

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

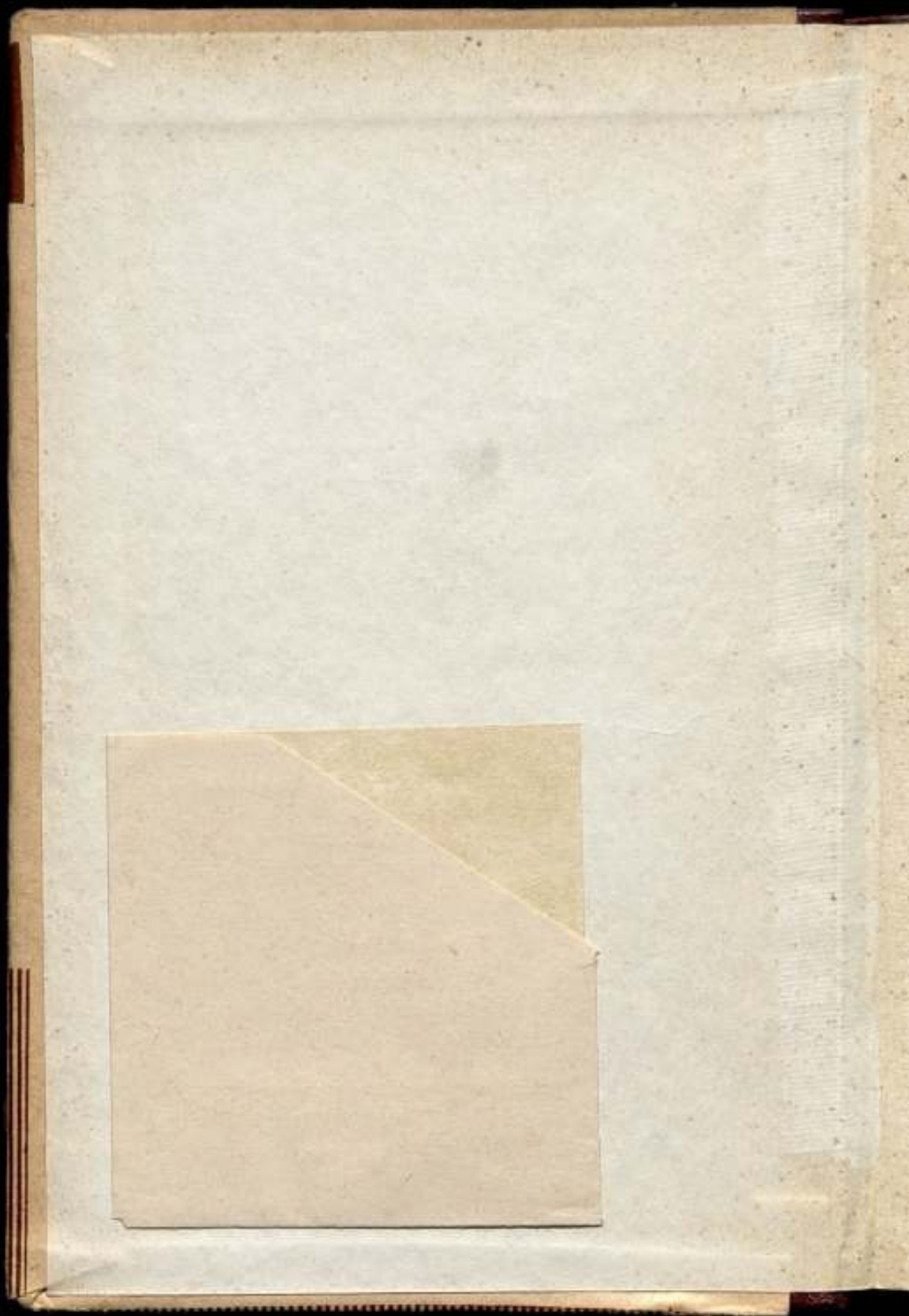
Справ.

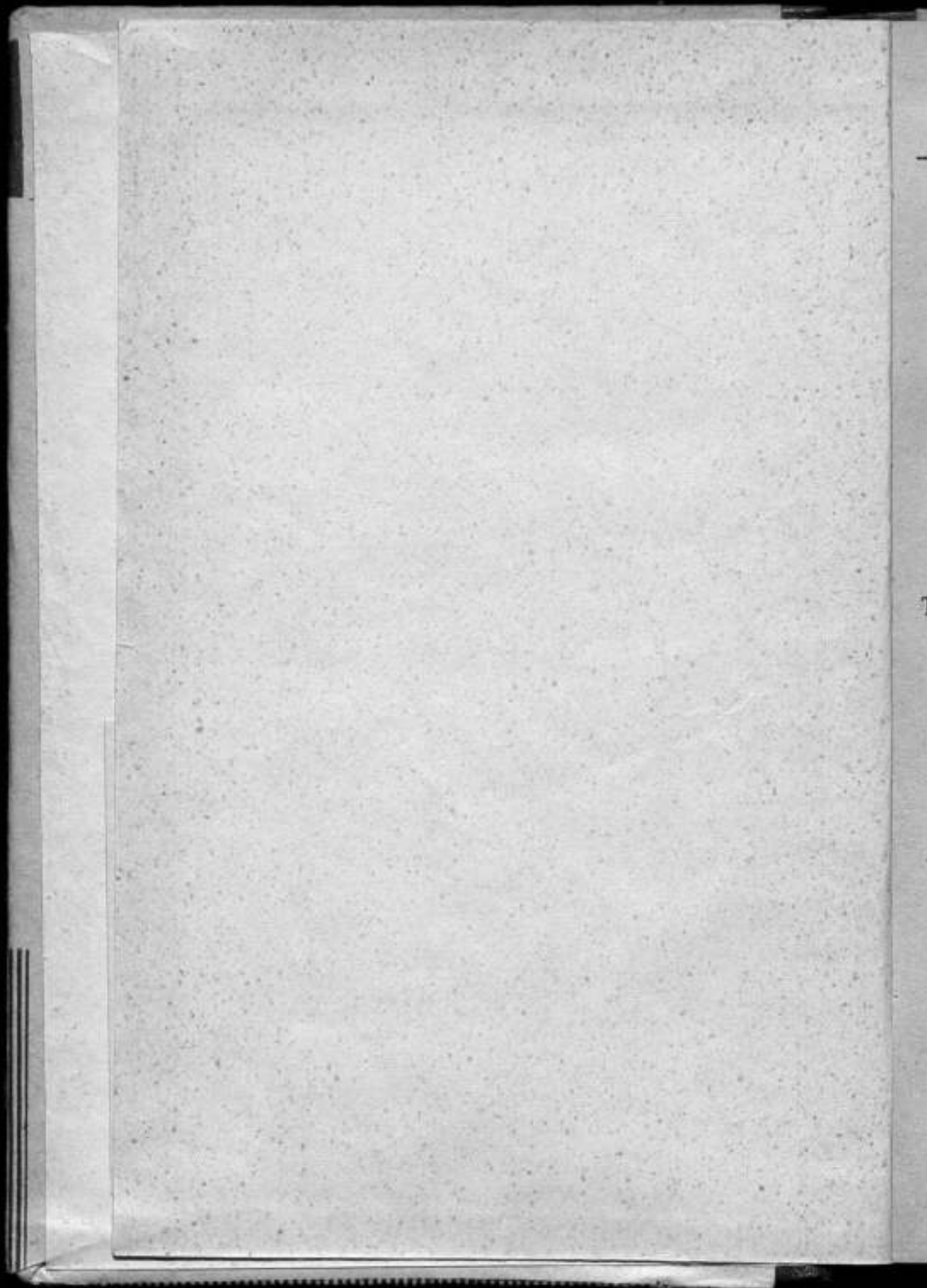
ОБЩИЕ
ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

ВЫПУСК 130 (190)







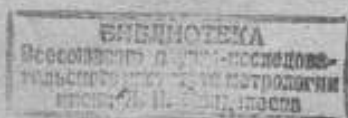
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

ВЫПУСК 130 (190)

Под редакцией
проф. К. П. ШИРОКОВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

1972

м/5553
2/

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

В. О. Арутюнов (председатель), Н. Н. Александрова (секретарь), С. В. Горбачевич, А. Н. Гордов, П. Г. Горюнов, Е. Ф. Долинский, А. И. Карташев, Л. К. Каяк, И. И. Киренков, Д. К. Коллеров, П. П. Кремлевский, И. Н. Кротков, В. Л. Лассан, Б. Н. Олейник (зам. председателя), Л. К. Пеккер, Т. Б. Рождественская, А. М. Федорова, Е. Н. Чечурина, К. П. Широков, Е. Г. Шрамков, М. Ф. Юдин

Ответственный редактор
доктор технических наук профессор
В. О. АРУТЮНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для современной метрологии характерно быстрое расширение «сферы влияния» — развитие новых областей измерений, создание новых высокоточных средств измерений на основе использования последних открытий физики, общий рост парка измерительных приборов. Все это стимулирует развитие отраслей метрологии, обслуживающих отдельные области измерений. Наряду с постоянным совершенствованием измерений в классических диапазонах и условиях, наблюдается проникновение их в области сверхвысоких и особо низких давлений, температур, частот, энергий. Обеспечение единства измерений требует создания новых эталонов, разработки поверочных схем, методов и средств поверки.

Но помимо конкретных разработок экспериментального характера, растет потребность в обобщении опыта отдельных областей измерений, в унификации терминологии, правил, методов обработки результатов наблюдений, определении фундаментальных физических констант, используемых для воспроизведения единиц, разработке общих принципов автоматизации измерений и передачи размеров единиц, привлечении к метрологическим работам средств вычислительной техники. Для обеспечения дальнейшего быстрого развития метрологии необходима разработка общей теории измерений как теоретической ее базы, включая анализ элементов измерения и разработку теории физических величин, принципов построения и совершенствования систем единиц, путей оптимизации выбора методов и средств измерений, способов оценивания их точности, теории эталонов, поверочных схем и др.

Для публикации исследований по указанным выше вопросам общего характера намечен выпуск сборников трудов метрологических институтов по общим вопросам метрологии, охватывающих более широкую тематику по сравнению с выпущенным ранее сборником «Исследования по методике оценки погрешностей измерений» (вып. 57 (117), 1962). Статьи, помещенные в настоящем сборнике, сгруппированы в четырех разделах: основные понятия; определение физических констант; погрешности измерений; средства автоматки и вычислительной техники в метрологических исследованиях.

В разделе «Основные понятия» помещены четыре статьи. Три из них (две — К. П. Широкова и одна — М. Н. Селиванова) представляют собой опыт анализа содержания и отличительных признаков основных понятий метрологии: измерение, наблюдение, физическая величина, единица, средства измерений, метод измерений, значение физической величины и некоторых производных от них понятий. В статьях даются обоснования определений понятий, включенных в новый государственный стандарт «Метрология. Термины и определения» (ГОСТ 16263—70), и обсуждаются вопросы правильного применения принятых терминов. В четвертой статье (К. П. Широкова) освещено состояние международной стандартизации единиц и публикуется перевод последней рекомендации ИСО R 1000/1969.

Раздел «Определение физических констант» состоит из трех статей, отражающих тематику работ лаборатории физических проблем метрологии ВНИИМ. В статье С. В. Горбачевича и В. М. Холина подведены итоги большого числа работ по определению физических констант (за последние 60 лет). В статье С. В. Горбачевича, В. В. Жукова, К. А. Краснова и В. С. Тунинского рассмотрены возможности применения эффектов Джозефсона (на постоянном и переменном токе) как для целей определения с повышенной точностью других физических констант, так и для контроля неизменности эталона вольта и создания новых средств измерений. В статье В. Н. Носаля приведен обзор и сделана сравнительная оценка результатов работ по определению отношения магнитного момента протона к магнетону Бора. В работе приведено наиболее достоверное значение этого отношения.

В раздел «Погрешности измерений» включено три статьи, затрагивающие существенные вопросы методов оценивания погрешностей. В первой из них, авторами которой являются А. Н. Гордов, В. С. Пеллинец и А. Е. Синельников, рассматриваются погрешности многозвенных измерительных систем и их параметры, при нормировании которых возможно найти условную характеристику точности средств измерений.

Авторы второй статьи — Л. К. Исаев и А. И. Механников — рассматривают процесс изменения погрешности прибора после его поверки и предлагают ввести дополнительные метрологические параметры, позволяющие оценить доверительные границы для этой погрешности.

Наконец, в статье И. П. Демакова и В. Е. Потепуна кратко излагается предлагаемый метод построения функции распределения случайной величины по малому числу наблюдений, основанный на использовании априорной информации о виде распределения и апостериорной информации, заключенной в единичных наблюдениях.

Последний раздел сборника посвящен повому и только еще развивающемуся направлению метрологии — автоматизации поверочных и измерительных операций и применению в них средств

вычислительной техники. В статье В. О. Арутюнова, А. Я. Безикович и Г. П. Зедгинидзе формулируются первоочередные проблемы в этой области, от решения которых следует ожидать значительного повышения эффективности метрологических исследований.

Обзор достигнутого к настоящему времени состояния и уровня работ по автоматизации метрологических операций как в СССР, так и за границей сделан в статье А. Я. Безикович, Ю. Н. Шестопалова и С. П. Эскина. Авторы кроме того намечают перспективные направления работ по автоматизации.

В следующей статье, принадлежащей А. Я. Безикович, Д. И. Зорину, Ю. Н. Шестопалову и С. П. Эскину, рассмотрены виды методов поверки и намечена обобщенная структурная схема соответствующих автоматических установок, а также перечень модулей с заданными метрологическими параметрами для компоновки таких установок.

Статья А. Я. Безикович, Д. И. Зорина и С. П. Эскина содержит доказательство адекватности поверки приборов как в статическом, так и в динамическом режиме (т. е. при безостановочном движении указателя).

В последней статье, посвященной автоматизации поверочных операций (авторы — А. Я. Безикович и В. И. Прицкер), приведена классификация оптико-электронных преобразователей, применяемых для автоматического отсчитывания показаний приборов, и дан анализ погрешностей отдельных элементов таких устройств.

Наконец, в статье Б. В. Васильева рассмотрены погрешности округления результатов арифметических операций, выполняемых на ЭЦВМ при обработке данных наблюдений, и рекомендованы способы округления, вносящие в результат погрешность с пренебрежимо малым математическим ожиданием.

Публикуя настоящий сборник, редакция надеется, что помещенные в нем материалы представят интерес не только для специалистов в представленных в сборнике областях, но и для более широкого круга метрологов и приборостроителей. Одновременно с настоящим сборником в отдельном выпуске публикуется рекомендация по методике обработки результатов многократных наблюдений при прямых измерениях, сопровождаемая статьей Ж. Ф. Кудряшовой, С. Г. Рабиновича и К. А. Резника. Статья и рекомендация выделены в отдельный выпуск как в связи с их большим объемом, так и для удобства практического использования.

В заключение следует отметить, что в настоящем сборнике применяются обозначения единиц, принятые в окончательной редакции проекта государственного стандарта «Единицы физических величин», разработанного ВНИИМ и рекомендованного Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР для практического применения («Измерительная техника», 1970 г. № 2).

Редактор

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

УДК 389.00.11

К. П. ШИРОКОВ
ВНИИМ

ОБ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЯХ МЕТРОЛОГИИ

Под измерениями в науке понимают способ количественного познания свойств физических объектов, рассматриваемых в самом широком смысле как физические системы и происходящие в них явления. Путем измерений могут быть познаны свойства конкретных объектов, а путем обобщения накопленных данных — физические законы, которым подчиняются явления реального мира.

Связывающим звеном между объективно существующим свойством и познанием его, или отражением этого свойства в сознании человека, служат средства измерений, т. е. технические средства, позволяющие получить объективную количественную информацию о данном свойстве. При измерениях эти средства приводят во взаимодействие с материальным объектом, причем применяют метод, позволяющий получить информацию об измеряемом свойстве с требуемой точностью.

Без измерений невозможно развитие естественных наук, т. е. наук, ставящих своей целью изучение природы. Измерения необходимы и при создании человеком искусственных физических систем, служащих для удовлетворения его потребностей (орудий производства, средств потребления, всякого рода сооружений и т. п.), т. е. в технических и других прикладных науках, а также в производстве.

С развитием науки и техники измерения все усложняются, требуемая точность их все более повышается. Если на заре развития материальной культуры людей удовлетворяли самые простые и грубые измерения, а иногда даже только субъективная оценка, то в наш век изучения космоса и углубления знаний о микромире требования к точности чрезвычайно повысились, стали необходимы самые сложные косвенные измерения. Это привело к развитию приборостроения и разделению измерительной техники на отдельные отрасли. Единство измерений, т. е. сопоставимость результатов измерений, выполненных в разных местах,

в разное время, разными приборами, стало насущной потребностью общества, а стремление к достижению единства поставило в свою очередь задачу повышения точности воспроизведения и хранения единиц, в которых проградуированы приборы. Это определило развитие метрологии — науки об измерениях и обеспечении их единства. В ряде государств были созданы специальные научные и технико-административные органы, возникла необходимость в унификации как единиц, так и эталонов для их воспроизведения и хранения, была заключена Метрическая конвенция и создан международный метрологический центр — Международное бюро мер и весов, хранящий международные эталоны некоторых важнейших единиц.

В целом метрология развивалась и усложнялась, выросли контингенты и квалификация метрологов, увеличился объем и глубина метрологических исследований и публикаций о них. Литература по метрологии в настоящее время насчитывает большое число монографий и курсов как по общим вопросам, так и по отдельным отраслям измерений. Издается ряд специальных журналов, в том числе международный журнал «Metrologia», много статей по вопросам метрологии публикуется в физических и отраслевых технических журналах.

Из общих теоретических вопросов, освещаемых в публикуемой литературе, основное место занимает теория погрешностей измерений, нет недостатка в литературе по единицам и эталонам, по новым видам и свойствам методов и средств измерений. Однако странным образом метрологи до сего времени почти не занимались общей теорией измерений. До сих пор не очерчены как предмет теории измерений, так и круг и взаимосвязь основных понятий, слабо разработана классификация и теория отдельных категорий понятий, не решен вопрос о способах нахождения однозначной оценки точности измерений, о выборе оптимального метода измерений, о соотношении точностей при передаче размеров единиц и т. п. Все эти вопросы ждут своего освещения и решения.

Настоящая статья имеет целью рассмотреть основные понятия метрологии, которые, насколько известно автору, до сих пор в подобном аспекте в отечественной метрологической литературе не освещались. Следует отметить, что за последние годы вопросам теории измерений уделяется все больше внимания со стороны физиков, философов, психологов, математиков. Автор не имеет в виду дать обзор литературы по этому вопросу. Можно лишь упомянуть работы Нильса Бора [1] и других физиков так называемой копенгагенской школы, А. Эйнштейна [2], С. И. Вавилова [3], В. А. Фока [4, 5] и др. Философы также уделяют внимание измерениям как одному из способов познания материального мира [6]. За рубежом, начиная с Кэмпбелла [7], издан ряд работ, рассматривающих измерения в психологическом или математическом аспектах [8, 9].

Идеи, излагаемые в упомянутых выше работах, представляют большой интерес для метрологов, однако последние едва ли най-

дут в них ответы на многие вопросы, рассматриваемые в метрологии. Метрологи сами должны заняться теорией измерений и развивать ее в соответствии со своими запросами, используя все полезные для метрологии положения, установленные в смежных науках.

Обращаясь непосредственно к теме статьи, следует прежде всего определить те исходные положения, которые позволили бы сформулировать соотношения между основными понятиями метрологии, соответствующие современным взглядам, принятым в физике и в материалистической философии.

В. И. Ленин в труде «Материализм и эмпириокритицизм» говорит, что материя есть «...объективная реальность, существующая независимо от человеческого сознания и отображаемая им». Он указывает, что «в мире нет ничего, кроме движущейся материи, и движущаяся материя не может двигаться иначе, как в пространстве и во времени». Анализируя вопрос, можно ли дать определения материи и сознанию, он приходит к выводу, что «...нельзя дать иного определения двух последних понятий гносеологии, кроме как указания на то, которое из них берется за первичное», и уточняет: «Материализм в полном согласии с естествознанием берет за первичное данное материя, считая вторичным сознание, мышление, ощущение, ибо в ясно выраженной форме ощущение связано только с высшими формами материи (органическая материя)» [10].

Всякое измерение есть познание свойств того или иного материального объекта, и единственно правильный метод анализа понятия «измерение» заключается в выяснении отношений между его элементами на основе приведенных выше положений материалистической философии.

В своих работах Н. Бор ввел различие между двумя способами описания явлений природы. Первый из них, применяемый в классической физике, получил название классического способа описания (КСО), и второй, названный Бором концепцией дополнительности, стал необходим с появлением квантовой теории и квантовой механики; его иногда называют дополнительным способом описания (ДСО). С развитием квантовой теории и атомной физики КСО не потерял своего значения. Результаты экспериментальных наблюдений и измерений могут быть непосредственно восприняты человеком только в том случае, если эти наблюдения и измерения ведутся с помощью макроскопических установок и приборов, подчиняющихся классическим законам. ДСО же необходим для объяснения и выражения тех «отклонений от привычных принципов описания природы, которые характерны для новейшего развития физики» [1]. Таким образом, в метрологии мы можем пользоваться КСО и принять основные постулаты, определения и следствия, которыми пользовалась и пользуется классическая физика.

При изложении основных положений КСО воспользуемся ходом рассуждений, указанным в работе [11], но внесем в них изме-

нения, вытекающие из метрологической направленности настоящей статьи.

Существуют различные физические объекты (физические системы). Они обладают разнообразными физическими свойствами. До тех пор, пока объект не стал предметом изучения человеком, это — естественный объект, взаимодействие которого с другими объектами определяется его естественными свойствами. Став предметом изучения, естественный объект превращается в объект познания [12]. Количество свойств естественного объекта, вообще говоря, неограниченно. Человек в своем стремлении познавать объекты познания выделяет некоторое ограниченное количество свойств, общих в качественном отношении ряду объектов, но индивидуальных для каждого из них в количественном отношении. Такие свойства получили название физических величин. Введение их в физику обусловило формирование ее как точной науки, так как появилась возможность устанавливать на основании измерений точные соотношения между величинами, ввести систему символов и строить физические теории с использованием достижений математики.

Естественные объекты и их свойства существуют реально, т. е. вне сознания человека. Становясь объектом познания, естественный объект не перестает быть реальностью, но, помимо этого, его свойства отражаются в сознании человека. Можно, таким образом, различать три категории понятий: а) реальность, не изучаемая человеком (естественные объекты), б) реальность, отражаемая в сознании человека (объекты познания), и в) отражение реальности в сознании (знания об объектах).

В процессе познания человек имеет дело с объектами познания, измеряя их свойства, названные им физическими величинами. В результате измерений он получает знания об объектах в виде значений физических величин. Таким образом, можно сказать, что физические величины являются реальными свойствами объектов познания, изменяющимися и исчезающими вместе с объектом, но вместе с тем отражаемыми в сознании, а значения физических величин — это только отражение этих свойств в сознании, которое может сохраняться, даже если объект перестал быть реальной действительностью или еще не стал ею.

Мы подробно рассматриваем принадлежность понятий метрологии к категориям реального или отраженного, так как это позволяет определить исходные позиции для выяснения связей между элементами измерения и построения научно обоснованных определений этих понятий. Следует также отметить, что понятие «физическая величина» является одним из важнейших в метрологии. Этот термин можно распространить на свойства, изучаемые не только в физике, но и в других науках (в химии, биологии и др.) при условии, что они могут быть измерены физическими методами.

Физические величины различаются в качественном и количественном отношении. Качественная сторона свойства определяет

«вид величины», а количественная — ее «размер». Однако термин «вид величины» не получил распространения вследствие того, что термин «физическая величина» можно применять как в общем смысле для указания свойства, общего в качественном отношении многим физическим объектам (например, длина вообще), так и в конкретном смысле для указания свойства, индивидуального в количественном отношении для каждого объекта (например, длина этого стола). Такое положение не следует рассматривать как допущение двусмысленности термина, оно является языковой нормой (например слово «мера» означает вид средства измерений, в то же время оно приложимо и к конкретному предмету: «эта мера»).

Индивидуальность величины в количественном отношении следует понимать в том смысле, что данное свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого.

Несколько отвлекаясь от темы, следует заметить, что часто термин «величина» применяют для выражения только количественной стороны свойства, когда пишут, например, «величина массы», «величина давления», «величина силы» и т. д. Такое употребление термина «величина» нельзя считать правильным, лучше в таких случаях пользоваться термином «размер», например, «эта масса по размеру больше той». При пользовании термином «размер величины» не следует впадать в другую крайность и придавать ему самостоятельное значение, заменяя им основной термин «величина» и говоря, например, «измерить размер массы». Следует помнить, что размер величины отражает только количественную сторону, отвлеченную от качества, измерять же можно свойство, имеющее и качественную и количественную стороны. Отвлечь свойство от его качества при измерении невозможно, так как от качества зависит выбор принципа и средств измерений и характер их взаимодействия с объектом.

В приложении к статье приведены определения рассматриваемых в ней понятий в соответствии с ГОСТ 16263—70 «Метрология. Термины и определения».

Вернемся теперь к изложению основных положений КСО.

Физические величины, свойственные данному объекту, могут быть постоянными во времени или переменными (изменяющимися). Для каждого момента времени каждая из величин X_i может иметь только один размер. Физические объекты различают по постоянным (или весьма медленно изменяющимся) величинам. Каждый объект может находиться в том или ином состоянии, характеризуемом размерами некоторой группы переменных величин. Если размер каждой из переменных величин этой группы в момент времени t_2 равен размеру в момент t_1 , то состояния объекта в моменты t_2 и t_1 считаются тождественными. Состояния считаются различными, если хотя бы одна переменная величина претерпела изменение. Переход из одного состояния в другое называется процессом (процессом изменения состояния).

Важным элементом КСО, допускающего непрерывность физических величин и зависимостей между ними, является концепция механистического детерминизма (механистической причинности), согласно которой размеры величин, характеризующих данную изолированную физическую систему в момент времени t_0 , однозначно определяют размеры этих величин в любой другой момент t_1 , так как их связь и зависимость от времени могут быть описаны системой дифференциальных уравнений.

Если система не изолирована, т. е. находится во взаимодействии с другими системами (объектами), то изменение ее состояния будет обусловлено также этим взаимодействием, и оно должно быть учтено для предсказания поведения системы.

Приведенные выше вкратце положения тесно связаны с принципом абсолютной объективности описания, согласно которому можно говорить о познании поведения объектов и их свойств «самих по себе», т. е. какими они были бы, если бы не производились наблюдения и измерения.

В своем стремлении познать и использовать физические объекты человек изучает их свойства. Объективные результаты изучения этих свойств возможно получить только производя измерения соответствующих величин. Какое определение следует дать понятию измерения и каковы его главные признаки? В задаче статьи не входит анализ различных вариантов определения понятия измерения, изложенных в свое время на страницах журнала «Измерительная техника» и достаточно обстоятельно освещенных О. А. Мельниковым [13]. В новый стандарт «Метрология. Термины и определения» включено самое общее определение, охватывающее все виды и аспекты измерений. В принятом определении (см. приложение) отражены четыре идеи:

- а) измерять можно реально существующие свойства объектов познания, т. е. физические величины;
- б) измерения требуют проведения опытов, без которых нельзя получить знания о свойствах объекта; это значит, что чисто теоретические рассуждения или расчеты не могут заменить эксперимент;
- в) для проведения опытов требуются особые технические средства (средства измерений), носители принятых единиц, без которых нельзя придать результату объективность;
- г) результатом измерений является значение физической величины, т. е. произведение числа на единицу этой величины.

При измерениях средства измерений приводят во взаимодействие с объектом с целью получения информации о его свойствах. В простейшем случае прямых измерений информацию о свойстве получают непосредственно из опытных данных, т. е. когда данное средство и принцип измерений позволяют получить оценку искомого свойства (например измерение массы с помощью циферблатных весов или температуры термометром). В случае косвенных измерений прямым измерениям подвергают величины, связанные с интересующей величиной известной зависимостью, на осно-

вании которой и находят искомое значение. Примером косвенного измерения может служить нахождение плотности однородного тела по его массе и геометрическим размерам. К совокупным измерениям относят производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин (т. е. одноименных свойств нескольких объектов), при которых их значения находят путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях различных сочетаний этих величин. Как на пример совокупных измерений можно указать на измерения, при которых значения массы отдельных гирь набора находят по известной массе одной из них и по результатам прямого сравнения масс различных сочетаний гирь.

Наконец, совместные измерения — это производимые одновременно измерения двух или нескольких неодновременных величин (например величин, характеризующих состояние и свойства объекта) с целью определения зависимости между ними. Примером могут служить измерения, при которых по данным прямых измерений электрического сопротивления измерительного резистора (катушки электрического сопротивления) при различных температурах определяют его сопротивление при температуре 20°C и температурные коэффициенты сопротивления, т. е., по существу, зависимость сопротивления резистора от температуры.

Взаимодействие средств измерений с объектом основано на физических явлениях, совокупность которых составляет принцип измерений, а совокупность приемов использования принципа и средств измерений называется методом измерений.

Обратимся теперь к средствам измерений и их видам. По своей философской категории средства измерений относятся к объектам познания, так как с одной стороны, они принадлежат к материальному миру, но, с другой стороны, не созданы самой природой, а являются результатом целенаправленной деятельности человека. В них тем или иным способом материализована единица, принятая для данной физической величины, и они являются орудием познания свойств объектов материального мира. Важным отличительным признаком средств измерений является то, что их погрешности и другие метрологические свойства нормированы, благодаря чему при надлежащем их выборе и применении может быть оценена точность получаемых результатов. Этот признак позволяет провести границу между средствами измерений и средствами обнаружения величин (иногда называемыми индикаторами).

К главнейшим видам средств измерений относятся меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные установки и измерительные системы. Некоторые авторы относят измерительные приборы и измерительные преобразователи к особой категории, именуемой измерительными устройствами, хотя это искусственно ограничивает применимость термина «устройство».

Отличительным признаком мер является то, что они предназначены для воспроизведения (материализации) физических вели-

чин заданного размера. Не все величины удобно воспроизводить, в частности, некоторые величины, характеризующие состояние объектов или процессы, происходящие в физических системах, трудно или нецелесообразно воспроизводить в виде мер. К ним относятся, например, давление, механическое напряжение, мощность и энергия.

Функцией измерительного прибора является выработка сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия органами чувств наблюдателя, чаще всего органами зрения. В отличие от измерительных приборов, измерительные преобразователи предназначены для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем с помощью его органов чувств.

Измерительная установка состоит из функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и вспомогательных устройств, расположенных в одном месте, т. е. не разнесенных на значительное расстояние, требующее применения специальных каналов связи. Назначение измерительной установки — такое же, как и измерительного прибора, т. е. выработка сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем.

По своему составу измерительная система отличается от измерительной установки лишь наличием особых каналов связи, так как ее части расположены на расстоянии. Кроме того, она имеет несколько иное назначение — а именно: выработку сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

Выше было сказано, что в средствах измерений материализуется единица, принятая для данной физической величины. Выбор единицы, являющейся необходимым условием измерений, оставлен на усмотрение человека, так как ни один из бесконечного множества естественных объектов, существующих в природе, ею самой не предназначается для воспроизведения единичного свойства. Это ведет к тому, что для одной и той же величины может быть выбрано несколько единиц, различающихся по размеру (например для длины: метр, аршин, фут, туаз и др.).

Начав с установления для различных величин единиц, не связанных между собой, человечество перешло затем к созданию систем единиц. В последние годы создана единая универсальная система единиц, названная Международной, на которую в перспективе будут переведены все измерения.

Остановимся на термине, который следует избрать для понятия о единице. В стандарте «Метрология. Термины и определения» установлен термин «единица физической величины» (а не применяемый еще часто «единица измерений»). Это сделано на том основа-

нии, что единицы применяют не только для измерений, но и для расчетов, планирования, теоретических построений и т. д. Кроме того, во всей метрологической литературе принято связывать единицы с величинами, например «метр — единица длины», «килограмм — единица массы» и т. д. Именно так сформулированы все определения единиц, принятые Генеральными конференциями по мерам и весам. Единица есть та же физическая величина, поэтому единица принадлежит к той же философской категории, что и физическая величина, т. е. является свойством объекта познания. В средствах измерений она выступает как единичный образец физической величины, которому по определению присвоено числовое значение 1. Для материального воспроизведения и хранения единиц служат особо точные средства измерений, принятые в качестве эталонов. Однако в результатах измерений, т. е. в значениях физических величин, являющихся нашими знаниями об объектах, единица теряет свою материальную сущность. Таким образом, понятие «единица физической величины» имеет две стороны — материальную и абстрактную.

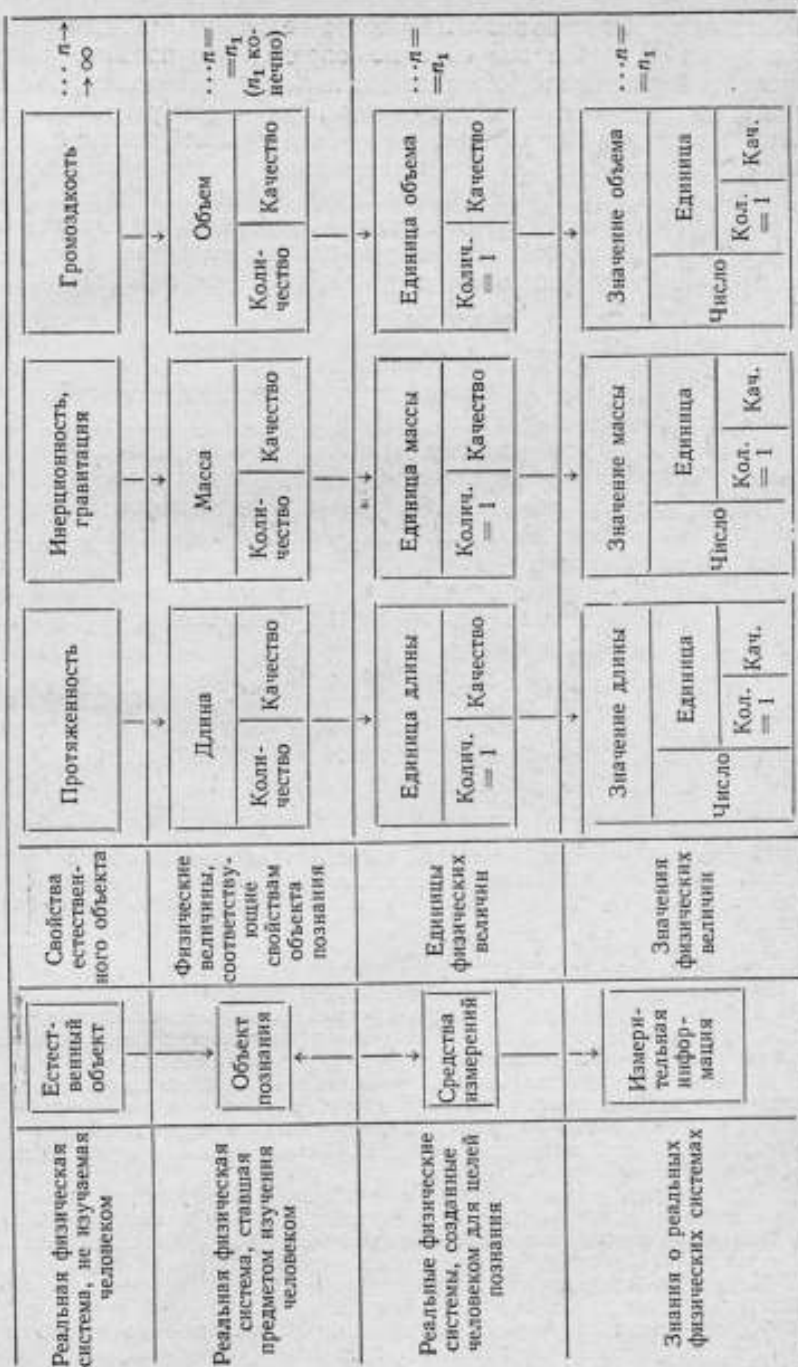
Введем еще понятия истинного и действительного значений физической величины, играющие в метрологии важную роль. Взаимодействие материальных объектов происходит в абсолютно точном соответствии с их свойствами, так как явления природы совершаются безошибочно («природа не ошибается»). В принципе должны существовать значения физических величин, идеальным образом отражающие в качественном и количественном отношениях соответствующие свойства объектов. Однако измерения всегда сопровождаются погрешностями, и истинные значения остаются для нас неизвестными.

На практике пользуются действительными значениями, которые могут быть найдены экспериментально. Они настолько приближаются к истинным значениям, что для поставленной цели могут быть использованы вместо них.

Понятие истинного значения необходимо в метрологии для введения понятия погрешности измерения. Понятие действительного значения особенно часто используют в поверочной практике.

В заключение приведем схему, иллюстрирующую взаимосвязь важнейших понятий метрологии. В левой вертикальной колонке схемы указаны философские категории понятий, в следующей направо — виды понятий, участвующих в измерениях. Стрелками показано происхождение понятий, причем стрелкой с двумя остриями обозначено взаимодействие объекта познания со средствами измерений. В следующих колонках показан генезис знания об объекте, т. е. значений характеризующих его физических величин. При взаимодействии объекта познания со средством измерений, в котором материализована единица некоторой физической величины, становится возможным найти значение этой величины. Физическая величина имеет две стороны — качественную и количественную, что на схеме показано включением в прямоугольник двух

Взаимосвязь важнейших понятий метрологии



меньших прямоугольников. Единица величины имеет те же стороны, но числовое значение по определению принято равным числу 1. Значение величины состоит из числа, умноженного на единицу, являющуюся в данном случае не образцом реального свойства, а знанием о нем. Данные в правой крайней колонке указывают, что количество свойств естественного объекта неопределенно велико ($n \rightarrow \infty$). Количество величин, введенных для познания объекта, ограничено ($n = n_1$, где n_1 — конечно). Количество единиц соответствует количеству величин, таким же может быть в принципе количество значений, характеризующих объект познания в некоторый момент времени.

*
* *

Мы рассмотрели небольшой круг важнейших понятий метрологии, попытавшись уяснить их взаимосвязь. Высказанные выше соображения были приняты во внимание при составлении определений этих и ряда других понятий, включенных в государственный стандарт «Метрология. Термины и определения», и помогли выбрать наиболее существенные отличительные признаки понятий. Следует надеяться, что ознакомление с этими соображениями облегчит восприятие определений и будет способствовать единообразному применению некоторых метрологических терминов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ МЕТРОЛОГИИ, ВКЛЮЧЕННЫЕ В ГОСТ 16263-70 «МЕТРОЛОГИЯ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ»

Физическая величина — свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта.

