для подсоединения стандартных самопишущих приборов. Для переключения пределов измерения используется либо изменение глубины обратной связи, либо изменение чувствительности выходного прибора. Для оптимального согласования по сопротивлению измерителя с контролируемым объектом на входе измерителя предусматриваются переключаемые высокоомные резисторы, обычно с сопротивлениями 10^8 — 10^{10} — 10^{12} ом.

Компенсационные измерители с ручным уравниванием [27]. Погрешность электрометрических измерителей напряжения обычно лежит на уровне 1,5—2,5%, что определяется в основном классом точности выходного прибора. При необходимости иметь большую точность применяют компенсаторы, в которых ЭМУ играет роль нуль-индикатора. Компенсационный электрометрический вольтметр модели 630 фирмы Keithley имеет пределы измерения 1—10—100—500 в, входное сопротивление нуль-индикатора 10^{13} или 10^{10} ом, его чувствительность на всю шкалу равна 1 и 10 мв, погрешность 3%, дрейф нуля 2 мв/ч. Погрешность компенсатора модели 630 равна 0,01% или 30 мкв в зависимости от того, что больше [2].

Нередко используют системы с частичной компенсацией измеряемого напряжения, когда выходным прибором измеряется только незначительная часть напряжения и погрешность этого прибора мало сказывается на результатах измерения.

Интересная и эффективная система компенсационного отсчета принята в приборе модели 1807 (с модулятором на фоторезисторах) фирмы General Radio (США). Она названа интерполятором. Компенсационное напряжение на каждом пределе измерения в этом случае выбирается из того же ряда, из которого выбраны оцифрованные деления на шкале выходного прибора. Сначала измерение производится без компенсирующего напряжения. После снятия прямого отсчета переключатель интерполятора устанавливается на первую значащую цифру показаний прибора. При этом по выходному прибору отсчитывается некомпенсированный остаток. Для повышения точности отсчета чувствительность выходного прибора повышается в 10 раз. Это позволяет вести отсчет по прибору с погрешностью менее 0,1% и точность измерений получается высокой.

Самопишущие электрометрические измерители напряжений. Электрометрические автокомпенсаторы широко распространены, особенно для рН-метрии. Так как исполнительным элементом автокомпенсаторов является двигатель переменного тока, то наиболее удобны для них ЭМУ с преобразователем постоянного тока в переменный, в частности на динами-

ческих конденсаторах. Однако наиболее часто для этой цели применяются полуэлектрометрические усилители на вибропреобразователях, чувствительность которых оказывается вполне достаточной для большинства случаев [99].

Цифровые электрометрические вольтметры. Из серийных приборов этого типа можно назвать модель Aries 1000 фирмы Tacussel—Solea (Франция), которая имеет пределы измерения от 0,1 до 1000 в, входное сопротивление 10^{12} ом, 5-значный отсчет, погрешность $0,02\% \pm 1$ знак, время установления показаний от 0,5 до 5 сек [100]. Фирма Polymetron AG выпускает цифровой рН-метр с входным сопротивлением 10^{14} ом [101]. Широкого применения такие приборы пока не получили.

Измерение больших напряжений. Верхний предел измерения электрометрических измерителей напряжений чаще всего равен 10 или 30 в, что достаточно для большинства практических случаев. Для измерения больших напряжений используют электростатические вольтметры, сложные катодные повторители на электрометрических лампах или емкостные делители. В частности электрометр типа VA-J-52 Народного предприятия Vakutronik (ГДР) с приставкой VA-H-222 позволяет измерять напряжения до 1 кв.

Дифференциальные электрометрические измерители напряжений [2]. Для построения таких измерителей используются ЭМУ с симметричным входом, чаще всего на полевых транзисторах с изолированным затвором. Дифференциальный измеритель модели 604 фирмы Keithley имеет пределы измерения (полная шкала) от 1 мв до 1 в, погрешность 2%, шумы 40 мкв, входное сопротивление 10^{14} ом между любыми двумя из трех зажимов, входную емкость между незаземленными входами 5 пф и относительно заземленного входа 1 пф.

Измерители с логарифмической характеристикой очень удобны в тех случаях, когда требуется регистрация напряжений от высокоомных источников в широком диапазоне. Электрометр с динамическим конденсатором модели 55A фирмы Electronic Instruments (Англия) имеет динамический диапазон 0,1—1 в, его дрейф не превышает 100 мкв (0,01% полной шкалы) за 12 ч или 300 мкв за неделю. Логарифмическая характеристика в этом приборе достигается путем использования потенцирующего преобразователя в делителе последовательной отрицательной обратной связи. Чтобы при такой схеме обеспечить независимость коэффициента усиления в петле обратной связи от уровня сигнала, в усилителе переменного тока ЭМУ предусмотрен логарифмирующий каскад.

Проверка электрометрических измерителей напряжений [102] общего назначения производится теми же средствами, что и для обычных измерителей напряжений. Достаточно

лишь с помощью высокоомных резисторов имитировать большое внутреннее сопротивление источника сигнала. Приставка с такими резисторами может быть выполнена без вспомогательных изоляторов и тем самым не создавать дополнительных паразитных токов и других помех.

Широкополосные электрометрические усилители для биологических исследований. При измерении внутриклеточных потенциалов биологических объектов с помощью ультрамикрорезисторов требуются ЭМУ для измерения напряжений от 1 до 200 мВ при входном сопротивлении до 10^{10} Ом и полосе пропускания от нуля до десятков кГц. Паразитный ток такого усилителя должен быть мал. Усилители внутриклеточных потенциалов выполняются на электрометрических лампах или полевых транзисторах с изолированным затвором. Для компенсации влияния емкости на входе усилителя на его частотные характеристики используется 2 метода: эквипотенциальное экранирование с помощью входного повторителя с единичным коэффициентом усиления и введение дополнительной положительной обратной связи через емкость. Такие приборы привлекают внимание исследователей и начинают выпускаться серийно. Фирма Nipon Kohden (Япония) демонстрировала в 1970 г. на выставке в Москве усилитель модели MZ-4 для исследований с помощью микрорезисторов, выполненный полностью на полупроводниках. Его входное сопротивление равно 10^{11} Ом, входная емкость 3 или 10 пФ (переключается), входной ток не более $5 \cdot 10^{-12}$ А, температурный дрейф менее 100 мкВ/град, коэффициент усиления 1 или 10, полоса пропускания от 0 до 10 кГц, при этом шумы при закороченном входе не превышают 50 мкВ.

5. ИЗМЕРИТЕЛИ МАЛЫХ ТОКОВ

Методы измерения малых токов [3, 103—105]. Электрометрические измерители токов различаются по виду пассивного электрометрического преобразователя тока в напряжение. Как уже упоминалось, используется 3 вида таких преобразователей: высокоомные резисторы, логарифмирующие элементы и конденсаторы. Для измерения напряжения на преобразователе может быть использован любой из перечисленных выше методов измерения напряжения. Наибольшее применение получили методы с использованием ЭМУ с обратной связью. Последнее время некоторое внимание уделяется методам измерения тока с запоминающим конденсатором, при этом ЭМУ не требуется. Хорошие результаты дает компенсация измеряемого тока известным, тогда ЭМУ играет роль нуль-индикатора, точность может быть получена высокой да-

же при невысоких точностных характеристиках пассивного преобразователя (в первую очередь высокоомного резистора), однако из-за сложности такие системы не получили широкого применения.

Измерители с высокоомным резистором. Чаще всего в таких приборах используются ЭМУ с параллельной отрицательной обратной связью через высокоомный резистор. Порог чувствительности по току при этом определяется качеством ЭМУ [106], а точность — качеством резистора [20]. Пределы измерения устанавливаются независимым изменением двух параметров: сопротивления резистора и глубины обратной связи. Это позволяет при наличии трех (например, 10^8 — 10^{10} — 10^{12} ом), иногда четырех резисторов плавно перекрыть диапазон по току до 8—10 порядков. Для компенсации отклонений сопротивлений резисторов от номинальных значений для каждого из резисторов предусматривается свой подгоночный резистор, с помощью которого несколько изменяется глубина обратной связи, чем и производится компенсация. Начат серийный выпуск электрометров с автоматическим выбором предела измерения. Такой режим предусмотрен в приборе модели 419 фирмы Keithley [2, 107], который имеет пределы измерения (полная шкала) от 10^{-13} до 10^{-2} а, при этом время установления показаний не превышает 4 сек. Применение преобразователя аналог—цифра на выходе измерителя с высокоомным резистором позволяет выполнять такие приборы с цифровым отсчетом. В частности, в приборе модели 419 имеется выход на цифropечатающую приставку.

В некоторых случаях в цепи обратной связи последовательно с высокоомным резистором включают регулируемый источник напряжения. С его помощью можно скомпенсировать начальный (фоновый) ток контролируемого объекта, расширить пределы измерения, повысить точность измерений и пр. Для повышения точности иногда в приборах предусматривается возможность периодической калибровки по току, например, с помощью встроенного ионизационного источника. В отечественных электрометрах У1—6 и У1—7 такая калибровка производится с помощью резисторов сопротивлением 5 Мом. Хорошие перспективы в этом отношении открывает калибровка высокоомного резистора по конденсатору [108]. Иногда для повышения стабильности высокоомные резисторы термостатируют.

Быстродействующие электрометрические измерители токов [1, 2, 109, 110]. Постоянная времени установления показаний электрометрического измерителя токов с параллельной обратной связью через высокоомный резистор определяется в конечном итоге сопротивлением и емкостью резистора. В тех случаях, когда требуется большее быстродействие, прибегают к специальным мерам, например можно уменьшить емкость

резистора за счет рационального монтажа, применением заземленных металлических экранов, перекрывающих пути для полей рассеивания с одного конца резистора на другой, применением экранов, создающих равномерное электрическое поле вдоль резистивного элемента. Кроме того, разработаны 2 метода компенсации остаточной емкости резистора с помощью частото-зависимой отрицательной обратной связи и с помощью положительной обратной связи через емкость. Пределы эффективности этих методов определяются тем, что емкость резистора является распределенной и тем самым может рассматриваться зависимой сложным образом от частоты, естественно, что скомпенсировать ее влияние полностью с помощью цепей с сосредоточенными параметрами нельзя.