Примечания. 1. Индивидуальность в количественном отношении следует понимать в том смысле, что данное свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого.

2. Термин допускается применять для свойств, изучаемых не только в физике, но и в химии или в других науках, если для сравнения их количественного содержания в разных объектах требуется применение физических методов.

3. Не следует применять термин «величина» для выражения только количественной стороны рассматриваемого свойства, например писать «величина массы», «величина давления», «величина силы» и т. д., так как эти свойства (масса, давление, сила) сами являются величинами. В этих случаях следует применять термин «размер величины».

Примеры. Длина, масса, электрическое сопротивление некоторого тела, давление газа (например в трубопроводе), работа некоторой силы.

Размер физической величины — количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина».

Измерение — нахождение значения физической величины опытным путем, с помощью специальных технических средств.

Прямое измерение — измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных.

Примеры. Измерения массы на циферблатных или равноплечных весах, температуры — термометром, длины — с помощью линейных мер.

Косвенное измерение — измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

Примеры. Нахождение плотности однородного тела по его массе и геометрическим размерам; нахождение удельного электрического сопротивления проводника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения.

Совокупные измерения — производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях различных сочетаний этих величин.

Пример. Измерения, при которых значения массы отдельных гирь набора находят по известному значению массы одной из них и по результатам прямого сравнения масс различных сочетаний гирь.

Совместные измерения — производимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин с целью определения зависимости между ними.

Пример. Измерения, при которых значения электрического сопротивления при температуре 20°C и температурных коэффициентов измерительного резистора находят по данным прямых измерений его сопротивления при различных температурах.

Принцип измерений — совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Примеры. Измерения температуры с использованием термоэлектрического эффекта; измерения массы взвешиванием (использование силы тяжести, пропорциональной массе); измерения расхода газа или жидкости по перепаду давления в сужающем устройстве.

Метод измерений — совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

Средство измерений — техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства.

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Примеры. Гиря — мера массы; измерительный резистор — мера электрического сопротивления; температурная лампа — мера яркостной или цветовой температуры; кварцевый генератор — мера частоты электрических колебаний.

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Примечание. Под сигналами измерительной информации понимаются сигналы, функционально связанные с измеряемыми величинами.

Примеры. Амперметр, манометр, термометр.

Измерительный преобразователь — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Примечание. Для категории средств измерений, охватывающей измерительные приборы и измерительные преобразователи, допускается применять термин «измерительные устройства».

Примеры. Термопара для термоэлектрического термометра; измерительный трансформатор тока.

Измерительная установка — совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенная в одном месте.

Примечание. К вспомогательным устройствам относятся источники питания, регулирующие приспособления, стабилизирующие устройства и т. п.

Примеры. Установка для измерений удельного сопротивления электро-технических материалов; установка для испытаний магнитных материалов.

Единица физической величины — физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение 1.

Примечания. 1. Термин применяется также для обозначения единицы, входящей множителем в значение физической величины.

2. Единицы некоторой величины могут различаться по своему размеру, например метр, фут и дюйм, являясь единицами длины, имеют различный размер: 1 фут = 0,3048 м, 1 дюйм = $25,4 \cdot 10^{-3}$ м.

Значение физической величины — оценка физической величины, в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Примечание. Отвлеченное число, входящее множителем в значение физической величины, называется числовым значением.

Пример. 12 кг — значение массы тела.

Истинное значение физической величины — значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство данного объекта.

Действительное значение физической величины — значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание. Изд-во иностр. лит., 1961.
2. Эйнштейн А. Физика и реальность. «Наука», 1965.
3. Вавилов С. И. Собрание сочинений, тт. III и IV. АН СССР, 1956.
4. Фок В. А. Основные законы физики в свете диалектического материализма. «Вестник ЛГУ», 1949, № 4.
5. Фок В. А. Об интерпретации квантовой механики. В сб. «Философские вопросы современной физики», изд. АН СССР, 1959.
6. Омеляновский М. Э. Философские вопросы квантовой механики. Изд. АН СССР, 1956.
7. Campbell N. R. An Account of the Principles of Measurement and Calculation. London, Longmans, Green, 1928.
8. Ellis V. Basic Concepts of Measurement. Cambridge, 1966.
9. Суппес П., Зинес Дж. Основы теории измерений. В сб. «Психологические измерения», «Мир», 1967.
10. Ленин В. И. Собрание сочинений, т. 18, стр. 276, 149, 181, 39.
11. Дышлевый П. С., Свириденко В. М. О принципе наблюдаемости и концепции дополнительности. В сб. «Метрологические проблемы теории измерений», Киев, «Наукова думка», 1966.
12. Канак Ф. М. Измерение и проблема реальности в физике. См. [11].
13. Мельников О. А. О роли измерений в процессе познания. Новосибирск, «Наука», 1968.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

ЧТО СЧИТАТЬ НАБЛЮДЕНИЕМ

Различные авторы подразумевают под термином «наблюдение» разные понятия, что в ряде случаев затрудняет понимание текста научной и технической литературы.

Одна группа специалистов наблюдение считает более широким понятием, чем измерение. Они могут указать, что координаты точки на земной поверхности были найдены посредством «астрономических наблюдений» [1]. Известно, что при этом измеряли горизонтальные и вертикальные углы (зенитные расстояния) высокоточными угломерными инструментами.

Другие специалисты термины «наблюдение» и «измерение» применяют как синонимы. Например, у одного и того же автора в одном случае может быть сказано: «... наиболее строгое решение задачи по получению вероятнейшего места корабля, по наблюдениям высот трех и более светил. . .» [2, стр. 238], в другом случае: «... измеренные высоты подвержены также влиянию и случайных ошибок» [2, стр. 237].

В третьем случае наблюдением считают единичное измерение, обработанный ряд таких «наблюдений» принимают за результат измерения. Так, в работе [3] указывается: «... результата измерений как среднего арифметического из наблюдений».

Нет четкого разграничения в понятиях наблюдение и измерение и у авторов фундаментальных трудов по метрологии. В этом нетрудно убедиться, на примере работы М. Ф. Маликова [4] раздел, посвященный выполнению измерений.

Кроме того, термин «наблюдение» широко применяют в военном деле, где под ним подразумевают один из способов разведки, получение каких-либо данных военного характера невооруженным глазом, а также различными техническими средствами, включая измерительные. В отдельных случаях встречается термин «точное наблюдение» [5].

Попытаемся выяснить, как следует трактовать термин «наблюдение» вообще и в области измерений в частности. С этой целью рассмотрим роль наблюдения в познании окружающей нас дей-

ствительности. В далеком прошлом и в настоящее время в деятельности человека огромную роль играло и играет зрение. Так, при помощи зрения возникает связь между человеком (его сознанием) и орудиями труда. Очевидно, что человек, имеющий хорошее зрение, может в процессе труда правильно использовать орудия труда, заметить их неисправности, заменить одно средство другим, сделать вывод о том, что одно средство труда лучше другого, и т. д. Иначе говоря, подмечать, выделять основное в процессе той или иной деятельности. Например, шофер наблюдает за светофором и проезжающими автомашинами; специалист, управляющий сложными системами, наблюдает за показанием приборов. Во многих случаях специалиста, периодически или постоянно занятого такого рода наблюдениями, принято называть наблюдателем. Как правило, результаты наблюдений фиксируются.

Таким образом, человеку в процессе деятельности свойственно наблюдение. В дальнейшем «наблюдение в процессе деятельности» будем называть кратко — наблюдением.

Первые научные знания человек получил при помощи длительных наблюдений. В астрономии, например, путем наблюдений даже невооруженным глазом человек еще в древности выделил звезды, которые появляются и исчезают на небосводе, установил, что Солнце изменяет свою высоту в зависимости от времени года и происходит это периодически, что при определенном положении Солнца и Луны приливы и отливы на море максимальны, и т. д.

Со временем применение измерительных средств при наблюдениях позволило количественно оценивать физические величины, характеризующие то или иное известное явление или объект. Естественно, что роль измерений в познании огромна, тем не менее они носят подчиненный характер. В теории познания измерение рассматривается именно как «одна из важнейших процедур наблюдения. . .» [6]. Однако это справедливо только по отношению к научному наблюдению, а не к наблюдению в процессе деятельности. Под научным понимается длительное наблюдение за каким-либо явлением или объектом, в процессе которого осмысливают результаты наблюдений или измерений, дают их интерпретацию, делают обобщения и выносят суждения. Если в наблюдении в процессе деятельности чувственная форма познания преобладает над рациональной [7], то в научном наблюдении рациональной форме познания отведена уже значительно большая роль. Непременными условиями научного наблюдения, как нам представляется, должны быть конкретность цели наблюдения и выводы об изучаемом явлении. Очевидно, чем конкретнее будет определена задача научного наблюдения, тем быстрее может быть получен результат.

Когда указано, что наблюдения вели за тем или иным объектом, то вряд ли можно утверждать, что эти наблюдения были научными. Только изучая конкретное свойство наблюдаемого объекта (например, изменяемость положения объекта в пространстве,

неизменность во времени той или иной величины, характеризующей объект, и т. д.), можно говорить о научных целях наблюдения.

Однако при измерениях наблюдения в процессе деятельности носят уже подчиненный характер. Для уяснения этого условно разделим измерения на два вида: «простое», когда для одного измерения достаточно произвести один отсчет по шкале прибора и «сложное», когда для отдельного измерения необходимо произвести отсчеты в двух точках шкалы одного прибора или применять два или более приборов. В обоих случаях ведут наблюдения за показаниями приборов (т. е. наблюдения в процессе деятельности) и производят отсчитывание их показаний. Даже при простом измерении результат такого наблюдения (показание прибора), как правило, не будет равен результату измерения, так как в показание обычно вводят поправки. Только в частных случаях, когда суммой поправок измерительного средства можно пренебречь, за результат измерения принимают результат наблюдения (например, при измерении силы тока щитовым амперметром).

При сложном измерении, когда, например, необходимо снять показания в двух точках шкалы, за результат измерения будет принята их разность (т. е. разность результатов двух наблюдений) после внесения в нее поправок (например, при измерении длины при помощи штриховой меры).

Таким образом, термин «наблюдение» имеет двоякий смысл. Вероятно, вследствие этого в энциклопедиях это понятие трактуют несколько по-разному. Так, в томе 3 «Философской энциклопедии» [8] дано определение, более подходящее для первого понятия — наблюдения в процессе деятельности:

«Наблюдение — вид деятельности, связанный с преднамеренным целенаправленным восприятием предметов и явлений внешнего мира. . .»

Формулировка, приведенная в БЭС [9], больше подходит для определения второго понятия — наблюдения научного, а именно:

«Наблюдение — относительно длительное целенаправленное и планомерное восприятие предметов и явлений окружающей действительности; метод познания действительности на основе непосредственного восприятия».

В «Энциклопедическом словаре» [10] определение близко данному в работе [9], однако о длительности восприятия в нем не указывается.

В метрологии, вероятно, целесообразно оставить только первое понятие: наблюдение в процессе деятельности в его краткой форме — наблюдение. В этом случае определение термина «наблюдение» может быть следующим:

Наблюдение — вид деятельности, осуществляемой с целью фиксации показания (-ий) какого-либо средства измерений.

Примечание. Результатом (-тами) наблюдения, как правило, является (-ются) отсчет (-ы).

Например, при измерении угломерным инструментом угла между двумя какими-либо гранями наблюдателю следует поочередно наблюдать обе грани. Значение измеренного угла будет получено по результатам двух наблюдений.

Второе понятие — наблюдение научное — вряд ли целесообразно вводить в метрологию, так как в этом значении применяют термины «исследование» и «изучение», к сожалению, зачастую без конкретного указания изучаемого свойства или явления, характеризующего объект.

В заключение отметим, что, считая наблюдением операцию, связанную с фиксацией показания (-й) прибора в процессе измерений, мы вправе лишиться раз напомнить наблюдателю о старом мудром правиле: «что наблюдаешь, то и записывай».

ЛИТЕРАТУРА

1. БСЭ, т. 10.
2. Белобров А. П. Мореходная астрономия. ГИМИЗ, 1954, стр. 237—238.
3. ГОСТ 13600—68. Классы точности. Общие требования, стр. 1.
4. Маликов М. Ф. Основы метрологии, 1949, стр. 351.
5. Мельников О. А. О роли измерений в процессе познания. Новосибирск, «Наука», 1968, стр. 3.
6. Мостепаненко М. В. Основы марксистской методологии научного познания, вып. 1-й. Курс лекций. Дом политического просвещения ЛК и ЛГК КПСС. Ленинградская кафедра философии АН СССР, 1967, стр. 192.
7. Диалектический материализм, изд. ВПШ и АОН при ЦК КПСС, 1962, стр. 321.
8. Философская энциклопедия, т. 3. БСЭ, 1964.
9. БСЭ, т. 29.
10. Энциклопедический словарь, т. 2. БСЭ, 1954.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЗАВИСИМОСТЕЙ
МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

В статье «Об основных понятиях метрологии»* дано обоснование взгляда на измерение как на акт количественного познания опытным путем одного из свойств реального физического объекта (объекта познания). При измерении средства измерений приводят во взаимодействие с объектом познания, и они позволяют получить объективную количественную оценку физической величины, отражающей познаваемое свойство, т. е. ее значение, выраженное в принятых единицах. Исходя из этого взгляда, измерениями можно считать лишь нахождение значений физических величин, свойственных реальным объектам в момент измерения, так как средства измерений могут реагировать лишь на их реально существующие свойства. Другими словами, под измерением можно понимать один из способов познания физической реальности. Под этим углом зрения следует рассматривать все ситуации, где применяется термин «измерение». Нас в данном случае интересует вопрос о зависимостях между величинами. Это выражение можно понимать двояко.

В физике зависимость чаще всего понимают как формулу, кривую или таблицу, выражающие наши знания о связи друг с другом физических величин. Совершенно очевидно, что зависимость, понимаемую так, измерять нельзя. Второе значение, которое можно придать выражению «зависимость между величинами» — это изменение свойства физического объекта в процессе изменения одной из физических величин, определяющих его состояние. Однако процесс, так же как и сам объект, в котором он происходит, измерять нельзя. Следует уточнить, о какой именно величине, свойственной объекту, идет речь — о длине, массе, скорости движения и т. д. Аналогично и в случае процесса, реализующего

* См. стр. 6.

закономерную связь между величинами, например связь изменения длины тела и изменения его температуры, нельзя говорить об измерении этого процесса. Здесь измеряемыми величинами являются приращения температуры и соответствующие им удлинения, по значениям которых можно описать зависимость удлинения от изменения температуры.

Слово «определение» можно применять в метрологии для двух понятий: дефиниции (например, новое определение метра) и добывания информации, причем второе понятие имеет более широкое содержание, чем измерение. Если измерять можно только физические величины, реально существующие в данный момент, то определять (в том числе рассчитывать, вычислять) можно значения величин, в том числе и результаты измерений, причем истинные значения могут относиться не только к настоящему, но и к прошедшему или к будущему времени. При измерениях мы оперируем с объективной реальностью, определять же можем то, что станет нашим знанием о реальности, и не только о реальности.

Сказанное выше позволяет сделать заключение, что идеи, высказанные в статье [1] относительно возможности измерений зависимостей между величинами, нельзя считать обоснованными. Идея еще дальше, автор статьи [1] подразделяет измерения на элементарные (измерения величин) и совокупные (измерения зависимостей). Из сказанного выше вытекает, что такая классификация неправомерна, так как измерять можно только величины. Следует сохранить подразделение измерений на прямые, косвенные, совместные и совокупные [2]*.

Остановимся попутно на некоторых других спорных положениях статьи [1]. Автор ее утверждает, что действительное значение измеряемой величины «получают тогда, когда из результата измерений исключают все систематические погрешности, а все случайные погрешности сводят к минимуму путем применения методов теории вероятностей, при достаточно большом числе отдельных измерений». Это — не определение, а лишь рецепт нахождения действительного значения, который, вдобавок, не всегда бывает правильным. При невысоких требованиях к точности за действительное значение может быть принято и такое значение, из которого не исключены все систематические погрешности и которое получено на основании небольшого числа измерений. Отличительным признаком действительного значения служит не это, а то, что оно должно настолько приближаться к истинному значению физической величины, что для данной практической цели может быть использовано вместо истинного значения, всегда остающегося неизвестным [2].

Встречают возражения и определения терминов, относящихся к точности измерений, а именно: достоверность, правильность и

* См. также статью «Об основных понятиях метрологии» на стр. 6.

точность результата измерений. Они сформулированы так: «Достоверность результата элементарных измерений определяет правильность и точность. Правильность характеризуется разностью между действительным и номинальным значением размера единицы, в которой выражен результат измерения, а точность оценивается одной из средних погрешностей, вычисляемой по значениям остаточных погрешностей».

На русском языке слово «точный» означает верный, истинный, действительный, такой как на самом деле [3, 4]. В этом же смысле понимаются выражения «точное литье», «точность механизмов», точность часов [5]. В измерительной технике класс точности характеризует все погрешности средств измерений, как систематические, так и случайные [6]. Поэтому нет оснований вкладывать в слово «точность» некоторый надуманный смысл, отличающийся от всем привычного и понятного. Кроме того, нельзя говорить о «номинальном значении размера единицы», так как единица не имеет номинального значения, и искажение результата систематическими погрешностями происходит не вследствие изменения размера единицы.

Терминология, рекомендуемая в статье [1], приводит к противоречивости высказываний. Например, из нее логически вытекает, что при высокой воспроизводимости результатов наблюдений, но большой систематической погрешности, следует говорить: «результат точный, но неправильный», а при малых систематических погрешностях, но большом рассеивании наблюдений — «результат правильный, но неточный». Подразумеваемый смысл таких высказываний воспринимается с трудом, и их не следует пропагандировать.

В государственном стандарте «Метрология. Термины и определения» [2] соответствующие понятия определены как характеристики измерений, отражающие:

- точность измерений — близость их результатов к истинному значению измеряемой величины,
- правильность измерений — отсутствие в их результатах систематических погрешностей,
- сходимость измерений — близость друг к другу результатов отдельных измерений, выполняемых в одних и тех же условиях,
- воспроизводимость измерений — близость друг к другу результатов отдельных измерений, выполняемых в различных условиях (в разное время, в различных местах, разными методами и средствами).

Таковы наиболее существенные замечания, которые необходимо сделать по поводу содержания статьи [1]. Лица, имеющие против них возражения или какие-либо дополнительные замечания, приглашаются сообщить их редакции настоящих трудов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агалецкий П. Н. Вопросы измерения зависимостей между величинами. «Измерительная техника», 1968, № 6.
2. ГОСТ 16263-70 «Метрология. Термины и определения».
3. Даль В. Толковый словарь русского языка, т. IV, 1955.
4. Толковый словарь русского языка под ред. Б. М. Волгина и Д. Н. Ушакова, т. IV, 1940.
5. БСЭ, 11-е изд., т. 43, 1956.
6. ГОСТ 13600-68 «Средства измерений. Классы точности. Общие требования».

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ ИСО ПО ЕДИНИЦАМ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Стандартизация, охватывающая в настоящее время все сферы технической и экономической деятельности, неразрывно связана с установлением общего языка для выражения стандартизуемых физических величин. Поэтому сразу же при создании в 1948 г. Международной организации по стандартизации (ИСО) наряду со многими техническими комитетами был создан Технический комитет 12 по величинам, единицам, символам, переводным множителям и таблицам (ИСО/ТК 12). Этот комитет ИСО подготовил ряд рекомендаций по единицам, применяемым в различных областях науки и техники. Основной из них является рекомендация ИСО R 31, состоящая из многих частей, например: основные величины и единицы Международной системы (СИ) и единицы пространства и времени, величины и единицы, применяемые в механике, термодинамике, электротехнике, светотехнике, акустике, и т. д. В этих документах основное место занимают единицы СИ, наряду с которыми указаны также другие единицы и их переводные множители.

Метрическая система мер, созданная в XVIII в. для замены разрозненных национальных систем единиц и положенная в основу Метрической конвенции 1875 г., прошла большой путь развития, который в наше время завершился созданием Международной системы единиц. Простая в построении и изучении, эта система вместе с тем обеспечивает охват всех применяемых в науке и технике физических величин и является современной формой метрической системы. Поэтому решениями последних генеральных конференций по мерам и весам она рекомендована для всеобщего применения. Во многих странах началось движение в пользу перехода на единицы СИ, которые должны заменить сложную совокупность применяемых единиц, состоящую из единиц различных систем и большого числа внесистемных единиц. Даже Англия, до последнего времени упорно придерживавшаяся британской

системы единиц, в 1965 г. приняла решение о переходе на единицы СИ.

Постоянный комитет ИСО по изучению научных принципов стандартизации (СТАКО) несколько раз рассматривал вопрос о единицах, применяемых в рекомендациях ИСО, и внес в Совет ИСО ряд предложений, по которым были приняты следующие решения этого высшего органа ИСО [1]:

— во всех работах ИСО, если применяются единицы не СИ, должны быть дополнительно указаны значения в единицах СИ (резолюция Совета ИСО 62/24);

— технические комитеты ИСО по отдельным отраслям промышленности должны информировать ТК 12 о затруднениях с единицами и о намеченных решениях (резолюция Совета ИСО 63/35);

— в некоторых случаях единицы не СИ могут сохраняться на переходный период, однако при этом должны включаться значения, выраженные в единицах СИ (резолюция 64/43).

Имея в виду важность полного введения Международной системы единиц, Совет ИСО просил ТК 12, в сотрудничестве с другими комитетами ИСО, ускорить достижение этой цели. Был создан Подкомитет 2 ТК 12, в задачу которого вошло составление общих правил применения единиц СИ и кратных и дольных от них в различных отраслях техники. В своих резолюциях от 1966 и 1967 гг. СТАКО рекомендовал ускорить работы Подкомитета 2 ТК 12 и просил периодически сообщать ему о ходе введения единиц СИ в проекты рекомендаций ИСО.

В резолюции от 18 марта 1969 г. СТАКО вновь подтвердил свое указание включать единицы СИ во все рекомендации ИСО и просил Совет ИСО известить секретариаты всех технических комитетов о том, что после определенной даты (насколько возможно близкой) проекты рекомендаций ИСО, в которых не включены соответствующие единицы СИ, не будут приниматься к утверждению.

СТАКО выразил также пожелание просить Международную электротехническую комиссию (МЭК) и, в частности, Технический комитет 24 — Величины и единицы — установить сотрудничество в этой области как в международном, так и в национальном плане между специалистами, принимающими участие в работах ИСО и МЭК.

Подкомитет 2 ТК 12 собирался два раза (в Эльсиноре в 1960 г. и в Москве в 1967 г.) и подготовил проект рекомендации № 1557 ИСО «Правила применения единиц Международной системы и выбор десятичных кратных и дольных единиц». Рекомендация принята в 1968 г. Советом ИСО и уже издана с обозначением R 1000/1969 [2]. Текст этой рекомендации (в переводе) приведен в приложении. В рекомендации применены только международные символы единиц, поэтому они фигурируют и в переводе текста.

Можно полагать, что разработка и издание рекомендаций ИСО в области величин и единиц будет способствовать тому, что применение единиц СИ и рекомендуемых кратных и дольных от них будет все более расширяться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Implementation of SI-unite in ISO recommendations (A review of the present position). Изд. ИСО, июнь 1969 г.
2. ISO Recommendation R 1000/69 Rules for the use of units of the International System of units and a selection of the decimal multiples and submultiples of the SI units, 1-st edition, Febr. 1969.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РЕКОМЕНДАЦИЯ ИСО R 1000/1969 ПРАВИЛА ПРИМЕНЕНИЯ ЕДИНИЦ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ И ВЫБОР ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ОТ ЕДИНИЦ СИ

1. Цель

Настоящая рекомендация ИСО содержит правила применения единиц Международной системы, а также правила образования и выбор десятичных кратных и дольных от единиц СИ для использования в различных областях техники.

2. Общие положения

2.1. Наименование «Международная система единиц» было принято 11-й Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г.

«Единицами СИ» называются когерентные единицы.

2.2. Международная система единиц базируется на следующих шести основных единицах:

метр (m)	ампер (A)
килограмм (kg)	кельвин (K)
секунда (s)	кандела (cd)

которые являются единицами основных величин: длины, массы, времени, силы электрического тока, термодинамической температуры и силы света.

2.3. Единицы плоского угла радиан (rad) и телесного угла стерadian (sr) названы дополнительными единицами Международной системы единиц.

2.4. Производные единицы СИ выражаются в функции от основных единиц; например, единица СИ скорости есть метр в секунду (m/s).

Для некоторых производных единиц СИ существуют специальные наименования и обозначения; принятые Генеральной конференцией по мерам и весам наименования и обозначения указаны в табл. 1.

Иногда проще выразить производные единицы через другие производные единицы, имеющие специальные наименования; например, единица СИ момента электрического диполя (A·s·m) обычно выражается как C·m.

Таблица 1

Наименования, принятые для производных единиц СИ

Величина	Наименование единицы СИ	Обозначение	Выражение в функции от основных или производных единиц СИ
Частота	герц	Hz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
Сила	ньютон	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
Мощность	ватт	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
Электрический заряд	кулон	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
Электрический потенциал, разность потенциалов, напряжение, в. д. с.	вольт	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A}$
Электрическая емкость	фарада	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ A} \cdot \text{s/V}$
Электрическое сопротивление	ом	Ω	$1 \Omega = 1 \text{ V/A}$
Магнитный поток	вебер	Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}$
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	тесла	T	$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$
Индуктивность	генри	H	$1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/A}$
Световой поток	люмен	lm	$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$
Освещенность	люкс	lx	$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$

2.5. Наименования десятичных кратных и дольных от единиц СИ образуются с помощью приставок, которые приведены в табл. 2.

Обозначение приставки рассматривается как сочетание с обозначением единицы, к которой она непосредственно присоединяется, образуя с нею новое обозначение единицы, могущее быть возведенным в положительную или отрица-

Таблица 2

Приставки для образования наименований десятичных кратных и дольных единиц

Коэффициент, на который умножается единица	Приставка	Обозначение
10^{12}	тера	T
10^9	гига	G
10^6	мега	M
10^3	кило	k
10^2	гекто	h
10	дека	da
10^{-1}	деци	d
10^{-2}	санти	c
10^{-3}	милли	m
10^{-6}	микро	μ
10^{-9}	нано	n
10^{-12}	пико	p
10^{-15}	фемто	f
10^{-18}	атто	a

тельную степень и сочетаться с другими обозначениями единиц для образования обозначений сложных единиц, например:

$$1 \text{ cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ } \mu\text{s}^{-1} = (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1}$$

$$1 \text{ mm}^2/\text{s} = (10^{-3} \text{ m})^2/\text{s} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Не следует употреблять сложные приставки: например, надо писать пм (пикометр), а не ппм.

3. Правила применения единиц СИ и их десятичных кратных и дольных

3.1. Следует предпочтительно применять единицы СИ, но было бы непрактично применять только эти единицы; требуются также десятичные кратные и дольные единицы, наименования которых образованы с помощью приставок.

Для упрощения вычислений необходимо применять когерентные единицы. Поэтому настоятельно рекомендуется применять в вычислениях только единицы СИ, а не их десятичные кратные и дольные.

3.2. Особенно рекомендуется применение приставок, представляющих степень числа 10 с показателем, кратным 3.

Примечание. В некоторых случаях для обеспечения удобства применения единиц, эта рекомендация может не соблюдаться; примеры таких исключений приведены в колонке 5 табл. 3.

3.3. Для образования наименований десятичных кратных и дольных от производной единицы СИ рекомендуется применять только одну приставку, причем приставку следует присоединить к единице, стоящей в числителе.

Примечание. В некоторых случаях удобство применения требует, чтобы приставка была присоединена к единицам, стоящим в числителе и в знаменателе или только к единице, стоящей в знаменателе; примеры таких исключений приведены в колонке 5 табл. 3.

4. Числовые значения

4.1. Для выражения величины с помощью числового значения и некоторой единицы, целесообразно в большинстве случаев использовать также десятичные кратные и дольные от единиц СИ, чтобы числовые значения находились в диапазоне от 0,1 до 1000, например:

Наблюдаемое или вычисленное значение	Может быть выражено
12 000 N	12 kN
0,00394 m	3,94 mm
14 010 N/m ²	14,01 kN/m ²
0,0003 s	0,3 ms

4.2. Правило п. 4.1 не всегда, однако, применимо. В одном и том же тексте числовые значения величины, выраженные с помощью одной единицы, могут колебаться в широких пределах; это имеет место, в частности, в таблицах. В таких случаях следует все же применять одну и ту же единицу, даже если это приводит к выходу из предпочтительного диапазона 0,1—1000.

4.3. Правила написания обозначений единиц даны во введении к Рекомендации ИСО R31, часть *: Общие положения, касающиеся величин, единиц и обозначений.

5. Перечень единиц

В прилагаемой таблице приведен перечень единиц СИ и выбор рекомендуемых кратных и дольных от единиц СИ, а также других допускаемых к применению единиц для ряда часто встречающихся величин.

* В настоящее время находится в стадии проекта.

ПЕРЕЧЕНЬ
единиц СИ и выбор рекомендованных десятичных кратных и дольных от единиц СИ,
а также других допускаемых к применению единиц

Пункты ИСО/Р 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятичных кратных и дольных от единиц СИ	Другие десятичные кратные и дольные от единиц СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
1-1.1	Плоский угол	рад (радиан)	град град	град град	градус (. . . °), 1° = $\frac{\pi}{180}$ рад минута (. . . ′), 1′ = $\frac{1^\circ}{60}$ секунда (. . . ″), 1″ = $\frac{1'}{60}$ град или гон (. . . ‰), 1‰ = $\frac{\pi}{200}$ рад	Рекомендуется употреблять единицы градус и град с десятичными подразделениями, когда единица радиан неприменяема
1-2.1	Телесный угол	ср (стерадиан)	км мм дм пм	дм см		1 морская миля = 1852 м
1-3.1—3.7	Длина	м (метр)				

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятичных кратных в долях от единицы СИ	Другие десятичные кратные и доли единицы СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
1-4.1	Площадь	m^2	km^2 mm^2	dm^2 cm^2	гектар (ha) $1 ha = 10^4 m^2$ ар (a) $1 a = 10^2 m^2$	
1-5.1	Объем	m^3	mm^3	dm^3 cm^3	гектолитр (hl) 1 hl = $= 10^{-1} m^3$ (литр (l)) 1 l = $= 10^{-3} m^3 = 1 dm^3$ сантиметр (cl) 1 cl = $10^{-5} m^3$ миллилитр (ml) 1 ml = $= 10^{-6} m^3 = 1 cm^3$	В 1964 г. Генеральная конференция по мерам и весам приняла наименование литр (l) как синоним кубического дециметра (dm^3), но не рекомендовала применять наименование литр для измерений высокой точности
1-6.1	Время	s (секунда)	ks ms μs ns		сутки (d) 1 d = 24 h час (h) 1 h = 60 min минута (min) 1 min = 60 s	Применяются также другие единицы: неделя, месяц, год (a)
1-8.1	Угловая скорость	rad/s				

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятикратных и десятичных единиц СИ	Другие десятикратные и десятичные единицы СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
1-10.1	Скорость	m/s			километр в час (km/h) $1 \text{ km/h} = \frac{1}{3,6} \text{ m/s}$	1 узел = 0,514444 m/s
Часть II. Периодические и связанные с ними явления						
2-3.1	Частота	Hz (герц) s^{-1}	THz GHz MHz kHz			
2-3.2	Частота вращения				оборот в минуту оборот в секунду	
Часть III. Механика						
3-1.1	Масса	kg (килограмм)	Mg g mg µg		тонна (t) $1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$	Метрический карат (1 метр. карат = $2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$) используется в коммерческих сделках на бриллианты, жемчуг и драгоценные камни

Пункты ИСО/Р 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекоммендованных десятичных кратных и дольных от единиц СИ	Другие десятичные кратные и дольные от единицы СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
3-2.1	Плотность	kg/m^3	Mg/m^3	$1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$	$1 \text{ t/m}^3 = 1 \text{ kg/l} = 1 \text{ g/ml}$	О литре (l) см. п. 1-5.1
3-5.1	Количество движения	$\text{kg} \cdot \text{m/s}$				
3-6.1	Момент количества движения	$\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$				
3-7.1	Момент инерции	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$				
3-8.1	Сила и	N (ньютон)	MN kN	daN		
3-8.2	Вес		mN μN			
3-10.1	Момент силы	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{MN} \cdot \text{m}$ $\text{kN} \cdot \text{m}$	$\text{daN} \cdot \text{m}$	$1 \text{ hbar} = 10^7 \text{ N/m}^2$	В некоторых странах гектобар (hbar) применяется
3-11.1	Давление и		$\mu\text{N} \cdot \text{m}$ GN/m^2	daN/mm^2		

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекоммендованных кратных и дольных единиц СИ	Другие десятичные кратные и дольные единицы СИ	Примечание
3-11.2	Механическое напряжение		MN/m ² kN/m ² mN/m ² μN/m ² mN·s/m ² mm ² /s mN/m GJ MJ kJ mJ	N/mm ² N/cm ²	только в отдельных областях В некоторых странах наютону на кв. метр при- своено наименование «паскаль»
3-19.1	Вязкость (динамическая)	N·s/m ² **		сантипуаз (ср) 1 ср = 10 ⁻¹ N·s/m ² сантистокс (сСт) 1 сСт = 10 ⁻⁶ m ² /s	
3-20.1	Вязкость (кинематическая)	m ² /s			
3-21.1	Поверхностное натяжение	N/m			
3-22.1	Работа			киловатт-час (кВтч) 1 кВтч = 3,6×10 ⁶ J = 3,6 MJ электронвольт (eV) 1 eV = (1,60210±	Единицы Втч, кВтч, МВтч, кВтч и ТВтч применяются в электротехнической промышленности Единицы keV, MeV и GeV
	Энергия	J (джоуль)			

* Решением ГКМВ от октября 1971 г. этой единице присвоено наименование «паскаль» (Pa). К. Ш.

** В связи с принятием наименования «паскаль» эта единица должна именоваться «паскаль-секунда» (Pa·s). К. Ш.

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятичных кратных и дольных единиц СИ	Другие десятичные кратные и дольные единицы СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
3-23.1	Мощность		GW MW kW mW μW kJ/m ²		±0,00007) × 10 ⁻¹⁸ J	применяются в технике ускорителей
4-1.1	Термодинамическая температура	K (кельвин)		Часть IV, Теплота		
4-2.1	Температура в градусах Цельсия				°C (градус Цельсия)	

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятичных кратных и дольных от единиц СИ	Другие десятичные кратные и дольные от единиц СИ	Примечание
4-1.1	Температурный интервал	К			1°С = 1 К
4-2.1	Коэффициент линейного расширения	К ⁻¹			°С ⁻¹
4-3.1	Количество теплоты	J	TJ GJ MJ kJ		
4-4.1	Тепловой поток	W	mJ kW		
4-5.1	Плотность теплового потока	W/m ²	MW/m ² kW/m ²		W/(m ² ·°C) W/(m ² ·°C)
4-6.1	Теплопроводность	W/(m·K)			
4-7.1	Коэффициент теплопередачи	W/(m ² ·K)			
4-8.1	Теплоемкость	J/K	kJ/K		kJ/°C J/°C
4-10.1					

Пункт ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятичных кратных и дольных единиц СИ	Другие десятичные кратные и дольные от единицы СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
4-11.1	Удельная теплоемкость	J/(kg · K)	kJ/(kg · K)		kJ/(kg · °C) J/(kg · °C)	
4-13.1	Энтропия	J/K	kJ/K			
4-14.1	Удельная энтропия	J/(kg · K)	kJ/(kg · K)			
4-16.1	Удельная внутренняя энергия	J/kg	MJ/kg kJ/kg			
4-18.1	Удельная теплота фазового превращения	J/kg	MJ/kg kJ/kg			
5-1.1	Электрический ток (сила эл. тока)	A (ампер)		кА мА μА пА рА		

Часть V. Электричество и магнетизм *

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятичных кратных и дольных единиц СИ	Другие десятичные кратные в дольных единицах СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
5-2.1	Электрический заряд, количество электричества	С (кулон)	кС мС нС рС			
5-3.1	Объемная плотность заряда	С/м ³	МС/м ³ кС/м ³	С/мм ³ С/см ³		
5-4.1	Поверхностная плотность заряда	С/м ²	МС/м ² кС/м ²	С/мм ² С/см ²		
5-5.1	Напряженность электрического поля		МВ/м кВ/м	В/мм		

* В области электричества и магнетизма единицы СИ предусматривают рационализованную форму уравнений между величинами. См. ИСО/R31, часть V.

МЭК не рассматривала правила, изложенные в данной рекомендации, и содержание данного перечня. С целью дать указания ИСО, ТК 24 МЭК составил список используемых кратных и дольных электрических и магнитных единиц, однако не уточнил их расположения в колонках.

Пункты ИСО/Р31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных кратных и дробных единиц СИ	Другие десятичные кратные и дробные от единиц СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
5-6.1	Электрический потенциал,	V/m	mV/m μV/m	V/cm		
5-6.2	Разность потенциалов, напряжение <i>в</i>	V (вольт)	MV kV mV μV			
5-6.3	Электродвижущая сила	C/m ²	kC/m ²	C/cm ²		
5-7.1	Электрическое смещение	C	nC			
5-9.1	Электрический поток, поток смещения	F (фарада)	nC kC			
5-11.1	Электрическая емкость	F (фарада)	nC μF			

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор: рекомендованных десятикратных и десятичных единиц СИ	Другие десятичные кратные и десятичные единицы СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
5-12.1	Диэлектрическая проницаемость	F/m	nF pF $\mu\text{F}/\text{m}$ nF/m pF/m	C/cm ²		
5-17.2	Электрическая поляризация	C/m ²	MC/m ² kC/m ²			
5-18.1	Электрический момент диполя	C·m				
5-19.1	Плотность тока	A/m ²	MA/m ² kA/m ²	A/mm ² A/cm ²		
5-20.1	Линейная плотность тока	A/m	kA/m	A/mm A/cm		
5-21.1	Напряженность магнит-	A/m	kA/m			

Пункты ИСО/Р 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомен- дованных деся- тичных кратных и доля- ных от единицы СИ	Другие деся- тичные кратные и доля- ные от единицы СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
	ного поля	А/м		А/см		
5-23.1	Разность магнитных по- тенциалов	А	кА мА			
5-24.1	Магнитная индукция, плотность магнитного пото- ка	Т (тесла)	мТ μТ нТ			
5-25.1	Поток магнитной индук- ции, магнитный поток	Вб (вебер)	мВб			
5-26.1	Магнитный векторный потенциал	Вб/м	кВб/м	Вб/мм		
5-27.1 5-27.2	Индуктивность и Взаимная индуктивность	Н (генри)	мН μН нН рН			

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных кратных и дольных единиц СИ	Другие точные кратные и дольные от единицы СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
5-29.1	Магнитная проницаемость	H/m	$\mu\text{H}/\text{m}$ pH/m			
5-34.1	Электромагнитный момент, магнитный момент	A · m ²				
5-35.1	Намагниченность	A/m	kA/m	A/m ¹⁰		
5-36.1	Магнитная поляризация	T	mT			
—	Магнитный момент диполя	N · m ² /A Wb · m				
5-41.1	Сопротивление	Ω (ом)	G Ω M Ω k Ω			
5-42.1	Проводимость	Ω^{-1} *			kS S (стмена)	1 S = 1 Ω^{-1}

* Решением ГКМВ от октября 1971 г. этой единице присвоено наименование естества (S). К. Ш.