Быстродействующие измерители малых токов за рубежом широко выпускаются серийно. Прибор модели 417 фирмы Keithley имеет пределы измерения (полная шкала) 10^{-13} — $3 \cdot 10^{-5}$ а, погрешность 2—3%, дрейф нуля 1% за 8 ч и время установления показаний менее 30 мсек.

Логарифмические измерители малых токов [2, 111—114]. Диапазон измерений и точностные характеристики логарифмических измерителей малых токов в большинстве случаев целиком определяются свойствами логарифмирующего элемента в цепи параллельной обратной связи.

Влияние временного дрейфа этих элементов исключается применением периодической калибровки, обычно по двум точкам с помощью встроенных резистивных источников малых токов. Быстродействие логарифмических измерителей зависит от уровня тока на входе, так как сопротивление логарифмирующего элемента изменяется при изменении тока.

За рубежом логарифмические измерители широко выпускаются серийно. Прибор модели 413А фирмы Keithley имеет диапазон 10^{-13} — 10^{-4} а, погрешность 20%, дрейф 17% за 24 ч, время установления показаний 0,1—2 сек.

Интеграторы малых токов [89, 115]. Конденсатор как пассивный электрометрический преобразователь тока в напряжение имеет высокие точностные характеристики, поэтому точность измерения малых токов методом накопления заряда может быть получена высокой — на уровне десятых и даже сотых долей процента. Чувствительность тоже может быть высокой, так как при методе интегрирования влияние случайных помех снижается. Недостатком классического варианта метода с накопительным конденсатором (ЭМУ с емкостной параллельной отрицательной обратной связью) является большое время измерений, однако в последнее время появилось много предложений, позволяющих уменьшить это время до нескольких секунд.

Устройства с запоминающим конденсатором [116]. В этом случае ток заряжает конденсатор в течение определенного

времени, после чего конденсатор отключается от объекта измерения и замыкается на первичную обмотку трансформатора. В образовавшемся колебательном контуре возникают затухающие колебания, которые снимаются со вторичной обмотки трансформатора и после усиления подаются на амплитудный дискриминатор. Все импульсы с амплитудой, превышающей уровень дискриминации, учитываются счетчиком импульсов. Их количество прямо пропорционально логарифму измеряемого тока. Важным преимуществом этого метода является то, что во время заряда конденсатора все измерительные цепи отключены и их помехи (особенно паразитный ток) не оказывают влияния. Это позволяет рассчитывать на получение высокой чувствительности. В частности, этот метод применяется для измерения токов на борту космических аппаратов.

Устройства с периодическим сбросом заряда [117, 118]. В интеграторах с периодическим сбросом заряда по достижении определенного напряжения на накопительном конденсаторе происходит его разряд и цикл начинается заново. При этом частота выходных импульсов пропорциональна току на входе. Существует большое количество вариантов схем таких интеграторов. В частности, на этом принципе работают так называемые электростатические реле. Высокие точности в таких системах получить не удастся, причиной чего является дрейф уровня напряжения срабатывания вследствие дрейфа нуля ЭМУ и других причин. Также не удастся получить и высокой чувствительности.

Устройства с периодической нейтрализацией заряда [119, 120]. В этих интеграторах производится не сброс заряда, а его периодическая нейтрализация известными зарядами. Это создает возможности для получения высокой точности — до сотых долей процента. Преобразователям малых токов в частоту с нейтрализацией заряда свойственна невысокая чувствительность — наименьший измеряемый ток в лучшем случае составляет 10^{-10} — 10^{-11} а. Это объясняется шумами ключевого устройства, подающего нейтрализующие заряды на накопительную емкость, в частности набросом заряда при переключениях. При больших частотах нейтрализации, что необходимо для обеспечения высокой точности при малом времени измерения, даже небольшие набросы заряда могут вызывать значительный ток помех.

Цифровые измерители малых токов [69, 108], которые в последние годы начали серийно выпускаться, могут быть выполнены как на базе резисторного измерителя с последующим преобразованием напряжения в цифровой код, так и на базе различных интеграторных систем [121]. Чувствительность цифровых измерителей пока еще низка. Цифровой прибор модели 615 фирмы Keithley имеет пределы измерения

(полная шкала) 10^{-12} — 10^{-1} а, погрешность 0,5—4 % ± 1 знак, уровень шумов $4 \cdot 10^{-15}$ а. Прибор модели 440 этой же фирмы [122, 123] имеет пределы измерения 10^{-10} — 10^{-2} а, погрешность 0,2—0,5 % ± 1 знак, дрейф нуля 0,5 % в неделю и 0,05 % /° С. Цифровой измеритель модели ME-1035 фирмы EG and G (США) имеет пределы измерения 10^{-11} — 10^{-5} а при погрешности 0,05—0,5 % ± 1 знак.

Аналоговые измерители высокой точности. Ни измерители с резистором, ни измерители с накопительным конденсатором не позволяют пока совместить высокую точность и высокую чувствительность измерений. Решить эту задачу удастся комбинированным использованием обоих методов. Этот вопрос исследован в [124, 106], где рассмотрено 3 комбинированных метода. Согласно одному из них на выходе интегрирующего ЭМУ с конденсатором в цепи обратной связи включается аналоговый дифференциатор на операционном усилителе постоянного тока. Напряжение на выходе дифференциатора пропорционально измеряемому току (система имеет непосредственный отсчет), а все элементы такой системы могут быть выполнены с высокой точностью. Ограничения по чувствительности определяются свойствами ЭМУ. Вторым из методов этой группы является компенсационный, при котором измеряемый ток компенсируется током от емкостного источника с генератором линейно изменяющегося напряжения. Согласно третьему методу, названному автокомпенсационным, в цепи параллельной отрицательной обратной связи ЭМУ последовательно включены интегратор на операционном усилителе и дифференцирующий конденсатор.

Сравнительное теоретическое и экспериментальное исследование этих методов [124] показывает, что все они примерно равноценны и позволяют получить точность на уровне по крайней мере десятых долей процента. Время измерения при этом невелико и обеспечивается непосредственный отсчет. Специфических ограничений по чувствительности, кроме тех, которые определяются качеством ЭМУ, нет.

Измерители разности и соотношения двух малых токов [125] используются в тех случаях, когда основную информацию о результатах измерений несет не абсолютное значение измеряемой величины, преобразуемой в малый ток (обычно неэлектрической, например радиоактивного излучения), а ее приращение относительно некоего опорного уровня. Применение дифференциальных измерителей малых токов позволяет исключить влияние ряда источников помех и тем самым повысить точность измерений.

Измерители разности двух токов могут быть выполнены по двум схемам: с образованием разности измеряемых токов и с образованием разности напряжений, пропорциональных измеряемому току. В обоих случаях в качестве преобразова-

телей токов в напряжение могут использоваться или резисторы, или конденсаторы. Дифференциальные измерители малых токов начали выпускаться серийно. Фирма Keithley выпускает дифференциальный электрометр модели 604 [2], который с приставками моделей 6041 или 6033, представляющими собой наборы подобранных пар высокоомных резисторов с сопротивлениями 10^6 , 10^8 , 10^{10} и 10^{11} ом, может измерять разность токов, каждый из которых составляет от 10^{-6} до 10^{-14} а, уровень помех при этом составляет $2 \cdot 10^{-15}$ а.

Измерители отношения двух малых токов используются в тех случаях, когда выгоднее выразить одну измеряемую величину в единицах другой (того же рода), например точно известной. При этом также удастся повысить точность измерений или получить какие-либо другие преимущества. Для построения компараторов токов пригодна 2-канальная схема с преобразованием измеряемых токов в напряжения, в которой коэффициенты преобразования можно регулировать, например, глубиной обратной связи. Тогда по положению регулирующих устройств при условии равенства выходных напряжений можно определить соотношение токов. Компараторы малых токов пока серийно не выпускаются.

Самопишущие измерители малых токов [3] широко выпускаются серийно и применяются в основном для работы с ионизационными камерами на промышленных объектах. По исполнению они отличаются от самопишущих измерителей напряжения только наличием набора высокоомных резисторов для преобразования токов в напряжения.

Поверка электрометрических измерителей тока [126]. Согласно поверочной схеме, принятой во ВНИИМ [127], меры малых токов, по которым поверяются рабочие приборы, аттестуются путем косвенных измерений силы постоянного тока методом заряда конденсатора. Такой порядок поверки является единственно возможным, если в качестве мер малого тока используются ионизационные источники или какие-либо другие, которые не могут быть аттестованы поэлементно. При использовании в качестве меры емкостного источника малых токов с генератором линейно изменяющегося напряжения он может быть аттестован поэлементно по образцовым мерам емкости и напряжения и измерителю времени [128]. Тем самым из поверочной схемы исключается один этап (аттестация меры малого тока методом измерения заряда) и это позволяет повысить точность меры малого тока. Такой порядок поверки принят во ВНИИФТРИ. Применяемый при этом источник имеет погрешность менее 0,5% в диапазоне 10^{-14} — 10^{-8} а и менее 1% в диапазоне 10^{-15} — 10^{-14} а при дискретности установки тока на выходе не хуже 1%. Его аттестация производится измерением крутизны линейно изменяющегося напряжения и емкости дифференцирующего конденсатора (от

10 нф до 0,1 мкф). При использовании такого источника на токах менее 10^{-15} а целесообразно применять нестационарные дифференцирующие конденсаторы [129].

Возможны и другие варианты поверочных схем. В частности, фирма Keithley опирается в своей поверочной схеме на образцовую установку NBS для измерения весьма больших сопротивлений. По этой установке периодически аттестуется предварительно тщательно исследованный магазин образцовых резисторов модели 5155 [2]. Погрешность магазина не превышает 0,2% в диапазоне 10^8 — 10^{12} ом и 0,5% на 10^{13} ом. По этому магазину проверяется высокоомный мост модели 515. Он представляет собой самокалибрующуюся систему, для которой исходными мерами являются высокоомные проволочные резисторы, поверяемые общепринятыми способами. Таким образом мост 515 проходит двойную поверку независимыми путями — при самокалибровке и по аттестованному в NBS магазину 5155. Этот мост и является основной исходной образцовой установкой фирмы. По нему и по нормальным элементам поверяются резистивные источники малых токов модели 261 [2, 53], по которым можно аттестовать рабочие измерители малых токов и при выпуске из производства и в процессе эксплуатации. Мост 515 является исходным и при поверке измерителей больших сопротивлений.