Пункты ИСО/Р 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятикратных и десятичных единиц СИ	Другие десятичные кратные и десятичные от единицы СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
5-43.1	Сопротивление, удельное	$\Omega \cdot m$	$G\Omega \cdot m$ $M\Omega \cdot m$ $k\Omega \cdot m$ $m\Omega \cdot m$ $\mu\Omega \cdot m$ $n\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot cm$	mS μS	Применяются также $\mu\Omega \cdot cm = 10^{-8} \Omega \cdot m$ $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} = 10^{-6} \Omega \cdot m =$ $= \mu\Omega \cdot m$
5-44.1	Проводимость, удельная	$1/(\Omega \cdot m)^*$			MS/m kS/m S/m	
5-45.1	Магнитное сопротивление	H^{-1}				
5-46.1	Магнитная проводимость	H				

* В связи с принятием наименования «сименс» эта единица должна именоваться «сименс на метр» (S/m). К. Ш.

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятичных кратных и дольных от единиц СИ	Другие десятичные кратные и дольные от единиц СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
5-49.1 5-49.2 5-49.3	Полное сопротивление, Модуль сопротивления и Реактивное сопротивление	Ω	M Ω k Ω			
5-51.1	Полная проводимость,		m Ω			
5-51.2	Модуль полной проводимости и	Ω^{-1} *			kS S mS μ S	
5-51.3	Реактивная проводимость					
5-52.1	Активная мощность		TW GW MW kW			

* См. примечание к п. 5-42.1.К.Ш.

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятичных кратных и дробных от единиц СИ	Другие десятичные кратные и дробные от единиц СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
5-53.1	Кажущаяся мощность	W	mW μW nW			См. также ИСО/R31, часть V
5-54.1	Реактивная мощность	VA			var	См. также ИСО/R31, часть V

Часть VIII. Физическая химия и молекулярная физика *

8-3.1	Количество вещества				kmol mol **	
-------	---------------------	--	--	--	----------------	--

* В настоящее время находится в стадии проекта.

** Решением ГКМВ от октября 1971 г. моль принят в качестве седьмой основной единицы СИ. В связи с этим моль и производные от него единицы должны быть перенесены из колонки 6 в колонки 3, 4 или 5 соответственно. К. Ш.

1 моль есть количество вещества системы, в которой содержится столько структурных элементов, сколько атомов углерода содержится в нуклиде ¹²C с массой 0,012 кг (точно). Структурный элемент должен быть специфицирован и может представлять собой атом, молекулу, ион, электрон и т. д. или группу подобных частиц.

Пункты ИСО/R 31	Величина	Единица СИ	Выбор рекомендованных десятичных кратных и дольных единиц СИ	Другие десятичные кратные и дольные единицы СИ	Другие единицы, допускаемые к применению	Примечание
8-5.1	Молярная масса				kg/mol g/mol	О литре (l) см. 1-5.1
8-6.1	Молярный объем				$1 \text{ m}^3/\text{kmol} = 1 \text{ l/mol}$	
8-7.1	Молярная внутренняя энергия				J/mol J/kmol	
8-8.1	Молярная теплоемкость				J/(mol · K); J/(mol · °C) J/(kmol · K); J/(kmol · °C)	
8-9.1 8-13.1	Молярная энтропия Молярность				J/(mol · K) kJmol/m ³ = 1 mol/l = 1 mol/dm ³ mol/m ³ kmol/kg mol/kg	О литре (l) см. 1-5.1
8-15.1	Молярность					
8-36.1 8-38.1	Коэффициент диффузии Коэффициент тепловой диффузии	m ² /s m ² /s				

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ

С. В. ГОРБАЦЕВИЧ, В. М. ХОЛИН

ВНИИМ

УДК 53.081 (09)

ЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 60 ЛЕТ

Современное состояние вопроса об определении, уточнении и согласовании фундаментальных физических констант представляет глубокий интерес как для физиков, так и для метрологов. Важность физического аспекта заключается в том, что уточнение констант дает возможность одновременного уточнения некоторых физических зависимостей. Примером этому может служить история с Лембовским сдвигом, с уточнением внутренней структуры протона, с аномальным магнитным моментом электрона и с многими другими вопросами современной физики. Именно эти причины и побуждают физиков, экспериментаторов и теоретиков, продолжать усилия по дальнейшему уточнению физических констант. Особенно широко эти исследования проводились в научных лабораториях Соединенных Штатов Америки. В настоящее время в Советском Союзе масштабы исследований по уточнению констант все увеличиваются.

Метрологический аспект задачи состоит в использовании констант для поддержания размеров единиц, а в дальнейшем и для их воспроизведения. Наиболее обнадеживающие перспективы на данном этапе представляются при применении таких констант, как гиромагнитное отношение протона и отношение постоянной Планка к элементарному заряду.

К числу констант, которые периодически согласуют друг с другом, начиная с 1929 г., относятся:

скорость света в пустоте, c

постоянная Ридберга, R_∞

постоянная тонкой структуры, α

гиромагнитное отношение протона, γ_p

отношение магнитного момента протона к магнетону Бора μ_p/μ_B

отношение магнитного момента протона к ядерному магне-

тону μ_p/μ_N

отношение магнитного момента электрона к магнетону Бора μ_e/μ_B

постоянная Фарадея, F
элементарный заряд, e
число Авогардо, N
постоянная Планка, h
квант магнитного потока, $h/(2e)$
масса покоя протона, m_p
масса покоя электрона, m_e
удельный заряд электрона, e/m_e .

Кроме того, в величинах, значения которых связаны с произведением единицы тока в абсолютной мере, обычно фигурирует ускорение силы тяжести и его значение почти всегда дают наряду со значениями констант.

Ниже приводятся некоторые сведения о результатах работ по определению и уточнению физических констант в СССР и в других странах мира. Значения приводятся в системе СГС, в которой обычно выражались результаты, полученные авторами, и в Международной системе единиц, которая в настоящее время принята для всеобщего применения.

Остановимся вначале на вкладе, который внесли в определение физических констант русские и советские физики и метрологи.

1. Первый опыт в России по определению элементарного заряда электрона принадлежит А. Ф. Иоффе, который получил в 1912 г. значение

$$e = 4,8024 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ} = 1,60191 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

В то время это было на уровне лучших результатов.

2. В 1928 г. П. И. Лукирский и С. С. Прилежаев осуществили опыт по определению константы h/e методом шарового конденсатора и получили

$$h/e = (1,3723 \pm 0,0013) \cdot 10^{-17} \text{ ед. СГСЭ} = \\ = (4,11405 \pm 0,0039) \cdot 10^{-15} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{Кл}^{-1}.$$

3. В течение 1958—1965 гг. Б. М. Яновским и Н. В. Студенцовым во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) были поставлены обширные опыты по определению гиромангнитного отношения протона в слабых полях катушек Гельмгольца и получено значение

$$\gamma_p = (2,675\ 162 \pm 0,000\ 005) \cdot 10^8 \text{ Т}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

В Харьковском Государственном институте мер и измерительных приборов (ХГНИИМ) в 1964—1968 гг. Г. К. Ягола и В. И. Зингерман определили гиромангнитное отношение протона в сильном поле и получили значение

$$\gamma_p = (2,675\ 071 \pm 0,000\ 010) \cdot 10^8 \text{ Т}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Измерение гиромагнитного отношения в сильных и слабых полях позволяют получить коэффициент перехода от национального ампера СССР к абсолютному амперу с большой точностью.

Одновременные измерения γ_p в слабых и сильных полях, равноценные по точности, не произведены ни в одной стране.

4. В 1964 г. Б. А. Мамырина и А. А. Французова в Физико-техническом институте АН СССР в г. Ленинграде очень точно определили отношение магнитного момента протона к ядерному магнетону и получили значение

$$\mu_p/\mu_N = 2,79279 \pm 0,00002.$$

Этот результат долгое время отличался от общепринятого, основанного на работах американских физиков. Однако появившаяся недавно работа английских ученых подтверждает результат Б. А. Мамырина и А. А. Французова.

5. В 1967 г. А. П. Наумовым во ВНИИМ было определено отношение g -фактора рубидия к g -фактору протона. Предварительный результат равен

$$g_r/g_p = 658,285 \pm 0,005.$$

Это отношение используют для вычисления отношения магнитных моментов электрона и протона.

6. В 1952 г. А. И. Карташев во ВНИИМ измерил скорость света с помощью интерференционного модулятора и получил значение

$$c = (299\,788,0 \pm 5,4) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}.$$

7. В 1956 г. В. А. Величко и В. П. Васильев в Центральном научно-исследовательском институте геодезии, аэрофотосъемки и картографии измерили скорость света с помощью двух ячеек Керра. Полученный ими результат равен

$$c = (299\,793,9 \pm 1,0) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}.$$

8. К 1965 г. Г. С. Симкин в ХГНИИМ измерил с помощью радиointерферометра скорость распространения электромагнитных волн и получил один из наиболее точных результатов в области измерения скорости света:

$$c = (299\,793,0 \pm 0,1) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}.$$

9. Исследованием ускорения силы тяжести занимались в СССР главным образом метрологи в Главной палате мер и весов, а затем во ВНИИМ. Начиная с конца XIX в. Д. И. Менделеев, затем А. А. Иванов (1915 г.), В. Д. Басков и В. У. Старцев (в 30-е годы), П. Н. Агалецкий, А. М. Марциняк, С. Н. Торопин и К. Н. Егоров (1957 г.) определяли абсолютное значение ускорения силы тяжести различными методами.

К 1957 г. были получены значения ускорения силы тяжести методом поворотных маятников и методами совмещенного и

свободного падения кварцевого жезла, что позволило получить поправку к Потсдамской системе, равную

$$(-12,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

10. В связи с работами по воспроизведению международного ампера М. Ф. Маликов и А. К. Колосов в 30-х годах производили исследования по определению постоянной Фарадея.

11. В настоящее время во ВНИИМ проводятся исследования по уточнению постоянной тонкой структуры, отношения магнитного момента протона к магнетону Бора и отношения магнитного момента протона к ядерному магнетону.

С целью поддержания эталона вольта СССР производятся работы по измерению кванта магнитного потока на основе эффекта Джозефсона и по дальнейшему уточнению гиромагнитного отношения протона.

В лабораториях различных стран мира за последние 60 лет проводились измерения физических констант и результаты этих измерений приводятся ниже.

Методы определения элементарного заряда электрона

Метод масляных капель Милликена

В этом методе изучают поведение заряженной капли масла под воздействием электрического поля. При равновесии сил электростатического поля, тяжести и вязкого трения измеряют величину $e^{2/3}/\eta$, где η — вязкость воздуха, e — элементарный заряд. Значения e , полученные этим методом различными авторами, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Год	Автор	$e \cdot 10^{19}$, ед. СГСЭ	$e \cdot 10^{19}$, Ка
1910—1930	R. A. Millikan	$4,770 \pm 0,005$	$1,591 1 \pm 0,001 7$
1910	E. Regener	$4,90 \pm 0,05$	$1,634 \pm 0,017$
1923	Y. Ishida	$4,770 \pm 0,014$	$1,591 \pm 0,005$
1925	J. Mattauich	$4,758 \pm 0,005$	$1,587 1 \pm 0,001 7$
1935	G. Kellström	$4,818 \pm 0,007$	$1,607 1 \pm 0,002 3$
1936	E. Bäcklin, H. Flemberg	$4,800 \pm 0,008$	$1,601 1 \pm 0,002 7$
1936—1937	W. N. Band	$4,814 \pm 0,005$	$1,605 7 \pm 0,001 7$
1937	W. V. Houston	$4,796 \pm 0,005$	$1,599 8 \pm 0,001 7$
1937	Y. Ishida, I. Fukushima	$4,806 \pm 0,005$	$1,603 1 \pm 0,001 7$
1938	P. J. Rigden	$4,800 \pm 0,004$	$1,601 1 \pm 0,001 3$
1938	G. B. Banerjea, B. Plattanaik	$4,811 \pm 0,009$	$1,604 8 \pm 0,003$
1939—1940	T. H. Laby; V. D. Hopper	$4,8020 \pm 0,001 3$	$1,601 8 \pm 0,000 4$
1949	V. D. Hopper	$4,802 4 \pm 0,000 7$	$1,601 9 \pm 0,000 2$

Методы счета частиц

В этом методе измеряют полный заряд, переносимый частицами, число которых считают при помощи счетчика Гейгера или другим методом. Найденные значения e приведены в табл. 2.

Таблица 2

Год	Автор	$e \cdot 10^{19}$, ед. СГСЭ	$e \cdot 10^{19}$, Кл
1908	E. Rutherford, H. Geiger	$4,65 \pm 0,15$	$1,55 \pm 0,05$
1909	E. Regener	$4,79 \pm 0,15$	$1,598 \pm 0,05$
1911	E. Rutherford, Boltwood	$4,81 \pm 0,15$	$1,604 \pm 0,05$
1934—1935	R. Ladenberg, Y. Beers	$4,768 \pm 0,005$	$1,590 \pm 0,002$
1940	E. Shopper	$4,840 \pm 0,030$	$1,614 \pm 0,010$

Определение числа Авогадро методом рентгеновских лучей

В этом методе для определения постоянной решетки кристалла d_n измеряют угол отражения θ_n от этого кристалла характеристического рентгеновского излучения с известной длиной волны λ по формуле

$$d_n = n\lambda / (2 \sin \theta_n),$$

где n — порядок отражения.

Длину волны гораздо проще определить в икс-единицах, чем в ангстремах, поэтому фактически измеряют $d_n \Lambda$, где Λ — коэффициент перехода от абсолютных единиц к икс-единицам.

Число Авогадро N можно выразить через параметры кристалла по формуле

$$N = \frac{Mf}{\rho d_n^3 \Phi},$$

где M — молекулярный вес кристалла,

f — число молекул в единичной ячейке кристалла,

ρ — плотность кристалла,

Φ — геометрический фактор кристалла, зависящий от формы элементарной ячейки.

Суммируя оба приведенных выше уравнения, получим число Авогадро—Зигбана $N\Lambda^3$.

Однако в 30-х годах точность определения коэффициента перехода Λ и постоянной Фарадея F намного превышала точность определения элементарного заряда и поэтому метод рентгеновских лучей применяли для определения элементарного заряда электрона по формуле $e = \frac{F\Lambda^3}{(N\Lambda^3)}$, используя известное значение постоянной Фарадея F . Были получены значения элементарного

заряда, приведенные в табл. 3, которые вызвали сомнение в верности значения e , полученного методом масляных капель Милликена.

Таблица 3

Год	Автор	$e \cdot 10^{18}$, ед. СГСЭ	$e \cdot 10^{18}$, Кл
1928	E. Bäcklin	$4,794 \pm 0,006$	$1,599 \pm 0,002$
1928	Badlund	$4,774 \pm 0,007$	$1,5924 \pm 0,0023$
1929	J. A. Bearden	$4,804 \pm 0,005$	$1,6024 \pm 0,0017$
1930	J. M. Cork	$4,816 \pm 0,006$	$1,6064 \pm 0,002$
1931	J. A. Bearden	$4,806 \pm 0,003$	$1,6031 \pm 0,001$
1935	E. Bäcklin	$4,805 \pm 0,004$	$1,6028 \pm 0,0013$
1935	M. Söderman	$4,806 \pm 0,003$	$1,6031 \pm 0,001$
1935	J. A. Bearden	$4,8036 \pm 0,0005$	$1,60231 \pm 0,00017$
1946	K. Miller, J. M. Du Mond	$4,801 \pm 0,002$	$1,6014 \pm 0,0007$
1936	J. Du Mond, V. L. Bollman	$4,799 \pm 0,007$	$1,6008 \pm 0,0023$

Когда в опыте Милликена была найдена ошибка в измерении вязкости воздуха и получено значение элементарного заряда электрона,

$$e = (4,8059 \pm 0,0052) \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ} = \\ = (1,6031 \pm 0,0017) \cdot 10^{-19} \text{ Кл,}$$

совпадающее с данными других авторов, описанный метод стали использовать для измерения числа Авогадро—Зигбана N_A^3 . Полученные значения N_A^3 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Год	Автор	Значение $N_A^3 \cdot 10^{-20}$, моль ⁻¹
1931	J. A. Bearden	$6059,60 \pm 0,50$
1932	Yuching Tu	$6059,60 \pm 0,50$
1953	G. Brogren	$6059,83 \pm 0,50$
1955	M. Straumanis, A. Ievins, K. Karlsons	$6060,81 \pm 0,50$
1957	A. Smakula, J. Kalnais	$6060,14 \pm 0,30$
1962	I. Hennins	$6059,77 \pm 0,24$
1964	I. Hennins, J. A. Bearden	$6059,77 \pm 0,15$

Методы определения удельного заряда электрона e/m_e

Электромагнитный метод

В этом методе изучают движение заряженных частиц в электромагнитных полях различной конфигурации. Значения e/m_e , полученные этим методом, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Год	Автор	$e/m_e \cdot 10^{-11}$, Кл·кг ⁻¹
1908—1909	A. H. Bucherer	1,763 ± 0,008
1909	K. Wolz	1,767 ± 0,002
1913	C. Schaefer	1,765 ± 0,002
1914	G. Neumann	1,765 ± 0,002
1908	J. Classen	1,776 ± 0,002
1911	J. Malassez	1,769 ± 0,002
1911	A. Bestelmeyer	1,766 ± 0,001
1912	F. Alberti	1,766 ± 0,002
1922	H. Busch	1,768 ± 0,0015
1927	K. Wolf	1,769 ± 0,002
1929—1930	F. Kirchner	1,759 0 ± 0,001 5
1930	C. T. Perry, E. L. Chaffee	1,759 8 ± 0,001
1933—1937	F. G. Dunnington	1,759 7 ± 0,000 4
1933—1938	A. E. Shaw	1,758 1 ± 0,001 3

Фотоэлектрический метод

В этом методе при помощи магнитного спектрометра измеряют энергию электронов, испущенных тонкими слоями материалов под воздействием рентгеновского излучения. Используя известное значение h/e , ряд авторов получили значения e/m_e (табл. 6.)

Таблица 6

Год	Автор	$e/m_e \cdot 10^{-11}$, Кл·кг ⁻¹
1933	G. G. Kretschmar	1,757 0 ± 0,002 6
1936	H. R. Robinson	1,761 0 ± 0,001 5

Метод измерения коэффициента преломления кристаллов

J. A. Bearden в 1938 г., используя метод измерения коэффициента преломления кристаллов, определил значение удельного заряда электрона

$$e/m_e = (1,7601 \pm 0,0003) \cdot 10^{11} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Метод измерения частоты дублетного расщепления линий в магнитном поле

В этом методе измеряют частоту дублетного расщепления магнитных линий в магнитном поле при нормальном эффекте Зеемана и затем отношение e/m_e вычисляют по формуле $\Delta\nu = \frac{e}{m_e} H$. Полученные данные приведены в табл. 7.

Таблица 7

Год	Автор	$e/m_e \cdot 10^{-11}$, Кл·кг ⁻¹
1923—1929	H. D. Babcock	1,760 6 ± 0,001 2
1932—1934	W. V. Houston, J. S. Campbell, L. E. Kinsler	1,757 0 ± 0,000 7

Измерение атомной массы электрона Nm_e методом исследования изотопического смещения линий

В этом методе определяют разность волновых чисел ν_D и ν_H линий H_α и D_α серии Бальмера водорода и дейтерия или водорода и однократно ионизированного гелия. Значение удельного заряда получают по формуле $e/m_e = F/Nm_e$. Результаты экспериментов даны в табл. 8.

Таблица 8

Год	Автор	$e/m_e \cdot 10^{-11}$, Кл·кг ⁻¹
1927—1937	W. V. Houston	1,760 1 ± 0,001 5
1933—1938	R. C. Williams, R. C. Gibbs	1,757 9 ± 0,000 4
1933—1935	C. D. Chane, F. H. Spedding, N. S. Grace	1,758 1 ± 0,000 4
1939	Djen-Yuen Chu	1,759 6 ± 0,000 3

Определение постоянной Фарадея

Самый простой и наиболее прямой метод определения постоянной Фарадея $F = Ne$ заключается в измерении количества электричества, переносимого при электролизе одним молем вещества. Использование серебряного и йодного кулометров и кулонометра, основанного на разложении $Na_2C_2O_4$, дало результаты, приведенные в табл. 9.

Таблица 9

Год	Автор	F , Кл·моль ⁻¹
1916	G. W. Vinal, W. M. Bouvard	96 522,9 ± 1,9
1960	D. N. Craig, J. I. Hoffman, C. A. Law, W. J. Hamer	96 485,66 ± 0,66
1914	G. W. Vinal, S. I. Bates	96 521,5 ± 1,3
1953	D. N. Craig, J. I. Hoffman	96 513 0 ± 3,0
1953	D. A. Mac Innes	96 522,7 ± 3,0

**Методы определения отношения h/e
постоянной Планка к заряду электрона**

Фотоэлектрический метод

Результаты определения значения h/e фотоэлектрическим методом приведены в табл. 10

Таблица 10

Год	Автор	$h/e \cdot 10^{13}$, ед. СГСЭ	$h/e \cdot 10^{18}$, Дж·с·Кл ⁻¹
1916	P. A. Millikan	$1,377\ 7 \pm 0,006\ 0$	$4,130\ 2 \pm 0,018\ 0$
1930	A. R. Olpin	$1,374\ 8 \pm 0,006\ 0$	$4,121\ 5 \pm 0,018\ 0$

**Метод измерения длины волны, соответствующей
коротковолновой границе рентгеновского спектра**

В эксперименте такого рода измеряют коротковолновую границу непрерывного спектра рентгеновских лучей, испускаемых мишенью, бомбардируемой электронами, ускоренными напряжением U . Применение уравнения Эйнштейна дает

$$U\lambda_{кр} = \frac{hc^2}{e\Lambda}.$$

Однако до 40-х годов абсолютное значение длины волны коротковолновой границы $\lambda_{кр}$ рентгеновских лучей измеряли точнее, чем напряжение, которое ограничивает точность определения h/e , и поэтому в ранних экспериментах коэффициент Λ считали известным точно, и для h/e были получены результаты, приведенные в табл. 11.

Таблица 11

Год	Автор	$h/e \cdot 10^{13}$, ед. СГСЭ	$h/e \cdot 10^{18}$, Дж·с·Кл ⁻¹
1920	E. Wagner	$1,372\ 7 \pm 0,005\ 0$	$4,115\ 2 \pm 0,015\ 0$
1921	W. Duane, H. Palmer	$1,374\ 9 \pm 0,005\ 0$	$4,121\ 8 \pm 0,015\ 0$
1929	H. Feder	$1,375\ 9 \pm 0,005\ 0$	$4,124\ 8 \pm 0,015\ 0$
1934—1937	P. Kirkpatrick, P. A. Ross	$1,375\ 4 \pm 0,005\ 0$	$4,123\ 3 \pm 0,015\ 0$
1935	G. Schaitberger	$1,377\ 5 \pm 0,005\ 0$	$4,129\ 6 \pm 0,0050$
1936	J. W. Du Mond, K. L. Bollman	$1,376\ 5 \pm 0,000\ 3$	$4,126\ 6 \pm 0,000\ 9$
1940	P. Ohlin	$1,380\ 0 \pm 0,000\ 5$	$4,137\ 1 \pm 0,001\ 5$
1941	J. A. Bearden, G. Schwarts	$1,377\ 5 \pm 0,000\ 2$	$4,129\ 6 \pm 0,000\ 8$
1942	W. K. H. Panofsky, A. Green, J. W. Du Mond	$1,378\ 6 \pm 0,0000\ 2$	$4,132\ 9 \pm 0,000\ 8$

Уточнение значения h/e потребовало вычисления $U\lambda_{кр}$ непосредственно, а h/e — из всей совокупности констант с помощью метода наименьших квадратов. В послевоенные годы для $U\lambda_{кр}$ были получены результаты, приведенные в табл. 12.

Таблица 12

Год	Автор	$U \lambda_{кр} \cdot 10^3$, В-нкс-ед.
1950	J. A. Bearden, G. Schwarts	$12\,371,0 \pm 2,0$
1951	J. A. Bearden, F. T. Johusan, H. M. Watts	$12\,371,0 \pm 2,0$
1953	G. L. Felt, J. N. Harris, J. W. Du Mond	$12\,370,0 \pm 2,0$
1964	J. J. Spijkerman, J. A. Bearden	$12\,273,26 \pm 0,40$

Более поздние результаты, полученные несколькими видоизмененными методами, дают значение $U\lambda_{кр}$, приведенное в табл. 13.

Таблица 13

Год	Автор	$U \lambda_{кр} \cdot 10^3$, В-нкс-ед.
1953	Ake Nilsson	$12\,372,0 \pm 5,0$
1954	F. G. Dunnington, C. L. Hemenway, J. D. Rough	$12\,368,7 \pm 1,8$
1962	S. Hagstrom, O. Hörnfeldt, C. Nord- lind, K. Siegbahn	$12\,372,7 \pm 1,5$

Определение h/e методом измерения потенциала ионизации

В этом методе измеряют

$$U\lambda = c^2 \cdot h/e.$$

Считая скорость света c известной более точно, чем остальные константы, авторы получили значения h/e , представленные в табл. 14.

Таблица 14

Год	Автор	$h/e \cdot 10^{12}$, ед. СГСЭ	$h/e \cdot 10^{13}$, Дж·с·Кл ⁻¹
1926	E. O. Lawrence	$1,375\,3 \pm 0,004\,0$	$4,123\,0 \pm 0,001\,2$
1931—1932	L. C. Van-Atta	$1,375\,2 \pm 0,004\,0$	$4,122\,7 \pm 0,001\,2$
1935	E. Whiddington, E. G. Woodroffe	$1,373\,6 \pm 0,005\,0$	$4,117\,9 \pm 0,001\,5$

Определение h/e с использованием эффекта Джозефсона

Облучение перехода Джозефсона частотой ν вызывает появление на его зажимах напряжения, равного $U = h\nu/2e$. Измеряя частоту облучения и напряжение, можно получить значение физической константы h/e , которое приведено в табл. 15.

Таблица 15

Год	Автор	$h/e \cdot 10^{14}$, Дж·с·Кл ⁻¹
1967—1969	D. N. Langenberg, W. N. Parker, B. N. Taylor, A. Denenstein	4,135 705 ± 0,000 010
1969	B. W. Petley, K. Morris	4,135 706 ± 0,000 009

Методы определения константы h/m_e

Измерение комptonовской длины электрона

При рассеянии рентгеновских лучей свободными электронами длина волны падающих рентгеновских лучей изменяется и связана с углом рассеяния θ соотношением $\Delta\lambda = (h/m_e c) (1 - \cos \theta)$.

Измеряя угол рассеяния и изменение длины волны, можно получить значение физической константы $h/m_e c$.

В 1934 г. P. A. Ross и P. Kirkpatrick получили

$$\begin{aligned} h/m_e c &= (24,180 \pm 0,040) \text{ м\AA} = \\ &= (2,4180 \pm 0,0040) \cdot 10^{-12} \text{ м}. \end{aligned}$$

Метод измерения частоты аннигиляции пары электрон—позитрон

При аннигиляции пары электрон—позитрон испускаются два фотона с длиной волны $\lambda = h/m_e c$. Измеряя эту длину волны, ряд авторов получили данные, которые сведены в табл. 16.

Таблица 16

Год	Автор	$h/m_e c$
1949	J. M. Du Mond, D. A. Lind, B. B. Watson	$(2,427 1 \pm 0,001 0) \cdot 10^{-12} \text{ м}$
1951—1952	D. E. Muller, H. C. Hoyt, D. J. Klein, J. W. Du Mond	$(2,426 20 \pm 0,000 33) \cdot 10^{-12} \text{ м}$
1962	J. W. Knowles	$(24,212 16 \pm 0,000 75) \text{ нкс-ед.}$

Метод измерения дифракции электронов

В этом методе измеряют длину волны Де Бройля для электронов $\lambda = h/m_e v$. Скорость электронов вычисляют по формуле $v = \sqrt{2eU/m_e}$, где U — пройденная ими разность потенциалов. Эта формула верна в нерелятивистском случае. Отсюда

$$\frac{h}{m} \cdot \frac{h}{e} = 2U\lambda^2.$$

Если измерять длину волны Де Бройля в икс-единицах, то получим

$$\frac{h}{m_e} \cdot \frac{h}{e} \cdot \frac{1}{\text{Å}^2} = 2U\lambda_{\text{икс-ед}}^2.$$

Этим методом были получены значения $h/m_e \cdot h/e$ (табл. 17).

Таблица 17

Год	Автор	$\left(\frac{h}{m_e} \cdot \frac{h}{e}\right) \cdot 10^{18}$
1938	S. von Frisen	$(3,003\ 03 \pm 0,001\ 80) \text{ В} \cdot \text{м}^2$
1952	T. В. Rymer, K. H. R. Wright	$(2,995\ 15 \pm 0,000\ 30) \text{ В} \cdot \text{икс-ед}^2$

При измерении скорости непосредственно были получены значения $h/m_e = \lambda v$, приведенные в табл. 18.

Таблица 18

Год	Автор	$h/m_e, \text{ эрг} \cdot \text{с} \cdot \text{г}^{-1}$	$h/m_e \cdot 10^4, \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1}$
1932	R. V. Meibon, E. Rupp	$7,289 \pm 0,022$	$7,289 \pm 0,022$
1934	J. Gnan	$7,274 \pm 0,016$	$7,274 \pm 0,016$

Определение g_e -фактора электрона

Значение g_e -фактора электрона, полученное различными методами, представлено в табл. 19.

Таблица 19

Год	Автор	$1/2g_e$
1948—1951	P. Kusch, H. Taub, A. K. Mann	$1,001\ 19 \pm 0,000\ 05$
1953—1968	D. T. Wilkinson, H. R. Crane	$1,001\ 159\ 557 \pm 0,000\ 000\ 030$
1968	G. Cräff, F. G. Major, R. W. H. Roeder, G. Werth	$1,001\ 159 \pm 0,000\ 002$
1969	G. Cräff, E. Kiempt, G. Werth	$1,001\ 159\ 66 \pm 0,000\ 000\ 30$

Отношение g -фактора электрона к g -фактору протона в атоме водорода $g_J(H)/g'_p$ является важной физической константой. Результаты определения его приведены в табл. 20.

Таблица 20

Год	Автор	$g_J(H)/g'_p$
1952	P. Kusch, S. Koenig, A. G. Prodell	$658,217 1 \pm 0,000 6$
1954	R. Beringer, M. A. Heald	$658,217 3 \pm 0,000 2$
1959	E. B. D. Lambe	$658,215 91 \pm 0,000 04$
1964	N. F. Ramsey	$658,210 49 \pm 0,000 20$

Значение отношения g -фактора электрона в атоме рубидия к g -фактору протона $g_J(Rb)/g'_p$ дано в табл. 21.

Таблица 21

Год	Автор	$g_J(Rb)/g'_p$
1962	P. L. Bender	$658,234 \pm 0,004$
1964	R. L. Driscoll	$658,232 3 \pm 0,0007$

Определение магнитного момента протона

Значения отношения магнитного момента протона к ядерному магнетону μ'_p/μ_N даны в табл. 22.

Таблица 22

Год	Автор	μ'_p/μ_N
1950	F. Bloch, C. D. Jeffries	$2,792 40 \pm 0,000 20$
1950	H. Sammer, H. A. Thomas, J. A. Hipple	$2,792 67 \pm 0,000 06$
1956	K. R. Trigger	$2,792 67 \pm 0,000 10$
1959	H. S. Boyne, P. A. Franken	$2,792 83 \pm 0,000 06$
1963	J. H. Sanders, K. C. Turberfield	$2,792 68 \pm 0,000 05$
1966	J. B. Mariot, H. Winkler	$2,792 59 \pm 0,000 12$
1967	B. M. Petley, K. Morris	$2,792 74 \pm 0,000 05$

Значения отношения магнитного момента протона к магнетону Бора μ_p'/μ_B , полученные методом циклотронного резонанса, представлены в табл. 23.

Таблица 23

Год	Автор	Значение μ_p'/μ_B
1950	J. H. Gardner, E. M. Purcell	$657,475 \pm 0,008$
1959	S. Liebes, P. Franken	$657,467 6 \pm 0,005$
1956	W. A. Hardy, E. M. Purcell	$657,462 \pm 0,003$
1963	J. H. Sanders, K. F. Tittel, J. F. Ward	$657,462 0 \pm 0,002 4$

Определение постоянной тонкой структуры α

Значения постоянной тонкой структуры α , приведены в табл. 24

Таблица 24

Год	Автор	Значение α^{-1}
1950—1953	S. Triebwasser, E. S. Dayhoff, W. E. Lamb	$137,038 8 \pm 0,000 9$
1962	N. F. Ramsey at all.	$137,035 9 \pm 0,000 4$
1962—1967	W. V. Hughes at all.	$137,036 7 \pm 0,001 0$
1965—1969	R. T. Robescoll, B. L. Cosens, T. V. Vorburger	$137,035 8 \pm 0,000 6$
1968	S. L. Kaufman, M. Leventhal, K. R. Lea	$137,035 0 \pm 0,000 4$
1968	H. Metcalf at all.	$137,035 4 \pm 0,000 6$

Определение гиромагнитного отношения протона

Значения этой постоянной различные исследователи определяли в сильных и слабых полях и их результаты сведены в табл. 25.

Приведенные данные характеризуют уровень работ по определению и уточнению фундаментальных физических констант во всем мире. Такое уточнение значений физических констант дол-

Таблица 25

Год	Автор	Значение $\nu_p' \cdot 10^{-8}, \text{r}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$
1949	H. A. Thomas, R. L. Driscoll; J. A. Hipple	2,675 230 ± 0,000 060
1957	W. Wilhelmy	2,675 490 ± 0,000 080
1960	H. Capptuller	2,675 220 ± 0,000 100
1958	P. L. Bender, R. L. Driscoll	2,675 150 ± 0,000 010
1962	P. Vigoureux	2,675 171 ± 0,000 008
1965	Ko Hara, Norico Koizumi	2,675 163 ± 0,000 027

жно стать важнейшей вехой в развитии метрологии, так как позволит в будущем по ряду единиц физических величин перейти на эталоны, основанные на физических константах.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ДЖОЗЕФСОНА
В МЕТРОЛОГИИ

Идею о существовании кванта магнитного потока впервые высказал Ф. Лондон [1], показавший, что магнитный поток, заключенный в сверхпроводящем кольце, принимает значения, кратные величине \hbar/e , где \hbar — постоянная Планка, e — заряд электрона. Впоследствии экспериментально было подтверждено [2, 3], что магнитный поток в замкнутом сверхпроводящем кольце действительно квантуется, а квант определяется выражением

$$\Phi_0 = \frac{\hbar}{2e}.$$

Наличие в знаменателе коэффициента 2 объясняется тем, что сверхпроводимость обусловлена появлением в металле при температуре ниже критической связанных пар электронов. Эксперименты [2, 3] не позволяют определить значение Φ_0 с достаточно высокой точностью.

В 1962 г. Джозефсон теоретически предсказал [4] существование в сверхпроводниках своеобразных эффектов, получивших впоследствии название эффектов Джозефсона. Их квантовомеханическое объяснение [5, 6] основано на рассмотрении условий прохождения через потенциальный барьер, создаваемый тонким слоем изолятора (обычно 1—2 нм) связанных пар электронов, определяющих ток сверхпроводимости. Пары электронов, образующиеся в сверхпроводящем металле, не способны обмениваться с окружающей средой энергией, меньшей некоторой энергии 2Δ , называемой удвоенной энергетической щелью. При этом оказывается, что за счет квантового туннельного эффекта возможно прохождение этих пар через изолятор, как если бы этот изолятор был сверхпроводящим. Это явление получило название эффекта Джозефсона на постоянном токе или слабой сверхпроводимости. Слабая сверхпроводимость сохраняется до тех пор, пока ток меньше некоторого тока I_m , называемого максимальным током

Джозефсона и характеризующего данный туннельный узел. Если же внешняя цепь задает ток, большой I_m , слабая сверхпроводимость разрушается и на барьере появляется некоторое напряжение U .

Если это напряжение не превышает напряжения, соответствующего энергетической щели, то может иметь место эффект Джозефсона на переменном токе, который заключается в следующем. При прохождении барьера в направлении падения напряже-

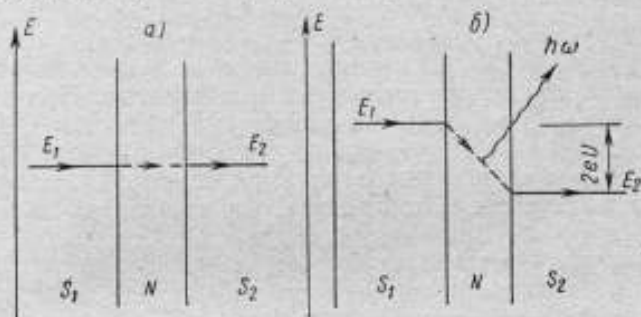


Рис. 1. Прохождение связанных пар электронов через туннельный узел при эффекте Джозефсона: а — на постоянном токе, б — на переменном токе.

S_1 и S_2 — сверхпроводники и N — изолятор, образующие узел Джозефсона, E_1 и E_2 — энергии пар в сверхпроводниках. Пунктиром показано движение пар через изолятор.

ния пары должны были бы приобретать дополнительную энергию $2eU$, а при движении в противоположном направлении отдавать такую же энергию. Но так как пары не могут принимать или отдавать энергию меньше 2Δ , то при условии $\Delta > eU$ эта дополнительная энергия излучается или поглощается в виде фотонов, удовлетворяющих соотношению

$$\hbar\omega = 2eU, \quad (1)$$

где ω — частота.

Если пар электронов, проходящих в направлении падения напряжения, больше, чем пар, проходящих в противоположном направлении, то протекающий через узел ток содержит составляющую с частотой $\omega = 2eU/\hbar$, а из области между сверхпроводниками наблюдается излучение электромагнитных волн этой же частоты.

Рассмотренный упрощенный механизм эффектов Джозефсона иллюстрирует рис. 1.