6. ИЗМЕРИТЕЛИ МАЛЫХ ЗАРЯДОВ

Методы измерения малых электрических зарядов [52, 93, 130, 131]. Для измерения малых зарядов в электрических цепях выпускается 2 группы приборов: общего назначения и специализированные для работы с пьезоэлектрическими датчиками. Первые представляют собой обычный ЭМУ с емкостной обратной связью, имеют узкую полосу пропускания и используются при различных экспериментах [22], для измерения токов методом накопления заряда и т. п. Вторые предназначены для использования с пьезоэлектрическими датчиками при измерении давлений, сил, ускорений и обычно выпускаются с полосой пропускания до нескольких десятков килогерц. Они широко используются при испытаниях ракет и других сложных механических систем и развиваются очень интенсивно, в частности фирма Kistler (ФРГ) выпускает целый ряд таких измерителей.

Коэффициент передачи [130]. Выходным сигналом измерителей заряда является напряжение. Коэффициент передачи таких измерителей (так называемое «усиление по заряду») обратно пропорционален емкости в цепи обратной связи, он может составлять до 100 мв/нк. Для регулировки коэффициента передачи предусматривается возможность плавного изменения глубины обратной связи. Это позволяет при извест-

ной передаточной характеристике пьезодатчика выставить заранее такой передаточный коэффициент измерителя, чтобы полное отклонение выходного прибора соответствовало кратному 10 значению измеряемой величины.

Частотный диапазон [132]. Верхняя граница частотного диапазона измерителя зарядов ограничивается только полосой пропускания собственно усилителя и при использовании ЭМУ с непосредственными связями каскадов может быть доведена до сотен килогерц. Так как собственные резонансные частоты пьезодатчиков обычно составляют десятки—сотни килогерц, то чаще всего достаточно для измерителей иметь верхнюю граничную частоту порядка десятков килогерц.

Нижняя граничная частота измерителя зарядов определяется в основном сопротивлением утечки в цепи обратной связи и может составлять 10^{-5} — 10^{-6} гц. При регистрации только переменной составляющей изучаемого процесса такой низкий предел частотного диапазона не нужен и даже вреден, поэтому в измерителях зарядов предусматривается возможность подключения параллельно конденсатору обратной связи резистора с сопротивлением 10^{10} — 10^{11} ом. Это позволяет избавиться от влияния дрейфа нуля и паразитного тока ЭМУ.

Шумы. При работе с пьезодатчиками измеритель, как правило, находится на большом расстоянии от объекта (в последнее время разработаны малогабаритные тряскоустойчивые измерители зарядов на полевых транзисторах, которые можно располагать на объекте вместе с пьезодатчиком), в этих случаях приходится использовать малoshумящие кабели. Кроме того, большая емкость кабеля при большой полосе пропускания измерителя существенно увеличивает шумы самого измерителя. Наконец, в многоканальных системах для уменьшения наводок и паразитных связей существенное значение имеет правильный выбор точек заземления и принципов экранирования.

Калибровка. Для контроля правильности работы измерителей заряда в них обычно встраивают калибровочные устройства. Последние представляют собой источники заряда и состоят из известной емкости и источника известного постоянного напряжения. Подавая заряд от калибровочного устройства на вход измерителя, можно определить коэффициент передачи измерителя с учетом влияния емкости пьезодатчика, кабеля и пр., т. е. в рабочих условиях.

7. ИЗМЕРИТЕЛИ БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Методы измерения больших сопротивлений [126, 133—135]. Методы измерения больших сопротивлений удобно классифицировать в зависимости от вида уравнения измерений.

При этом можно различать 3 группы методов. Для первой из них уравнение измерений имеет вид $R_x = kR_0$, т. е. в качестве меры используется высокоомный резистор. Типичными представителями приборов такого рода являются тераомметры и высокоомные мосты. Для второй группы уравнение измерений имеет вид $R_x = t/C_0$, т. е. мерой служит конденсатор и, кроме того, измеряется время. В эту группу входят методы заряда и разряда и современное их исполнение [136] с интегрирующим ЭМУ. Третья группа методов характеризуется уравнением $R_x = U/i_0$, т. е. мерой является источник тока и, кроме того, необходимо измерять напряжение. Измеритель по этому методу может быть представлен ЭМУ, на вход которого подан известный ток, а в цепь параллельной обратной связи включено измеряемое сопротивление.

Влияние шумов ЭМУ по напряжению в таких измерителях будет различно, что можно проследить с помощью приведенного ранее уравнения для U_n . Не вдаваясь в подробности, отметим, что наименьшее влияние помех ЭМУ имеют измерители с источником тока, несколько большее — измерители с конденсатором, а в измерителях с высокоомным резистором влияние помех возрастает в R_x/R_0 раз, причем это отношение может быть очень велико (при измерении сопротивлений до 10^{17} ом оно лежит на уровне 10^5 — 10^6). В таком же соотношении находятся и параметры, характеризующие чувствительность методов.

Тераомметры [2, 19, 69, 134, 137, 138]. Наиболее распространены две схемы тераомметров. В первой ток через контролируемое сопротивление, находящееся под известным напряжением, измеряется ЭМУ с параллельной обратной связью через образцовый резистор, во втором имеется делитель из контролируемого и образцового сопротивлений и ЭМУ с последовательной обратной связью измеряет падение напряжения на последнем при заданном напряжении на делителе в целом. Вторая схема имеет большую паразитную емкость и поэтому используется лишь для измерения сопротивлений до 10^{13} — 10^{14} ом.

При отсчете показаний тераомметра необходимо учитывать положение трех переключателей: образцовых резисторов, питающих напряжений и глубины обратной связи. Для исключения этого неудобства в новом тераомметре модели 4329А фирмы Hewlett Packard (США) применено устройство для автоматического получения множителя при показаниях выходного прибора, этот множитель указывается на световом табло [139].

Тераомметры с логарифмической шкалой. Такие приборы удобны при измерениях, не требующих высокой точности, и в последнее время используются довольно широко. В них ток через контролируемый объект, находящийся под постоянным

напряжением, подается на электрометрический измеритель токов с логарифмической характеристикой. Прибор типа Tegalog Народного предприятия Vakutronik (ГДР) имеет диапазон измерения от 10^8 до 10^{15} ом без переключения пределов, измерительное напряжение 100 в, погрешность 20 %.

Высокоомные мосты [2, 27, 140, 141]. Для измерения больших сопротивлений используются 4-, 2- и 6-плечие мосты. Первые отличаются от низкоомных мостов лишь использованием электрометрического нуль-индикатора и защитой от наводок и токов утечки. В 2-плечих мостах 2 плеча представлены источниками постоянных напряжений, что дает возможность заземления и нуль-индикатора и источников питания. В 6-плечих мостах используются свойства преобразования звезда—треугольник для имитации высокоомного сопротивления в образцовом плече моста. Это позволяет применять в качестве образцового высокоомные проволочные резисторы, имеющие высокую точность. Кроме того, можно плавно изменять значение сопротивления этого резистора регулировкой низкоомных лучей звезды.

Высокоомные мосты наиболее пригодны для измерения очень больших сопротивлений (10^8 — 10^{12} ом) с высокой точностью. В нашей стране выпускаются высокоомные мосты P4052, P4053, P4060, выполненные с широким использованием микропроволочных резисторов и имеющие довольно хорошие характеристики. Из зарубежных мостов наибольший интерес представляет самокалибрующийся мост модели 515 фирмы Keithley. Электрометрический нуль-индикатор этого моста имеет входное сопротивление более 10^{14} ом, порог чувствительности по напряжению 200 мкв и по току $2 \cdot 10^{-16}$ а. В диапазоне 10^5 — 10^8 ом мост имеет погрешность 0,05 %, а в диапазоне 10^8 — 10^{15} ом — от 0,1 до 1 %. Минимальное измерительное напряжение в большинстве случаев составляет 1—5 в и лишь при наибольших измеряемых сопротивлениях доходит до 10—100 в.

Высокоомные мосты широко применяются в качестве метрологических установок высшей точности, в частности во ВНИИМ, в NBS, в Физико-техническом бюро ФРГ, в Национальном исследовательском Совете Канады, и в NPL.

Измерители с интегрирующим ЭМУ [136, 142]. Чувствительность этих измерителей существенно выше, кроме того, конденсатор как пассивный электрометрический преобразователь имеет высокие характеристики, поэтому этим системам уделяется определенное внимание. В частности, в Национальном исследовательском Совете Канады этим методом производится измерение сопротивлений до 10^{14} ом с погрешностью менее 0,03 % и ставится задача измерения сопротивлений до

10^{15} ом с погрешностью на уровне 0,01 %. Преимуществом этого метода является то, что он сравнительно простым путем позволяет получить цифровой отсчет.

Измерители с источником тока [143, 144]. В последние годы метод с источником тока используется редко, хотя он обладает наибольшей чувствительностью по сравнению с другими. По-видимому, это связано с тем, что не удается найти простых схемно-конструктивных решений. Ранее известные измерители такого типа использовали емкостные источники тока с генератором линейно изменяющегося напряжения на операционном усилителе или многооборотном потенциометре, а также ионизационные источники. Во ВНИИМ и в NBS для измерений больших сопротивлений используются установки с источником тока на изменяющейся емкости.

Измерение удельных сопротивлений диэлектриков [81, 134, 145—149]. Для этих целей выпускаются специальные приборы, обычно называемые измерительными камерами. Фирма Takeda Ricken (Япония) выпускает камеру типа TR-42 для измерения объемного и поверхностного сопротивлений листовых изоляционных изделий. Электроды камеры имеют следующие размеры: диаметр измерительного электрода 50 мм, внутренний диаметр охранного кольца 70 мм, внешний 80 мм. Измерительная схема камеры выполнена по методу делителя, используется электрометр с динамическим конденсатором типа TR-84B (этой же фирмы), при этом верхний предел измерений камеры лежит на уровне 10^{19} ом. Эта же фирма выпускает камеры для измерений удельных сопротивлений фотополупроводников, для высокотемпературных исследований, для измерений на жидкостях.

Измерение сопротивлений утечки конденсаторов [69]. При таких измерениях необходимо учитывать 2 особенности конденсатора как объекта измерения большого сопротивления: наличие токов поляризации, зависящих от времени нахождения конденсатора под напряжением, и большая емкость, что требует иметь стабильные источники питания для создания напряжения на конденсаторе. Иногда разрабатываются самостоятельные приборы для испытания конденсаторов, иногда возможность таких испытаний предусматривается в тераометрах общего назначения.

Измерение параметров диэлектриков на инфранизких частотах [150, 151]. Зависимость электрических свойств полимеров от частоты проявляется только в области инфранизких частот. Существует соответствие между механическими и электрическими свойствами диэлектриков и по результатам измерений электрических свойств на инфранизких частотах можно получить довольно ценную информацию. При необхо-

димости иметь высокую точность используются мостовые методы, возможен и ряд других.

Поверка электрометрических измерителей сопротивлений [152—154]. На низших пределах поверка обычно осуществляется с помощью проволочных мер большого сопротивления. В NPL разработаны проволочные меры до 10^9 ом с длительной нестабильностью на уровне тысячных долей процента. В нашей стране выпускаются микропроволочные катушки сопротивлений до 10^9 ом (класса точности 0,02) и микропроволочные магазины сопротивлений до 10^{10} ом (класса точности 0,1).

На пределах измерения свыше 10^9 — 10^{10} ом поверка производится с помощью мер на непроволочных резисторах [155]. Магазин модели 5155 фирмы Keithley на диапазон 10^8 — 10^{13} ом имеет погрешность 0,2—0,5%, нестабильность менее 0,1% за 1000 ч и температурный коэффициент сопротивления 0,1%/°C. Фирма Morganite Resistors Ltd (Англия) выпускает образцовые резисторы на диапазон от 10^8 до 10^{13} ом, имеющие нестабильность менее 1% в год, коэффициент напряжения менее 0,1%/в, температурный коэффициент 0,1%/°C.

При отсутствии образцовых магазинов непроволочных резисторов (в нашей стране они не выпускаются) или на пределах измерения свыше 10^{12} — 10^{13} ом применяются различные методы поверки. В частности, для поверки тераомметров, представляющих собой сочетание измерителя малых токов и источника испытательных напряжений, можно использовать образцовые источники малых токов. Для поверки мостов и в нашей стране и за рубежом пытаются использовать пассивные имитаторы больших сопротивлений на основе преобразования звезда—треугольник [156]. Следует заметить, что такой имитатор увеличивает уровень помех самого измерителя и его нельзя рассматривать как независимую меру больших сопротивлений, поскольку его свойства, как меры, зависят не только от его внутренних параметров, но и от параметров поверяемого объекта.

Для поверки тераомметров можно использовать 2-зажимные активные имитаторы больших сопротивлений с ручным уравниванием [157, 158], однако они, как и пассивные имитаторы, не обладают свойствами независимой меры.

Существует ряд возможностей построения имитаторов больших сопротивлений [159, 160]. Перспективными, в частности, являются 3-зажимные активные имитаторы с автоматическим уравниванием. Их свойства определяются характеристиками использованного в имитаторе ЭМУ, и по видимому, могут быть достаточно удовлетворительными.

8. ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

В настоящее время количество видов электрометрической аппаратуры, в которых испытывается потребность на практике, исчисляется многими десятками. Однако такая аппаратура во многих случаях является мелкосерийной. Чтобы снизить затраты на производство в этих условиях многие зарубежные фирмы стремятся максимально унифицировать конструктивное исполнение выпускаемой электрометрической аппаратуры [2]. Это вполне возможно, так как в большинстве случаев используются одни и те же элементы: ЭМУ, пассивные электрометрические преобразователи, источники малых токов, конструктивные электрометрические элементы.

Принимаются меры и для повышения серийности электрометрической аппаратуры. С этой целью фирмами обычно выпускается большое количество разнообразных приставок, расширяющих области применения основной измерительной аппаратуры [2]. Среди таких дополнительных элементов можно отметить приставки для измерения эдс Холла в высокоомных образцах, зонды для измерения параметров электростатических полей методом наведенного заряда, емкостные делители для измерения больших напряжений, ионизационные камеры, ионизационные датчики параметров электростатических полей, ячейки Фарадея, пьезоэлектрические датчики, различного рода измерительные камеры для измерения удельных сопротивлений, кабели для соединения электрометрической аппаратуры с объектом измерения, соединительные элементы, позволяющие по желанию отключать измерители от объекта, образцовые источники напряжения для испытания резистивных объектов, в том числе высоковольтные, и т. п.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА*

1. Keithley J. F. Elektrometer. Radio electron. (Ned), 1970, 18, № 9, 367—371 (1970, 10.32.1042)
2. Keithley instruments, 1970—1971. Cleveland, Ohio, 1970, 64 pp. (1971, 7.32.1158K)
3. Илюкович А. М. Методы электрометрических измерений. — В сб. «Вопросы измерения малых постоянных токов и напряжений». ЦНИИ-ТЭИ Приборостроения. М., 1970, 8—13
4. Krämer H., Messner D. Meßsonde zur Bestimmung der örtlichen Ladungsverteilung auf Oberflächen von Festkörpern. Пат. ФРГ, кл. 21e, 29/14, (G 01 r, 29/14), № 1281573, заявл. 8.12.64, опубл. 26.06.69 (1970, 6.32.820)

* Цифры в скобках показывают, в каком году, в каком номере РЖ «Метрология и измерительная техника» (выпуск 32), за каким индексом опубликован реферат по данной статье или патенту.

5. Mesure des propriétés électrostatiques des matières plastiques. Франц. пат., кл. G 01 r, № 1572180, заявл. 4.12.67, опубл. 19.05.69 (1970, 6.32.821)
6. Heyl G. Zur Messung der Ladungsverteilung auf der Oberfläche und im Innern von hochisolierenden Stoffen. «Kunststoffe», 1970, 60, № 1, 45—52 (1970, 7.32.1170)
7. Гавриленко Н. Д., Захарченко В. В. Датчик для измерения потенциалов статического электричества. Авт. св. СССР, кл. 21e, 36/10 (G 01 r), № 256073, заявл. 6.04.67, опубл. 3.04.70 (1970, 9.32.1056)
8. Forster E. O., Efron E. Process for measuring static charge in a liquid hydrocarbon stream. Пат. США, кл. 324—32, (G 01 r), № 3478261, заявл. 31.12.68, опубл. 11.11.69 (1970, 12.32.1065)
9. Mesure des propriétés électrostatiques des matières plastiques. Франц. пат., кл. G 01 r, № 94665, заявл. 7.05.68, опубл. 3.10.69 (1971, 2.32.1610)
10. Sessler G. M., West J. E. Method for measurement of surface charge densities on electrets. «Rev. Sci. Instrum.», 1971, 42, № 1, 15—19 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1971, вып. 18, реф. 152)
11. Седин В. А., Яровой Г. П. Измерение поверхностного заряда и потенциала внешнего поля электрета. «Измерительная техника», 1971, № 3, 54—56 (1971, 8.32.1367)
12. Aminoff E., Heleskivi J. Apparatus for dc measurements of the Hall and photo—Hall effect in high resistivity semiconductors. «Tied. Valtion tekn. tutkinuslait.», 1970, Ser. 2, № 31, 18 pp. (1971, 7.32.1429)
13. Усилитель ионизационных токов 1542 — В сб. «Уникальные приборы», № 3, М., 1969, 7—8 (1970, 2.32.1191)
14. Gerät zum Messen, Lokalisieren und zur Kontrolle elektrostatischer Aufladungen. «Kunststoffen», 1969, 59, № 9, 562 (1970, 2.32.1056)
15. Blackwell L. L., Able E. T. Portable static meter for determining the magnitude and polarity of accumulated electrostatic charges. Пат. США, кл. 324—72 (G 01 r), № 3449668, заявл. 15.03.65, опубл. 10.06.69 (1970, 7.32.1171)
16. Ionisationsverstärker und Speisegerät Typ 1542. «Feingerätetechnik», 1970, 19, № 5, 237 (1970, 10.32.1041)
17. Kleinwächter H. Das Influenz—E—Feldmeter als elektromechanischer Verstärker extrem hohen Verstärkungsfaktors und seine Anwendung als empfindliches Meßgerät. «Arch. techn. Mes.», 1970, № 413, R62—R65 (1970, 11.32.1188)
18. Blasek G. Kontinuierlicher Sekundärelektronenvervielfacher zur Messung kleiner Ströme von Elektronen niedriger Energie. «Exptl. Tech. Phys.», 1970, 18, № 1—2, 13—16 (1970, 12.32.1157)
19. Ein neues Reststrom-, Durchbruchspannung- und Teraohm—Meßgerät. «Philips Forsh. und Fert.», s. a., 15, № 2, 36 (1970, 10.32.1045)
20. Ortlepp S. Gerät zur Messung der Sperrströme an Si—Halbleitern. «Radio—Fernsehen—Elektron.», 1970, 19, № 12, 401—404 (1970, 11.32.1271)
21. Guittard C. Procédé de mesure de la différence de potentiel à la surface d'un objet et dispositif pour la mesure de ce procédé. Франц. пат., кл. G 01 r, № 1581818, заявл. 7.08.68, опубл. 19.09.69 (1970, 10.32.1126)
22. Герасимов А. И., Царев В. П. Измеритель распределения плотности тока в импульсных электронных пучках. (Редколлегия ж. «Приборы и техника эксперимента» АН СССР). М., 1969, 9 стр. (1970, 1.32.1109 Деп.)
23. Dövenner D., Maurer B. Ein neue Methode zur Bestimmen der elektrostatischen Aufladbarkeit von Kunststoffpulvern. «Kunststoffen», 1969, 59, № 9, 571—574 (1970, 3.32.1194)