Роль кванта магнитного потока в согласовании фундаментальных физических констант

Под согласованием физических констант понимают определение значений, которые наилучшим образом удовлетворяют существующим зависимостям между константами. Для проведения такого

согласования необходимо, как указано в работах [7, 8], дополнительно определить по крайней мере три константы. По ряду соображений, на которых мы здесь не останавливаемся, для этого были выбраны: постоянная тонкой структуры α , элементарный заряд e и число Авогадро N . Полученная на основе экспериментов [9] по определению α , числа Фарадея F , гиромангнитного отношения протона μ_p и отношения магнитного момента протона к ядерному магнетону μ_p/μ_N система уравнений распадается на две группы. В одну группу входят данные по определению постоянной тонкой структуры, а в другую — по определению постоянной Фарадея, отношения магнитного момента протона к ядерному магнетону и гиромангнитного отношения протона. При переходе к условным уравнениям во второй группе получают только две функциональные зависимости между константами α , e , N , что недостаточно для однозначного их определения. Дополнительное условие, позволяющее избежать неоднозначности, дает первая группа уравнений. Такая ситуация предъявляет к опытам по определению α высокие требования, которым они не могут пока удовлетворить.

Включение в систему входных уравнений результатов экспериментов по определению кванта магнитного потока добавляет ко второй группе уравнений новую функциональную зависимость между e и α , что снимает указанную неоднозначность и позволяет получить более достоверные значения фундаментальных физических констант.

Кроме того, полученные результаты показали, что эксперименты по определению кванта магнитного потока имеют особое значение в согласовании. В частности, во ВНИИМ рассмотрена роль повышения точности экспериментов, на которых основывается согласование. При этом оказывается, что при равных уменьшениях погрешностей определения входных данных (скажем, в два раза) наибольший вклад в уточнение согласуемых констант дает уменьшение погрешности определения значения \hbar/e .

Но, помимо важности определения \hbar/e для получения согласованной системы фундаментальных физических констант, уже сейчас можно утверждать, что уточнение значения \hbar/e поможет прояснить вопрос о расхождениях между экспериментом и предсказаниями квантовой электродинамики. В частности, в выражение для частоты ν сверхтонкого расщепления в основном состоянии водорода, даваемое квантовой электродинамикой, входят известные с необходимой точностью константы и постоянная тонкой структуры α . При постановке в это выражение значения α , взятого изданных согласования Дюмонда и Козна, проведенного в 1963 г.

$$\alpha^{-1} = 137,038\ 8 \pm 0,000\ 6$$

и сравнении с экспериментально найденным значением ν , определенным с погрешностью $2 \cdot 10^{-11}$ [10], получим [11]

$$\frac{\nu_{\text{эксп}} - \nu_{\text{теор}}}{\nu_{\text{эксп}}} = (43 \pm 12) \cdot 10^{-11}.$$

Это расхождение может быть устранено, если для α воспользоваться полученным с помощью известного с большой точностью отношения \hbar/e значением

$$\alpha = \left(\frac{2R_{\infty}\gamma_p}{c} \cdot \frac{\mu_0}{\mu_p} \cdot \frac{\hbar}{c} \right)^{1/2},$$

где c — скорость света,
 R_{∞} — постоянная Ридберга для бесконечной массы,
 γ_p — гиромагнитное отношение протона,
 μ_0/μ_p — отношение магнитного момента протона к магнетону Бора.

Подставляя в эту формулу значения c , R_{∞} , γ_p , μ_0/μ_p и значение \hbar/e , полученное Паркером, Тейлором и Лангенбергом [12], равное

$$\hbar/e = (4,135\,725 \pm 0,000\,026) \cdot 10^{-15} \text{ Вб},$$

получаем для постоянной тонкой структуры

$$\alpha^{-1} = 137,035\,9 \pm 0,000\,4.$$

Подставив это значение в формулу для сверхтонкого расщепления [10] и сравнив результат с экспериментом [12], получим

$$\frac{\nu_{\text{эксп}} - \nu_{\text{теор}}}{\nu_{\text{эксп}}} = (0 \pm 8) \cdot 10^{-6}.$$

Таким образом, значение α , полученное из эксперимента по определению \hbar/e , с использованием точно известных констант, снимает существующие расхождения между теоретическими и экспериментальными данными. Конечно, полностью эта проблема будет разрешена после накопления достаточного количества экспериментальных данных, но уже сейчас видно, что уточнение отношения \hbar/e позволит с большей определенностью принять новое значение постоянной тонкой структуры.

Все это и объясняет возросший в последнее время интерес к измерению отношения \hbar/e .

Экспериментальное определение кванта магнитного потока

На рис. 2 схематически изображены некоторые типы узлов, используемых при практическом осуществлении эффектов Джозефсона. Туннельный узел a получают путем вакуумного напыления на подложку с предварительно нанесенными контактами тонкой

пленки (толщиной 200—500 нм) материала, который может переходить в сверхпроводящее состояние. Затем контролируемым окислением в воздушной среде или среде кислорода на эту пленку наносят слой диэлектрика (окисла) толщиной порядка 1 нм, на который

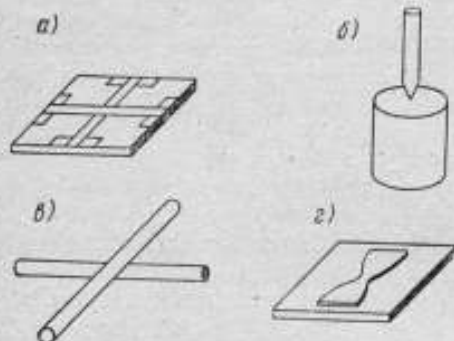


Рис. 2. Типы узлов Джозефсона: а — туннельный узел, б — и в — точечный контакт, г — сверхпроводящий мостик.

сверху напыляют вторую пленку. Место пересечения пленок образует узел Джозефсона. Точечный контакт б представляет собой острие из сверхпроводящего металла, силу давления которого на другой сверхпроводник можно регулировать. Другой тип точечного контакта в имеет вид двух круглых пересекающихся проводов. Образец г обычно называют сверхпроводящим мостиком. Пленку подобной формы можно получить механическим или фотогальваническим методом. Различные условия эксперимента приводят к тому, что наблюдаемые проявления эффекта Джозефсона на переменном токе на первый взгляд весьма отличаются от приведенных выше. Так, при пропускании через узел стоящего тока, большего I_m , излучение наблюдается только при дискретных значениях напряжения, а вольт-амперная характеристика узла на постоянном токе имеет ступенчатый характер. При этом частота излучения связана с напряжением ступени U_n соотношением

$$\omega = \frac{2e}{h} \cdot \frac{U_n}{n}, \quad (2)$$

где n — номер ступени.

Такое проявление эффекта Джозефсона на переменном токе впервые наблюдали Эк, Скалапино и Тейлор [13], а излучение из узла было зарегистрировано в Физико-техническом институте низких температур (ФТИНТ) АН УССР [14]. Теоретическое объяснение эти эксперименты получили в работах [15—17], где узел Джозефсона рассматривается как полосковый резонатор, колебания в котором возбуждаются переменным током Джозефсона.

сверху напыляют вторую пленку. Место пересечения пленок образует узел Джозефсона.

Точечный контакт б представляет собой острие из сверхпроводящего металла, силу давления которого на другой сверхпроводник можно регулировать. Другой тип точечного контакта в имеет вид двух круглых пересекающихся проводов.

Образец г обычно называют сверхпроводящим мостиком. Пленку подобной формы

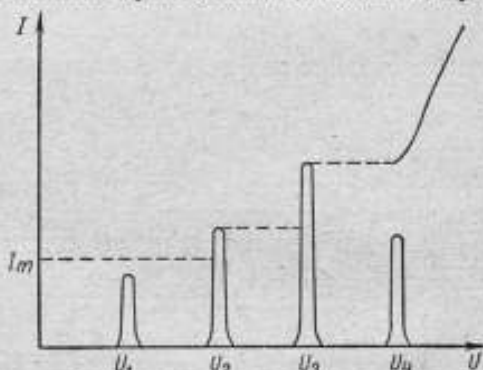


Рис. 3. Зависимость постоянного тока, протекающего через узел Джозефсона, от напряжения на узле.

При совпадении частоты этого тока с одной из собственных частот резонатора $\omega_1, \dots, \omega_n$ полный ток, протекающий через узел, имеет резонансные пики постоянной составляющей (рис. 3). Однако в связи с тем, что в экспериментах независимой переменной является не напряжение, а ток, то наблюдается ступенчатая вольт-амперная характеристика, показанная на рис. 3 пунктиром.

Такая же ступенчатая характеристика наблюдается и в случае, когда узел помещен во внешнее микроволновое поле [18]. Аналитическое выражение для характеристики можно получить тем же методом, что и в работах [16, 17]. Следующее упрощенное объяснение такой характеристики предложил Шапиро [19]. Внешнее электромагнитное поле приводит к частотной модуляции переменного тока Джозефсона, причем пики постоянной составляющей тока соответствуют боковым полосам спектра модулированного сигнала при совпадении частоты тока Джозефсона и частоты n -й гармоники внешнего поля. Скачки постоянного тока наблюдаются при равноотстоящих напряжениях, определяемых соотношением

$$U_n = n\phi_0 \frac{h}{2e}, \quad (3)$$

где p — круговая частота внешнего облучения.

На рис. 4 приведены экспериментальные характеристики узла Джозефсона, взятые из работы [20]. Кривые с большими значениями тока соответствуют большей мощности облучения.

Эти проявления эффекта Джозефсона на переменном токе приводят к тому, что для измерения h/e могут быть использованы три экспериментальных метода:

- 1) измерение напряжения на узле, индуцированного внешним с. в. ч. облучением;
- 2) измерение частоты излучения из узла при падении на нем известного постоянного напряжения;
- 3) измерение напряжения, при котором происходит скачок постоянного тока, протекающего через узел помещенный во внешнее СВЧ поле известной частоты.

Этими методами h/e было измерено в университете штата Пенсильвания (США) [20, 21]. Эксперименты показали, что не все три метода одинаково перспективны для метрологических целей.

В связи с тем, что эффекту индуцирования постоянного напряжения внешним облучением присуща нестабильность, погрешность эксперимента при первом методе выше, чем при двух других.

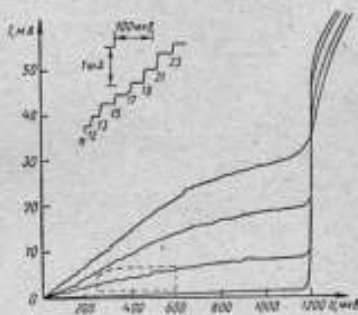


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики узла Джозефсона.

В верхней части показан в увеличенном масштабе участок характеристики, выделенный пунктиром.

Второй метод требует весьма сложной аппаратуры, так как излучение из узла имеет мощность порядка 10^{-10} — 10^{-12} Вт и точные измерения частоты столь маломощного излучения весьма затруднительны. Кроме того, исследования, проведенные И. М. Дмитриенко и И. К. Янсоном [22], показывают, что в отдельных случаях ширина спектра излучения может достигать 100 кГц и наблюдается «бегание» линии излучения в пределах 1—2 МГц флуктуационного характера. Исследования излучения из джозефсоновских узлов продолжают.

Наиболее перспективным в настоящее время является третий метод измерения h/e . На рис. 5 схематически изображена низкотемпературная часть аппаратуры, используемой при измерении этим методом. Туннельный образец 1 расположен в волноводе 2, нижняя часть которого находится в сосуде Дьюара 3 с жидким гелием. Для настройки связи узла с полем в волноводе имеется короткозамыкающий плунжер 5, положение которого регулируют извне криостата. В азотном дьюаре 4 размещены катушки Гельмгольца 6, создающие постоянное магнитное поле, и влияние внешних магнитных полей ослабляется с помощью экрана 7. Для

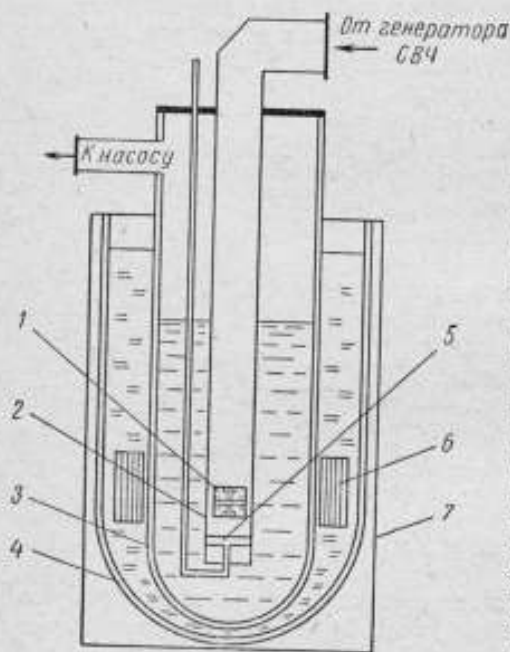


Рис. 5. Криостат для измерений $h/2e$.

1 — туннельный образец; 2 — волновод; 3 — дьюар с жидким гелием; 4 — азотный дьюар; 5 — короткозамыкающий плунжер; 6 — катушки Гельмгольца; 7 — экран

достижения температур ниже 4,2 К (температура кипения гелия при атмосферном давлении) откачивают вакуумным насосом пары над поверхностью кипящего гелия.

Структурная схема с. в. ч. аппаратуры приведена на рис. 6. Электромагнитные колебания в диапазоне 8—12 ГГц генерируются свпгенератором, 1, частота которого может быть стабилизирована при помощи блока 3 стабилизации частоты. Для этого с выхода свпгенератора через направленные ответвители 4 и 5 аттенюатор 2 отводят часть с. в. ч. мощности. Через ответвитель 5 вентиль 6 и аттенюатор 7 колебания поступают на преобразователь частоты 8 и затем на электронно-счетный частотомер 12, собственный кварцевый генератор которого поверяют, сравнивая

с помощью компаратора 15 с частотным эталоном. Болومتر 10 и измеритель мощности 11 позволяют контролировать мощность излучения, подаваемого через ответвитель 9, калиброванный аттенуатор 13 и вентиль 14 к образцу. Такая система дает возможность получать колебания с нестабильностью в час несколько единиц на 10^{-6} и измерять их частоту с погрешностью 10^{-6} %.

При измерении компенсатором PVP фирмы Julie Research Laboratory (рис. 7) напряжение на узле [21] на ступенях с номером $n = 30 \div 40$ составляло 600—800 мкВ. В положении K переключателей ток источника постоянного тока регулируют таким образом, чтобы установилось нулевое показание гальванометра G_1 . Если при этом калибровочное сопротивление 2 согласовано со значением э. д. с. нормального элемента 5, то на выходной делитель 6 подается напряжение 1,000000 В. Для контроля постоянства рабочего тока предусмотрена цепь, состоящая из соединенного с зажимами MM' контрольного сопротивления 4, значение которого выбирают таким, чтобы падение напряжения

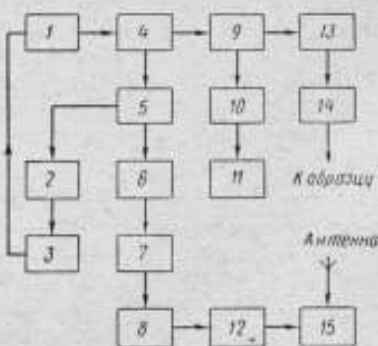


Рис. 6. Структурная схема с. в. ч. аппаратуры.

1 — генератор, 2, 7, 13 — аттенуаторы, 3 — блок стабилизации частоты, 4, 5, 9 — ответвители, 6, 14 — вентили, 8 — преобразователь частоты, 10 — болومتر, 11 — измеритель мощности, 12 — электронносчетный частотомер, 15 — компаратор.

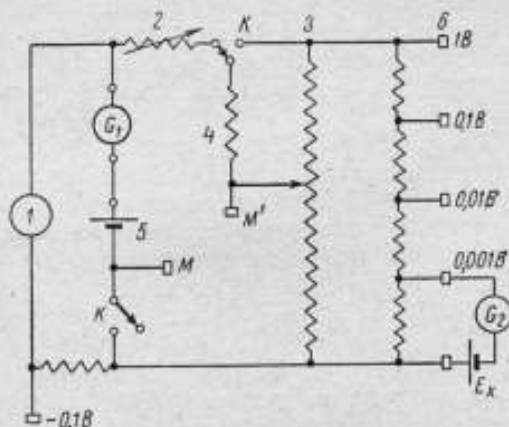


Рис. 7. Упрощенная схема компенсатора PVP.

1 — источник постоянного тока, 2 — калибровочное сопротивление, 3 — семнадцатиный делитель, 4 — контрольное сопротивление, 5 — нормальный элемент, 6 — выходной делитель напряжения

на нем при номинальном рабочем токе было равно 1 В. Чувствительность нуль-индикатора G_2 , состоящего из фотогальванометрического усилителя и гальванометра, равна 2 мм/нВ.

В эксперименте большое внимание было уделено выявлению источников погрешностей и уменьшению их влияния. В частности,

при измерении столь малых напряжений важно свести к минимуму влияние паразитных напряжений в измерительных цепях. Влияние паразитных э. д. с., направление и размер которых не зависит от направления тока, исключали измерением напряжения на узле при двух направлениях тока. Это возможно благодаря тому, что снятая при противоположных направлениях тока вольт-амперная характеристика узлов Джозефсона симметрична относительно начала координат. Для повышения стабильности т. э. д. с. все эксперименты проводили при температурах ниже λ — точки гелия (температура, при которой гелий становится сверхтекучим и в гелиевой ванне градиент температуры равен нулю). При этих условиях т. э. д. с. имеет значения порядка 100 нВ и постоянна в течение времени, достаточного для выполнения измерений. Анализ измерительной цепи и варьирование условий эксперимента показали, что паразитные напряжения, направление которых изменяется с изменением направления тока, пренебрежимо малы.

Измерения \hbar/e производились с туннельными контактами типа Sn — окись Sn—Sn, Sn — окись Sn—Pb, Pb — окись Pb—Pb и с точечными контактами Ta—Ta, Sn—Sn, Nb—Ta, Ta—NbSn.

Опыты показали, что в данном эксперименте точечные контакты менее перспективны, так как большое сопротивление точечного контакта приводит к меньшей крутизне ступеней на вольт-амперной характеристике и последняя нестабильна из-за чувствительности точечного контакта к вибрациям.

Недостатком туннельных узлов является малый срок их службы. Если не принимать специальных мер к сохранению туннельного образца (например, хранение между экспериментами при низкой температуре), то практически его можно использовать только один раз. Так как положение ступеней на вольт-амперной характеристике не зависит от конкретного образца, а изготовление образцов несложно, то этот недостаток можно считать несущественным.

Результаты измерений $\hbar/2e$ при $T \ll 2,2$ К оказываются устойчивыми в пределах точности измерений, независимо от окружающего магнитного поля (от 0 до 10^{-3} Т), типа джозефсоновского узла, номера ступени и мощности СВЧ облучения. Это обстоятельство подтверждает правильность теории эффекта Джозефсона.

Типичные результаты измерений $2e/\hbar$ приведены в табл. 1, а выявленные источники составляющих погрешностей эксперимента приведены в табл. 2.

В работе [21] предложен ряд усовершенствований установки для снижения общей погрешности определения $2e/\hbar$. Наиболее перспективным является соединение нескольких туннельных узлов для повышения измеряемого напряжения.

Другой путь служит для уменьшения погрешности, вносимой компенсатором. В частности, указано на возможность использования в качестве нуля-индикатора сверхпроводящего гальванометра, предложена схема для более точной аттестации выходного

Таблица 1

Результаты измерений $2e/h$ на туннельных тонкопленочных и точечных узлах

Тип узла	Значения $2e/h$ и средней квадратической погрешности, МГц/мкВ
Sn—SnO—Sn	483,596 ± 0,005
Sn—Sn	5986 ± 0,0032
Ta—Ta	5973 ± 0,0021
Sn—SnO—Sn	5965 ± 0,0021
Sn—SnO—Sn	5955 ± 0,0021
Sn—SnO—Pb	5962 ± 0,0023
Nb—Ta	5987 ± 0,0021
Ta—Nb ₂ Sn	5975 ± 0,0022
Ta—Ta	5961 ± 0,0025
Sn—SnO—Sn	5976 ± 0,0020
Pb—PbO—Pb	5971 ± 0,0015
Pb—PbO—Pb	5972 ± 0,0015
Pb—PbO—Pb	5972 ± 0,0020
Среднезвешенное значение	
Поправка на переход от вольты НБЭ к абсолютному вольту	0,0058 ± 0,0020
Окончательное значение	483,5914 ± 0,0030

Таблица 2

Составляющие погрешностей

Наименование составляющей погрешности	Средняя квадратическая погрешность, %
Погрешность от нестабильности частоты излучения	$1 \cdot 10^{-4}$
Составляющие погрешности измерения:	
а) погрешность аттестации эталона сравнения	$1 \cdot 10^{-4}$
б) погрешность поддержания напряжения на выходном делителе напряжения	$1 \cdot 10^{-4}$
в) непостоянство рабочего тока компенсатора при различном соотношении плеч делителя	$5 \cdot 10^{-5}$
г) погрешность семидекадного делителя	$5 \cdot 10^{-3}$
д) погрешность, обусловленная разрешающей способностью и дрейфом нуля-индикатора	$2 \cdot 10^{-4}$
е) погрешность выходного делителя напряжения	$3 \cdot 10^{-4}$
Погрешность аттестации эталона единиц э. д. с. США	$4 \cdot 10^{-4}$
Общая средняя квадратическая погрешность	$6 \cdot 10^{-4}$

делителя напряжения, рассмотрена возможность повышения стабильности источника постоянного тока.

В университете штата Пенсильвания ведется дальнейшая работа по повышению надежности полученных результатов измерений h/e . Для этого, во-первых, проводятся эксперименты указанного выше типа на частотах порядка 70 ГГц и, во-вторых, эксперименты по измерению частоты колебаний, излучаемых туннельными узлами.

Исследования по применению эффекта Джозефсона на переменном токе для измерений кванта магнитного потока ведутся также в Национальной физической лаборатории (Англия) [23], где используют узлы Джозефсона в виде двух пересекающихся петель из сверхпроводящей проволоки. В настоящее время погрешность этих измерений в НФЛ составляет 10^{-4} , однако ожидается, что в ближайшее время она будет значительно снижена. Следует отметить, что ввиду их перспективности работы по измерениям кванта магнитного потока включены в план научно-технического сотрудничества в области метрологии между СССР и Англией.

Перспективы применения эффекта Джозефсона на переменном токе к решению задач, связанных с поддержанием размера вольта

Одним из наиболее важных применений эффекта Джозефсона на переменном токе является использование его для решения задач, связанных с поддержанием размера вольта. Как известно, в настоящее время для воспроизведения и поддержания вольта в СССР и в других странах, а также в МБМВ служит группа нормальных элементов. При этом возникает необходимость периодически взаимно сличать национальные эталоны с эталоном МБМВ, что и осуществляется регулярно каждые 2—3 года. Результаты этих сличений за последние 20 лет приведены в табл. 3, из которой

Таблица 3

Разности между размерами национальных единиц э. д. с. и вольта МБМВ (в микровольтах), полученные при взаимных сличениях

Страна	Год сличения						
	1950	1953	1955	1957	1961	1964	1967
Австралия	—	—	—	—	+6,3	+5,5	+5,2
Канада	—	-3,1	-2,4	-0,8	-3,4	-1,7	-3,0
Франция	-0,1	-1,8	-1,8	-2,1	-3,2	-3,1	-4,9
ГДР	-10,2	-2,8	+0,5	+1,1	—	-4,3	-6,8
ФРГ	—	-2,3	+0,6	+0,2	-0,1	-1,4	-0,6
Великобритания	+2,2	+3,2	+4,5	+5,2	+5,1	+3,1	+2,6
Италия	—	—	—	—	—	+0,8	-0,9
Япония	-3,5	-1,4	-2,0	-3,4	-2,9	-3,5	-2,7
СССР	+23,0	+22,3	+9,3	+8,4	+6,8	+7,8	+8,4
США	+0,8	-3,3	-0,7	-1,3	-1,9	-2,2	-2,6

видно, что нестабильность эталонов СССР составляет за год примерно 0,5 мкВ. В последние годы в СССР, США и некоторых других странах степень нестабильности национальных эталонов вольта определяют как с помощью токовых весов, так и через гиромагнитное отношение протона γ_p . В США степень нестабильности эталона вольта оценивается этим методом с относительной

погрешностью $3 \cdot 10^{-6}$. Кроме того, такой метод требует полного отсутствия внешних магнитных полей и постоянства температуры окружающего воздуха. Все это снижает его ценность.

Эти трудности могут быть преодолены, если проверять нестабильность эталонов за длительный период времени, используя эффект Джозефсона. По имеющимся данным [21], относительную погрешность такой проверки можно свести до $1 \cdot 10^{-6}$ и менее. Напряжение n -й ступени на вольт-амперной характеристике узла Джозефсона определяется только частотой внешнего облучения и константой \hbar/e . Поэтому изменения показаний компенсатора будут в данном случае служить мерой нестабильности поверяемого нормального элемента. Аналогичную методику можно использовать и для сличений национальных эталонов вольта. В этом случае при компенсации напряжения на узле Джозефсона частью э. д. с. нормального элемента, отделенной при помощи высокоточного делителя с изменяемым коэффициентом деления, следует определить этот коэффициент, значение облучающей частоты и номер ступени, на которой производилась компенсация. Из формулы (3) следует, что отношение э. д. с. двух нормальных элементов E_1 и E_2 можно найти из соотношения

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{\nu_1}{\nu_2},$$

где k_1, k_2 — коэффициенты деления,

ν_1, ν_2 — частоты облучения,

n_1, n_2 — номера ступеней, на которых производилась компенсация.

В качестве альтернативы возможно предложить другую методику. Узел помещают в электромагнитное поле, частоту которого можно изменять в некоторых пределах. Отделив определенную часть, скажем, одну тысячную, э. д. с. эталонного нормального элемента, сравнивают ее с напряжением, соответствующим заранее выбранной ступени на вольт-амперной характеристике узла Джозефсона. При этом частоту внешнего поля изменяют так, чтобы эти напряжения не различались в пределах данной чувствительности нуль-индикатора. Сравнение частот, полученных любым из этих методов, и соответствующих им k и n позволит определять изменение размера национального вольта, а также расхождения в размерах вольта, воспроизводимых в различных странах.

В перспективе, когда константа \hbar/e будет известна с достаточной точностью, появится возможность находить абсолютные значения э. д. с. нормальных элементов, используя эффект Джозефсона.

Таким образом, можно будет воспроизводить вольт, принимая \hbar/e точно известным (с погрешностью меньшей той, с которой устанавливают вольт).

В дальнейшем представляется вероятным в качестве эталона использовать один или группу туннельных образцов, на которых

будет возникать напряжение, соответствующее частоте облучения образца и номеру ступени на вольт-амперной характеристике. Значение напряжения можно будет вычислить как функцию от v , n и \hbar/e . По существу это явится предпосылкой для перехода в будущем на естественный эталон единицы э. д. с.

Применение эффекта Джозефсона на постоянном токе для практических измерений

Для измерительной практики большой интерес представляют явления, происходящие в цепях сверхпроводников, содержащих несколько узлов Джозефсона. Зиммерман и Сильвер [24—28] первые экспериментально исследовали такие цепи. Они показали, что в устройстве, содержащем два идентичных туннельных узла, соединенных параллельно (рис. 8), критический ток I_k (в данном случае ток, при котором на узлах появляется напряжение) является периодической функцией магнитного потока, пронизывающего площадь, охватываемую цепью. Период изменения тока I равен кванту магнитного потока Φ_0 :

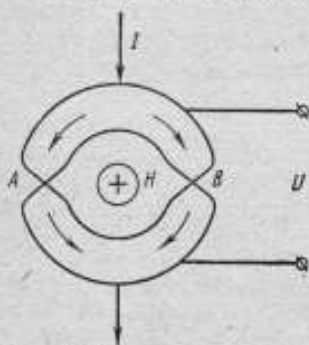


Рис. 8. Параллельное соединение узлов Джозефсона A и B .

$$I = 2I_m \left| \cos \pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \right|,$$

где I_m — максимальный ток узла Джозефсона,
 Φ — магнитный поток от внешнего поля через площадь, охватываемую цепью.

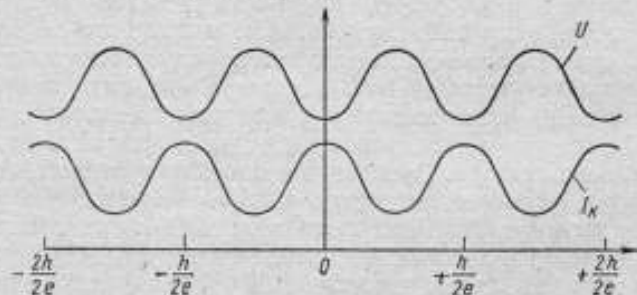


Рис. 9. Кривые зависимости тока и напряжения интерферометра от внешнего магнитного поля.

Оказалось, что при прохождении через такую систему тока, несколько превышающего критический, напряжение на ней также обнаруживает периодическую зависимость от внешнего магнитного поля (рис. 9). В данном случае мы сталкиваемся с явлением интер-

ференции токов, проходящих через два туннельных узла. Такая система получила название сверхпроводящего интерферометра. В исследовательском центре компании Форда чувствительность интерферометра к магнитному полю использовали для построения магнитометра [29]. Интерферометр включали в качестве нуля-индикатора в систему автоматической компенсации изменений измеряемого поля.

Структурная схема компенсационного магнитометра и конструкция интерферометра, примененного в нем, приведены на рис. 10 и 11. Интерферометр, через который пропускают ток смещения чуть больше критического,

подвергают воздействию синусоидального модулирующего магнитного поля. Рабочую точку обычно выбирают в минимуме кривой зависимости U от H (рис. 12). Выходное напряжение (U_a на рис. 13), соответствующее основной гармонике, усиливается и выпрямляется синхронным детектором, опорная частота

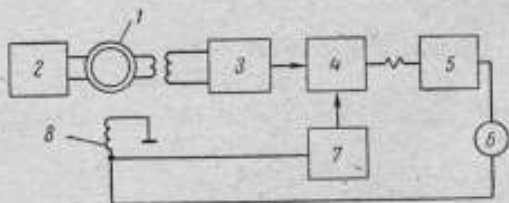


Рис. 10. Структурная схема компенсационного магнитометра.

1 — интерферометр, 2 — источник тока смещения, 3 — усилитель тока, 4 — синхронный детектор, 5 — интегратор, 6 — индикатор, 7 — модулятор, 8 — компенсирующая катушка

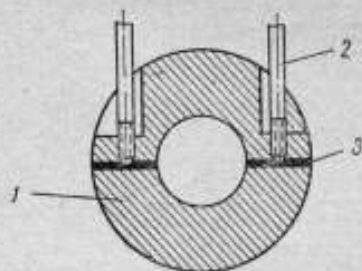


Рис. 11. Конструкция сверхпроводящего интерферометра.

1 — внешний цилиндр, 2 — внутренний винт, 3 — слой диэлектрика

указанной выше зависимости (обычно 10^{-10} T) и имеет порог чувствительности порядка 10^{-12} T.

Улучшенной модификацией этого прибора является компенсационно-цифровой магнитометр, разработанный в той же лаборатории [30]. Главным результатом использования цифрового варианта магнитометра явилась возможность измерения больших изменений магнитного поля в единицах периода интерферометра путем отсчета числа минимумов напряжения, соответствующего этому изменению. Кроме того, прибор может применяться как

в компенсационном, так и в смешанном режиме, сочетая при этом высокую чувствительность компенсационного метода с широким диапазоном цифрового.

Знак изменения поля в цифровом варианте определяют по двум напряжениям U_a и U_b (рис. 13), зависимость которых от H имеет

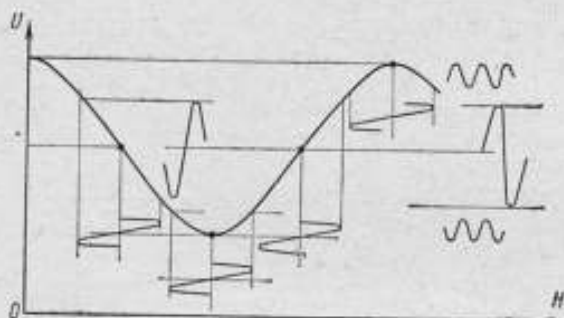


Рис. 12. Влияние синусоидальной модуляции поля на выходной сигнал интерферометра.

U — напряжение интерферометра

периодический характер с разностью фаз 90° . Эти напряжения соответствуют первой и второй гармоникам выходного сигнала.

Структурная схема цепи, вырабатывающей напряжения U_a и U_b , приведена на рис. 14. На интерферометр, через который протекает постоянный ток смещения, воздействует магнитное поле, модули-

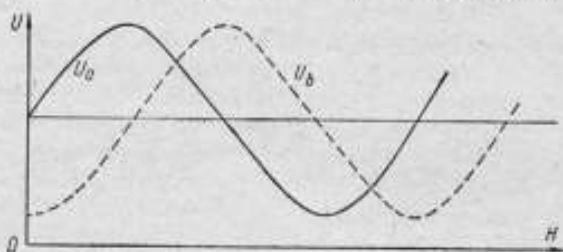


Рис. 13. Изменение амплитуд первой и второй гармоник напряжения на интерферометре при изменении плотности магнитного потока.

рованное колебаниями частоты f_0 . Выходной сигнал усиливается и подается на синхронный детектор с опорным напряжением частоты f_0 . Зависимость напряжения этого детектора от H приведена на рис. 13 (кривая U_a). Выходному сигналу синхронного детектора питаемого опорным напряжением частоты $2f_0$, при подаче на него того же выходного сигнала соответствует кривая U_b рис. 13. Для счета числа периодов напряжения сигналы U_a и U_b подаются на

логическую схему, которая по ним вырабатывает импульсы добавления или вычитания и приводит в действие реверсивный счетчик. Для визуального наблюдения изменений потока напряжения U_a и U_b подают на пластины горизонтального и вертикального отклонения луча электронно-лучевой трубки, при этом пятно на экране трубки перемещается по кругу. С возрастанием H пятно движется по часовой стрелке, а с уменьшением — против нее. Это позволяет отмечать малые приращения внешнего поля, соответствующие долям периода интерферометра. Максимальное число последовательных периодов, отсчитываемых при изменении поля

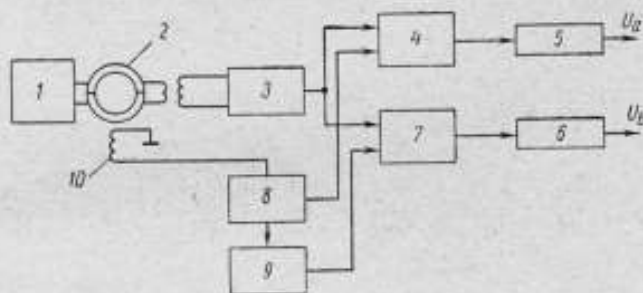


Рис. 14. Цепь, вырабатывающая напряжения U_a и U_b .

1 — источник тока смещения, 2 — интерферометр, 3 — усилитель тока, 4 — синхронный детектор первой гармоники, 5 и 6 — фильтры, 7 — синхронный детектор второй гармоники, 8 — модулятор, 9 — удвоитель частоты, 10 — катушка.

без дополнительной регулировки тока смещения, близко к 700. Ожидается, что применение тонкопленочного интерферометра позволит улучшить рабочие характеристики магнитометра, в том числе расширит диапазон измерений и снизит относительную погрешность до $3 \cdot 10^{-10}$.

Сверхпроводящий интерферометр может быть также использован для создания гальванометра. Рассмотрим интерферометр 2 с помещенной в него катушкой 1 (рис. 15 а). Протекающий по катушке ток создает магнитный поток, пронизывающий площадь между двумя узлами А и В Джозефсона. Изменение этого потока вызывает осцилляции критического тока, число которых пропорционально изменению тока в катушке.

Впервые гальванометр на основе эффекта Джозефсона и квантования магнитного потока выполнил Кларк [31]. Для изготовления интерферометра с катушкой (рис. 15 б) участок изолированной ниобиевой проволоки 5 зачищали с одной стороны. Затем проволоку погружали в каплю расплавленного свинцово-оловянного припоя 4. Можно предположить, что узлы Джозефсона А и В образуются по краям между припоем и проволокой, которая в данном случае играет роль катушки. Тогда эта система не

будет отличаться от представленной на рис. 15, а. Площадь S , пронизываемая магнитным потоком от протекающего по ниобиевой проволоке тока, равняется

$$S = l(\lambda_c + \lambda_n),$$

где l — длина капли припоя, λ_c и λ_n — глубина проникновения магнитного поля в свинец и ниобий соответственно.

Приращение тока в катушке, соответствующее одной осцилляции критического тока, будет

$$\Delta I = \frac{\Phi_0 r}{2l(\lambda_c + \lambda_n)},$$

где r — радиус проволоки.

В частности, для $r \sim 7 \cdot 10^{-3}$ см, $l = 5 \times 10^{-1}$ см, $\lambda_n \sim 50$ нм и $\lambda_c \approx 100$ нм получаем $\Delta I \approx 1$ мА, что примерно соответствует наблюдаемому периоду модуляции тока.

Чтобы использовать устройство как гальванометр, было необходимо непрерывно контролировать силу критического тока. Для этого синусоидальный модулирующий ток с амплитудой, достаточной для того, чтобы на интерферометре появлялось напряжение, пропуска-

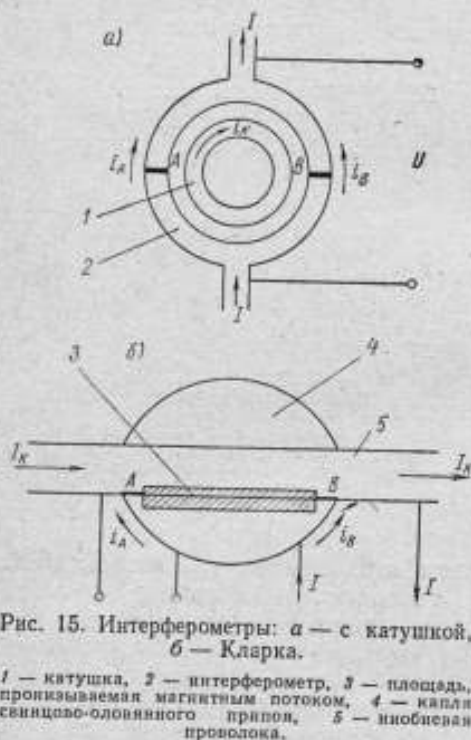


Рис. 15. Интерферометры: а — с катушкой, б — Кларка.