24. Pillai P. K. C., Jain V. K. Measurement of surface charge and discharge current of electrets. *L. Sci. and Ind. Res.*, 1970, 29, № 6, 270—275 (1971, 4.32.1129)
25. Munakata C., Watanabe H. Measurement of resistance by means of electron beam. *Japan J. Appl. Phys.*, 1969, 8, № 11, 1307—1309 (1970, 5.32.1281)
26. Mathes K. N. Mc Cowan E. J. Problems with dielectric measurements at cryogenic temperature. *Measur. Diectetr. Prop. Space Condit.*, Philadelphia, Pa, 1967, 3—17 (1970, 10.32.1123)
27. Александров В. С., Прянишников В. А. Приборы для измерения малых постоянных напряжений и токов. Л., «Энергия», 1971, 184 с. (1971, 4.32.1206K)
28. Popeliš I., Mariani E. Aparatūra na meranic ionovŷch termoelektrickŷch prŷdov dielektrick v intervale teplot —150°C až +200°C. *Čs. řas. fys.*, 1970, A20, № 4, 355—360 (1971, 1.32.1045)
29. Джагунов Р. Г., Якубов Р. А., Мелик-Шахназарова Т. А. Усилительный элемент из пьезокерамики ЦТС-19. «Измерительная техника», 1969, № 9, 108—109 (1970, 1.32.1204)
30. Джагунов Р. Г., Вайсман Г. С. Вопросы конструирования пьезоэлектрических вольтметров с капиллярными индикаторами. «Известия ВУЗов. Приборостроение», 1969, 12, № 12, 38—41 (1970, 4.32.1224)
31. Белосмоллов А. Б., Дрейзин В. Э. Параметрический измерительный преобразователь напряжений. «Известия ВУЗов. Приборостроение», 1970, 13, № 5, 12—15 (1970, 12.32.1104)
32. Белецкий Б. И., Минц М. Б. Высокочувствительные усилители постоянного тока с преобразователями. Л., «Энергия», 1970, 384 с
33. Lang B. Anordnung zum Umwandlern kleiner Meßgleichspannungen in Wechselspannungen. Пат. ФРГ, кл. 21с, 19/18, (G 01 г, 19/18), № 1286208, заявл. 24.08.66, опубл. 5.02.70 (1970, 11.32.1258)
34. Lang B. Vorrichtung zur Umwandlung kleiner Meßgleichspannungen in eine Wechselspannung. Пат. ФРГ, кл. 21е, 19/18, (G 01 г, 19/18), № 1287687, заявл. 8.08.66, опубл. 24.09.70 (1971, 6.32.1163)
35. Илюкович А. М. Модуляторы на магниторезисторах для высокочувствительных усилителей постоянного тока. «Измерительная техника», 1971, № 5, 58—59
36. Бегунов Р. А., Рабинович С. Г., Троицкий Е. А. Фотогальванометрические автокомпенсационные приборы с ценой деления 1.10^{-12} а и 4.10^{-10} в. — В сб. «Вопросы измерения малых постоянных токов и напряжений», ЦНИИТЭИ Приборостроения, М., 1970, 66—68
37. Беркман Р. Я., Бондарук Б. Л., Рахлин Л. И. Быстродействующие низкороговые микровольтметры и наноамперметры на базе магнитных модуляторов с выходом на второй гармонике. — В сб. «Вопросы измерения малых постоянных токов и напряжений», ЦНИИТЭИ Приборостроения, М., 1970, 56—59
38. Троицкий Е. А. Естественные флуктуации подвижной части гальванометров. «Измерительная техника», 1969, № 10, 41—42 (1970, 2.32.1107)
39. Рабинович С. Г. Анализ естественных флуктуаций показаний гальванометрических автокомпенсаторов. «Труды метрологических ин-тов СССР», 1969, вып. 107 (167), 124—136 (1970, 2.32.1109)
40. Коновалов Е. Г., Станишевский В. К., Ходак Г. И., Шуклин К. С. Методика измерения электростатических зарядов, возникающих на высокоомных изоляторах при их деформировании. «Доклады АН БССР», 1970, 14, № 11, 1006—1009 (1971, 5.32.1273)
41. Schubert R. Ein Beitrag zur Theorie der Modulationsverstärker. 14 Int. Wiss. Koolloq. Techn. Hochsch. Ilmenan 1969, Ht. 2, S. I, s. a., 61—80 (1971, 5.32.1377).

42. Mizrahi A. High impedance, selfzeroing dc voltmeter circuit. Пат. США, кл. 324—111, (G 01 r 1/00, H 03 f 1/02), № 3509460, заявл. 1.11.67, опубл. 28.04.70 (1971, 2.32.1624)
43. Волгин Л. И. Применение операционных усилителей в контрольно-измерительной технике. В сб. «Энциклопедия измерений, контроля и автоматизаций», вып. 14, «Энергия», 1970, 23—26 (1970, 12.32.970)
44. Bonfig K. W., Gehrold E. Gegenkopplung bei Operationsverstärkern. «Arch. techn. Mes.», 1970, № 417, 237—240 (1971, 3.32.1279)
45. Galvanomètre électronique «type GVM—30». «Instrum. et. Labs.», 1969, № 50, 27 (1970, 5.32.1230)
46. Сучков Ю. И. О напряжении тепловых шумов в высокоомных микропроводных резисторах. «Труды Фрунзенского политехнического ин-та», 1970, вып. 40, 26—37 (1970, 8.32.1070)
47. Решение научно-технической конференции по вопросам измерения малых постоянных токов и напряжений. — В сб. «Вопросы измерения малых постоянных токов и напряжений», ЦНИИТЭИ Приборостроения, М., 1970, 3—7
48. Ходак Г. И., Шуклин К. С. Исследование виброшумов высокоомных резисторов типа КВМ и КЛМ. «Труды ВНИИФТРИ», 1970, вып. 1, ч. 2, 57—68
49. Всеволожский Л. А., Илюкович А. М., Михайлова И. П. Установка для измерения параметров логарифмических характеристик нелинейных элементов в области весьма малых токов. «Приборы и техника эксперимента», 1970, № 3, 191—193 (1970, 12.32.1116)
50. Брусилловский Г. Л., Силин В. А., Картузова И. А., Шишкин Ю. Г. Устройство для автоматической записи вольтамперных характеристик в координатах $I_{gi}=f(V_a)$ в диапазоне токов от $5 \cdot 10^{-13}$ до 10^{-4} а. «Приборы и техника эксперимента», 1971, № 1, 162—164 (1971, 7.32.1385)
51. Шуклин К. С. Опыт создания специальных элементов и узлов для входных цепей электрометров. «Труды ВНИИФТРИ», 1970, вып. 1, ч. 1, 166—206 (1971, 3.32.1145)
52. Curic C., Foch H. Perfectionnements apportés aux dispositifs de mesure des quantités de charges électriques. Франц. пат., кл. G 01 г, H 01 j, № 1551950, заявл. 19.09.67, опубл. 25.11.68 (1970, 1.32.1086)
53. Model 261. Keithley Eng. Notes, s. a., 18, № 1 (1970, 7.32.1291)
54. Spescha G. S., Meier F. Magnetisch betätigtes Relais. Швейц. пат. кл. H04h 50/54, H01h 45/10, № 502660, заявл. 25.07.69, опубл. 15.03.71, 1971 г (10517, 2175P)
55. Herrwerth P. Elektrische koaxiale Meßübertragungsleitung für sehr geringe Stromstärken. Пат. ФРГ, кл. 21e, 29/00 (G 01 г, 29/00), № 1281569, заявл. 29.04.60, опубл. 19.06.69 (1970, 6.32.1183)
56. Илюкович А. М. Современное состояние и тенденции развития ламповых электрометрических усилителей. «Труды ВНИИФТРИ», 1970, вып. 1, ч. 1, 5—77 (1971, 3.32.1275)
57. Шамрило М. А., Мельников В. П., Шипинский В. Ф. Исследование шумов электрометрических ламп. В сб. «Вопросы конструирования, технологии и контроля изготовления электронных вакуумных приборов», Минск, 1970, 80—90 (1970, 10.32.1238)
58. Зайцев Б. Д., Степаненко И. Ц., Шведов Е. Е. Методы измерения низкочастотных шумов. «Измерительная техника», 1970, № 6, 43—46 (1970, 12.32.974)
59. Зайцев Б. Д., Шведов Е. Е. Установка для измерения инфранизкочастотных шумов. «Измерительная техника», 1970, № 8, 74—76 (1971, 2.32.1719)
60. Мельников В. П., Шамрило М. А., Шипинский В. Ф. Стабилизация параметров электрометрических ламп. В сб. «Вопросы конструирования технологии и контроля изготовления электронных вакуумных приборов», Минск, 1970, 124—130 (1970, 10.32.1192)