1 — катушка, 2 — интерферометр, 3 — площадь, пронизываемая магнитным потоком, 4 — капля свинцово-оловянного припоя, 5 — ниобиевая проволока.

кали через контакты $I - I$ (рис. 15 б). Модуляция была ограничена положительной частью вольт-амперной характеристики. Результирующее напряжение интерферометра подавали на усилитель-ограничитель, выходное напряжение последнего как функция времени представляет ряд импульсов. Расстояние между ними зависит от критического тока, определяемого по среднему напряжению. Таким образом можно было наблюдать до 4000 изменений критического тока, что соответствует току в ниобиевой проволоке около 1 А. Гальванометр Кларка имеет порог чувствительности 10^{-6} А, очень малое сопротивление и индуктивность порядка 10^{-8} Г. При последовательном включении сопротивления гальванометр можно использовать как потенциометр и вольтметр. Цепь для измерений

очень малых напряжений показана на рис. 16. При сопротивлении R порядка 10^{-8} Ом чувствительность прибора порядка 10^{-14} В и постоянная времени 1 с.

На рис. 17 приведена система, примененная Кларком для измерений малых сопротивлений. Критический ток интерферометра, используемого здесь в качестве нуль-индикатора, определяют методом, изложенным выше. Сигнал с выхода усилителя-ограничителя интегрируют, полученное постоянное напряжение усиливают и через обратную связь подают на известное сопротивление. Когда мост сбалансирован, это напряжение падает до нуля. В данном случае важно, чтобы постоянная времени цепи обратной связи была намного меньше постоянной времени L/R цепи нуль-индикатора, иначе может произойти перебор показаний на соседний период кривой $U-I_k$ (рис. 18), и измерения будут ошибочными. Соединение интерферометра Кларка со сверхпроводящим кольцом в принципе [32] позволяет построить магнитометр с порогом чувствительности $5 \cdot 10^{-11}$ Т.

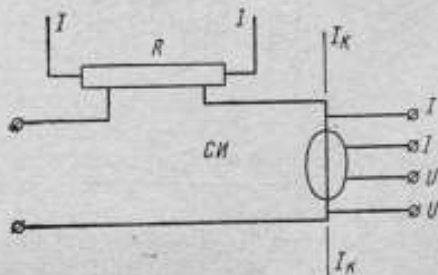


Рис. 16. Цепь для измерения малого напряжения.

СИ — сверхпроводящий интерферометр

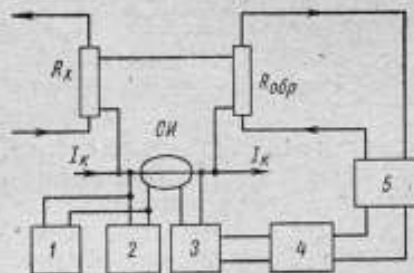


Рис. 17. Цепь для измерения малых сопротивлений.

1 — источник тока смещения, 2 — модулятор, 3 — усилитель переменного тока, 4 — интегратор, 5 — усилитель постоянного тока.

СИ — сверхпроводящий интерферометр.

интерферометр изготавливали по методу Кларка. Структурная схема потенциометра для измерения малых сопротивлений приведена на рис. 19. При разомкнутой цепи обратной связи и выключенном токе I_n в интерферометре через измеряемое сопротивление изменением тока смещения I_k подбирают рабочую точку (для этого годится любой достаточно крутой участок кривой, показанной на рис. 18). Затем цепь обратной связи замыкают,

построить магнитометр с порогом чувствительности $5 \cdot 10^{-11}$ Т. В Массачусетском технологическом институте [33] разработан потенциометр, в котором в качестве нуль-индикатора также использован сверхпроводящий интерферометр. Однако этот потенциометр существенно отличается от прибора, разработанного Кларком. Выбранный режим работы устранил необходимость подачи сигналов переменного тока в криостат, что уменьшало возможность наведения уравнивающих токов в цепи нуль-индикатора. Собственно

ток I_n медленно увеличивают до требуемого значения и измеряют ток обратной связи I_o . Искомое сопротивление $R_n = R_o (I_o/I_n)$. Погрешность его определения обратно пропорциональна коэффи-

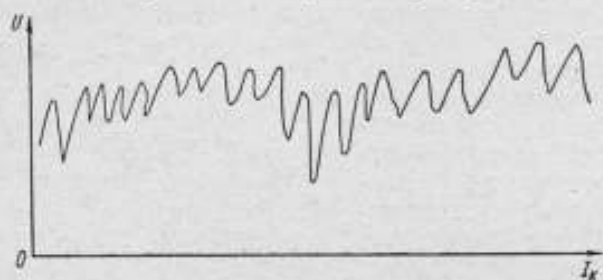


Рис. 18. Зависимость напряжения потенциометра от тока через нуль-индикатор.

циенту усиления в цепи обратной связи. При необходимости можно проверить нуль, устанавливая I_n равным нулю и изменяя I_k до $I_o = 0$. При постоянной времени τ с общий порог чувствительности

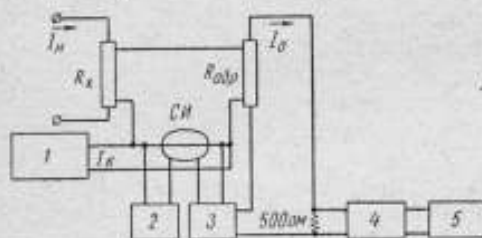


Рис. 19. Схема потенциометра для измерений малых сопротивлений.

1 — источник тока смещения I_k , 2 — источник тока смещения перехода, 3 — усилитель с прерывателем и регулировкой нуля, 4 — фильтр, 5 — потенциометр. СИ — сверхпроводящий интерферометр.

прибора по току в точке баланса составляет 10^{-6} А, что при сопротивлении измерительной цепи 10^{-8} Ом дает порог чувствительности по напряжению 10^{-14} В. В самое последнее время появилось сообщение [34], что в университете штата Огайо (США) также разработан прибор для измерений напряжения порядка 10^{-15} В с использованием переходов Джозефсона.

Заключение

Приведенные выше примеры иллюстрируют непосредственное применение эффектов Джозефсона в области метрологии и для практических измерений.

Однако этим не ограничивается важность этих эффектов для науки и техники, и в литературе [15, 32, 35] широко обсуждаются перспективы применения узлов Джозефсона в качестве генератора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, приемника излучения, умножителя частоты, источника малых постоянных напряжений, преобразователя для измерения низких температур, трансформатора постоянного тока и др.

Учитывая, что со времени предсказания Джозефсоном эффектов, носящих теперь его имя, прошло всего 6 лет, а со времени первого их экспериментального подтверждения — лишь 4 года, сейчас трудно даже предполагать, какие будут созданы еще устройства на основе этих эффектов.

В настоящее время исследования эффектов Джозефсона и поиски областей их применения ведут многие лаборатории СССР и за рубежом. Поэтому любой обзор, посвященный этим работам, рискует оказаться неполным еще до его выхода из печати.

Некоторые затруднения при использовании сверхпроводящих устройств связаны с необходимостью наличия низкой температуры. Однако техника получения низких температур постоянно совершенствуется, и эта проблема постепенно перестает быть препятствием для использования таких устройств.

Одновременно интенсивно ведутся исследования, направленные на поиски новых материалов, которые оставались бы сверхпроводящими при более высоких температурах (вплоть до комнатных). Если эти работы увенчаются успехом, то сверхпроводящие устройства и, в частности, основанные на использовании эффектов Джозефсона, найдут широкое применение во всех областях измерительной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. London F. *Superfluids*. New York, 1950, v. 1, p. 152.
2. Doll R., Näbauer M. *Phys. Rev. Letters*, 1961, v. 7, p. 51.
3. Deaver B. S., Fairbank W. M. *Phys. Rev. Letters*, 1961, v. 7, p. 43.
4. Josephson B. D. *Phys. Letters*, 1962, v. 1, p. 251.
5. Josephson B. D. *Rev. Mod. Phys.*, 1964, v. 36, p. 216.
6. Josephson B. D. *Adv. in Phys.*, 1965, v. 14, p. 419.
7. Горбацевич С. В., Залуцкая Т. Л. Выражения зависимостей между некоторыми физическими константами и числовые значения основных физических констант по данным 1965 г. Труды метрологических институтов в СССР, вып. 97 (157). Изд-во стандартов, 1968.
8. Cohen E. R., Du Mond J. W. M. *Rev. Mod. Phys.*, 1965, v. 37, p. 537.
9. Cohen E. R., Crowe K. M., Du Mond J. W. M. *Fundamental constants of physics*. New York, 1957, v. 1.
10. Crampton S. B., Kleppner, Ramsey N., *Phys. Rev. Letters*, 1963, v. 11, p. 338.
11. Иенни Д. Р. Проверка квантовой электродинамики. Труды конференции по электромагнитным взаимодействиям при низких и средних энергиях, т. 1. Изд. ВИНТИ, 1967.
12. Parker W. H., Taylor B. N., Langenberg D. N. *Phys. Rev. Letters*, 1967, v. 18, p. 287 (перевод: УФН, 1968 т. 94, вып. 2, стр. 353).
13. Eck R. E., Scalapino D. J., Taylor B. N. *Phys. Rev. Letters*, 1964, v. 13, p. 15.
14. Янсон И. К., Свистунов В. М., Дмитренко И. М. Экспериментальное наблюдение туннельного эффекта для куперовских пар с излучением фотонов. ЖЭТФ, 1965, т. 48, стр. 976.
15. Langenberg D. N., Scalapino D. J., Taylor B. N. *Proc. IEEE*, 1966, v. 54, p. 560.
16. Кулик И. О. Теория «ступеней» вольт-амперной характеристики туннельного тока Джозефсона. Письма ЖЭТФ, 1965, т. 2, стр. 134.

17. Иванченко Ю. М., Свидзинский А. В., Слюсарев В. А. Электродинамика эффекта Джозефсона. ЖЭТФ, 1966, т. 51, вып. 194
18. Shapiro S. Phys. Rev. Letters, 1963, v. 11, p. 80.
19. Shapiro S., Janus A. K., Holly S. Rev. Mod. Phys., 1964, v. 36, p. 223.
20. Taylor B. N. Труды X Международной конференции по физике низких температур, т. IIА, стр. 59, М., ВИНТИ, 1967 г.
21. Taylor B. N., Parker W. H., Langenberg D. N., Denenstein A. Metrologia, 1967, v. 3, p. 89.
22. Дмитренко И. М., Янсон И. К. Экспериментальное исследование эффекта Джозефсона в сверхпроводниках. Труды X Международной конференции по физике низких температур, т. IIА. Изд. ВИНТИ, 1967, стр. 228.
23. Кук А. X. Современная метрология и основные физические константы. Труды метрологических институтов СССР, вып. 123 (183). Изд-во, стандартов, 1971.
24. Lambe J., Silver A. U., Mercereau J. E., Jacklevic R. C. Phys. Lett., 1964, v. 11, p. 16.
25. Silver A. U., Mercereau J. E., Zimmerman J. E. Bull. Am. Phys. Soc., 1965, v. 10, p. 318.
26. Jacklevic R. C., Lambe J., Silver A. U., Mercereau J. E. Phys. Rev. Lett., 1964, v. 12, p. 159.
27. Zimmerman J. E., Silver A. U. Phys. Lett., 1964, v. 10, p. 47.
28. Zimmerman J. E., Silver A. U. Phys. Rev., 1966, v. 14, p. 367.
29. Forgacs R. L., Warnick A. JEEE, Nat. Convention Record, 1966, Pt. 10, p. 90.
30. Forgacs R. L., Warnick A. Rev. of Sci. Instrum., 1967, v. 38, p. 214.
31. Clarke J. Philosophical Magazine, 1966, v. 13, p. 115.
32. Clarke J. Труды X Международной конференции по физике низких температур, т. IIА. Изд. ВИНТИ, 1969, стр. 211.
33. Mewane J. W., Neighbor J. E., Newbawer R. C. Rev. of Sci. Instrum., 1966, v. 3, p. 1602.
34. Zych D. A. Rev. of Sci. Instrum., 1968, v. 39, p. 1058.
35. Taylor B. N. Journ. Appl. Phys., 1968, v. 39, p. 2490.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

В. Н. НОСАЛЬ
ВНИИМ

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОТНОШЕНИЯ МАГНИТНОГО МОМЕНТА ПРОТОНА К МАГНЕТОНУ БОРА

Магнитный момент протона, выраженный в магнетонах Бора (μ_p/μ_B) является одной из важных физических констант. Значение μ_p/μ_B в комбинации с другими экспериментальными данными используют для определения значений таких физических констант, как число Авогадро N , постоянная Планка h , постоянная тонкой структуры α , заряд электрона e , магнетон Бора μ_B , удельный заряд электрона e/m_e и т. д. [1]. Это видно из приводимых ниже зависимостей (1)—(5):

$$N = \mu_0 \frac{M_p}{\alpha^2} R_\infty \gamma_p^2 \frac{\mu_B \mu_N}{\mu_p^2}, \quad (1)$$

$$h = \frac{\alpha^2 c}{2\mu_0 R_\infty^2 \gamma_p^2} \left(\frac{\mu_p}{\mu_B} \right), \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{e^2}{2\epsilon_0 \hbar c}, \quad (3)$$

$$\mu_B = \frac{\hbar e}{4\pi m_e} = \frac{\alpha^2 c}{8\pi \mu_0 R_\infty^2 \gamma_p} \left(\frac{\mu_p}{\mu_B} \right), \quad (4)$$

$$\frac{e}{m_e} = \gamma_p \frac{\mu_B}{\mu_p}, \quad (5)$$

где μ_0 — магнитная постоянная,
 M_p — относительная атомная масса протона,
 R_∞ — постоянная Ридберга,
 γ_p — гиромагнитное отношение протона,
 μ_N — ядерный магнетон,
 c — скорость света в вакууме,
 ϵ_0 — электрическая постоянная.

С другой стороны, измерение μ_p/μ_B и уточнение его значения в совокупности с результатами других экспериментов имеет существенное значение для развития физики, в частности для подтверждения некоторых положений квантовой электродинамики.

Из релятивистской теории П. А. Дирака и постулата Уленбека — Гаудсмита следует, что электрон обладает собственным моментом количества движения $\hbar/4\pi$ и магнитным моментом μ , равным магнетону Бора [5], что подтверждалось экспериментами (1925 г. — Э. Бак и А. Ланде, 1934 г. — Кинслер и др.) вплоть до 1948 г. Результаты опытов соответствовали теории в пределах экспериментальных ошибок и не вызывали сомнения.

В 30—40 гг. в ряде работ по определению магнитных моментов ядер и по исследованию сверхтонкого расщепления атомных спектров с помощью техники молекулярных пучков были измерены магнитные моменты ядер щелочных металлов и индия и частоты переходов сверхтонкого расщепления спектров этих атомов. Одновременно измеряли напряженность магнитного поля, в котором находилась молекула, и частоту резонансного перехода. По этим данным через некоторые фундаментальные физические константы можно вычислить магнитный момент ядра. Точность экспериментов ограничивалась точностью измерений напряженности магнитного поля. Однако, если измерять в одном и том же магнитном поле частоты ядерного и электронного резонанса, отношение частот даст отношение магнитного момента ядра к магнитному моменту электрона.

Если рассматривать молекулы, суммарный электронный момент количества движения которых равен нулю, а спин и магнитный момент равны соответственно I и μ_n , то резонансная частота такой молекулы равна

$$f_n = g_n \mu_B \frac{H}{h},$$

где $g_n = (\mu_n/\mu_B) I$ — ядерный g -фактор.

Атом в состоянии $^2S_{1/2}$, спин ядра которого равен нулю, обладает резонансной частотой, равной

$$f_s = g_s \mu_B H/h,$$

где $g_s = 2\mu_B/\mu_B$ есть g -фактор электрона.

Если предположить, что $g_s = 2$, то $\mu_n = \mu_B$. Измерив частоты f_n и f_s , можно определить g_n .

Значения g_n , полученные таким способом, отличались примерно на 0,12% от значений, полученных в более ранних опытах, где измеряли только f_n в поле с напряженностью H , измеренной абсолютным методом. Кроме того, экспериментальные результаты определения частоты сверхтонкого расщепления в водороде также отличались от теоретических:

$$\nu_{\text{эк}} = 1420,410 \pm 0,006 \text{ МГц} — \text{эксперимент,}$$

$$\nu_{\text{те}} = 1416,97 \pm 0,54 \text{ МГц} — \text{теория,}$$

и расхождение значительно превышало погрешность эксперимента и вычислений. Г. Брейт [2] предположил, что причиной расхождения является отличие μ_s и μ_B . Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования подтвердили это.

В конце 1947 г. П. Каш и Г. Фоли [3], выполняя исследование по определению атомных g -факторов в $^2P_{3/2}$ и $^2P_{1/2}$ -состояниях и используя технику молекулярных пучков, получили значение $g_s = 2 \cdot (1,00114)$.

В 1947 г. Ю. Швингер [4] показал, что g_s имеет значение:

$$g_s = 2 (1 + \alpha/2\pi) = 2 \cdot (1,00116),$$

где $\alpha^{-1} = 137,038$.

Из вывода работы [4] следует, что, кроме дираковского магнитного момента, электрон обладает также аномальным магнитным моментом, возникающим благодаря взаимодействию электрона с электронно-позитронным вакуумом. Результаты работ [3] и [4] хорошо согласуются.

В дальнейшем Х. Тауб и П. Каш [5], усовершенствовав технику ранних экспериментов и используя данные работы [4], получили следующие результаты по определению магнитного момента протона в магнетонах Бора μ_p/μ_B :

$$\frac{g_p}{g_j(\text{Cs } ^2S_{1/2})} = 15,1911 \cdot 10^{-4} \quad (6)$$

и

$$\frac{g_p}{g_j(\text{In } ^2P_{1/2})} = 45,6877 \cdot 10^{-4}, \quad (7)$$

где g_p — g -фактор протона, измеренный в NaOH,

g_j — g -фактор атома.

Применяя найденные в других опытах соотношения

$$\frac{g_j(\text{Cs } ^2S_{1/2})}{g_j(\text{Na})} = 1,000134 \pm 0,000007 \quad (8)$$

и

$$\frac{g_j(\text{Na})}{g_j(\text{In } ^2P_{1/2})} = 3(1,00243 \pm 0,00010) \quad (9)$$

и комбинируя их с соотношениями (6) и (7) Х. Тауб и П. Каш нашли

$$g_p/g_j = 15,1923 \cdot 10^{-4} \quad (\text{In}),$$

$$g_p/g_j = 15,1931 \cdot 10^{-4} \quad (\text{Cs}).$$

Используя значение $g_s = 2 \cdot (1,0016)$ из расчетов работы [4] и полагая, что $g_s = g_j(\text{Na})$, они получили:

$$g_p = 30,4206 \cdot 10^{-4} \pm 5 \cdot 10^{-6},$$

$$\mu_p = (15,2106 \cdot 10^{-4} \pm 0,0008) \mu_B \quad (10)$$

или

$$\mu_B/\mu_p = 657,436 \pm 0,033. \quad (11)$$

В выражения (10) и (11) введена диамагнитная поправка порядка $20 \cdot 10^{-6}$.

В работе [5] сделано существенное предположение, что для Na в $^2S_{1/2}$ -состоянии g -фактор равен g_s и $g_s/g_l = 1,00116$, а g_p , как было указано ранее, определяли для NaOH. На результаты повлиял также недостаточный уровень экспериментальной техники того времени, чем и вызвана сравнительно большая погрешность их и расхождение значения μ_p/μ_B с последующими работами.

Выполненное в 1949—1951 гг. Д. Гарднером и Е. М. Перселом [6] исследование по определению μ_p/μ_B имело существенное значение для развития теории, так как наметило пути для постановки экспериментов, которые в конечном счете привели к подтверждению теоретической формулы для определения μ_p/μ_B . В этой работе значение μ_p/μ_B определялось как отношение значений частоты прецессии протонов $\omega_p = \gamma_p B$, измеренной методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР), к циклотронной частоте свободных электронов $\omega_e = eB/m_e$ в том же самом магнитном поле с индукцией B . Эти соотношения можно представить в виде

$$\omega_e = 4\pi g_l \frac{\mu_B}{h} B$$

$$\omega_p = \frac{2\pi\mu_p B}{h} = \frac{4\pi\mu_p}{h} B,$$

где g_l — орбитальный g -фактор электрона.

Измеряя обе частоты в одном и том же магнитном поле, найдем

$$\frac{\omega_p}{\omega_e} = \frac{\mu_p}{\mu_B} = \frac{2g_l}{g_p}, \quad (12)$$

что является выражением магнитного момента протона в магнетонах Бора через g -фактор протона и орбитальный g -фактор электрона.

В эксперименте [6] индукция магнитного поля была порядка 0,33 Т и циклотронная частота электронов — порядка 10 ГГц, что позволило использовать имеющуюся типовую аппаратуру 3-см диапазона СВЧ. Частота прецессии протонов для этого поля равна примерно 14 МГц.

Пучок электронов, созданный электронным катодом 6 (рис. 1), пересекал волновод, имеющий прорезанные вертикальные щели 2 и 5, и электронный ток собирался коллектором 1. Лентообразный пучок замедленных электронов,двигающихся параллельно линиям магнитного поля, поглощал часть мощности СВЧ (волна TE_{10}) распространяющейся в волноводе. При этом происходило приращение радиусов начальных орбит электронов, пучок расширялся, и через щель 2 проходила лишь часть электронного пучка.

Поглощение мощности СВЧ пучком электронов носит резонансный характер и происходит на частоте, равной циклотронной ча-

стоте электронов. При отсутствии этого поглощения пучок полностью проходит через щель 2. Таким образом, по спаду коллекторного тока можно определить положение резонансной кривой.

Однако было замечено, что при малых потенциалах волновода относительно катода вместо минимума при резонансе наблюдалось сильное увеличение коллекторного тока. Это можно объяснить

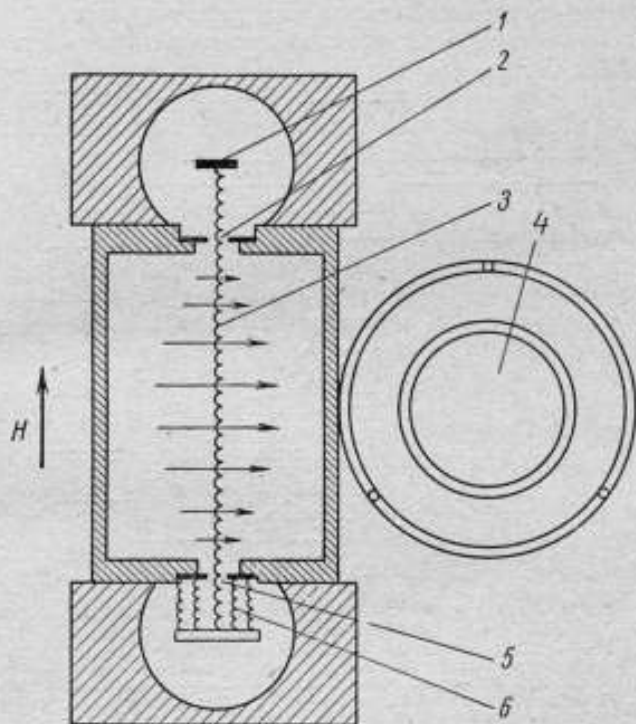


Рис. 1. Волновод с источником электронов и электронным коллектором и протонный образец.

1 — коллектор электронов, 2 и 5 — щели, 3 — пучок электронов, 4 — протонный образец, 6 — катод.

рассасыванием пространственного заряда под действием поля СВЧ, что, в свою очередь, приводит к уменьшению ограничения тока потенциалом пространственного заряда.

Секция волновода, где наблюдался циклотронный резонанс, была отделена вакуумными диафрагмами и ее откачивали до 10^{-6} мм рт. ст. Для обнаружения протонного резонанса служило устройство с амплитудным мостом. Резонанс наблюдался в образцах с минеральным маслом и с водой. Ширина протонной резонансной линии определялась в основном степенью неоднородности индукции магнитного поля и составляла $25 \cdot 10^{-6}$ Т. Так как поле было

достаточно однородным и ширина кривой протонного резонанса — меньше ширины циклотронного, последний являлся определяющим фактором. Для различных условий эксперимента ширина циклотронного резонанса составляла $(3 \div 7,5) \cdot 10^{-6} \text{ Т}$. Волновод, где наблюдался циклотронный резонанс, и протонный образец одновременно помещали в зазор электромагнита и циклотронный и протонный резонанс наблюдали на экране осциллографа (рис. 2). Для прохождения резонансов использовали модуляцию поля электромагнита с частотой 60 Гц.

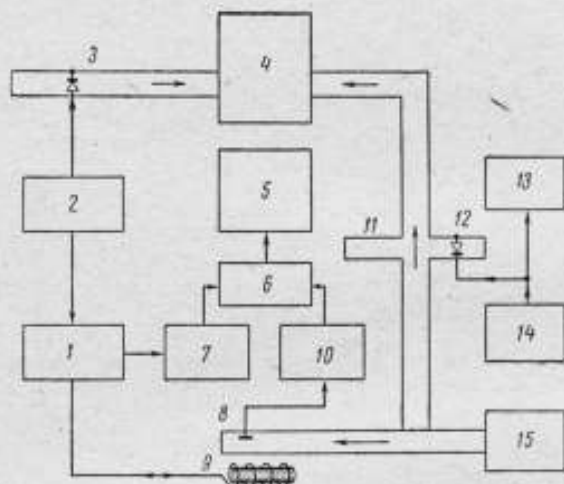


Рис. 2. Функциональная схема аппаратуры в работе [6].

1 — амплитудный мост, 2 — генератор и умножитель протонной частоты, 3 — умножительный диод, 4 — спектр-анализатор СВЧ, 5 — осциллограф, 6 — электронный переключатель, 7 — усилитель сигнала протонного резонанса, 8 — коллектор электронов, 9 — протонный образец, 10 — усилитель сигнала циклотронного резонанса, 11 — двойной T-мост, 12 — модуляционный диод, 13 — гетеродинный волномер, 14 — генератор стандартных сигналов (ГСС), 15 — генератор СВЧ.

Частоту измеряли интерполяционным методом, используя спектр-анализатор СВЧ 3 как нуль-индикатор. На его экране метку от 657-й гармоники кварцевого генератора 2 протонной частоты совмещали с меткой от нижней боковой частоты генератора СВЧ 15, промодулированного частотой генератора стандартных сигналов (ГСС) 14.

Измеряли только частоту ГСС; отсчет брали в момент совмещения резонансных пиков на экране осциллографа и одновременного совмещения меток на экране спектра-анализатора СВЧ с помощью подстройки частоты ГСС. В этом случае ω_e/ω_p определяют по формуле

$$\frac{\omega_e}{\omega_p} = 657 + \frac{f_m}{f_n},$$

где f_m — частота ГСС, измеренная гетеродинным волномером 13, f_n — частота кварцевого генератора 2.

В результате эксперимента в работе [6] получено

$$\frac{\omega_e}{\omega_p} = 657,575 \pm 0,008. \quad (13)$$

Вводя диамагнитную поправку $-26,8 \cdot 10^{-6}$ (данные авторов), авторы нашли

$$\mu_B/\mu_p = 657,4573 \pm 0,008^* \quad (14)$$

с относительной средней квадратической погрешностью $12 \cdot 10^{-4}$. Сравнительно большая погрешность, а также возможные неучтенные систематические ошибки объясняются следующими причинами.

Прежде всего следует указать, что существенный сдвиг циклотронной частоты вызывается объемным зарядом электронов пучка и электростатическими потенциалами на внутренней поверхности волновода, возникающими вследствие образования на ней непронизывающей пленки. Практически учесть этот сдвиг невозможно, так как распределение электростатического поля внутри волновода неизвестно. Погрешности, вызванные неоднородностью магнитного поля в зазоре, не удавалось полностью исключить даже меняя местами протонный образец и волновод и усредняя результаты, потому что оставалась некоторая неточность в их установке.

Влияние поля катода исключали, меняя направление тока на обратное. Однако было замечено, что сдвиги резонансных пиков не были симметричны и их направление в амплитуда зависели от направления тока катода и основного магнитного поля. Значение этих сдвигов зависело также от потенциала коллектора. В отдельных случаях относительный сдвиг доходил до 10^{-4} .

Результат (14) работы [6] имел существенное значение для квантовой электродинамики. Комбинируя его с данными С. Кёнига, А. Продела и П. Каша [8] по измерению g_j/g_p и используя соотношение

$$g_j/g_s = 1 - \alpha^2/3 = 1 - 17,75 \cdot 10^{-6},$$

можно определить g_j/g_e .

Здесь $\alpha^2/3$ — релятивистская поправка на энергию связи и увеличение массы электрона в атоме водорода.

В работе [8] авторы с помощью техники молекулярных пучков и ЯМР определили g_j/g_p для атомарного водорода и протонов в сферическом образце минерального масла. Они получили:

$$g_j/g_p = 658,2171 \pm 0,0006$$

и

$$g_s/g_p = 658,2288 \pm 0,0006,$$

* В работе [7] приведено значение $\mu_B/\mu_p = 657,4565$. По-видимому, автор вводил среднее значение диамагнитной поправки из указанных им значений поправок для сферических образцов минерального масла ($-29,7 \cdot 10^{-6}$) и воды ($-26,0 \cdot 10^{-6}$).

где g_p' — значение без диамагнитной поправки;

$$g_p'/g_p = 658,2087,^* \quad (15)$$

где g_p — значение с введенной диамагнитной поправкой.

В результате работ (6) и (8) найдено:

$$g/g_L = 2(1,001146 \pm 0,000012).$$

К этому времени Р. Карплус и Н. М. Кроль [9] определили второй поправочный член в теоретической формуле μ_s/μ_B :

$$\mu_s = \mu_B \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} - 2,973 \frac{\alpha^2}{\pi^2} \right) = 1,0011454 \mu_B. \quad (16)$$

(Здесь принято значение $\alpha^{-1} = 137,0373$, что соответствует согласованному значению этой константы того времени).

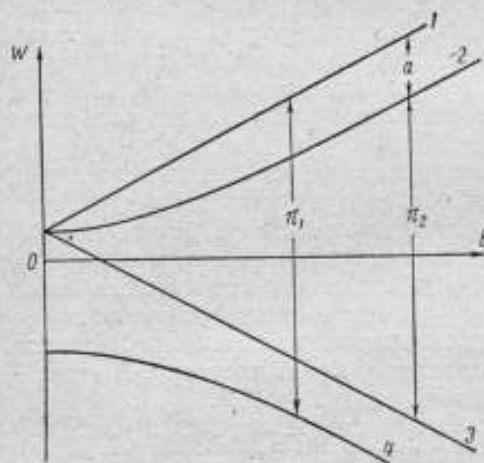


Рис. 3. Уровни энергии основного состояния водорода в магнитном поле с индукцией B .

Уровни энергии, соответствующие квантовым числам: 1) $F=1, M=1, M_J=1/2; M_I=1/2$; 2) $F=1, M=0, M_J=1/2, M_I=-1/2$; 3) $F=1, M=-1, M_J=-1/2, M_I=-1/2$; 4) $F=0, M=0, M_J=-1/2, M_I=1/2$.

M_J — магнитное квантовое число, соответствующее квантовому числу J , где J — полное (внутреннее) квантовое число атома; M_I — магнитное квантовое число, соответствующее квантовому числу I , где I — спиновое квантовое число ядра.

Однако значение g/g_L , полученное из указанных выше экспериментов, не оказалось достаточно обоснованным критерием проверки теории из-за большой погрешности определения $2g/g_p$. Кроме того, и в самом эксперименте [8] можно предполагать наличие неучтенных погрешностей, связанных, в частности, с недостаточной однородностью магнитного поля (около $7 \cdot 10^{-6}$ на 1 мм) и с отсутствием специального стабилизатора тока электромагнита.

Значительно более совершенным оказался эксперимент Р. Беринджера и М. Хилда в 1954 г. [10] по определению g/g_p в атомарном водороде. Для измерения g/g_p они использовали резонансное поглощение мощности СВЧ на частоте зеемановского перехода. При индукции внешнего магнитного поля порядка 0,3 Т переходы обнаруживаются на частотах около 10 ГГц (рис. 3).

* В цитированной работе [7] указана погрешность $\pm 0,0004$. Приводимая авторами определения [8] диамагнитная поправка $-30,5 \cdot 10^{-6}$. Дюмонд указывает значение диамагнитной поправки $-29,7 \cdot 10^{-6}$, но приводит значение $g_p'/g_p = 658,2096$. Однако этой поправке соответствует значение $g/g_p = 658,2093$.

Если основное состояние атомарного водорода является чистым $^2S_{1/2}$, то уровень энергии W , включая магнитные сверхтонкие взаимодействия, дается формулой Брейта—Раби:

$$W(F = 1/0; M_F) = -1/4 \Delta W + g_p \mu_B H M_F \pm \pm 1/2 \Delta W (1 + 2M_F x + x^2)^{1/2} = -1/4 h\nu_H + h\nu_p M_F \pm \pm 1/2 h\nu_H (1 + 2M_F x + x^2)^{1/2}, \quad (17)$$

где $x = (g_l - g_p) \frac{M_B H}{\Delta W}$,

W — энергия атома, соответствующая состоянию с квантовыми числами F и M_F ;

F — квантовое число, определяющее полный механический момент атома;

M_F — магнитное квантовое число, соответствующее квантовому числу F ;

$\Delta W = h\nu_H$ — энергия сверхтонкого расщепления атомарного водорода в нулевом поле;

$\nu_H = 1420,4051 \pm 0,0002$ МГц [11] — частота сверхтонкого расщепления атомарного водорода в нулевом поле.

Если измерять напряженность магнитного поля с помощью ЯМР, то

$$h\nu_p = -g_p \mu_B H,$$

$$x = (1 - g_l/g_p) \frac{\nu_p}{\nu_H}.$$

Переходы $\Delta M = \pm 1$ и $\Delta M = 0$ для умеренных полей происходят в диапазоне СВЧ и обычно их обозначают π_1 и π_2 (рис. 3). Выражая энергию перехода как $h\nu$, можно получить отношение g_l/g_p только как функцию частот. Для переходов π_1 и π_2 (верхний и нижний знаки соответственно) получаем

$$-\frac{g_l}{g_p} = \frac{\nu}{\nu_p} \left(\frac{\nu + \nu_p \pm \nu_H \pm 1/2 \nu_p \nu_H / \nu}{\nu + \nu_p \pm \nu_H} \right). \quad (18)$$

В эксперименте [10] атомарный водород создавали в охлаждаемой воздухом трубке Вуда и пропускали по кварцевой трубке вдоль оси объемного резонатора, настроенного на частоту перехода.

Источником мощности СВЧ служил клистрон, стабилизированный по опорному перестраиваемому резонатору. Частоту измеряли калиброванным приемником интерполяционным методом. Поле электромагнита имело протонную стабилизацию, обеспечивающую нестабильность не более $\pm 2 \cdot 10^{-7}$.

Применение метода дифференциального прохождения давало возможность точно обнаружить точку резонанса при поглощении мощности СВЧ.

В работе [10] авторы тщательно исследовали и устраняли причины асимметрии резонансной кривой. В результате обработки 44 серий измерений они получили:

$$g_1/g_p = 658,2181 \pm 0,0003,$$

$$g_2/g_p = 658,2298,$$

а вводя диамагнитную поправку ($-29,8 \cdot 10^{-6}$), нашли:

$$g_2/g_p = 658,2101^* \quad (19)$$

Следующим существенным этапом в критической проверке теории был эксперимент в 1958—1959 гг. С. Либеса и П. Франкена по определению μ_p/μ_B [12].

В отличие от работы [6] они использовали индикацию циклотронного резонанса по изменению микроволновой мощности, поглощенной облаком свободных электронов, находившихся в откачанном до высокого вакуума сферическом баллоне из пирексового стекла. Электроны создавались путем фотоэмиссии с молекулярной пленки калия, нанесенной на внутреннюю поверхность баллона. В баллоне образовывался объемный заряд с заметной удельной плотностью, поэтому необходимо было вводить поправку на сдвиг резонансной частоты, вызванный этим зарядом. Баллон помещали в коаксиальный резонатор, настроенный на циклотронную частоту электронов.

В работе [12] показано, что при определенных допущениях, подтвержденных в дальнейшем в процессе опыта, экспериментальное отношение ω_e/ω_p связано с μ_B/μ_p соотношением

$$\omega_e/\omega_p = \mu_B/\mu_p \left(1 + \frac{K}{H^2} \right),$$

где K — функция распределения электростатического поля.

При условии, что электростатическое поле не зависит от магнитного, зависимость ω_e/ω_p от $1/H^2$ будет линейной. Авторы нашли, что в диапазоне $7,5 \cdot 10^{-2}$ — $15 \cdot 10^{-2}$ Т эта зависимость линейна с погрешностью до $1 \cdot 10^{-6}$.

Таким образом, экстраполируя по магнитному полю, можно исключить сдвиг частоты, вызванный неоднородностью электростатического поля внутри объемного резонатора и баллона без определения распределения поля по их объему.

Циклотронный резонанс обнаруживали чувствительным приемником и точку резонанса определяли по минимуму сигнала на выходе фазового детектора. Аналогичная схема была использована и для обнаружения протонного резонанса. Частоты измеряли электронным счетчиком.

* В работе [7] приведено значение $g_2/g_p = 658,2106$. Однако указанная автором диамагнитная поправка ($-29,7 \cdot 10^{-6}$) не соответствует этому значению.

Протонный образец и резонатор с помощью специального устройства поочередно помещали в одну и ту же точку зазора электромагнита. Протонный и циклотронный резонанс находили изменением настройки генератора протонной частоты и опорного генератора.

Для поддержания стабильности магнитного поля во время измерений электромагнит был снабжен стабилизатором тока.

Применение экстраполяции по полю и использование более совершенного экспериментального оборудования позволило получить в этой работе большую точность, чем в эксперименте [6].

С. Либес и П. Франкен в результате 42 экстраполяций нашли

$$\omega_e/\omega_p = 657,462 \pm 0,004.$$

Вводя диамагнитную поправку ($-29,7 \cdot 10^{-6}$), они получили

$$\mu_B/\mu_p = 657,442 \pm 0,004. \quad (20)$$

Этот результат отличается от результата работы [6] и находится вне пределов указанных авторами погрешностей. Комбинируя его с данными работы [8], можно получить

$$g_e/g_l = 2 (1,001\,166 \pm 0,000\,005).$$

С результатами работы [10] он дает

$$g_e/g_l = 2 (1,001\,168 \pm 0,000\,005).$$

Эти значения расходились с теоретическими расчетами работы [9], что привело к необходимости проверить их правильность. Такая работа была выполнена Ч. Sommerфилдом [13].