61. Курилов В. А., Апинян В. В. Электрометрический интегратор П2—3 «Приборы и техника эксперимента», 1971, № 4, 110—111
62. Perfectionnements aux appareils de mesures électriques. Франц. пат., кл. G 01 г, № 1585238, заявл. 30.07.68, опубл. 16.01.70 (1971, 3.32.1200)
63. Осипов А. К. Полупроводниковые электрометрические усилители (Обзор). «Приборы и техника эксперимента», 1971, № 1, 7—18 (1971, 7.32.1435)
64. Elektrometer mit Halbleiter—Eingang. *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1969, 21, № 16, 401 (1970, 1.32.989)
65. New all-solid-state picoammeter has better than 0.5% week stability and 3×10^{-14} ampere sensitivity, Model 410A. «Keithley Eng. Notes», 1968, 16, № 6, (1970, 3.32.1208)
66. P a c a k M. Simple MOSFET electrometer circuits. «Electronic Engineering», 1969, 41, № 499, 24—27 (1970, 3.32.1294)
67. Electromètre-multimètre «TE—980». «Instrum. et labs.» 1969, № 50, 26 (1970, 5.32.1229)
68. Electromètre-multimètre «TE982» *Instrum. et lab*», 1970, № 54, 25 (1971, 4.32.1199)
69. Digitales Tera—Ohmmeter und Pico—Ampermeter. — «Arch. techn. Mess», 1971, № 421, R19—R20 (1971, 8.32.1415)
70. Barker R. W. J. Input parameter measurement techniques for high input impedance dc amplifiers. «Proc. IEEE», 1969, 57, № 8, 1437—1438 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1970, вып. 4, реф. 28)
71. Hawkins R. J., Mansour I. R. M Bloodmorth G. G. The spectrum of current noise in MOSTs at very low frequencies. «J. Phys. (Brit. J. Appl. Phys.)», 1969, D2, № 8, 1059—1062 (1970, 3.32.1303)
72. Oeschmichen J. P. Voltmetre électronique a T. E. C. «Toute électron.» 1969, 36, № 337, 313—316 (1970, 1.32.1103)
73. Валеев У. С. Нерезонансное параметрическое усиление напряжения на переменной емкости. «Автометрия», 1969, № 5, 32—38 (1970, 4.32.1280)
74. Куликовский К. Л., Берберян Г. В., Саямов Э. А. Динамический конденсатор без движущейся части. «Известия ВУЗов. Приборостроение», 1969, 12, № 11, 28—30 (1970, 4.32.1178)
75. Борзов В. М. Расчет входной цепи электрометра с динамическим конденсатором. «Труды ВНИИФТРИ», 1970, вып. 1, ч. 2, 4—33 (1971, 3.32.1143)
76. Сакс О. В., Мадисе Т. В. Динамический конденсатор ДК—64Т. «Ученые записки Тартуского ун-та», 1969, вып. 239, 106—121 (1970, 3.32.1183)
77. Фечин Н. И., Савельева Л. К. Динамический конденсатор. Авт. св. СССР, кл. 21q, 10/01, (H 01 g 5/16), № 270072, заявл. 21.12.67, опубл. 13.08.70 (1971, 1.32.1042)
78. Čhlup J. Resonanční zapojení vstupního obvodu elektrometru s dynamickým kondensátorem. Пат. ЧССР, кл. 21e, 30/20, (Q 01 г), № 133304, заявл. 21.02.68, опубл. 15.07.69 (1971, 3.32.1142)
79. Родионов Ю. Н. Анализ шумов электрометрических усилителей с динамическим конденсатором. «Измерительная техника», 1970, № 11, 70—72 (1971, 4.32.1253)
80. Fermor J. H. Improvements in and relating to electrometers. Англ. пат. кл. GIV, HIM, (G 01 г), № 1154243, заявл. 1.02.67, опубл. 4.06.69 (1970, 2.32.1058)
81. Fermor J. H., Kjekshus A. Apparatus for the measurement of electrical resistivity in ionic conductors. «Tidsskr. kjemi, bergvesen og metallurgi», 1970, 30, № 2, 18—22 (1970, 8.32.1074)
82. Bajan J. L'amplication parametrique en électrométrie. «Onde électr. 1969, 49, № 506, 535—543 (1970, 1.32.1211)

83. Аллабуттаев К. А. Измерительный преобразователь на варикапах. — В сб. «21-я Научная конференция Ярославского технологического ин-та», Ярославль, 1969, 40—41 (1970, 8.32.1175)
84. Przapowski R., Otrębski J. Przetwornik napięcia stałego do układów elektrometrów ręcznych. Пат. ПНР, кл. 21e, 28/01, (G 01 r), № 57995, заявл. 23.09.66, опубл. 30.08.69 (1970, 10.32.1179)
85. Zarzycki R. Układ półprzewodnikowego modulatora pojemnościowego. Пат. ПНР, кл. 21a⁴, 14/01, (H03c), № 59360, заявл. 9.09.66, опубл. 28.02.70 (1970, 12.32.1187)
86. Давыдов В. С., Порошин Н. Д. Параметрические емкостные усилители постоянных и медленно меняющихся напряжений. — В сб. «Вопросы измерения малых постоянных токов и напряжений», ЦНИИ-ТЭИ Приборостроения, М., 1970, 53—56
87. Doering E. Untersuchungen am Metall—Silizium System. «Z. angew. Phys.», 1970, 29, № 6, 346—349 (1971, 2.32.1687)
88. Жарков А. В., Павлов С. С., Погуляевский Я. С., Фролов В. П. Электрометрический усилитель с поверхностным варикапом. «Приборы и техника эксперимента», 1970, № 6, 118—120 (1971, 6.32.1194)
89. Wickstrom R. A., Schroder D. K., Nathanson H. C. A simple inexpensive electrometer used to measure currents of individual silicon vidicon diodes in the 10⁻¹⁶ to 10⁻¹⁵ ampere range. IEEE trans. Electron. Devices», 1970, 17, № 8, 634—636 (1971, 1.32.1059)
90. Патров Б. М. Расчет частотных характеристик генераторного усилителя постоянного тока одной структуры. «Известия ВУЗов. Приборостроение», 1969, 12, № 9, 11—15 (1970, 2.32.1194)
91. Певзнер В. В., Полонников Д. Е. Усилители постоянного тока с управляемыми генераторами. М., «Энергия», 1970, 288с.
- 92. Abe Z., Kato Y., Furuhashi Y. A new second harmonic type ferroelectric modulator for electrometer. Rev. Sci. Instrum.» 1971, № 6, 805—809 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1971, вып. 36, реф. 281)
93. Cluchet J. Tabot L. Procédé de mesure de charges électriques et dispositif pour la mise en oeuvre de ce procédé. Франц. пат., кл. G 01 r, № 1552113, заявл. 17.11.67, опубл. 25.11.68 (1970, 1.32.1085)
94. Куликовский К. Л., Саямов Э. А. Струнный электрометр. Авт. св. СССР, кл. 21e, 5/02 (G 01 r, 5/32), № 266928, заявл. 7.06.68, опубл. 8.07.70 (1971, 1.32.1060)
95. Slingelettrometer i idiostatisk koppling. Шведск. пат. кл. 21e, 5/32 (G 01 r, 5/32), № 321738, заявл. 16.09.64, опубл. 16.03.70 (1971, 4.32.1198)
96. Клемин Л. В. Исследование электростатического электрометра с переменным возбуждением, «Труды ВНИИФТРИ», 1970, вып. 1, ч. I, 140—165 (1971, 3.32.1144)
97. Григорьев А. С. Динамика движения подвижной части линейного электрометра. «Труды Тамбовского ин-та химического машиностроения», 1969, вып. 3, 411—415 (1970, 8.32.1041)
98. Берберян Г. В., Куликовский К. Л., Саямов Э. А. Фототриодный электрометрический компенсатор для измерения постоянных напряжений. «Известия ВУЗов. Приборостроение», 1970, 10, № 4, 31—32 (1970, 11.32.1210)
99. Ясинага С. Схема сервоусилителя с высоким входным сопротивлением. Японск. пат. кл. 54(7)D11, № 3860, заявл. 1.02.67, опубл. 9.02.70 (1971, 4.32.1251)
100. Beispiele zeitgemässer Geräte für effektive und Vergleichsmessungen. «Schweiz. Maschinenmarkt», 1969, 69, № 42, 87, 89, 91, 93, 95, 97 (1970, 3.32.1147)
101. Elektrische Messinstrumente. «Techn. Rasch.» 1970, 62, № 17, 9, 11, 13 (1970, 10.32.1043)

102. Вольтметры электронные постоянного тока. Методы и средства проверки. Стандарт СССР, ГОСТ 16315—70 (1971, 4.32.1204С)
103. Burkhardt, Guillot, Lavergne. Appareils originaux pour la mesure des courants faibles. «Electron. ind.», 1970, № 133, 276—282 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1970, вып. 28, реф. 202)
104. Пикоамперметры ЕР—2 и ЕР—2S. — В сб. «Уникальные приборы», № 4, М., 1970, 39—40 (1970, 12.32.1115)
105. Cloos O., Heigwer G. An automatic compensating instrument for measuring low electric direct currents. «Nucl. Instrum. and Meth.», 1971, 91, № 4, 633—635 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника», 1971, вып. 20, реф. 181)
106. Родионов Ю. Н., Шадрин Г. В. Предельные точность и чувствительность электрометрических усилителей тока. — В сб. «Вопросы измерения малых постоянных токов и напряжений», ЦНИИТЭИ Приборостроения, М., 1970, 13—18
107. New, automatic ranging picoammeter permits fast, precise measurements from 10^{-2} to 10^{-14} ampere. Model 419. «Keithley Eng. Notes», 1968, 16, № 4 (1970, 3.32.1209)
108. Илюкович А. М. Пути создания измерителей весьма малых постоянных токов с цифровым отсчетом. «Труды ВНИИФТРИ», 1971, вып. 1, ч. 2, 69—93 (1971, 3.32.1217)
109. Паршин А. В. Широкополосный полупроводниковый электрометрический усилитель. «Приборы и техника эксперимента», 1969, № 6, 107—110 (1970, 4.32.1282)
110. Da Costa V. D. Mourchou R., Tategrain A. Amplificateur rapide de courants faibles. «Bull. instrum. nucl.», 1970, № 38, 26—27 (1970, 8.32.1182)
111. Langerak J. J. Logarithmische verhoudingsmeter voor twee stromen tussen 10^{-10} ene 10^{-5} A. «Radio electron.» (Nederl.), 1969, 17, Deel 1, № 23, 934—938; Deel 2, № 24 978—980, 984 (1970, 5.32.1254; 5.32.1255)
112. Николаев Ю. Н., Титов М. Н. Логарифмический усилитель малых токов. «Приборы и техника эксперимента», 1970, № 6, 116—118 (1971, 6.32.1192)
113. Всеволожский Л. А. Логарифмический усилитель малых постоянных токов. «Измерительная техника», 1971, № 1, 48—50 (1971, 7.32.1440)
114. Amplificateurs pour courant continu á réponse linéaire et logarithmique série 140. «Bull. instrum. nucl.», 1970, № 41, 61—62 (1971, 8.32.1522)
115. Хосонто Т. Измерительное устройство, работающее по методу накопления заряда. Японск. пат., кл. 110В7, № 12103, заявл. 24.08.66, опубл. 2.06.69 (1970, 2.32.1057)
116. Ключев Л. Л., Хехнев Р. Г., Зернов А. Н. Применение знакового коррелятора для повышения точности измерения слабых постоянных токов. «Приборы и техника эксперимента», 1971, № 6, 83—85 (1971, 6.32.1108)
117. Пушкина М. А., Слуцкий М. Е. Устройство для измерения слабых токов. Авт. св. СССР, кл. 21е, 36/01 (G 01 г), № 252463, заявл. 25.04.68, опубл. 5.02.70 (1970, 8.32.1119)
118. Chater W. T. A digitizing electrometer system using an integrating circuit preamplifier. «Rev. Sci. Instrum.», 1971, 42, № 1, 129—134 (1971, 7.32.1317)
119. Langerak J. J. Stroommeter en integrator voor stromen van 0,1 nA—100 mA. «Radio electron.» (Nederl.), 1969, 17e, Deel 1, № 15, 604—606; Deel 2, № 16, 636—640 (1970, 1.32.1112; 1.32.1113)
120. Ольдекоп Л. Г. Преобразователь малых постоянных токов в частоту повторения импульсов. «Труды Союзного НИИ приборостроения», 1970, вып. 13, 54—58 (1971, 6.32.1161)
121. Гореликов Н. И., Касперович А. Н., Корчагин И. Я., Попов Ю. А., Прокопенко В. И. Цифровой измеритель малых то-