Новое выражение для μ_p/μ_B дает

$$\mu_p = \mu_B (1 + \alpha/2\pi - 0,328\alpha^2/\pi^2) = 1,001\,159\,6 \mu_B. \quad (21)$$

(Здесь $\alpha^{-1} = 137,0391$ — значение константы согласованной на 1957 г. Этот результат находился в лучшем соответствии с экспериментальными данными.)

В дальнейшем были выполнены исследования по определению μ_p/μ_B со свободными электронами [14, 15], а также по определению отношения g -факторов электрона и протона в связанном состоянии [7, 16, 18].

В работе [14] была использована аппаратура, сходная с аппаратурой работы [6], но циклотронный резонанс обнаруживали по поглощению микроволновой мощности приемником СВЧ с низким уровнем шумов. Резонанс наблюдали в объемном резонаторе, настроенном на циклотронную частоту электронов. В резонаторе электроны создавались вольфрамовым катодом и затормаживались электростатическим полем. Это приводило к увеличению времени взаимодействия электронов с полем СВЧ и, следовательно к сужению резонансной кривой. Резонансный пик имел относительную

ширину менее 10^{-5} . Неоднородность магнитного поля в объеме электронного облака не превышала $6 \cdot 10^{-6}$.

Специальная методика дала возможность обнаружить зону расположения заторможенных электронов и значение индукции магнитного поля в зоне взаимодействия электронов с полем.

В работе [14] для протонов в газообразном водороде получено

$$\omega_p/\omega_p = 657,4676 \pm 0,0005.$$

При введении диамагнитной поправки для молекулярного водорода ($-26,7 \cdot 10^{-6}$) найдено:

$$\mu_B/\mu_p = 657,4501 \pm 0,0005. \quad (22)$$

Работа [15], выполненная в 1963 г., отличается тщательным исследованием и учетом возможных сдвигов циклотронной резонансной кривой, вызванных неоднородностью магнитного поля, электростатическим полем объемного заряда, релятивистскими эффектами, расстройкой резонатора и т. п.

Магнитное поле было стабилизировано по сигналу ЯМР. Источник СВЧ имел частотную автоподстройку. Частоту измеряли интерполяционным методом по эталонному сигналу с погрешностью до $1 \cdot 10^{-7}$ для частоты циклотронного резонанса и для частоты протонного резонанса — с погрешностью до $2 \cdot 10^{-7}$.

В результате обработки 31 серии измерений было найдено

$$\omega_p/\omega_p = 657,4621 \pm 0,0024.$$

Вводя диамагнитную поправку ($-28,2 \cdot 10^{-6}$), авторы получили

$$\mu_B/\mu_p = 657,4436 \pm 0,0024^*. \quad (23)$$

В работе [16] была использована аппаратура и методика исследования работы [10], но g/g_p определяли в атомарном дейтерии.

Для протонов в сферическом образце минерального масла получено значение

$$g_j/g_p = 658,2169 \pm 0,0004. \quad (24)$$

Наибольшую точность получили в 1959 г. Е. Ламбэ и Дикке в экспериментах по определению μ_p/μ_B и g_s/g_p для протонов в воде

$$g_s/g_p = 658,21591 \pm 0,00002. \quad (25)$$

Но эта работа не опубликована и данные приведены в работе Дюмонда [7]. Однако из-за погрешности примерно $4 \cdot 10^{-7}$ в значении диамагнитной поправки точность определения g_s/g_p в данной работе ограничивается этой погрешностью. Вводя диамагнитную поправку ($-26,0 \cdot 10^{-6}$), получаем [7]:

$$g_j/g_p = 657,2105. \quad (26)$$

* Этот же результат приводит Дюмонд [7], однако он указывает значение диамагнитной поправки, равное $-29,7 \cdot 10^{-6}$.

С этими результатами практически совпадает значение $g/g_p = 658,21049 \pm 0,0002$, полученное в 1966 г. Н. Ф. Рамзеем с сотрудниками [18]. Однако эта работа имеет перед всеми рассматриваемыми здесь работами то преимущество, что отношение g/g_p определяли непосредственно в атомарном водороде. Как показано в работе [18], в этом случае g/g_p для свободных частиц равно g/g_p в атомарном водороде, что и было определено в процессе эксперимента. При таком методе исключаются погрешности, связанные с несовершенством теории, по которой рассчитывают поправки на диамагнитное экранирование. Переходы наблюдались в водородном лазере при магнитном поле с индукцией 0,23 Т (см. рис. 3, переходы л и а). Техника лазера позволяет получить узкие резонансные линии (130 и 60 Гц), в то время как в экспериментах [10] и [16], близких по технике к спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), ширина линии составляет около 20 кГц. Последнее обстоятельство и было ранее препятствием для постановки эксперимента по непосредственному определению g/g_p в атомарном водороде.

В 1963 г. работа [17] окончательно подтвердила теоретическую формулу для определения аномального магнитного момента электрона. В своем эксперименте авторам удалось непосредственно измерить разность между циклотронной частотой электрона и частотой его спиновой прецессии. Эту разность частот можно выразить как

$$\omega = B \left(\frac{4\pi\mu_p}{h} - \frac{e}{m_e c} \right) = \frac{Be}{m_e c} \left(\frac{\mu_p}{\mu_B} - 1 \right).$$

Аномалия $a = \mu_p/\mu_B - 1$ была измерена непосредственно. Окончательный результат $a = 0,001159622 \pm 0,00000027$ с относительной погрешностью $\pm 23 \cdot 10^{-6}$ для μ_p/μ_B дает погрешность $\pm 27 \cdot 10^{-9}$. Это позволяет получить значение μ_p/μ_B из экспериментов по измерению g -факторов протона и электрона, которые выполнены с большей точностью, чем эксперименты по непосредственному измерению μ_p/μ_B .

Комбинируя результаты работ Е. Ламбэ и Дикке и [18] с теоретическим значением

$$\mu_p/\mu_B = 1 + \alpha/2\pi - 0,328\alpha^2/\pi^2 = 1,00115961,$$

получаем

$$\mu_p/\mu_B = 657,4481 \pm 0,0002 \text{ (из работы Е. Ламба и Дикке),}$$

$$\mu_p/\mu_B = 657,44809 \pm 0,00020 \text{ (из работы [18])}$$

Здесь $\alpha^{-1} = 137,0388$ — согласованное значение константы на 1965 г. Если использовать новое значение $\alpha^{-1} = 137,0360 \pm 0,0002$, известное из работы [19], то изменение значения μ_p/μ_B от такой замены будет вне пределов погрешности измерения g/g_p .

Результаты рассмотренных экспериментов сведены в таблицу. На рис. 4 в соответствии с таблицей приведены значения μ_p/μ_B и их средние квадратические погрешности, определенные в наиболее точных из рассмотренных работ.

Результаты, полученные разными авторами при опре

Стро- ка	Авторы	Год	ϵ_1/ϵ_p	ω_1/ω_p
1	Х. Тауб, П. Каш [5]	1949	658,224 0 ± 0,033 (NaOH)	—
2	Д. Гарднер, Е. М. Персел [6]	1949—1951	— —	657,475 ± 0,008 (масло, H ₂ O)
3	С. Кениг, П. Продел, П. Каш [8]	1952	—	—
4	Р. Беринджер, М. Хилд [10]	1954	658,218 1 ± 0,0003 (масло)	—
5	С. Либес, П. Франкен [12]	1956—1959	—	657,462 + 0,003 (масло)
6	Д. Гейджер, В. Хьюз; Г. Рэдфорд [16]	1957	658,216 9 ± 0,000 4 (масло)	—
7	В. Харди, Е. М. Персел * [14]	1959	—	657,467 6 ± 0,000 3 (газ Н)
8	Д. Сандерс, К. Титл, Д. Уард [15]	1963	—	657,462 1 ± 0,0024 (масло)
9	Е. Ламба, Дикке, см. [7]	1959	658,215 91 ± 0,000 02 (H ₂ O)	—
10	Клеппер, Рамсей, Робинсон [18]	1966	—	—

* Данные взяты по работе Дюмонда [7], так как в работе [14] числовых данных нет.

деления μ_p/μ_B и отношения g -факторов

ϵ_2/ϵ_p	μ_B/μ_p	Диамагнитная поправка $\times 10^4$	Данные Дюмонда [7]		Пересчитанные данные авторов определений
			ϵ_2/ϵ_p	μ_B/μ_p	
—	657,436	—20			
—	657,457 4	—26,8	—	657,456 5	
658,208 7 ± 0,000 6 (масло)	—	—30,5	658,209 6	—	657,448 4 ± ± 0,000 6
658,210 1	—	—29,8	658,210 6	—	657,448 7 ± ± 0,000 3
—	657,442	—29,8	—	657,442	657,443 0 ± ± 0,003
—	—	—	658,209 4	—	657,447 7 ± ± 0,0004
—	657,450 1*	—	—	657,450 1	—
—	657,443 6	—28,2	—	657,443 6	
658,210 5	—	—	658,210 5	—	657,448 1 ± ± 0,000 25
658,210 49 ± 0,000 20 (H)	—	—	—	—	657,448 09 ± ± 0,000 20

Следует заметить, что при введении диамагнитной поправки как авторы определений μ_p/μ_B , так и Дюмонд, применяют различные значения ее (см. строки 3, 4, 6 и 8 таблицы).

Основные расхождения существуют между диамагнитными поправками для сферического образца минерального масла. Эти расхождения могут привести к несоответствию результатов и к их неправильной оценке. На основании имеющихся в настоящее время данных, в частности [20] и [21], было принято целесообразным пересчитать результаты некоторых экспериментов, вводя для про-

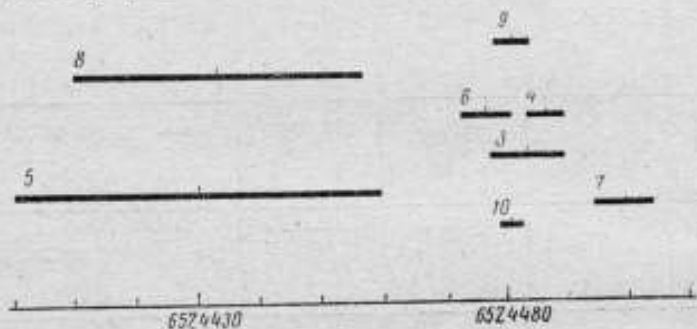


Рис. 4. Наиболее точные значения μ_B/μ_p , полученные разными авторами из непосредственных измерений μ_B/μ_p и из измерения g_s/g_p .

Цифры на рисунке соответствуют номерам строк в таблице.

тонов в сферическом образце минерального масла диамагнитную поправку ($-28,2 \cdot 10^{-6}$). Справедливость такого пересчета косвенным образом подтверждается тем, что данные экспериментов (см. строки 3, 4, 6, 9 и 10 таблицы) группируются, сходясь к значению

$$\mu_B/\mu_p = 657,448\ 14 \pm 0,000\ 14.$$

Этот результат получен в процессе обработки данных указанных экспериментов методом наименьших квадратов. При этом значения критерия согласия $r = \sigma_E/\sigma_I = 1,14$ (см. [7]) позволяют полагать, что систематических погрешностей нет.

Таким образом, указанное значение μ_B/μ_p следует считать наиболее достоверным в настоящее время. Это значение практически совпадает с приводимым в согласовании 1965 г. [7] значением

$$\mu_B/\mu_p = 657,448\ 1.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбацевич С. В., Залуцкая Т. Л. Выражения зависимостей между некоторыми физическими константами и числовые значения основных физических констант по данным 1965 г. Труды метрологических институтов СССР, вып. 57 (117). Стандартгиз, 1967.
2. Breit G. Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 984.

3. Kusch P., Foley. Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 1256; Foley, Kusch P., Phys. Rev., 1948, v. 73, p. 412; Kusch P., Foley. Phys. Rev., 1948, v. 74, p. 250.
4. Schwinger. Phys. Rev., 1948, v. 73, p. 416.
5. Taub H., Kusch P. Phys. Rev., 1949, v. 75, p. 1481.
6. Gardner J. H., Purcell E. M. Phys. Rev., 1949, v. 76, p. 1262.
7. Du Mond. Rev. Mod. Phys., 1965, v. 37, № 4, p. 537.
8. Koenig S. H., Prodell A. G., Kusch P. Phys. Rev., 1952, v. 88, p. 191.
9. Karplus R., Kroll N. M. Phys. Rev., 1951, v. 181, p. 73.
10. Beringer R., Heald M., Phys. Rev., 1954, v. 95, p. 1474.
11. Prodell, A. G. Kusch P. Phys. Rev., 1952, v. 88, p. 184.
12. Liebes S., Franken P. Phys. Rev., 1959, v. 116, p. 633.
13. Sommerfield C. M. Phys. Rev., 1957, v. 107, p. 328.
14. Hardy W. A., Purcell E. M. Bul. Am. Soc., 1959, v. 1, p. 37.
15. Sanders J. H., Tittel K. F., Ward J. F. Proc. Roy. Soc., 1963, A272, p. 103.
16. Geiger J. S., Hughes V. W., Radford H. F. Phys. Rev., 1957, v. 105, p. 183.
17. Wilkinson D. T., Crane H. R. Phys. Rev., 1963, v. 130 (3), p. 852.
18. Myint T., Kleppner D., Ramsey N. F. and Robinson H. G. Phys. Rev. Letters., 1966, v. 17, p. 405.
19. Parker W. H., Langenberg D. N., Denestein A. Phys. Rev., 1969, v. 177, p. 639.
20. Леше А. Ядерная индукция. Изд-во иностр. лит., 1963.
21. Эмсли Дж. ЯМР спектроскопия высокого разрешения, т. 1. «Мир», 1968.

Поступила в редакцию 6/1 1970 г.

УДК 53.088

А. Н. ГОРДОВ, В. С. ПЕЛЛИНЕЦ, А. Е. СИНЕЛЬНИКОВ
ВНИИМ

О МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ

Одной из главных задач теории погрешностей является определение суммарной погрешности результата выполненного измерения. Значение этой погрешности определяет пределы, в которых лежит истинное значение измеряемой величины, что, в свою очередь, необходимо для дальнейших расчетов характеристик изделий, выбора конструктивных параметров, подтверждения или опровержения научных гипотез и т. д.

Следует отметить, что информационная теория измерительных устройств [1], позволяющая получить некоторые обобщенные характеристики качества приборов на основе теории информации, не дает возможности с требуемой степенью точности судить о рассматриваемой погрешности.

От выбора методики определения указанной погрешности зависит вид характеристик точности средства измерений, приводимых в соответствующей технической документации [2]. Отсюда вытекает, в частности, важность единообразного подхода к определению погрешности.

Рассмотрим принципы построения методики определения погрешности результата измерения применительно к многозвенным измерительным системам, находящимся в условиях одновременного воздействия большого числа влияющих факторов. Разумеется, методика должна оставаться верной и для простых, однозвенных, средств измерений.

Как известно [3], наиболее надежным способом определения погрешности измерения является сопоставление результатов, полученных с помощью данного и заведомо более точного средства измерений. Однако экспериментатор, как правило, не располагает точной аппаратурой, способной работать вне области нормальных значений влияющих величин. Иногда такому сопоставлению препятствуют ограничения, связанные с весом, габаритами, потребляемой мощностью средств измерений и т. п. В этих условиях наиболее

целесообразно находить погрешность результата измерения суммированием отдельных частных погрешностей.

Частные погрешности ϵ можно определять экспериментальным или экспериментально-расчетным путем. Их можно относить как к одному, так и к нескольким звеньям, к одной или нескольким влияющим величинам, исходя из удобства определения. Необходимо только, чтобы форма их представления была одинаковой и позволяла производить суммирование.

Из большого числа классификационных признаков погрешностей выберем лишь необходимые для выполнения расчетов. Подразделим погрешности:

1) по виду:

а) на систематические, являющиеся математическим ожиданием некоторой погрешности ϵ , рассматриваемой как нецентрированная случайная величина. Будем обозначать их Δ (в абсолютной форме) или δ (в относительной форме);

б) на случайные, выражаемые в виде оценки среднего квадратического отклонения σ или соответственно σ_r (в тех же формах);

2) по связи с уровнем x измеряемой величины:

а) на наложенные (аддитивные) ϵ_n , значения которых не зависят от размера измеряемой величины; их удобно выражать в абсолютной форме;

б) зависящие от размера измеряемой величины, в простейшем случае — пропорциональные (мультипликативные) ϵ_n , т. е. прямо пропорциональные размеру измеряемой величины; их удобно выражать в относительной форме.

Таким образом, любая, например, i -я частная погрешность определяется в общем случае четырьмя независимыми составляющими: $\Delta_i, \delta_i x, \sigma_i, \sigma_{r,i} x$, если их выражать в абсолютной форме, или $\Delta_i/x, \delta_i, \sigma_i/x, \sigma_{r,i}$ — в относительной форме.

Кроме того, частные погрешности разделяются на две группы:

1) имеющие место при нормальных условиях эксплуатации аппаратуры, т. е. входящие в основную погрешность;

2) определяемые отклонением влияющих величин от их нормальных значений или областей нормальных значений, т. е. вызывающие дополнительную погрешность.

Рассмотрим порядок вычисления частных погрешностей, вызываемых действием влияющих величин, не разделяя их на внутренние и внешние [4].

Для определения частной погрешности ϵ системы (звена), вызванной действием k -й влияющей величины, необходимо знать:

1) функцию влияния — зависимость наложенной ϵ_n и пропорциональной ϵ_n , составляющих частной погрешности, от отклонения k -й влияющей величины A_k от ее нормального значения:

$$\epsilon_n = \epsilon_n(a_k, A_k),$$

$$\epsilon_n = \epsilon_n(b_k, A_k),$$

где a_k и b_k — конструктивные характеристики системы, определяющие зависимость погрешности от k -й влияющей величины.

Если характеристики a_k и b_k можно считать неизменными, то функции влияния выражаются как

$$\varepsilon_n = \varepsilon_n(A_k),$$

$$\varepsilon_n = \varepsilon_n(A_k).$$

При экспериментальном определении функций влияния, когда физическое содержание величин a_k и b_k не раскрывается, их обычно считают неизменными;

2) функцию распределения $\varphi(A_k)$ величины A_k — отклонения влияющей величины от нормального значения, или значение A_k , если оно является постоянным;

3) функции распределения $\varphi(a_k)$ и $\varphi(b_k)$, если характеристики a_k и b_k не считаются неизменными.

Систематические составляющие частной погрешности, наложенную Δ и пропорциональную δ , в наиболее общем случае определяют из выражений:

$$\Delta = \int_{N_1}^{N_2} \int_{a_1}^{a_2} \varepsilon_n(a_k, A_k) \varphi(a_k) \varphi(A_k) da_k dA_k$$

$$\delta = \int_{N_1}^{N_2} \int_{b_1}^{b_2} \varepsilon_n(b_k, A_k) \varphi(b_k) \varphi(A_k) db_k dA_k,$$

где $[N_1, N_2]$ — интервал возможных значений A_k ; $[a_1, a_2]$ и $[b_1, b_2]$ — то же a_k и b_k соответственно.

Средние квадратические значения наложенной и пропорциональной случайных составляющих определяют по формулам:

$$\sigma = \left[\int_{N_1}^{N_2} \int_{a_1}^{a_2} (\varepsilon_n - \Delta)^2 \varphi(a_k) \varphi(A_k) da_k dA_k \right]^{1/2};$$

$$\sigma_r = \left[\int_{N_1}^{N_2} \int_{b_1}^{b_2} (\varepsilon_n - \delta)^2 \varphi(b_k) \varphi(A_k) db_k dA_k \right]^{1/2}.$$

Если одна из величин здесь постоянная, то предыдущие выражения упрощаются; так, при $a_k = \text{const}$ и $b_k = \text{const}$.

$$\Delta = \int_{N_1}^{N_2} \varepsilon_n(A_k) \varphi(A_k) dA_k, \quad \delta = \int_{N_1}^{N_2} \varepsilon_n(A_k) \varphi(A_k) dA_k;$$

$$\sigma = \int_{N_1}^{N_2} (\varepsilon_n - \Delta)^2 \varphi(A_k) dA_k, \quad \sigma_r = \int_{N_1}^{N_2} (\varepsilon_n - \delta)^2 \varphi(A_k) dA_k.$$

В частном случае, когда функции влияния $\epsilon_n = \epsilon_n(a_k, A_k)$ и $\epsilon_n = \epsilon_n(b_k, A_k)$ линейны, т. е. представляют собой произведение коэффициентов влияния B_k и β_k на отклонение A_k , а функции распределения $\varphi(a_k)$, $\varphi(b_k)$ и $\varphi(A_k)$ симметричны, выражения для Δ и δ приобретают наиболее простой вид

$$\Delta = \overline{B_k A_k}; \quad \delta = \overline{\beta_k A_k}.$$

В некоторых случаях в выражение для функции влияния может входить несколько аргументов типа a_k или b_k . При этом приведенные выше выражения видоизменяются, сохраняя свою структуру. Определенный порядок вычислений частных погрешностей полностью распространяется и на динамические погрешности. В зависимости от вида подлежащей измерению характеристики измеряемой величины, возможны следующие два случая:

1. При измерении постоянного во времени параметра переменной величины (например, действующего значения напряжения переменного тока) параметром A_k является отклонение частоты сигнала от частоты, на которой проградуирована система (звено), а функция влияния определяется из ее амплитудно-частотной характеристики.

2. При измерении изменяющегося во времени параметра переменной величины функцией влияния является передаточная функция системы (звена), а параметром A_k — сам изменяющийся во времени параметр переменной измеряемой величины; тогда частотная (динамическая) погрешность будет функцией времени. В тех случаях, когда столь подробная информация о динамической погрешности (знание ее в любой момент времени) не нужна, эту составляющую можно найти в зависимости от задач конкретного измерения по максимальному или среднему квадратическому (во времени) значению, либо по иной точечной оценке.

По рассмотренной выше методике определяют все частные погрешности системы (звена).

Следующим шагом является суммирование частных погрешностей, для чего необходимо, в частности, привести их ко входу системы (звена) путем деления каждой из них на чувствительность той системы (звена), для которой они определены.

Рассмотрим порядок суммирования вычисленных и приведенных к одной форме погрешностей.

Суммирование производится отдельно по каждой из четырех независимых составляющих частных погрешностей.

Систематические составляющие Δ_i и соответственно δ_i суммируют алгебраически:

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta_i; \quad \delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \delta_i,$$

причем слагаемыми, сумма которых не превышает 0,1 от Δ_{Σ} и δ_{Σ} соответственно, следует пренебрегать.

Случайные составляющие погрешности суммируют по правилам сложения случайных величин. Однако строгий учет всех правил приводит к излишне сложным выражениям, тогда как допустима неточность определения погрешности до 15% [3]. Поэтому представляется целесообразным ограничиться учетом трех следующих обстоятельств:

- 1) вида функции распределения погрешности,
- 2) объема выборки при определении частных погрешностей,
- 3) линейных корреляционных связей между составляющими погрешности.

При учете вида функции распределения суммарной погрешности принимается следующее положение [5]: соотношение между доверительной погрешностью γ_i при заданной доверительной вероятности $\alpha = 0,997$ и приведенной средней квадратической погрешностью σ_{Σ} для функции распределения суммарной погрешности должно быть такое же, как и в случае нормального распределения, т. е. равно 3.

Если для распределения суммарной погрешности $\gamma_{\Sigma} = R\sigma'_{\Sigma}$, то приведение осуществляют, умножая оценку суммарной средней квадратической погрешности σ'_{Σ} на коэффициент $\kappa = R/3$.

Рекомендации по определению вида функции распределения, а также коэффициенты κ для некоторых композиций функций нормального распределения, соответствующих нормальному и равновероятному закону, приведены в работе [5].

Для учета объема выборки частных погрешностей, найденных на основе менее 20 измерений, умножают оценку средней квадратической погрешности на коэффициент χ , определяемый из таблицы Стюдента—Фишера (см. таблицу).

Объем выборки	2	3	4	5	6	10	15	20
χ	200	10	4	2,5	2	1,5	1,25	1,1

Линейную взаимную корреляцию учитывают путем введения коэффициента корреляции $k_{i,j}$, который может лежать в промежутке $[-1, 1]$.

Трудность в ряде случаев определения коэффициентов $k_{i,j}$ является одним из основных недостатков рассматриваемой методики. Формулы для вычисления случайных погрешностей результата измерения можно написать в следующем виде:

$$\sigma'_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i \chi_i)^2 + 2 \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} k_{i,j} \sigma_i \sigma_j \chi_i \chi_j};$$

$$\sigma'_{r,\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_{r,i} \chi_i)^2 + 2 \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} k_{i,j} \sigma_{r,i} \sigma_{r,j} \chi_i \chi_j}.$$

Слагаемыми, составляющими 0,3—0,4 от σ_z и $\sigma_{r, z}$, для сокращения выкладок следует пренебрегать.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет определить систематическую и случайную составляющие погрешности измерения, выполненного с помощью данной системы (звена).

При условии исключения из результата измерения систематической составляющей погрешности точность характеризуется случайной составляющей погрешности равной

$$\sqrt{\sigma_z^2 + (\sigma_{r, z}x)^2 + 2k\sigma_z\sigma_{r, z}x},$$

где k — коэффициент линейной корреляции между σ_z и $\sigma_{r, z}x$.

В случае же, когда систематическую составляющую исключить нельзя, значение доверительной погрешности результата измерения при доверительной вероятности 0,997 можно найти по формуле

$$\gamma_z = \Delta_z + \delta_z x \pm 3 \sqrt{\sigma_z^2 + (\sigma_{r, z}x)^2 + 2k\sigma_z\sigma_{r, z}x},$$

а в относительной форме

$$\gamma_{r, z} = \frac{\gamma_z}{x}.$$

Применение указанной методики предполагает знание функций (или коэффициентов) влияния различных величин на погрешность, вносимую звеньями или системой в целом, а также функций распределения отклонений влияющих величин от нормальных значений. Эти функции влияния должны быть определены в процессе разработки средства измерений и входить в техническую документацию на аппаратуру.

На основе рассмотренной методики решается также вопрос об установлении совокупности параметров, которыми следует характеризовать точность средств измерений, применяемых в условиях одновременного воздействия группы влияющих величин.

Естественным является желание характеризовать средство измерений одной единственной интегральной оценкой. Однако, поскольку современные средства измерений во многих случаях применяют в условиях большого разнообразия сочетаний заранее не известных уровней измеряемой и влияющих величин и задать эти условия заранее не представляется возможным, даже сама постановка подобной задачи вызывает определенные сомнения.

Тем не менее, при использовании интегральной оценки не для вычисления погрешности результата измерения, а для предварительного сопоставления однотипных приборов и подобных целей, в качестве такой оценки может быть рекомендована совокупность двух величин:

— основной погрешности (ОП) системы, выраженной в процентах от диапазона измерений;

— условной дополнительной погрешности (УДП) средства измерений, вычисленной по приведенной выше методике в предполо-

жении, что все без исключения влияющие величины изменяются в полном диапазоне значений, допускаемом технической документацией на прибор, причем изменение их является случайным и имеет равновероятную функцию распределения. Погрешность вычисляют для максимально возможного значения измеряемой величины и приводят к той же форме, что и основная погрешность.

УДП зависит не только от точности прибора, но и от допускаемых условий его эксплуатации; последнюю зависимость можно исключить, задавая некоторые стандартные диапазоны изменений влияющих величин.

Следует еще раз подчеркнуть, что предлагаемая оценка является сугубо ориентировочной.

Выводы

В случаях, когда оценка погрешности результата измерения (особенно, выполненного с применением сложной измерительной системы) методом сопоставления полученных данных с результатом измерения более точным прибором не представляется возможной, наиболее целесообразным является метод определения частных погрешностей данного измерения и суммирования их по определенным правилам.

Предлагаемая методика позволяет установить совокупность характеристик, подлежащих введению в техническую документацию на прибор, и найти условную характеристику точности средства измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. «Энергия», 1968.
2. Кузнецов В. П. О нормировании погрешностей измерительных усилителей. «Измерительная техника», 1968, № 10.
3. Маликов М. Ф. Основы метрологии. М., 1949.
4. Земельман М. А. К вопросу о погрешностях измерительной аппаратуры. «Измерительная техника», 1966, № 11.
5. Рабинович Б. Е. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. Труды институтов Комитета стандартов, вып. 57 (117). Стандартгиз, 1962.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

Л. К. ИСАЕВ, А. И. МЕХАНИКОВ
ВНИИФТРИ

ИЗМЕНЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ВО ВРЕМЕНИ

В процессе эксплуатации измерительного прибора ему принято приписывать погрешности, определяемые при последней поверке. Однако в межповерочный период (в зависимости от условий и интенсивности использования) погрешности прибора изменяются, и он в общем случае может выйти из своего класса точности. Опыт поверочной службы показывает, что забракованные по скрытым, так называемым метрологическим отказам, устанавливаемым в процессе поверки, радионизмерительные приборы составляют для отдельных типов до 40%. Таким образом, появляется необходимость введения дополнительных метрологических параметров, характеризующих динамику погрешности во времени, чтобы определить качество прибора в любой момент межповерочного периода. Интересно отметить, что в ряде стран (США, Канада) лаборатории национальной поверочной службы не указывают срок годности результатов поверки, чем подчеркивается необходимость для потребителя самому устанавливать срок очередной поверки с учетом особенностей приборов, условий их эксплуатации, требуемого уровня надежности и т. п. [1]. В связи с этим представляет интерес определение доверительного интервала погрешности прибора в любой момент времени после его поверки, т. е. нахождение оценки его текущей погрешности. При этом потребитель будет получать измерительную информацию с определенной, заранее заданной, доверительной вероятностью. Кроме того, такой подход позволит обоснованно устанавливать межповерочные интервалы.

Математическая модель процесса изменения погрешности

Пусть функция $x(t)$ отражает процесс изменения погрешности измерительной системы, обусловленный как систематическим изменением параметров ее элементов, так и флуктуациями из-за изменения с течением времени условий, в которых она применяется.

Тогда погрешность системы в момент t можно представить в виде некоторой точки с координатами (x, t) на плоскости, а весь процесс $x(t)$ — в виде траектории этой точки на плоскости. Положим, что зависимость текущего значения погрешности $x(t)$ не распространяется далее непосредственно предшествовавшего момента t_0 , когда значение погрешности равнялось x_0 , а время $t - t_0 = \tau$ стремится к нулю, т. е. что процесс $x(t)$ носит характер броуновского движения. Положим далее, что существует некоторая вероятность $P_{tt_0}(x, x_0)$ перехода погрешности системы из состояния (x_0, t_0) в состояние (x, t) . Тогда, если упорядоченное движение точки совершается с конечной скоростью

$$A(x, t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{x - x_0}{\tau}, \quad (1)$$

кроме того, скорость изменения среднего квадрата разности (как меры неупорядоченности движения) во времени при малых τ

$$B(x, t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{(x - x_0)^2}{\tau} \quad (2)$$

конечна и $P_{tt_0}(x, x_0)$ для малых τ быстро убывает при $|x - x_0| \rightarrow \infty$ и возрастает при малых $|x - x_0|$ (что в наших предположениях выполняется всегда), то функция $P_{tt_0}(x, x_0)$ удовлетворяет уравнению Эйнштейна — Колмогорова [2] или второму уравнению Колмогорова [3]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} [A(x, t) P] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [B(x, t) P], \quad (3)$$

Следует отметить, что положение точек (x, t) и (x_0, t_0) не является детерминированным, а характеризуется некоторыми распределениями с плотностями вероятности $W(x)$ и $W_0(x_0)$. Умножая правую и левую части выражения (3) на известную функцию $W_0(x_0)$ и производя интегрирование по x_0 под знаком дифференциала, получим

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [A(x, t) W] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [B(x, t) W], \quad (4)$$

где $W = W(x, t/x_0, t_0) dx$ — условия вероятности того, что в момент t погрешность находится в интервале $(x, x + dx)$ при условии, что в момент t_0 она находилась в интервале $(x_0, x_0 + dx_0)$.

Общее решение уравнения (4) в настоящее время неизвестно, однако для некоторых, достаточно распространенных частных случаев решения получены [2—4]. В частности, известно, что если процесс $x(t)$ однороден, т. е. $W(x, t)$ зависит только от разности $\xi = x - x_0$ и $\tau = t - t_0$, то $A(x, t)$ и $B(x, t)$ постоянны и уравнение (4) имеет вид

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -A \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{B}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}. \quad (5)$$

В нашем случае постоянство A и B означает постоянство скорости систематического дрейфа изучаемого параметра прибора и постоянство скорости изменения дисперсии флуктуаций этого параметра.

В случае, если вероятности одинаковых смещений в сторону положительных и отрицательных значений x равны, т. е. если $A = 0$, уравнение (4) имеет вид

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{B}{2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}. \quad (6)$$

Уравнения типа (5) и (6) известны в математической физике как уравнения диффузии, а процессы, описываемые этими уравнениями, носят название диффузионных. Уравнение (5) подстановкой

$$W(x, t) = \exp\left\{\frac{A}{B}x - \frac{A^2}{2B}t\right\} u(x, t) \quad (7)$$

сводится к уравнению вида (6)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{B}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (8)$$

Решением уравнения (8) является интеграл Пуассона [3]

$$u(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Bt}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(x-\xi)^2}{2Bt}\right\} \varphi(\xi) d\xi, \quad (9)$$

где $\varphi(x_0) = u(x, 0)$ — плотность вероятности начального распределения x , непрерывная и ограниченная функция.

Из выражения (7) следует, что

$$\varphi(x_0) = u(x, 0) = W(x, 0) \exp\left\{-\frac{A}{B}x\right\}. \quad (10)$$

Таким образом, решая уравнения (4)–(6), можно получить выражение для плотности вероятности W в произвольный момент времени t .

Остановимся на процессах, которые описываются уравнением (5). Постоянство коэффициентов A и B с учетом условий (1) и (2) означает, что среднее значение погрешности и дисперсия ее флуктуаций являются линейными функциями времени, т. е., что

$$M[x(t)] = At + a, \quad (11)$$

и

$$D[x(t)] = Bt + b, \quad (12)$$

где a и b — характеристики процесса (среднее значение и дисперсия) в начальный момент времени ($t = 0$).

Из всего изложенного следует, что процесс $x(t)$ — нестационарный случайный, без последствия и может быть отнесен к клас-

су марковских, которые описываются стохастическим уравнением (3). Независимость последовательных значений x достигается на интервалах времени порядка интервала корреляции τ_k .

Доверительные интервалы значений погрешности

Не останавливаясь на таких важных показателях, как вероятность нахождения погрешности прибора в пределах допуска за заданный интервал времени, среднее время до первого выхода прибора из своего класса точности, дисперсия этого времени и т. п., перейдем к задаче о нахождении доверительного интервала значений x в момент времени T эксплуатации прибора для процесса $x(t)$, описываемого уравнением (5) и характеризующего динамику параметра прибора. При этом полагаем, что плотность начального ($t = 0$) распределения x_0 (в момент поверки) и доверительная вероятность β известны.

Из практики эксплуатации измерительных систем и приборов известно, что начальные распределения погрешности, как правило, относятся к одному из следующих типов: к δ -распределению (детерминированное начальное значение $-x_0$); нормальному со средним \bar{x}_0 и дисперсией σ_0^2 ; к равномерному внутри некоторого интервала $(-\Delta, \Delta)$; распределению арксинуса и к бимодальному [5—7].

δ -распределение погрешности

В этом случае $W_0(x_0) = \delta(x - x_0)$. Подстановка $W_0(x_0)$ в выражение (10), (9) и (7) дает

$$W(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Bt}} \exp\left\{-\frac{(x - x_0 - At)^2}{2Bt}\right\}. \quad (13)$$

Доверительный интервал выражается в виде [8]

$$I_\beta(T) = (x_0 + AT - t_\beta \sqrt{BT}; x_0 + AT + t_\beta \sqrt{BT}), \quad (14)$$

где t_β определяет число средних квадратических отклонений вправо и влево от центра интервала, при котором интервал I_β накрывает x с доверительной вероятностью β . Очевидно, что абсолютное значение I_β равно $2t_\beta \sqrt{BT}$.

Имея аналитические выражения для границ доверительного интервала, можно, в частности, определить и время, через которое процесс $x(t)$ достигнет некоторого предельного значения. Например, в случае симметричного допуска $(-\Delta, \Delta)$ можно написать уравнение связи в виде

$$x_0 + At + t_\beta \sqrt{Bt} = \Delta. \quad (15)$$

Отсюда время достижения границы допуска

$$t_\Delta = \frac{\Delta - x_0}{A} - \frac{Bt_\beta^2}{2A^2} \left[\sqrt{1 + \frac{4A(\Delta - x_0)}{Bt_\beta^2}} - 1 \right]. \quad (16)$$

В случае преобладания систематического дрейфа $\left(\frac{4A(\Delta-x_0)}{Bt_\beta^2} \gg 1\right)$ выражение (16) принимает вид

$$t_d = \frac{\Delta-x_0}{A} \left[1 - t_\beta \sqrt{\frac{B}{A(\Delta-x_0)}}\right] \approx \frac{\Delta-x_0}{A}, \quad (17)$$

а в случае преобладания флуктуаций $\left(\frac{4A(\Delta-x_0)}{Bt_\beta^2} \ll 1\right)$ время достижения границы будет

$$t_d = \frac{(\Delta-x_0)^2}{Bt_\beta^2}. \quad (18)$$

Нормальное распределение погрешности с параметрами x_0 и σ_0^2

В этом случае выражение для плотности вероятности представляется в виде

$$W(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(Bt + \sigma_0^2)}} \exp\left[-\frac{(x-x_0-At)^2}{2(Bt + \sigma_0^2)}\right]. \quad (19)$$

Аналогично уравнению (14) доверительный интервал через время T составляет

$$I_\beta(T) = \left(x_0 + AT - t_\beta \sqrt{BT + \sigma_0^2};\right. \\ \left.x_0 + AT + t_\beta \sqrt{BT + \sigma_0^2}\right).$$

Очевидно, что выражение для времени первого выхода параметра за пределы допуска $(-\Delta, \Delta)$ можно найти из уравнения связи

$$x_0 + At_d + t_\beta \sqrt{Bt_d + \sigma_0^2} = \Delta. \quad (20)$$

Решая уравнение (20) относительно t_d , получим

$$t_d = \frac{\Delta-x_0}{A} - \frac{Bt_\beta^2}{2A^2} \times \\ \times \left[\sqrt{1 + \frac{4A\sigma_0^2(\Delta-x_0)}{Bt_\beta^2} \cdot \left(\frac{B}{\sigma_0^2} + \frac{A}{\Delta-x_0}\right)} - 1 \right]. \quad (21)$$

В случае преобладания систематической составляющей $\left(\frac{A}{\Delta-x_0} \gg \frac{B}{\sigma_0^2}\right)$ выражение (21) можно написать в виде

$$t_d = \frac{\Delta-x_0}{A} - t_\beta \frac{\sigma_0}{A}, \quad (22)$$

учитывая при этом, что

$$\frac{A(\Delta - x_0)}{B} \gg \frac{\Delta^2}{\sigma_0^2} \gg 1.$$

В случае преобладания флуктуаций $\left(\frac{A}{\Delta - x_0} \ll \frac{B}{\sigma_0^2}\right)$ выражение (21) сводится к виду (18).