- ков. Авт. св. СССР, кл. 42m⁵, 3/00 (G 06 j, 3/00), № 269633, заявл. 3.03.69, опубл. 7.08.70 (1971, 2.32.1640)
122. Münch. G. Geräte und Einrichtungen zum Messen elektrischer Größen. «VDI—Zeitschrift», 1969, 111, № 14, 952—955 (1970, 1.32.981)
123. Digitales Pikoamperemeter. «Elektro—Anz. Ausg. ges. Ind.», 1969, 22, № 2, 442 (1970, 4.32.1215)
124. Борзов В. М., Илюкович А. М. Сравнительный анализ возможных методов построения измерителей малых токов высокой точности с непосредственным отсчетом при помощи средств аналоговой техники. «Труды ВНИИФТРИ», 1970, вып. 1, ч. 1, 95—119 (1971, 3.32.1216)
125. Aszoni A. An electrometric amplifier for measurements with self-powered detectors. «Energ. nucl.» (Ital), 1970, 17, № 12, 733—735 (1971, 7.32.1434)
126. Илюкович А. М. Работы ВНИИФТРИ в области измерения малых токов и больших сопротивлений. «Доклады Научно-технического семинара «Метрология в радиоэлектронике», Тезисы. ч. 1», М., 1970, 36—38 (1970, 8.32.999)
127. Антонова Д. И., Рождественская Т. Б. Методы и средства обеспечения единства измерений малых постоянных токов в диапазоне 10^{-15} — 10^{-10} а. «Измерительная техника», 1970, № 4, 59—63 (1970, 8.32.1121)
128. Борзов В. М., Илюкович А. М. Анализ погрешности источника малых токов с генератором пилообразного напряжения. «Труды ВНИИФТРИ», 1970, вып. 1, ч. 1, 120—139 (1971, 3.32.1218)
129. Борзов В. М., Илюкович А. М. О проверке электрометрических усилителей с предельной чувствительностью по току. «Измерительная техника», 1970, № 12, 61—62 (1971, 6.32.1195)
130. Ladungsverstärker. «Ind.—Anz.», 1970, 92, № 5, 84 (1970, 5.32.1172)
131. Laccioni P. Renucci G. Conversion analogique-nématique de la charge d'un condensateur suivant un mode linéaire ou logarithmique. «Electron. ind.», 1970, № 137, 635—637 (1971, 2.32.1608)
132. Rüti I. Ladungsverstärker, insbesondere für piezoelektrische Meßgeber. Австр. пат. кл. 42k1 (G 011), № 275196, заявл. 2.11.67, опубл. 10.10.69 (1970, 7.32.1294)
133. Drabble J. R., Whyte T. D. The direct current measurement of very high resistance at low temperatures. J. Phys. E. Sci. Instrum., 1970, 3, 515—517 (1970, 12.32.1032)
134. Комин Н. Е., Фратини И. В. Методы и аппаратура для измерения больших удельных сопротивлений твердых диэлектриков. В сб. «Вопросы измерения малых постоянных токов и напряжений», ЦНИИ-ТЭИ Приборостроения, М., 1970, 19—27
135. Corney A. C. Simple medium-precision high resistance measuring device. «Electron. Eng.», 1970, 42, № 510, 46—47 (ЭИ, серия «Контрольно-измерительная техника»), 1970, вып. 43, реф. 291)
136. Илюкович А. М., Карлачук В. И., Куликов В. А. Интегрирующий измеритель больших сопротивлений с цифровым отсчетом. «Труды ВНИИФТРИ», 1970, вып. 1, ч. 2, 109—122
137. Ровенский В. Г., Федоров И. Г., Бойченко Ю. П. Автоматический записывающий тераомметр для дистанционных измерений. — В сб. «Материалы Научно-технической конференции Северо-Кавказского горнометаллургического ин-та, 1968», Орджоникидзе, 1970, 104—105 (1970, 7.32.1126)
138. Antoniu M. Logometru electrostatic. Пат. СРР, кл. 21e 5/04 (G 01 r), № 51903, заявл. 11.05.68, опубл. 23.10.69 (1970, 11.32.1130)
139. High resistance meter. «Research», 1969, 2, № 5, 16 (1970, 3.32.1198)
140. Клибанов Л. И., Павленко Е. С., Чернов А. М. Калибруемый мост постоянного тока для измерения больших сопротивлений. Авт. св. СССР, кл. 21e, 29/02, (G 01 r), № 249472, заявл. 19.02.68, опубл. 18.12.69 (1970, 8.32.1084)

141. Теплинский А. М. Мосты для измерения сопротивлений высокоомных резисторов. — В сб. «Вопросы измерения малых постоянных токов и напряжений», ЦНИИТЭИ Приборостроения, М., 1970, 36—41
142. Tsao S. H. Method and apparatus for measuring high resistances in relation to resistance ratio capacitance and time interval. Пат. США, кл. 324—62, (G 01 г, 27/02), № 3490039, заявл. 29.01.68, опубли. 13.01.70 (1971, 2.32.1587)
143. Рождественская Т. Б., Жутовский В. Л., Антонова Д. И. Тераомметр. Авт. св. СССР, кл. 21е, 29/01, (G 01 г), № 247398, заявл. 8.04.68, опубли. 11.12.69 (1970, 8.32.1073)
144. Rietto A. M. Misure di resistenze con l'elettrometro. «Elettrotecnica», 1970, 57, № 9, 539—541 (1971, 3.32.1156)
145. Бондаренко Л. С. Способ определения удельного поверхностного сопротивления электроизоляционных материалов. Авт. св. СССР, кл. 21е, 29/01, (G 01 г), № 237260, заявл. 17.03.67, опубли. 10.07.69 (1970, 1.32.1029)
146. Mesures de résistivité superficielle et volumique d'échantillons à très forte résistance, Techniques et résultats. «Rev. prat. controleindustr.» 1969, 8, № 39, 24—26 (1970, 4.32.1168)
147. Bush H. D., Fassett J. R. Circuit for measuring sheet resistivity including an a. c. current source and average reading d. c. voltmeter switchably connected to pairs of a four probe array. Пат. США, кл. 324—64, (G 01 г), № 3456186, заявл. 31.10.66, опубли. 15.07.69 (1970, 8.32.1076)
148. Прибор для измерения удельного сопротивления полупроводников «Рометр». — В сб. «Уникальные приборы», № 4, М., 1970, 41—42 (1970, 12.32.1036)
149. Sessler G. M. Method of measuring the volume resistivity of thin, solid dielectric material utilizing the decay rates of a number of measured decay intervals. Пат. США, кл. 324—62, (G 01 г, 27/02), № 3496461, заявл. 25.05.67, опубли. 17.02.70 (1970, 3.32.1146)
150. Дзюбенко И. В. Методы измерения электрических параметров диэлектриков на инфранизких частотах. «Измерительная техника», 1970, № 10, 44—47 (1971, 1.32.980)
151. Дзюбенко И. В. Мостовая установка для измерения параметров диэлектриков на инфранизких частотах. «Труды ВНИИФТРИ», 1970, вып. 1, ч. 2, 138—155
152. Blouet J., Elnékavé N., Knosp R. Le département de metrologie électrique du L. C. I. E. «Rev. genelectr.», 1969, 78, № 9, 845—847, VI, VII, VIII (1970, 3.32.1111)
153. Кибенко В. Д., Краснов А. К., Мирошниченко В. С., Павленко Е. С., Чернов А. М. Новые меры большого сопротивления. — В сб. «Вопросы измерения малых постоянных токов и напряжений», ЦНИИТЭИ Приборостроения, М., 1970, 28—35
154. Кибенко В. Д., Краснов А. К., Мирошниченко В. С., Павленко Е. С., Чернов А. М. Новые принципы построения мер для воспроизведения и передачи верных значений электрического сопротивления свыше 10^9 ом. «Труды ВНИИФТРИ», 1970, вып. 1, ч. 2, 123—137 (1971, 3.32.1157)
155. Жутовский В. Л. Образцовые меры большого электрического сопротивления. «Измерительная техника», 1971, № 1, 42—44 (1971, 7.32.1195)
156. Sauer H. A. Wye-delta transfer standards for calibration of wide range dc resistance and dc conductance bridges. «IEEE Trans. Instrum. and Measur.», 1968, 17, № 2, 151—155 (1970, 3.32.1134)
157. Дзюбенко И. В., Илюкович А. М. Имитатор больших сопротивлений для поверки тераомметров. «Измерительная техника», 1969, № 11, 27—28 (1970, 2.32.1125)

158. Рождественская Т. Б., Жутовский В. Л. Мера электрического сопротивления. Авт. св. СССР, кл. 21e, 29/01 (G 01 r), № 248064, заявл. 15.04.68, опубл. 17.12.69 (1970, 8.32.1001)
159. Чернов А. М., Мирошниченко В. С., Краснов А. К. Имитатор электрического сопротивления. Авт. св. СССР, кл. 21e, 26, (G 01 r), № 241523, заявл. 18.12.67, опубл. 19.09.69 (1970, 8.32.1072)
160. Рождественская Т. Б., Жутовский В. Л., Антонова Д. И. О применении «эквивалентных цепей» для поверки мегомметров и тераомметров. «Измерительная техника», 1970, № 5, 83—87 (1970, 10.32.1088)
161. Дзюбенко И. В., Илюкович А. М. Резистивный источник весьма малых постоянных токов с большим внутренним сопротивлением. «Измерительная техника», 1971, № 1, 46—48 (1971, 7.32.1299)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появление новых отраслей науки и техники, совершенствование технологии, развитие всех отраслей народного хозяйства, рост объемов производства вызывают не только резкое увеличение потребности в измерительных средствах, но и повышение требований к их точности и производительности.