Равномерное распределение погрешности

Положим, что начальное (в момент поверки) распределение погрешности — равновероятное с плотностью вероятности

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{при } x < a, x > b. \end{cases} \quad (23)$$

Обозначим $b - a = 2\delta$, тогда $f(x) = 1/2\delta$.

Определяя выражение для $W(x, t)$ способом, рассмотренным выше, находим, что

$$W(x, t) = \frac{1}{2\delta} \left[\Phi\left(\frac{x_0 + \delta - x + At}{\sqrt{Bt}}\right) + \Phi\left(\frac{x_0 + \delta + x - At}{\sqrt{Bt}}\right) \right], \quad (24)$$

где $\Phi(z)$ — функция Лапласа.

Нетрудно видеть, что среднее значение функции $x(t)$ равно $x_0 + At$, а дисперсия

$$\sigma_x^2 = Bt + \frac{\delta^2}{3}.$$

Уравнение связи в этом случае написать в замкнутой форме аналогично выражениям (15) и (20) не представляется возможным. Действительно, интегрирование выражения (24) в пределах от x_1 до x_2 дает

$$\begin{aligned} P(t) = & \frac{1}{2\delta} \left\{ (x_2 - x_0 + \delta - At) \Phi\left(\frac{x_2 + \delta - At + x_0}{\sqrt{Bt}}\right) - \right. \\ & - (x_1 + x_0 + \delta - At) \Phi\left(\frac{x_1 + x_0 + \delta - At}{\sqrt{Bt}}\right) - \\ & - (x_2 - x_0 - \delta - At) \Phi\left(\frac{x_2 - x_0 - \delta - At}{\sqrt{Bt}}\right) + \\ & \left. + (x_1 - x_0 - \delta - At) \Phi\left(\frac{x_1 - x_0 - \delta - At}{\sqrt{Bt}}\right) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sqrt{\frac{Bt}{2\pi}} \left[\exp\left(-\frac{(x_2 + x_0 + \delta - At)^2}{2Bt}\right) - \right. \\
 & - \exp\left(-\frac{(x_1 + x_0 + \delta - At)^2}{2Bt}\right) - \exp\left(-\frac{(x_2 - x_0 - \delta - At)^2}{2Bt}\right) + \\
 & \left. + \exp\left(-\frac{(x_1 - x_0 - \delta - At)^2}{2Bt}\right) \right]. \quad (25)
 \end{aligned}$$

Для заданного значения $P(t) = \beta$ практически невозможно выразить доверительный интервал в явном виде.

В практике измерений, однако, часто встречаются случаи, когда $x_0 = 0$, т. е. $|x_1| = |x_2| = \Delta$, а систематический дрейф отсутствует ($A = 0$). В этих случаях выражение (25) принимает вид

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{1}{\delta} \left((\Delta + \delta) \cdot \Phi\left(\frac{\Delta + \delta}{\sqrt{Bt}}\right) - (\Delta - \delta) \cdot \Phi\left(\frac{\Delta - \delta}{\sqrt{Bt}}\right) + \right. \\
 & \left. + \sqrt{\frac{Bt}{2\pi}} \left[\exp\left\{-\frac{(\Delta + \delta)^2}{2Bt}\right\} - \exp\left\{-\frac{(\Delta - \delta)^2}{2Bt}\right\} \right] \right). \quad (26)
 \end{aligned}$$

Если обозначить $\frac{\Delta - \delta}{\sqrt{Bt}} = z$ и $\frac{\delta}{\sqrt{Bt}} = \alpha$, то выражение (26) можно представить в виде

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{1}{\alpha} \left\{ (z + 2\alpha) \cdot \Phi(z + 2\alpha) - z\Phi(z) + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\exp\left\{-\frac{(z + 2\alpha)^2}{2}\right\} - \exp\left\{-\frac{z^2}{2}\right\} \right] \right\}. \quad (27)
 \end{aligned}$$

Нетрудно видеть, что $\Delta = \sqrt{Bt}(z + \alpha)$. Используя таблицы П.3 работы [9] и задаваясь значениями доверительной вероятности β и значениями α , можно построить для $z(\alpha, \beta)$ табл. 1.

Таблица 1

Значения функции $z(\alpha, \beta)$

$\alpha \backslash \beta$	0,8	0,9	0,95	0,99	0,997
0,1	1,20	1,54	1,86	2,51	2,90
0,25	1,05	1,41	1,73	2,38	2,75
0,5	0,83	1,20	1,55	2,20	2,60
1,0	0,49	0,90	1,25	1,95	2,35
2,0	0,00	0,50	1,90	1,66	2,14

Например, через время T (при известных δ и β) $\alpha = 0,5$. Требуется определить доверительный интервал, характеризуемый доверительной вероятностью $\beta = 0,99$.

По табл. 1 находим, что $z = 2,2$, и, следовательно,

$$\Delta = 2,7\sqrt{BT} = 5,4\delta.$$

Используя выражение (27), можно определить среднее время нахождения погрешности в интервале $\pm\delta$ при заданной вероятности, т. е. среднее время нахождения прибора в своем классе точности. В этом случае $|\Delta| = |\delta|$, а при монотонном изменении процесса $x(t)$ имеем $\Delta = \delta$, $z = 0$ и поэтому [7]

$$P(t) = 2\Phi(2\alpha) - \frac{0,4}{\alpha} + \frac{1}{\alpha\sqrt{2\pi}} \exp[-2\alpha^2]. \quad (28)$$

С учетом того, что $\alpha = \frac{\delta}{\sqrt{Bt}}$, получим табл. 2.

Таблица 2

Значения α (β) и T (α)				
β	0,8	0,9	0,95	0,99
α	2	4	8	40
T	$\frac{\delta^2}{4B}$	$\frac{\delta^2}{16B}$	$\frac{\delta^2}{64B}$	$\frac{\delta^2}{1600B}$

Распределение арксинуса

Это распределение погрешности характерно при измерениях на сверхвысоких частотах (погрешность рассогласования). Плотность вероятности определяется выражением

$$W_0(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2}} & \text{при } |x| < a \\ 0 & \text{при } |x| > a, \end{cases}$$

где a — максимальное значение погрешности.

Задача нахождения доверительного интервала при начальном распределении арксинуса в общем случае приводит к чрезвычайно громоздким выражениям [10], практически непригодным для инженерной практики. Однако для некоторых частных, достаточно распространенных, случаев задача решена [11]. Так, например, при отсутствии систематического дрейфа ($A = 0$) доверительный интервал погрешности прибора через время T после его аттестации, характеризуемый доверительной вероятностью 0,997, определяется следующим образом:

$$\Delta = 3\sqrt{BT} + \gamma a.$$

Здесь γ — весовой коэффициент, зависящий от параметра $\alpha = a/\sqrt{BT}$ и определяемый из табл. 3.

Таблица 3

α	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	∞
γ	0,37	0,53	0,7	0,85	0,93	0,97	0,98	1,0

**Бимодальное распределение погрешности
(суперпозиция двух нормальных распределений)**

Бимодальное начальное распределение довольно часто встречается в измерительной практике для приборов массового изготовления:

$$W_0(x) = \frac{1}{2\sigma_n\sqrt{2\pi}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-c)^2}{2\sigma_n^2} \right] + \exp \left[-\frac{(x+c)^2}{2\sigma_n^2} \right] \right\}, \quad (29)$$

где $\pm c$ — моды, а $\sigma_n + c^2$ — дисперсия распределения.

При этом интересно отметить, что в зависимости от значения c/σ_n форма распределения меняется от плосковершинной при $c/\sigma_n \sim 1,1$ до двухвершинной с провалом практически до оси x при $c/\sigma_n \geq 3$.

Начальное распределение $W_0(x)$ со временем будет деформироваться из распределения (29) в следующее:

$$W(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi(Bt + \sigma_n^2)}} \times \left\{ \exp \left[-\frac{(x-c-At)^2}{2(Bt + \sigma_n^2)} \right] + \exp \left[-\frac{(x+c-At)^2}{2(Bt + \sigma_n^2)} \right] \right\}. \quad (30)$$

В этом случае доверительный интервал можно определить (по аналогии с $I_B(T)$ для нормального распределения) в виде

$$I_B(T) = \left(-c + AT - t_B \sqrt{BT + \sigma_n^2}; \right. \\ \left. c + AT + t_B \sqrt{BT + \sigma_n^2} \right).$$

Заключение

Введение дополнительных метрологических параметров A и B , описывающих динамику погрешности прибора во времени, позволяет производить оценку доверительного интервала погрешности прибора в любой момент его эксплуатации при заданной доверительной вероятности. Возможно также решение обратной

задачи, т. е. определение вероятности того, что прибор в данный момент времени находится в пределах допуска. Определение величин A и B , характеризующих дрейф погрешности, целесообразно производить на этапе испытаний опытных образцов приборов с последующим уточнением по результатам поверок.

Конкретное значение текущей погрешности прибора зависит как от значений A и B , так и от вида и параметров ее начального распределения (в момент поверки прибора). Рассмотрены наиболее распространенные пять типов распределений.

Предлагаемый метод определения доверительных интервалов может быть использован для обоснования устанавливаемых межповерочных сроков. В настоящей статье изложена теоретическая сторона метода. Авторы готовят продолжение статьи с показом конкретных приложений метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мэллсон Д. А. К вопросу о выборе межповерочного интервала. «Экспресс-информация», серия «Контрольно-измерительная техника», 1967, № 31.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. «Сов. радио», 1966.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. «Наука», 1966.
4. Стратонович Р. А. Избранные вопросы теории флуктуации в радиотехнике, «Сов. радио», 1961.
5. Рабинович Б. Е. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. Труды институтов Комитета, вып. 57 (117), Стандартгиз, 1962.
6. Леонтьев Л. П. Введение в теорию надежности радионизмерительной аппаратуры. Изд-во АН Латв.ССР, Рига, 1963.
7. Келин А. В., Криксунов В. М. О сроках поверки РИП. «Измерительная техника», 1966, № 3.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. ФМЛ, 1962.
9. Шор Я. Б. Статистические методы анализа контроля качества и надежности. «Сов. радио», 1962.
10. Левин Б. Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. «Сов. радио», 1960.
11. Механиков А. И. Расчет погрешности при некоторых измерениях на с. в. ч. «Измерительная техника», 1968, № 7.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

**ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД
ПОСТРОЕНИЯ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИХ
ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАЛЫХ
ВЫБОРОК**

В практике статистического анализа результатов метрологических исследований широко используют общераспространенные методы математической статистики, которые позволяют извлечь из наблюдений необходимую информацию при условии, что имеется достаточно большое количество исходных данных. Для этих случаев математической статистикой разработаны методы обработки экспериментальных данных и предложены различные критерии согласия, позволяющие получить эффективные и достаточные оценки параметров, выяснить вид функции распределения исследуемых величин и решить другие задачи статистического анализа.

Однако при небольшом количестве наблюдений (при объеме выборки с числом членов $3 \leq n \leq 30$) общепринятые методы статистического анализа экспериментальных данных становятся малоэффективными и их использование приводит к получению недостаточно надежных оценок.

В связи с возрастанием сложности поверочных средств и экспериментальных работ в последнее десятилетие возникла проблема извлечения максимума информации из малого числа данных. Особенно остро эта проблема ощущается при разработке кибернетических систем, в которые поступает весьма ограниченный объем данных. Впервые эта проблема была поставлена и частично решена в статье В. В. Чавчанидзе и В. А. Кумсишвили [1] в 1959 г. Затем над ее дальнейшим развитием и обоснованием работали О. П. Березин [2], И. В. Еременко и А. Н. Свердлик, на работы которых имеется ссылка в книге И. А. Рябинина [3], и другие.

Необходимо отметить, что предположение авторов метода прямоугольных вкладов [1] о равнозначности априорной и апостериорной информации является неоправданным ограничением, существенно снижающим эффективность этого метода. На практике не так

редки случаи, когда априорная информация, которой располагает исследователь, неравнозначна информации, содержащейся в единичном наблюдении. В некоторых случаях она больше, а в других — меньше. Поэтому условие равнозначности является частным случаем. В общем случае коэффициент достоверности априорной информации не равен коэффициенту достоверности * единичного наблюдения. Кроме того, существенным недостатком метода прямоугольных вкладов является необходимость оптимизации ширины вклада.

Метод уменьшения неопределенности [3] также имеет ограничение в том смысле, что практически в нем не учтена возможность реализации нескольких одинаковых значений x_i случайной величины X . И хотя этот метод достаточно прост и эффективен, он ограничивает возможности анализа встречающихся распределений.

Метод, предлагаемый авторами настоящей статьи, использует основные идеи методов прямоугольных вкладов и уменьшения неопределенности, но не имеет их недостатков. Он прост, высокоэффективен и позволяет определять и сглаживать эмпирическую функцию распределения случайной величины X при числе членов выборки $n \geq 3$. В особых случаях, указываемых в дальнейшем, он позволяет определять искомую функцию распределения и при меньшем числе членов выборки, т. е. при $n < 3$.

Для определения неизвестного распределения вероятностей по малому числу наблюдений рассмотрим следующую «урновую» модель эксперимента.

Имеются урны № 1 и № 2, содержащие тщательно перемешанные шары m цветов каждая. В урне № 1 распределение шаров по отдельным цветам не известно и характеризуется соотношением

$$P_x = \{p_{x_1}, p_{x_2}, \dots, p_{x_i}, \dots, p_{x_m}\} = \{p_{x_i}\}, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

где $p_{x_i} = \frac{n_{x_i}}{N_x}$,

n_{x_i} и N_x — соответственно шары i -го цвета и общее количество шаров в урне № 1.

На основании априорной информации известно, что в урне № 2 содержится N_a шаров, распределение которых по цвету близко к распределению шаров в урне № 1 и характеризуется соотношением

$$P_a = \{p_{a_1}, p_{a_2}, \dots, p_{a_i}, \dots, p_{a_m}\} = \{p_{a_i}\}, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

где n_{a_i} и N_a — соответственно шары i -го цвета и общее количество шаров в урне № 2.

* В статье [1] эта величина именуется весовым коэффициентом эмпирической функции плотности.

Возьмем малое число шаров из урны № 1 и зафиксируем эмпирическое распределение этих шаров по цвету

$$P_1 = \{p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1i}, \dots, p_{1m}\} = \{p_{1i}\}, \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, m.$$

Шары, взятые из урны № 1, поместим в урну № 2 и тщательно перемешаем с находящимися там шарами. Согласно теореме о полной вероятности, распределение шаров по i -му цвету в урне № 2 будет характеризоваться соотношением

$$p_{2i}^* = \frac{N_1}{N_1 + N_2} p_{1i} + \frac{N_2}{N_1 + N_2} p_{2i}. \quad (4)$$

Полученное таким образом распределение шаров по цвету в урне № 2

$$P_2 = \{p_{21}^*, p_{22}^*, \dots, p_{2i}^*, \dots, p_{2m}^*\} = \{p_{2i}^*\}, \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

используют как приближенную модель неизвестного распределения (1).

Распределение (5), названное авторами полуэмпирическим, можно представить в виде

$$p_{2i}^* \approx p_{2i} = \omega p_{1i} + (1 - \omega) p_{2i}, \quad (4')$$

где

$$\omega = \frac{N_1}{N_1 + N_2}.$$

Эту «урновую» модель можно рассматривать как модель учета априорной информации при проведении эксперимента.

Если в выражении (4') произвести суммирование по объему $m' < m$, то получим

$$\sum_{i=1}^{m'} p_{2i}^* = \omega \sum_{i=1}^{m'} p_{1i} + (1 - \omega) \sum_{i=1}^{m'} p_{2i}, \quad (6)$$

откуда окончательно

$$F_2^*(x) = \omega F_1(x) + (1 - \omega) F_2(x). \quad (7)$$

Метод полуэмпирических функций основан на следующих предположениях относительно функции $f(x)$:

$$A) f(x) \geq 0 \text{ при } a - \frac{\Delta}{2} \leq x \leq b + \frac{\Delta}{2}, \quad (8)$$

$$f(x) \equiv 0 \text{ при } x < a - \frac{\Delta}{2}, \quad x > b + \frac{\Delta}{2}, \quad (9)$$

где a и b — конечные числа,

Δ — интервал дискретности (интервал округления), который определяется точностью измерений случайной величины X ;

Б) $f(x)$ является ограниченной функцией в интервале $\left[a - \frac{\Delta}{2}, b + \frac{\Delta}{2} \right]$ и имеет конечное число точек разрыва.

Последнее условие отражает ступенчатость формы функции распределения погрешностей наблюдений, так как их результаты всегда округляются с дискретностью, соответствующей пределу точности отсчитывания показаний измерительного прибора. Внутри интервала округления (интервала дискретности) естественно считать, что погрешности распределены равномерно [4].

Следует отметить, что в отличие от метода уменьшения неопределенности [3] предлагаемый метод распределяет равномерно индивидуальную информацию отдельных реализаций не на интервал $[x_i, x_{i+1}]$, а на интервал $\left[x_i - \frac{\Delta}{2}, x_i + \frac{\Delta}{2} \right]$, т. е. метод учитывает неопределенность, заключенную в конкретной реализации x_i , так как все реализации, попавшие в точку x_i , фактически распределены в указанном интервале равномерно (в том числе и одиночная реализация).

Кроме того, предлагаемый метод предусматривает более эффективное использование всего объема априорной информации. В действительности, до опыта обычно располагают значительно большим объемом информации, чем тот, который используют при методе прямоугольных вкладов. Так, например, априорно, из теоретических расчетов, по аналогии или по результатам предыдущих исследований может быть известен предполагаемый вид или характер искомой функции распределения $F_a(x)$ и коэффициент достоверности ω этой информации. Значение ω в зависимости от степени достоверности априорной информации о виде $F_a(x)$ может лежать в пределах от 0 до 1. В большинстве случаев известна величина Δ , характеризующая зону неопределенности при наблюдении реализаций x_i . Другими словами, Δ представляет собой интервал дискретности наблюдаемых величин, который зависит от технических средств, используемых для наблюдения X . В некоторых случаях, кроме того, известен конечный интервал возможных значений случайной величины X , т. е. интервал $[a, b]$. Однако последняя информация не существенна, так как этот интервал можно всегда рассчитать или назначить заранее.

Итак, исследователь до начала наблюдений (эксперимента) обладает достаточно большим объемом априорной информации, которую до сих пор слабо учитывали при статистическом анализе. Использование этой информации может существенно повысить эффективность определения эмпирической функции распределения.

Пусть в результате эксперимента получены следующие наблюдения случайной величины X :

$$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n, \quad 3 \leq n \leq 30$$

с дискретностью Δ , и требуется определить эмпирическую функцию распределения $F_n(x)$ с учетом этого интервала и вида априорной функции распределения $F_a(x)$.

Предлагаемый метод заключается в следующем:

1. Определяют интервал $[a, b]$ и интервал дискретности Δ . Если величины a и b неизвестны, то в качестве этих величин можно взять пределы

$$\bar{x} \pm 3s \text{ или } \bar{x} \pm 4s, \quad (10)$$

где \bar{x} — среднее арифметическое значение исследуемой выборки и s — среднее квадратическое отклонение одного наблюдения в выборке.

Такой выбор крайних значений интервала может быть обоснован тем, что вероятность появления отдельного наблюдения за пределами указанного интервала настолько мала, что такое событие можно считать практически невозможным*.

2. Вычисляют интервал $\left[a - \frac{\Delta}{2}, b + \frac{\Delta}{2} \right]$, определяющий область существования функции $f(x)$.

3. В интервале $\left[a - \frac{\Delta}{2}, b + \frac{\Delta}{2} \right]$ строят априорную функцию распределения $F_a(x)$, при этом

$$F_a\left(a - \frac{\Delta}{2}\right) = 0, \quad (11)$$

$$F_a\left(b + \frac{\Delta}{2}\right) = 1. \quad (12)$$

4. Интервал $\left[a - \frac{\Delta}{2}, b + \frac{\Delta}{2} \right]$ разбивают на k равных отрезков. Количество этих отрезков зависит от характера априорной функции распределения $F_a(x)$. Практически достаточно, чтобы $k \geq 19$.

5. Из точек \tilde{x}_i разбиения интервала восстанавливают перпендикуляры к оси абсцисс до пересечения с графиком априорной функции распределения $F_a(x)$, при этом

$$\tilde{x}_0 = a - \frac{\Delta}{2}, \quad (13)$$

$$\tilde{x}_k = b + \frac{\Delta}{2}. \quad (14)$$

* Иногда в статистической практике при проверке однородности выборок, для оценки и исключения резко выделяющихся результатов наблюдений применяются и более узкие пределы, как например, в работе Ю. В. Линника [5].

6. В промежутке существования функции строят график учета априорной функции распределения $F_a(x)$, представляющий собой линию, проведенную через точки

$$y_j = \omega F_a(\tilde{x}_j), \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (15)$$

где ω — принятый уровень достоверности априорной информации, по условию $0 \leq \omega \leq 1$.

7. Вычисляют приращение δ эмпирической функции распределения при одной реализации случайной величины X по формуле

$$\delta = \frac{1 - \omega}{n}. \quad (16)$$

8. В промежутке $\left[a - \frac{\Delta}{2}, b + \frac{\Delta}{2} \right]$ проводят сетку из $l + 1$ линий, первая из которых является линией учета характера априорной функции распределения $F_a(x)$, построенной при выполнении п. 6. Она проходит через точку $A\left(a - \frac{\Delta}{2}, 0\right)$. Остальные линии смещены одна от другой на расстояние

$$r_i = m_i \delta, \quad (i = 1, 2, \dots, l), \quad (17)$$

где m_i — число реализаций, равных по значению величине x_i , отсюда

$$n = \sum_{i=1}^l m_i.$$

Последняя линия должна проходить через точку $B\left(b + \frac{\Delta}{2}, 1\right)$.

9. В точках $x_i \pm \frac{\Delta}{2}$ восстанавливают перпендикуляры к оси абсцисс.

10. Находят точки пересечения перпендикуляров:

• в точках $x_i - \frac{\Delta}{2}$ — с i -ми линиями сетки,

• в точках $x_i + \frac{\Delta}{2}$ — с $(i + 1)$ -ми линиями сетки.

11. Проводят ломаную линию от точки $A\left(a - \frac{\Delta}{2}, 0\right)$ до точки $B\left(b + \frac{\Delta}{2}, 1\right)$, соединив последовательно все точки пересечения, полученные в п. 10.

Найденная таким образом ломаная линия и будет искомой сглаженной функцией распределения $F_*(x)$, так называемой полуэмпирической функцией распределения. Переход от $F_*(x)$ к функции плотности распределения $f_*(x)$ принципиальной трудности не составляет.

Следует заметить, что так как все участки ломаной линии наклонные, получение квантилей и толерантных пределов иско-

мого распределения, соответствующих той или иной вероятности, также не представляет трудности. Искомые квантили являются ординатами точек пересечения вертикальных линий с полученной ломаной линией.

На рис. 1 приведено построение полуэмпирической функции распределения для случая, удовлетворяющего следующим исходным данным:

- 1) $F_a(x)$ — равномерное распределение,

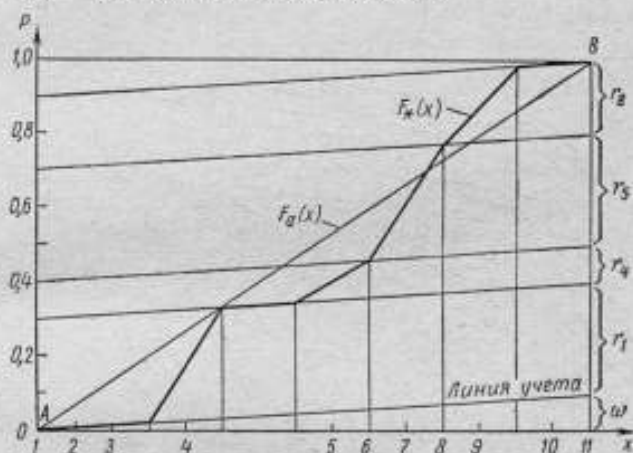


Рис. 1. Пример построения полуэмпирической функции $F_*(x)$, когда априорная функция распределения является равномерной в интервале $\left[a - \frac{\Delta}{2}, b + \frac{\Delta}{2} \right]$

На оси абсцисс 1—11 соответственно обозначены точки: 1) $A \left(a - \frac{\Delta}{2}, 0 \right)$; 2) a ; 3) $a + \frac{\Delta}{2}$; 4) $x_1, x_2 = x_3 = x_4$, поэтому $m_1 = 3$; 5) $x_4, m_4 = 1$; 6) $x_4 - \frac{\Delta}{2}$; 7) $x_4, x_5 = x_6 = x_7$, поэтому $m_4 = 3$; 8) $x_4 + \frac{\Delta}{2}$; 9) $x_8, m_8 = 1$; 10) b ; 11) $b + \frac{\Delta}{2}$.

2) $\omega = \frac{1}{n+1} = 0,1$, т. е. достоверность априорной информации равна достоверности единичного наблюдения;

3) общее число наблюдений $n = 9$ (x_1, x_2, \dots, x_9), которые по своим значениям сгруппированы в четыре группы ($l = 4$):

$$x_1 = x_2 = x_3, x_4, x_5 = x_6 = x_7, x_8 = x_9.$$

На рис. 2 приведен пример построения полуэмпирической функции распределения для исходных данных:

- 1) $F_a(x)$ — асимметричное распределение,

2) $\omega = 0,5$,

3) общее число наблюдений $n = 11$, сгруппированных в шесть групп ($l = 6$): $x_1 = x_2 = x_3 = x_4, x_5 = x_6, x_7 = x_8, x_9, x_{10}, x_{11}$.

В особых случаях исследователь имеет дополнительную априорную информацию, которая позволяет дополнить предположения А и Б (стр. 121—122) относительно функции $f(x)$ следующими условиями:

В) искомое распределение является симметричным или приближенно симметричным,

Г) известно действительное значение X , и постоянная составляющая величины x_i учтена.

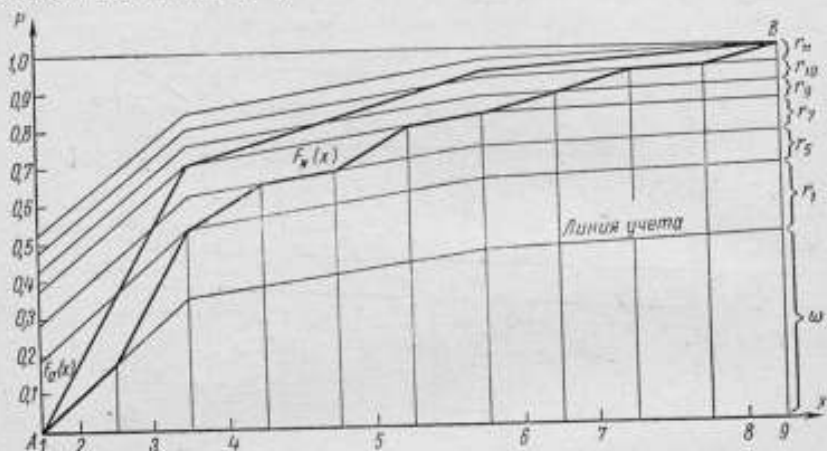


Рис. 2. Пример построения полуэмпирической функции $F_n(x)$, когда априорная функция распределения является асимметричной в интервале $\left[a - \frac{\Delta}{2}, b + \frac{\Delta}{2} \right]$

На оси абсцисс 1—9 соответственно обозначены точки: 1) $A \left(a - \frac{\Delta}{2}, 0 \right)$; 2) a ; 3) $x_1, x_2 = x_3 = x_4 = x_5$, поэтому $m_1 = 4$; 4) $x_6, x_7 = x_8$, поэтому $m_2 = 2$; 5) $x_9, x_{10} = x_{11}$, поэтому $m_3 = 2$; 6) $x_0, m_0 = 1$; 7) $x_{10}, m_{10} = 1$; 8) b , она же точка $x_{11}, m_{11} = 1$; 9) $b + \frac{\Delta}{2}$.

Кроме того, $r_i = m_i \delta$, где $\delta = \frac{1 - \omega}{n}$.

Эти дополнительные условия, отражающие характер априорного распределения, позволяют увеличить информативную ценность одного наблюдения за счет использования «соображений симметрии» [6]. В настоящее время «соображения симметрии» широко используют в физике [7], химии [8] и особенно в математике [9, 10].

Если наблюдение ведут за случайной величиной X , о функции плотности распределения которой априорно известно, что она удовлетворяет условиям А, Б, В и Г, то при недостатке информации можно допустить, что согласно «соображениям симметрии», любая реализация должна иметь своего двойника, расположенного на одинаковом расстоянии по другую сторону действительного значения X . При таком допущении количество точек удваивается, и объем апостериорной информации возрастает в два раза.

На рис. 3 приведено построение полуэмпирической функции распределения для исходных данных: 1) $F_0(x)$ — нормальное распределение $N(0,1)$; 2) $\omega = 0,5$; 3) $n = 2$.

Экспериментальная проверка эффективности предлагаемого метода осуществлена путем статистического моделирования для рав-

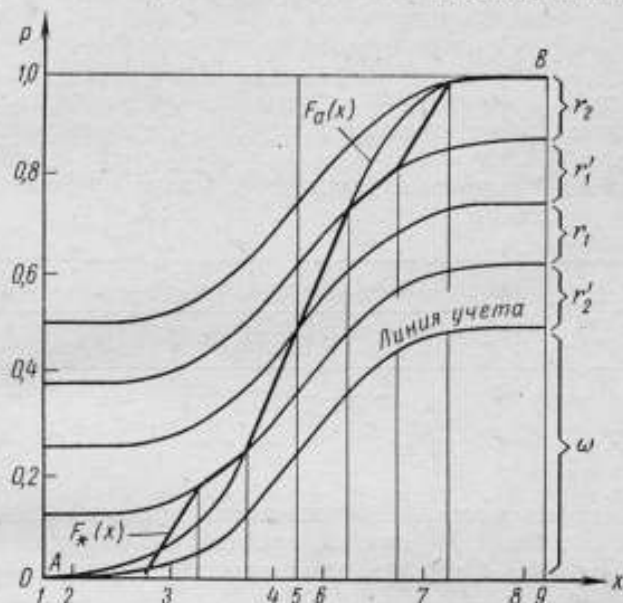


Рис. 3. Пример построения полуэмпирической функции $F_*(x)$, когда априорная функция распределения является нормальной $N(0, 1)$ (особый случай).

На оси абсцисс 1—9 соответственно обозначены точки: 1) $A(a - \frac{\Delta}{2}, 0)$; 2) a ; 3) x_1' , $m_1' = 1$; 4) x_1 , $m_1 = 1$; 5) 0; 6) x_1' , $m_1' = 1$; 7) x_2 , $m_2 = 1$; 8) b ; 9) $b + \frac{\Delta}{2}$.

Кроме того, $r_i = m_i \delta$, где $\delta = \frac{1 - \omega}{n}$.

номерного распределения. В качестве оценки эффективности использовано соотношение

$$W = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{20} [F_*(x_i) - F(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^{20} [F_2(x_i) - F(x_i)]^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (18)$$

между значениями следующих функций распределения в точке x_i :

$F_*(x_i)$ — полуэмпирической, построенной по предлагаемому методу,

$F(x_i)$ — исходной теоретической,

$F_3(x_i)$ — эмпирической, построенной общепринятым методом по формуле

$$F_3(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < x_1, \\ \frac{n}{m}, & \text{если } x_n < x \leq x_{n+1}, 1 \leq n \leq m-1 \\ 1, & \text{если } x > x_m \end{cases} \quad (19)$$

где $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_m$ — наблюдаемые реализации случайной величины, расположенные в порядке возрастания их значений [10].

Результаты проверки эффективности метода приведены в таблице.

Коэффициент достоверности априорной информации ω	Оценка эффективности W при объеме выборки		
	3	6	10
0,4	0,715	0,745	0,798
0,5	0,787	0,811	0,831
0,6	0,854	0,861	0,868

Они показывают высокую эффективность предложенного метода при анализе малых выборок по сравнению с общепринятым классическим методом построения эмпирической функции распределения по формуле (19).

*
* *
*

В заключение следует отметить следующие достоинства предлагаемого графо-аналитического метода определения функции распределения с учетом априорной информации и интервала дискретности:

1. Метод дает возможность определять функцию распределения величины X по малому числу, а в особых случаях — по сверхмалому числу наблюдений; он особенно эффективен при статистическом анализе результатов метрологических измерений, так как в этом случае понятие интервала дискретности совпадает с понятием погрешности отсчитывания показаний измерительного прибора. Метод позволяет наглядно и достаточно просто определять квантили и толерантные пределы искомого распределения, а также вычислять вероятности осуществления реализаций в любых пределах существования функции с любой точностью.

2. По сравнению с методом прямоугольных вкладов [1] предложенный метод обладает простотой и требует значительно меньше вычислительной работы. Кроме того, отсутствует необходимость оптимизации ширины вклада. Следует отметить, что метод прямо-

угольных вкладов является частным случаем предложенного метода, когда априорное распределение равномерное, а ширина вклада не выходит за пределы $\left[a - \frac{\Delta}{2}, b + \frac{\Delta}{2} \right]$ и равна интервалу дискретности.

3. По сравнению с методом уменьшения неопределенности [3] предложенный метод меньше деформирует эмпирическое распределение при замене его сглаженной кривой распределения и, кроме того, учитывает дополнительную информацию, заключенную в отдельных реализациях, что позволяет точнее описать искомую функцию распределения случайной величины X .

ЛИТЕРАТУРА

1. Чавчаидзе В. В., Кумеишвили В. А. Об определении законов распределения на основе малого числа наблюдений. Сб. «Применение вычислительной техники для автоматизации производства» под ред. В. В. Солодовникова. Машгиз, 1961.
2. Березин О. П. Определение законов распределения малых выборок методом прямоугольных вкладов. Доклады к НТК по надежности судового электроборудования, вып. 65, Изд. НТОсудпром, 1965.
3. Рябинин И. А. Основы теории и расчета надежности судовых электро-энергетических систем. «Судостроение», 1967.
4. Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. «Советское радио», 1962.
5. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений, изд. 2-е. Физматгиз, 1962.
6. Weyl H. Symmetry, Princeton university press, Princeton, New Jersey, 1952.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика, «Наука», 1965.
8. Дисафоре Г., Орчин М. Симметрия в химии. «Мир», 1967.
9. Weyl H. Mathematische Analyse des Raumproblems. Berlin, 1923.
10. Бернштейн С. Н. Теория вероятностей, изд. 4-е. Гостехиздат, 1946.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

СРЕДСТВА АВТОМАТИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В МЕТРОЛОГИИ

УДК 389.001.2 : 621.38

*В. О. АРУТЮНОВ, А. Я. БЕЗИКОВИЧ,
Г. П. ЗЕДГИНИДЗЕ*

ВНИИМ
Тбилисский филиал ВНИИМ

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАБОТ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОНИКИ, АВТОМАТИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Уровень развития метрологии в значительной степени определяет научный и производственный прогресс и является мерой последнего. В развитых экономически государствах метрологические институты оснащены наиболее современными средствами, основанными на применении электроники, автоматики и вычислительной техники, которыми занимаются специально созданные лаборатории и отделы. В качестве примера можно сослаться на постановку этих работ в Национальном бюро эталонов (НБЭ) США, Национальной физической лаборатории (НФЛ) Англии и в метрологических учреждениях других стран [1].

В настоящее время такие специализированные лаборатории и отделы имеются в ряде метрологических институтов СССР.

Работы в области технической кибернетики, проводимые в отдельных институтах, могут быть отнесены к двум направлениям. Первое из них охватывает круг вопросов, связанных с внедрением в метрологию средств технической кибернетики. Второе связано с обеспечением поверки автоматических измерительных систем, широко используемых в устройствах регулирования и управления различными производственными процессами [2].

Оба направления имеют много общих элементов, прежде всего, потому, что автоматические измерительные системы, в свою очередь, содержат автоматические устройства регулирования и управления. Обратная зависимость обуславливается тем, что точность систем управления нельзя оценить без активного вмешательства метрологии. Это становится очевидным при рассмотрении состояния дел с измерительными системами (ИС) — элементами всех без исключения автоматизированных устройств.

Потребности в ИС настолько велики, а предъявляемые к ним требования настолько различны, что задача оснащения ими народного хозяйства может быть решена только при условии разработки нормализованных взаимозаменяемых элементов, которые позволяют компоновать требуемые ИС. Очевидно, что без создания системы нормирования метрологических параметров ИС и их элементов, методов и аппаратуры для их оценки, т. е. без участия метрологии, эту задачу решить нельзя [3].

Работы по применению электроники, автоматики и вычислительной техники в метрологии проводятся в недостаточном объеме. Для форсирования их необходимо решение большого по объему комплекса вопросов. К числу первоочередных можно отнести такие проблемы, как:

1. Разработка теоретических основ создания автоматических метрологических установок.
2. Разработка системы функциональных специализированных элементов автоматических метрологических установок и методов их оценки.
3. Создание измерительно-вычислительных средств для автоматизации метрологических исследований и поверочных работ.
4. Решение проблемы создания вычислительных центров в системе Комитета, проведение исследований с целью определения оптимальных характеристик связи измерительных и эталонных установок с вычислительным центром.
5. Разработка научных основ и средств дистанционной передачи размеров единиц физических величин от эталонов образцовым и рабочим приборам.
6. Разработка научных основ генеральной схемы и технических средств обеспечения метрологической взаимозаменяемости измерительных средств автоматических систем управления, регулирования и контроля.

Решение первой из названных проблем предусматривает разработку методов поэлементной и комплексной поверки автоматических установок, оптимизацию выбора схем их построения, обоснование выбранных методов поверки, определение связи между параметрами элементов и системы в целом.

В качестве первоочередных могут быть названы разработки:

- а) теоретических основ автоматизации метрологических исследований по отдельным видам измерений, в частности и в первую очередь электрическим, как наиболее универсальным с точки зрения возможности измерения с их помощью различных физических величин;
- б) принципов создания автоматических систем для точного регулирования режимов эксплуатации эталонных и измерительных установок;
- в) основ создания необходимого и достаточного числа унифицированных, специализированных элементов автоматических си-

стем для обеспечения научных исследований метрологических институтов;

г) теоретических обоснований целесообразности автоматизации различных видов поверки.

Трудно переоценить значение этих общетеоретических исследований, так как они приведут к созданию автоматических метрологических установок на научной основе.

Темы второй проблемы позволяют ускорить процесс создания автоматических метрологических систем в НИИ Комитета и создать базу для унификации элементов этих систем, что в конечном итоге приводит к снижению стоимости и объема исследований при решении каждой конкретной задачи.