Решение этих задач связано с разработкой новых методов и средств измерения, основанных на последних достижениях науки, на использовании новых физических принципов, на применении электроники и вычислительной техники для автоматизации процессов измерения, обработки их результатов и управления процессами и машинами на основе полученной от измерительных средств информации.

В обзорах, составляющих настоящий сборник, на основе обработки литературных источников, список которых приведен в конце каждого обзора, показаны те направления, по которым идет развитие отдельных областей измерений.

В обзоре, посвященном динамическим измерениям физических величин, т. е. измерениям этих величин в процессе их изменения во времени, показано, что такие измерения в настоящее время приобретают все большее значение, области их применения все расширяются, в связи с чем измерения приходится выполнять в очень различных условиях. Это вызвало необходимость в новых измерительных преобразователях. В обзоре показано, что проведенные в последние годы исследования и разработки еще не получили достаточного практического внедрения и это является одной из актуальных задач на ближайшие годы.

Большое значение получает автоматизация процессов измерений и обработки их результатов, особенно при измерениях на труднодоступных объектах при сложной программе и при большом числе однотипных измерений. Показано значение применения для динамических измерений современных

автоматических анализаторов спектра и корреляторов. Рассмотрены пути решения одной из самых острых проблем в области динамических измерений — проблемы метрологического обеспечения точности измерений.

Для выполнения одной из основных задач, стоящих перед отечественным машиностроением, — повышения качества продукции наиболее эффективными методами, и для наиболее рационального использования современного металлообрабатывающего оборудования — необходимо скорейшее внедрение наиболее прогрессивных средств измерения размеров — лазерных приборов и координатных измерительных машин, а также всемерное использование преимуществ, которые дает применение для размерного контроля вычислительной техники.

Обзор применения этих средств в зарубежном машиностроении показал их техническую и экономическую эффективность и большие перспективы, которые открывает их использование в отечественной промышленности. Они позволяют повысить точность и расширить пределы высокоточных измерений, а также автоматизировать процессы измерений не только в массовом и крупносерийном производстве, но и в мелкосерийном и индивидуальном.

Для повышения точности и производительности анализов в лабораторных и промышленных условиях в настоящее время все шире применяются совмещенные установки, в том числе состоящие из хроматографа, масс-спектрометра, используемого в качестве детектора, и вычислительной машины. В обзоре, основанном на материалах, опубликованных в Реферативном журнале «Метрология и измерительная техника за 1969—1971 гг., и в частности на трудах Международного симпозиума по газовой хроматографии 1969 г., показана перспективность и эффективность применения таких установок.

В обзоре современного состояния и тенденций развития расходомерии описаны проведенные в последние годы теоретические и экспериментальные исследования, разработанные конструкции и схемы расходомерных устройств, а также рассмотрены вопросы градуировки и поверки приборов. Широкая область применения расходомеров, все более усложняющиеся условия измерений, повышение требований к их точности привели к необходимости создания методов и средств, основанных на новых физических принципах измерения. В обзоре показаны достижения в области электромагнитных, лазерных, ультразвуковых, ядерно-резонансных, корреляционных расходомеров, области наиболее эффективного применения каждого из этих видов приборов, а также методы и средства метрологического обеспечения их точности.

Анализ тенденций развития расходомерии выполнен в основном по материалам 1968—1971 гг., однако при рассмот-

рении развития электромагнитных расходомеров пришлось обратиться также к некоторым более ранним работам, так как теоретические и экспериментальные исследования, на которых основаны практические разработки последних лет, относятся к 1965—1967 гг.

При рассмотрении современного состояния и тенденций развития электрометрии дан обзор области применения электрометрической аппаратуры, описаны методы электрометрии, указаны требования, предъявляемые к измерительной аппаратуре, принципы ее построения, свойства элементов и материалов, влияющие на метрологические и эксплуатационные характеристики, приведены методы расчета элементов и схем, а также методы поверки измерительной аппаратуры. Показано многообразие областей использования электрометрической аппаратуры, предопределяющее широкий диапазон требований к ней, и ограничения чувствительности электрометрических методов, связанные с шумами исследуемых объектов и уровнем помех самой аппаратуры. Рассмотрены источники помех и пути снижения их влияния.

В обзоре показано, какими путями достигается возможность измерения напряжений на уровне десятков микровольт от источников с внутренним сопротивлением до 10^{12} — 10^{14} ом, токов порядка 10^{-17} а, зарядов до 10^{-16} к, а также сопротивлений до 10^{17} — 10^{18} ом.

Все обзоры выпуска основаны на многочисленных источниках и в них с максимальной полнотой отражены те направления и тенденции, которые могут способствовать решению задачи ускорения научно-технического прогресса, поставленной XXIV съездом КПСС.

Опечатки к Итогам науки и техники «Метрология и измерительная техника». Том 2

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
24	14 сверху	приборов, имеющего шкалу	приборов: имеющего шкалу
43	11 снизу	скорость счета 18 м/мин	скорость перемещения отражателя 18 м/мин
43	16 снизу	0,001 мм, для метрологических работ 0,0001 мм	0,0001 мм, для метрологических работ 0,00001 мм
44	24 сверху	углу 1''	углу 1''
62	15 снизу	на 25,4 мкм	на 25,4 мм
125—126	1 снизу	монохромический	монохроматический
175	19 снизу	во втором	во второй

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
<i>П. Н. Агалецкий.</i> Динамические измерения механических величин	7
Введение	7
Методы и средства динамических измерений	8
Использованная литература	27
<i>М. И. Меклер.</i> Современные средства линейных измерений в зарубежном машиностроении	30
Введение	30
1. Лазерные приборы	31
2. Координатные измерительные машины	50
3. Применение вычислительных машин в размерном контроле	64
Использованная литература	66
<i>В. С. Краснова.</i> Совмещение хроматографов с масс-спектрометрами и вычислительными машинами	71
Использованная литература	79
<i>С. С. Кивилис.</i> Тенденции развития расходомерии	84
Введение	84
Глава I. Контактная расходомерия	85
1. Расходомеры переменного перепада давления	85
2. Расходомеры постоянного перепада давления	87
3. Турбинные расходомеры	89
Глава II. Неконтактная расходомерия	90
1. Электромагнитные расходомеры	90
Теоретические и экспериментальные исследования	91
Разработка новых схем	97
Усовершенствование конструкций	103
Градуйровка и поверка	108
2. Ультразвуковые расходомеры	110
Теоретические и экспериментальные исследования [166—172]	110
Разработка новых схем	111
Усовершенствование конструкций	118
Градуйровка и поверка	119
3. Ядерно-резонансные расходомеры	119
4. Лазерные расходомеры	123
5. Корреляционные расходомеры	128
Глава III. Методы и средства градуировки и поверки расходомеров	130
1. Образцовые жидкостные установки	130
2. Образцовые газовые установки	132
Использованная литература	133
<i>А. М. Илюкович.</i> Электрометрия. Состояние и тенденции развития	147
Введение	147
1. Общие сведения об электрометрических усилителях	149
2. Элементы электрометрической аппаратуры	153
3. Типы электрометрических усилителей	157
4. Электрометрические измерители напряжений	164
5. Измерители малых токов	167
6. Измерители малых зарядов	173
7. Измерители больших сопротивлений	174
8. Особенности производства электрометрической аппаратуры	179
Использованная литература	179
Заключение	188

УДК 531.767/775+534.647

Агалецкий П. Н. «Динамические измерения механических величин» «Метрология и измерительная техника» (Итоги науки и техники) М., 1972, 8—44, Библ. 40.

Дан обзор современного состояния техники измерения параметров движения и механических колебаний, а также метрологического обеспечения этих измерений. Обзор выполнен по материалам 1968—1971 гг.

УДК 531.714:621.375.826

Меклер М. И. «Современные средства линейных измерений в зарубежном машиностроении». «Метрология и измерительная техника» (Итоги науки и техники) М., 1972, 45—110. Библ. 86.

Рассмотрено современное состояние и перспективы развития лазерных приборов для линейных измерений и координатных измерительных машин, а также примеры использования вычислительных машин для размерного контроля. Обзор выполнен по материалам 1969—1971 гг.

УДК 543.51+543.544+681.3

Краснова В. С. «Совмещение хроматографов с масс-спектрометрами и вычислительными машинами». «Метрология и измерительная техника» (Итоги науки и техники) М., 1972, 111—132. Библ. 73.

Рассматриваются комплексные агрегаты, которые начинают все шире применяться для анализа в лабораторных и промышленных условиях. В обзоре использованы материалы 1969—1971 гг.

УДК 532.57.08+533.57.08:681.121

Кивилис С. С. «Тенденции развития расходомерии». «Метрология и измерительная техника» (Итоги науки и техники) М., 1972, 133—242. Библ. 299.

Дан обзор современного состояния и тенденций развития расходомерных приборов и сужающих устройств. Основное внимание уделено приборам, в которых использованы новые для расходомерии физические принципы. Обзор составлен по материалам 1968—1971 гг. (по электромагнитным расходомерам приведены некоторые данные начиная с 1966 г.).

УДК 621.317.723

Илюкович А. М. «Электрометрия. Состояние и тенденции развития». «Метрология и измерительная техника» (Итоги науки и техники) М., 1972, 243—308. Библ. 161.

Дан обзор достижений в области электрометрии с указанием числовых значений характеристик, факторов, влияющих на эти характеристики, и пути преодоления имеющихся трудностей. Обзор выполнен по материалам 1969—1971 гг.

Технический редактор Л. А. Белова

Подписано в печать Т-10719 от 6/VII-1972 г.

Формат бумаги 60×90¹/₁₆

Печ. л. 12,0

Уч.-изд. л. 13,03

Цена 1 р. 54 к.

Тираж 1500 экз

Заказ 1439

Производственно-издательский комбинат ВИНТИ, Люберцы,
Октябрьский проспект 403