В качестве примеров могут быть названы разработки:

а) специализированных быстродействующих аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей электрических сигналов, измерительных усилителей, генераторов, стабилизаторов, счетно-вычислительных устройств с требуемыми метрологическими свойствами;

б) автоматических интерферометров (оптико-электронных преобразователей, устройств, обеспечивающих автоматическую стабилизацию и регистрацию условий измерений и др.).

Третья проблема имеет целью создание комплексных стационарных автоматических установок для работ с эталонами и для поверочных целей.

Четвертая проблема предусматривает проведение работ по созданию научно и экономически обоснованной вычислительной базы системы Комитета, которая покажет целесообразность использования средств вычислительной техники для метрологической практики, обеспечит решение специфических метрологических задач, программирование, автоматизацию сбора и обработки измерительной информации, разработку и согласование измерительных и вычислительных устройств с целью оптимального программирования процессов измерений, повышения их точности и снижения затрат машинного времени. В частности, в соответствии с этой проблемой должен быть решен вопрос создания средств обработки, хранения и передачи результатов измерений с целью повышения и ускорения эффективности научных исследований, обеспечения возможности ввода данных в вычислительную машину.

Пятая проблема возникла в связи с необходимостью изменения существующей системы метрологического обслуживания народного хозяйства вследствие значительного увеличения парка приборов, требующего создания большого количества разнообразных типов образцовых средств. Кроме того, для ряда отраслей народного хозяйства необходимы методы и средства поверки, позволяющие производить поверку приборов в эксплуатационных условиях без изъятия их из измерительных комплексов и обеспечивающие периодичность поверки в соответствии с требованиями условий эксплуатации.

Повышение эффективности и точности поверочных работ достигается их автоматизацией, т. е. в общем случае созданием средств поверки, не требующих участия человека. Такая автоматизация не нарушает принципов обеспечения единства измерений путем многоступенчатой передачи размеров единиц от эталонов рабочим приборам.

Автоматизация в более широком смысле может привести к телемеханическому сличению образцовых (а впоследствии — и рабочих) мер и измерительных приборов с эталонами единиц массы, длины, температуры и т. п., подобно осуществляемому уже сличению эталонов единицы времени по радио.

В процессе исследований необходимо решить сложнейшие вопросы преобразования размеров единиц в тот или иной наиболее удобный код, передачу этого кода по радиорелейным линиям, прием, дешифрацию сигналов и поверку по ним образцовых или рабочих измерительных приборов. Решение этой проблемы позволит создать технические средства и методы телесличения, которые будут находиться на современном уровне науки и техники. Реализация этих методов должна привести к экономии больших средств и времени, расходуемого на перевозку приборов от места их эксплуатации до места осуществления поверочных работ, ликвидировать случаи повреждений поверяемых приборов при их транспортировке, позволит без дополнительных расходов сократить сроки между очередными поверками, значительно сократить штаты госповерителей и коренным образом изменить всю схему государственной системы надзора за состоянием измерительной техники.

Такая перестройка поверочного дела не может быть осуществлена только за счет изменения системы поверки, но неизбежно связана с изменением самого объекта поверки — прибора, конструкцией и принципом действия которого должна быть предусмотрена возможность телеповерки.

Эта комплексная проблема может быть решена государственной метрологической службой лишь при обязательном творческом участии ряда министерств, которые должны разработать принципы построения новых приборов и освоить их производство.

Очевидно, что затраты на решение этой проблемы будут достаточно велики, но значительный экономический эффект позволит в короткие сроки возместить их.

Цель и задачи шестой проблемы очевидны из ее наименования и тесно увязываются с перечисленными выше. Часть вопросов, существенных для этой проблемы, решается при проработке второй, четвертой и пятой проблем. Самостоятельными работами этого направления являются обобщение материалов, полученных в результате исследований смежных вопросов внутри указанных проблем и разработка на их основе нормативной документации, обеспечивающей взаимозаменяемость элементов измерительных систем.

Решение каждой из проблем, включающей огромное количество конкретных задач, не может быть выполнено силами одного какого-либо органа Государственного Комитета стандартов СССР, а является задачей всех его институтов и, кроме того, предполагает, как уже указывалось, участие различных министерств и ведомств.

Постановка работ таким широким фронтом оправдывается тем, что проведение их позволяет на новых основах в существенно более короткие сроки проводить научные исследования, результатом которых будет повышение точности эталонных установок, совершенствование средств измерений и поверки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Метрология за рубежом. ВНИИКИ, М., Издательство стандартов, 1968.
2. Земельман М. А., Кнютфер А. П., Кузнецов В. П. О методах нормирования метрологических характеристик измерительных устройств. «Измерительная техника», 1969, № 1, 2, 3.
3. Кавалеров Г. И., Каверкин И. Я., Шкабордня М. С. О принципах построения агрегатного комплекса средств электронизмерительной техники. «Приборы и системы управления», 1969, № 6.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

*А. Я. БЕЗИКОВИЧ, Ю. Н. ШЕСТОПАЛОВ,
С. П. ЭСКИН*

ВНИИМ

СОСТОЯНИЕ И УРОВЕНЬ РАБОТ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обширный круг задач, стоящих перед современной метрологией [1], не может быть решен путем простого совершенствования уже известных методов и средств, без использования достижений развивающихся отраслей науки и техники — автоматики, электроники, вычислительной техники. На путь привлечения этих отраслей становятся многие метрологические лаборатории и добиваются существенных результатов [2]. Ниже рассмотрено состояние работ этого направления за рубежом и в СССР.

В ряде государств разработка и создание средств, основанных на применении электроники, автоматики и вычислительной техники, ведутся в специализированных отделах. Так, в составе Национального бюро эталонов США (НБЭ) имеется 16 отделов, в каждом из которых проводятся комплексные работы, т. е. создаются эталоны, разрабатываются методы измерений, проводятся физические исследования по определению свойств материалов, разрабатываются методы испытаний и поверки. В дополнение к этим отделам в НБЭ имеется специализированный «Отдел вычислительных систем», в который входит ряд секций: унифицированных модулей, разработки вычислительных машин, автоматизации измерений, технических приложений и анализа систем [3]. Этот отдел призван решать общие для всех остальных отделов НБЭ научные задачи по теоретическому обоснованию методов автоматизации метрологических экспериментов и способов вычисления погрешностей, по разработке типовых функциональных узлов — модулей, из которых могут компоноваться требуемые измерительные устройства. Установлено [4], что наиболее рациональным является создание модулей, характеризуемых следующими особенностями: 1) каждый модуль предназначается для выполнения только одной, но вполне определенной логической или исполнительской функ-

ции; 2) является физически и функционально независимым блоком; 3) может быть полностью испытан и поверен независимо от других модулей и устройств. Все модули согласованы по входным и выходным параметрам. В работах НБЭ показано, что для компоновки большого числа автоматических метрологических устройств достаточно иметь следующие модули: управляющие блоки, цифровой хронизатор, счетчик с регулируемым числом регистрируемых импульсов, интегрирующий вольтметр, аналого-цифровой преобразователь, цифро-аналоговый преобразователь, сдвиговый регистр, устройства записи на перфокарту и на магнитную ленту.

Наряду с этим проводится большой цикл работ по созданию комплексных автоматических устройств. В качестве примера можно привести установку для сличений э. д. с. нормальных элементов (н. э.) группового эталона вольта, состоящего из 44 элементов [5]. Абсолютное значение э. д. с. устанавливается с помощью токовых весов или устройств, в которых используется протонный резонанс. Автоматизация применяется на стадии обработки результатов сравнения отдельных элементов друг с другом. Процесс эталонирования достаточно длителен и занимает около месяца. Погрешность сличения — порядка 0,6 мкВ.

Интересно отметить, что в США, так же как в СССР, в ряде ведомств требования к точности измерений настолько высоки, что эти ведомства имеют в своем распоряжении собственные образцовые меры, по точности сравнимые с государственными эталонами, и сами поддерживают и хранят воспроизводимые с их помощью единицы. Так, в Атомной комиссии США имеется 400 н. э., аттестацию которых нужно производить с погрешностью в пределах 1,3—0,6 мкВ. Для этой цели в одной из ее лабораторий создана автоматическая установка для сличений н. э. [6]. Эта установка, введенная в эксплуатацию в 1962 г. и действующая по настоящее время, обеспечивает полную автоматизацию всего цикла поверки. Измерительная часть этой установки основана на принципе сравнения, обеспечивающем наивысшую точность измерения. Процесс уравнивания автоматизирован, обеспечена запись результата поверки и номера элемента, к которому этот результат относится. Функционированием системы управляют так называемые хронизирующие устройства, обеспечивающие определенную последовательность операций. Одно из таких устройств осуществляет выбор испытуемого элемента и выдает команду на цифropечатающее устройство для регистрации его номера, далее подается питание в цепь управления и тем самым — команда на уравнивание цепи. Система команд обеспечивает включение через известные промежутки времени цифropечатающей установки, ввод результатов в ЦВМ и обработку их. По итогам многократно повторенных циклов измерений удалось установить и количественно оценить ряд параметров н. э., либо неизвестных до этого, либо оцениваемых ранее весьма приближенно.

Для электроизмерительных приборов в США создана поверочная установка, в которой автоматизирован весь процесс поверки за исключением отсчитывания показаний [7]. Установка состоит из четырех узлов: программного устройства, устройства визуального контроля, регистрирующего устройства и блока задания измеряемых величин. При разработке этой системы основное внимание было обращено на то, чтобы упростить функции оператора, связанные со значительной потерей времени, и те, которые могут привести к промахам.

Нанесенная на перфокарту программа поверки содержит данные о пределах измерений, количестве поверяемых отметок, пределах допускаемых погрешностей поверяемого прибора, а также паспортные данные прибора, необходимые для внесения в протокол поверки. Правильность выбора данной перфокарты для поверяемого прибора устанавливаются с помощью визуального устройства.

В блоке задания измеряемых величин для получения нормированных значений выходных величин (тока и напряжения) используются цепи с многоконтурной обратной связью.

В области линейных измерений примером комплексной автоматизации может служить созданный в НБЭ интерферометр для поверки шкал длиной до 1 м со стабилизированным лазером [8]. Интерферометр построен по схеме Майкельсона, подвижное зеркало связано с кареткой, на которой расположена шкала. Штрихи шкалы фиксирует фотоэлектрический микроскоп, а параллельность зеркал обеспечивает система сервоконтроля. Интерферометр снабжен автоматической системой для введения поправок на изменение окружающих условий (давления, температуры, влажности и т. д.). Погрешность измерений $\pm 0,5$ мкм.

В отделе вычислительных систем (лаборатория автоматизации измерений) ведутся работы и по созданию поверочных установок, komponуемых из типовых функциональных узлов. Решающим фактором является производительность установок, так как число поверяемых мер и приборов, несмотря на небольшой круг обязательных поверок, весьма значительно и общая стоимость поверки их превосходит 2,5 млн. долларов в год.

В Национальной физической лаборатории (НФЛ) Англии также имеется специализированное подразделение по автоматизации метрологических работ «Кибернетика и автоматическое управление», состоящее из отделов: автоматического регулирования, машинного перевода, информационного поиска в биологии [3]. В этом подразделении занято почти 10% сотрудников, работающих в НФЛ, и решаются в основном теоретические задачи, а изготавливают создаваемые устройства в экспериментальных мастерских. Большое внимание уделяется при этом работам по автоматизации эталонных комплексов [9]. В частности, создан автоматический прибор для компарирования электрических величин при помощи 200-элементных термпар с порогом чувствительности $10^{-4}\%$ [10]. Сконструирован мекометр, позволяющий измерять

расстояния 0—3000 м с погрешностью не более 1 мм с помощью поляризованного луча, модулированного на частоте 500 МГц.

Исходя из того, что ядерно-квантовые величины в качестве эталонов весьма ценны своей стабильностью и воспроизводимостью на местах, в НФЛ проводятся работы по переходу к естественным эталонам единиц тока, напряжения, длины и других физических величин на основе гиромагнитного отношения протона. Эти работы стали возможными только при использовании средств автоматики и электроники.

В НФЛ расширяется диапазон применения газовых оптических квантовых генераторов в оптической интерферометрии, в частности, для измерений длины в геофизических исследованиях и сейсмологии. Отмечается широкое применение автоматических методов получения записи и анализа экспериментальных данных, используются вычислительные машины.

Известно, что работы в области автоматизации проводятся также в Международном бюро мер и весов (МБМВ), в Японии, в Физико-техническом институте ФРГ (РТВ), Управлении метрологии и испытаний товаров ГДР, в Италии и других странах.

В МБМВ лабораторией по электронике создана автоматическая установка для измерений ионизирующих токов [11], избавляющая человека от необходимости пребывания во вредных условиях. Ряд работ по автоматизации, кроме того, выполняется для МБМВ приборостроительными фирмами. Так, фирмой «Rochat» разработан панельный однодиапазонный цифровой прибор типа А. 1454 для применения в метрологии [12]. Этот прибор предназначен для измерений постоянного и переменного тока и напряжения, а также любых физических величин, преобразуемых в электрический ток или напряжение. Возможно применение прибора в сочетании с различными измерительными преобразователями: в тахометрии, термометрии, химическом анализе, при взвешивании, измерении давлений, толщины, длины. Разработан также [13] лазерный интерферометр, предназначенный для измерений больших длин (до 2,5 м) с погрешностью до 0,83 мкм. Регистрация интерференционных колец осуществляется автоматически фотоэлектрическим методом.

Сообщение [14] о том, что в ближайшем будущем предполагается получить французский эталон сопротивления с помощью расчетного конденсатора, указывает на то, что в МБМВ для метрологических работ привлекаются средства электронно-вычислительной техники, имеющейся в вычислительном отделе МБМВ.

В Японии организацию и создание аппаратуры для поверок электроизмерительных приборов осуществляет Корпорация по проверке электрических измерительных приборов (JEMIC) [15]. Эта корпорация большое внимание уделяет вопросам автоматизации процесса поверки. В частности, создано оборудование для автоматического типового контрольного испытания многофазных счетчиков электрической энергии. Аппаратура обеспечивает про-

ведение следующих испытаний: определение основной погрешности, чувствительности, самохода, сопротивления изоляции, влияния изменений напряжения, частоты, температуры, магнитного поля, наклона, взаимного влияния элементов друг на друга. Поверка производится автоматически в соответствии с программой, вводимой в блок памяти ЭВМ и с использованием устройств автоматического счета числа оборотов счетчиков. Автоматизация процесса поверки, обеспечивающая возможность поверок в условиях непрерывных нагрузок в течение 2000 ч, позволила повысить надежность счетчиков. Корпорацией создано также оборудование для автоматической поверки однофазных счетчиков, основанное на автоматическом сличении числа оборотов диска поверяемых и образцового счетчиков с помощью фотоэлектрического преобразователя и обработке результатов поверки электронным вычислительным устройством. Погрешность поверки не превышает $\pm 0,1\%$, производительность установки — более 500 счетчиков в день.

Поверка образцовых счетчиков также автоматизирована и осуществляется с помощью фотоэлектрического преобразователя и электронного счетчика импульсов путем сличения с тщательно изученным и аттестованным образцовым счетчиком. Аттестация последнего производится с помощью компаратора переменного тока. Для этих же целей разрабатывается новое устройство, обеспечивающее регистрацию показаний образцового и поверяемого счетчиков на магнитной ленте с последующей обработкой и вычислением погрешности.

Для поверки показывающих электроизмерительных приборов постоянного тока создана полуавтоматическая установка, основанная на применении компараторов тока и напряжения (1 мА—30 А, 45 мВ—1500 В) и цифрового вольтметра, обеспечивающего цифровую регистрацию и возможность вывода результатов поверки на цифропечать.

Для поверки приборов на переменном токе разработан автоматический термокомпаратор переменного и постоянного тока с цифровой индикацией. Компаратор представляет собой прибор, основанный на одновременном сравнении переменного и постоянного тока с помощью двух встречно включенных термопреобразователей. Значения э. д. с. этих преобразователей автоматически уравниваются, а ток обратной связи преобразуется в напряжение, выраженное в цифровой форме и соответствующее погрешности поверяемого прибора в процентах.

Примером работ, проводимых в ФРГ в области линейных и угловых измерений, служит автоматический интерференционный компаратор с фотоэлектрическим микроскопом для поверки штриховых мер длины в динамическом режиме [16]. В состав компаратора входят интерферометр, фотоэлектрические преобразователи, усилители, дискриминатор направления счета интерференционных полос, реверсивный счетчик, регистр, через который показания

счетчика передаются в промежуточное запоминающее устройство и далее — на ленточный перфоратор. В последнем фиксируются также условия измерений (температура, давление, влажность), номера шкал и интервалов длины. С созданием такого компаратора решена задача аттестации штриховых мер длины, необходимых в точном приборо- и станкостроении.

В Италии проведены исследования по автоматизации интерференционных dilatометров и, в частности, сообщается о первом этапе автоматизации — внедрении фотоэлектрических методов регистрации порядка интерференции [17]. Одновременно с записью температурного режима поверяемого образца на график наносятся отметки об изменении его длины. Эти отметки даются аналого-дискретным преобразователем, включенным между фотоэлектрическим преобразователем и записывающим прибором. Дальнейшее развитие таких работ позволит не только увеличить производительность аттестации образцов, но и повысить точность измерений.

В ГДР разработан автоматический интерференционный рефрактометр [18], предназначенный для точного определения показателя преломления жидкостей и газов. Рефрактометр построен по принципу компенсационного преобразования с использованием интерференции в монохроматическом и белом свете.

Большое внимание уделяется метрологическими и приборостроительными организациями различных стран вопросам разработки методов и создания точных автоматических цифровых измерительных приборов (частотомеров, вольтметров, мостов для измерений параметров электрических цепей и др.) и комбинированных аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей [19, 20 и др.]. Погрешность этих приборов в настоящее время становится соизмеримой с погрешностью метрологических средств, достигая 0,01—0,001% при высоком быстродействии и автоматическом выполнении измерений и регистрации результатов.

Специализированные лаборатории по автоматизации метрологических работ в настоящее время имеются во ВНИИМ, его Тбилисском филиале, во ВНИИФТРИ и его Иркутском филиале, в Сибирском и Харьковском государственных научно-исследовательских институтах метрологии.

Координацию работ этих лабораторий осуществляет комиссия специалистов по технической кибернетике при Совете директоров институтов Комитета. Из двух основных видов задач, стоящих перед специалистами в области автоматизации,* основное внимание институты уделяют задачам, связанным с разработкой методов и средств автоматизации метрологических экспериментов.

Наряду с этими подразделениями институтов Комитета вопросами автоматизации поверки рабочих мер и измерительных приборов занимается ряд учреждений министерств радиотехнической промышленности, приборостроения и средств автоматизации, ин-

* См. стр. 130.

ституты Академии наук СССР и др. Они создают аппаратуру, обеспечивающую, как правило, удовлетворение запросов данного института или отрасли.

Для систематизации работ по автоматизации метрологических исследований, выполненных в СССР, проблемы автоматизации можно подразделить на две подпроблемы: а) создание систем для автоматизации исследований в области электрических измерений и б) создание систем для автоматизации исследований в области измерений неэлектрических величин. Для обеих подпроблем характерны работы по созданию поверочной и измерительной аппаратуры, а также работы, обеспечивающие разработку и хранение эталонов. Как поверочную, так и эталонную аппаратуру можно создавать в виде комплектных установок и в виде элементов или функциональных узлов (модулей). Большой удельный вес имеют работы по автоматизации отдельных видов измерений высокой точности и созданию автоматической аппаратуры для измерений величин импульсного характера, а также экстремумов различных физических величин.

Одним из характерных и важных направлений работ, проводимых с эталонами, является создание устройств стабилизации и регистрации влияющих величин.

К числу существенных работ лаборатории автоматизации метрологических исследований во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии имени Д. И. Менделеева (ВНИИМ) следует отнести создание комплекса автоматической аппаратуры для проверки наиболее точных и в то же время достаточно массовых электроизмерительных приборов (показывающих амперметров, вольтметров и ваттметров прямого действия). Основная цель данной работы заключалась в том, чтобы, используя наиболее точный из методов измерений — метод сравнения, автоматизировать его, включая автоматизацию отсчитывания показаний по шкалам поверяемых приборов, и тем обеспечить повышение точности и производительности проверки, а также фиксацию результатов в виде протокола проверки. Аппаратура позволяет проверять на постоянном токе приборы со стрелочными указателями класса точности 0,2—1,0 в динамическом режиме. Исследования приборов на этой аппаратуре показали, что она удовлетворяет требованиям не только метрологической и исследовательской практики, но и приборостроения [21—23]. С целью автоматизации проверки приборов со световым указателем создается аппаратура с устройством для отсчитывания показаний по шкалам на основе ранее не применявшихся в электроприборостроении передающих телевизионных трубок типа видикон [24]. Опыт применения подобных элементов будет способствовать возможности внедрения дистанционных методов проверки приборов [25].

При проверке приборов невысоких классов точности протоколирование не требуется и достаточно знать, что погрешности данного прибора не выходят за допускаемые пределы. Примером предна-

значенной для этих целей автоматической поверочной установки является созданная во Всесоюзном научно-исследовательском институте электроизмерительных приборов (ВНИИЭП) установка [26], основанная на применении калибратора, с помощью которого выдается для каждой поверяемой отметки сумма номинального значения измеряемой величины и допустимого значения погрешности — в случае возрастания показаний и разность — при убывании показаний.

Проводятся работы по автоматизации поверки одного из самых массовых видов электроизмерительной аппаратуры — счетчиков электрической энергии. Разработанная во ВНИИЭП [27] автоматическая установка для поверки однофазных счетчиков основана на сравнении поверяемого и образцового счетчиков с помощью фотоэлектрических преобразователей путем счета числа импульсов, поступающих от образцового счетчика за время одного или нескольких оборотов диска поверяемого счетчика. Для этого диск образцового счетчика имеет зубцы или прорези, обеспечивающие модуляцию светового потока. Последний преобразуется фотоэлементом в электрические импульсы, которые усиливаются и через управляющую цепь подаются на пересчетный прибор. Управляют счетом импульсы, поступающие от фотоэлемента, реагирующего на прохождение пятна на боковой поверхности диска поверяемого счетчика. Аппаратура обеспечивает автоматическую отбраковку счетчиков классов точности 2,0; 2,5; 3,0 по системе «годен», «не годен» в соответствии с устанавливаемым полем допуска погрешности для каждой нагрузки.

В области поверок неэлектрических величин примером комплексной аппаратуры служит созданный во ВНИИМ автоматический интерферометр, предназначенный для поверки в статическом и динамическом режимах образцовых штриховых мер длины до 200 мм с погрешностью 0,1 мкм. Оптическая часть интерферометра построена по схеме Майкельсона с подвижным зеркалом, установленным на каретке с поверяемой мерой. Штрихи меры регистрируются: в статическом режиме — при помощи устройства для автоматического наведения на штрихи и в динамическом режиме — системой фиксации границ интервалов штриховых мер [28, 29]. Порядок интерференции определяется фотоэлектронной системой, состоящей из фотоэлектрического и дифференцирующего преобразователей, реверсивного счетчика импульсов, промежуточного запоминающего устройства и цифropечатающей машины типа ЦПМ-1.

Для автоматизации поверки штриховых мер длины компараторным методом во ВНИИМ разработан двойной фотоэлектрический микроскоп [30]. Принцип измерений разностей длин компарируемых штриховых мер состоит в преобразовании длин в интервалы времени, которые измеряются путем счета соответствующего им числа периодов точно известной высокой частоты. Определение знака измеряемой разности длин основано на несовпаде-

нии во времени импульсов от штрихов. Электронное измерительное устройство осуществляет многократные измерения временных интервалов с усреднением результатов.

В качестве примера работ по созданию автоматических эталонных устройств можно назвать также спектрометрическую установку ВНИИМ для измерений длин волн и исследования контуров спектральных линий [31], представляющую собой часть комплекса государственного эталона единицы длины и снабженную фотоэлектрическим устройством для автоматического вычерчивания контуров линий. Устройство состоит из фотокомпенсационного усилителя типа Ф-116 и автоматического потенциометра типа ЭП-09. Сканирование интерференционной картины осуществляется путем модуляции давления внутри камеры эталона Фабри—Перо, а равенство давления атмосферному фиксируется при помощи фотосопротивления, подключенного ко входу фотокомпенсационного усилителя.

В нашей стране широко проводятся также работы по созданию так называемой полуавтоматической поверочной аппаратуры. В области электрических измерений первый шаг в этом направлении сделан во ВНИИМ в 1948 г., когда был создан автоматический ступенчатый компенсатор для проверки амперметров, вольтметров и ваттметров. Принцип действия его основан на компенсации основной части напряжения, равной показанию на поверяемой отметке шкалы, напряжением соответствующего числа ступеней компенсатора [32]. Нескомпенсированную часть напряжения, пропорциональную погрешности прибора, измеряли стрелочным гальванометром, угол отклонения которого с помощью специального устройства фиксировали на диаграммной бумаге. Несколько позже на заводе «Вибратор» (Ленинград) создан прибор с полной компенсацией напряжения за счет применения автоматического уравновешивания нескомпенсированного остатка фотоэлектрическим компенсатором. Эти работы, так же как их дальнейшее развитие, освещены в литературе [33—35].

В Харьковском институте метрологии [36, 37] проведены работы в этом направлении и найдено решение, обеспечивающее более полную автоматизацию, а именно: автоматизацию установления тока или напряжения, равного показанию на данной отметке, и совмещение операции точного наведения указателя на эту отметку с измерением и индикацией нескомпенсированной части, пропорциональной погрешности.

В более поздних работах [38—40] принят иной принцип построения автокомпенсационных поверочных установок, выполненных с применением калибраторов тока и напряжения, т. е. на устройствах, основанных на автоматическом сравнении выходного сигнала калибратора с напряжением опорного элемента без применения отдельного компенсатора. На выходе калибратора можно получить любые требуемые дискретные значения напряжения. В калибраторах имеется дополнительная декада с дискрет-

ностью $\pm 0,05\%$, по показанию которой определяют значения погрешности.

Полуавтоматическая поверка счетчиков электрической энергии обеспечивается разработанной Ленинградским электромеханическим заводом (ЛЭМЗ) системой для поверки трехфазных электрических счетчиков с применением управляющей машины УМ1-НХ. В состав системы, кроме управляющей машины, входят также фотоэлектрические преобразователи числа оборотов диска поверяемых счетчиков, генератор стабильных по частоте импульсов, блок печати, блок сдвигающих регистров с логическими устройствами, стенд для навески счетчиков и стабилизированные блоки питания. Принцип действия системы основан на сравнении времени одного или двух оборотов диска поверяемого счетчика с вводимым в машину УМ1-НХ расчетным временем для данной нагрузки. Подаваемую на счетчики мощность поддерживают и измеряют с помощью образцовых показывающих ваттметров. Для надежного действия фотопреобразователей на торце дисков нанесена специальная риска. Система обеспечивает автоматическую поверку одновременно 62 счетчиков. Результаты поверки печатаются на бланке с указанием порядкового номера счетчика на стенде, этапа поверки и значения погрешности в виде трехзначного числа с указанием ее знака. Данные о бракованных счетчиках печатаются красным цветом, годных — черным. Предусмотрена сигнализация о годности или браке на световом табло.

Примером частичной автоматизации в области измерений твердости является образцовый прибор для воспроизведения ее шкалы и градуировки мер твердости с погрешностью 0,25—0,5% [41]. В этом приборе процесс вдавливания наконечника автоматизирован, благодаря чему можно задавать требуемый закон нагружения и разгружения и воспроизводить его с большим постоянством. Реле времени включает два дистрибутора, обеспечивающих опускание и подъем наконечника. При включении реле времени наконечник внедряется в меру, выдерживается заданное время под полной нагрузкой, затем поднимается до заданной высоты и после этого автоматически выключается. Отпечаток измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях визуалью с помощью микроскопа.

Поверка измерительных преобразователей, не снабженных шкалами, а характеризующихся коэффициентом преобразования, наиболее легко поддается автоматизации одним из методов, предложенным в работе [42], при наличии образцового измерительного преобразователя с заданной и хорошо известной функцией преобразования. Среди работ в этом направлении может быть названа автоматическая поверочная установка для сличения платиноиридиевых термомпар, разработанная в Сибирском государственном научно-исследовательском институте метрологии [43].

Все институты Государственного Комитета стандартов, СССР проводят работы по созданию измерительных средств

высокой точности, а также предназначенных для измерений экстремумов различных физических величин. В рамках данной статьи не представляется возможным остановиться на этих работах, освещенных, например, в литературе [44—47]. Этот перечень не претендует на исчерпывающую полноту, так как имеет в виду отметить только наиболее характерные работы данного направления.

Несколько подробнее следует остановиться на работах институтов по созданию элементов и функциональных узлов (модулей), а также устройств стабилизации и регистрации режимов работы и внешних условий.

Во ВНИИМ разработан высокостабильный компенсационный источник опорного напряжения, выполненный на монолитных интегральных схемах типа П2222 и термокомпенсированных кремниевых стабилитронах типа Д818 [48]. Источник является основным элементом, определяющим точность автоматических цифровых измерительных систем и аналого-цифровых преобразователей, разрабатываемых для метрологических исследований, и может найти широкое применение в наиболее точных цифровых измерительных приборах, создаваемых промышленностью. Источник выполнен в виде компактного блока и имеет высокие метрологические характеристики: нестабильность выходного напряжения менее $\pm 1,5 \times 10^{-3}\%$ за месяц, температурный коэффициент напряжения $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, выходное сопротивление $5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$.

Во ВНИИФТРИ разработана система типовых унифицированных стабилизированных блоков питания, внедренных в промышленное производство и известных в настоящее время как система «Александрит». Система конструктивно выполнена на типовых транзисторных элементах, каждый блок состоит из отдельных функциональных узлов. Элементы блоков защищены от токов короткого замыкания. Вся система содержит низковольтные блоки питания 45 типов (в диапазоне 1,5—50 В) и высоковольтные — 7 типов (в диапазоне 400—2200 В). Типовые унифицированные блоки питания весьма удобны для создания различных автоматических метрологических устройств, так как позволяют компоновать любое устройство питания и имеют параметры, удовлетворяющие достаточно высоким требованиям: нестабильность выходного напряжения порядка 0,01—0,1%, выходное сопротивление меньше 0,1 Ом.

Для питания маломощных цепей с постоянными нагрузками (фотоэлектронных умножителей, пьезоэлектриков и т. п.) во ВНИИМ разработаны высоковольтные стабилизаторы [49], обеспечивающие регулируемое в пределах 750—1500 В выходное напряжение. Изменение выходного напряжения не превышает $\pm 0,01\%$, а напряжение пульсаций — меньше 0,001%.

В качестве элементов ряда метрологических устройств могут быть использованы транзисторные усилители постоянного и переменного тока, разработанные для применения в фотоэлектрических преобразователях сигналов от оптических интерферометров [50].

Усилители имеют высокоомный (порядка десятков мегаом) вход и малую потребляемую мощность (~ 250 мВт), что позволяет размещать их непосредственно в метрологических установках, практически не нарушая температурный режим последних.

Во ВНИИМ разработаны три типа реверсивных счетчиков импульсов, для использования в метрологических автоматических установках. Счетчик типа СР-1 функционирует по двоично-десятичной системе с условным кодом девять, имеет два входа, на один из которых подаются импульсы, подлежащие сложению, а на другой — вычитанию, емкость счетчика равна 10^7 , скорость счета и реверса 10 кГц. Счетчик типа СР-2 функционирует в двоично-десятичном коде 1—2—4—2, имеет общий вход счетных импульсов и два отдельных входа для команд сложения и вычитания, емкость равна 10^6 , скорость счета 200 кГц и скорость реверса 10 кГц. Счетчик типа СР-3 функционирует в двоично-десятичном коде 8—4—2—1, имеет такие же входы, как счетчик типа СР-2, но собран полностью из унифицированных функциональных узлов системы импульсно-потенциальных логических элементов. Емкость счетчика равна 10^6 , скорость счета 1 МГц и скорость реверса 100 кГц.

Примером типовой системы автоматического поддержания условий эксперимента является разработанная во ВНИИФТРИ прецизионная система автоматического регулирования и поддержания температуры, имеющая высокие статические и динамические параметры в широком диапазоне измерений постоянных времени объекта управления (5—1000 с) [51]. Статическая и динамическая погрешности такого регулятора составляют соответственно 0,0015 и 0,002 °С. Регуляторы могут найти широкое применение для точного регулирования температуры объектов в метрологических исследованиях и в промышленности.

Следует отметить, что ряд модулей можно было бы не создавать в институтах Комитета, так как подобная задача стоит и перед организациями Министерства приборостроения и средств автоматизации в связи с созданием агрегатного комплекса средств электроизмерительной техники. Однако до настоящего времени освоенные промышленностью модули по своим техническим характеристикам не удовлетворяют требованиям метрологических институтов, а те из них, которые можно было бы использовать, находятся еще в списке «подлежащих разработке» [52].

Во многих метрологических институтах страны проводятся работы по привлечению средств вычислительной техники в метрологию. Основная цель этих работ заключается в том, чтобы на основе математического моделирования и использования вычислительной техники обеспечить возможность измерений величин, изменяющихся во времени, измерений с учетом возмущений, вносимых преобразователями, коррекции погрешностей и влияния условий проведения эксперимента, прогнозирования эксперимента и статистической обработки данных [53—55].

Все институты Комитета ведут исследования, связанные с разработкой теоретических основ автоматических метрологических систем. В частности, углубленно прорабатываются вопросы, отражающие специфику измерений в динамическом и квазистатическом режимах [56—58]*. Делаются первые шаги по обобщению результатов отдельных работ по автоматизации [59], начинается развиваться новое направление работ в метрологии — обеспечение дистанционных методов поверки**

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов В. О. Содержание и основные задачи современной метрологии. «Измерительная техника», 1967, № 9.
2. Безикович А. Я., Шестопапов Ю. Н., Эскин С. П. Автоматика, электроника и счетно-решающая техника в метрологии. «Измерительная техника», 1967, № 2.
3. Метрология за рубежом. Стандартгаз, 1968.
4. Boyle Don R. Measurement automation at the National Bureau of Standards. «Joint. Automat. Control Conf., Seattle, Wash., 1966».
5. National Bureaus of Standards. Research. highlights of the NBS. Washington, Annual report, Fiscal year, 1964.
6. Braudway David W. Automatic testing of Standard cells, ISA. Trans., 1966, v. 5, № 3.
7. Schomburg Richard A. Система программированной поверки приборов. «Экспресс-информация. Контрольно-измерительная техника», 1968, № 33.
8. Automatic fringe-counting interferometer for calibration of length scales. Engineer., 1967, 223, № 580.
9. NPL making fundamental Standards easier to use. «Electr. Rev.», 1967, 181, № 2.
10. Hermach F. L., Williams E. S. Thermal converters for Audio-frequency voltage measurements of high accuracy. IEEE Transaction on Instr. and Measurement, 1966, v. IM-15, № 4.
11. Procès Verbaux, 1967, v. 35, p. 112.
12. L' affichage numerique au service de la metrologie. «Rochar electron. informs.», 1967, № 5.
13. Mansion D. Interferometre á laser pour machines outils de precision. «Inter. electron.», 1967, v. 22, № 1.
14. Carré Pierre. La metrologie fondamentale on France. Inform. scient. France, 1966, № 1.
15. Japan Electric Meter Inspection Corporation. IEMIC, Japan, 1966.
16. Heinecke K. Automatische Vermessen and Protokollieren von Präzisionsmaßstäben Fotoelektrisches, Mikroskop Maschinenmarkt, 1965, Bd. 71, № 37.
17. Ruffino G. An Interferometric Dilatometer with Electronic Fringe coueter. ACTA IMEKO, 1961.
18. Kinder W., Plesse H. Automatisches Interferenz Refraktometer. Optic, 1968, v. 28, № 3.
19. Каталог фирм: «Hewlett Packards», «Solartron», «Tesla», «Hartmann Braun», «Takeda Riken Industry Co LTD», «RFT Industrie electronics», завода «Электроника» и др.
20. Савинский А. (Варшава). Развитие цифровой измерительной техники в Польше; Вошин Е. Г. (Карл-Маркс-Штадт, ГДР). Вопросы оптимизации измерительных информационных систем. Сборник тезисов докладов VIII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. СО АН СССР, Новосибирск, 1966.

* См. стр. 167

** См. стр. 130 и 150.

21. Эскин С. П. Устройство для поверки электроизмерительных приборов. Авторское свидетельство № 194948. «Бюлл. изобр.», 1967, № 9.
22. Зорин Д. И., Эскин С. П. Способ автоматической поверки измерительных приборов. Авторское свидетельство № 197003. «Бюлл. изобр.», 1967, № 13.
23. Безикович А. Я., Грудинина Т. И., Зорин Д. И., Кончаева Л. Б., Прицкер В. И., Эскин С. П. Аппаратура для автоматической поверки амперметров, вольтметров и ваттметров на постоянном токе. «Измерительная техника», 1969, № 6.
24. Прицкер В. И., Эскин С. П. Установка для поверки измерительных приборов. Авторское свидетельство № 197002. «Бюлл. изобр.», 1967, № 13.
25. Зедгинидзе Г. П. Кибернетика и вычислительная техника в метрологии. Труды метрологических институтов СССР, вып. 123 (183). Изд-во стандартов, 1971.
26. Орешников В. В. Методы автоматизации поверочных работ массовых электроизмерительных приборов непосредственной оценки. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ленинград, ВНИИЭП 1966.
27. Орешников В. В., Соколов С. С., Шубин К. П. Устройство для автоматической поверки электрических счетчиков. Авторское свидетельство № 104669. «Бюлл. изобр.», 1956, № 10.
28. Драпкин М. Я., Зорин Д. И., Свердличенко В. Д., Шестопалов Ю. Н. Фотоэлектрические способы и системы автоматической фиксации границ интервалов штриховых мер длины. Тезисы докладов и сообщений IX Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. СО АН СССР, Новосибирск, 1968.
29. Бржезинский М. Л., Драпкин М. Я., Зорин Д. И., Каекин В. В., Свердличенко В. Д., Трофимова Н. В., Шестопалов Ю. Н. Измерение штриховых мер длины с автоматической регистрацией результатов. «Измерительная техника», 1970, № 4.
30. Каяк Л. К., Тришин Н. В., Ячменцев О. В. Автоматический фотоэлектрический продольный компаратор. Труды метрологических институтов СССР, вып. 101 (151), Изд-во стандартов, 1968.
31. Батарчукова Н. Р., Ирихова Л. А., Карташев А. И. Спектрометрическая установка для измерения длин волн и исследования контуров спектральных линий. Труды метрологических институтов СССР, вып. 101 (151). Изд-во стандартов, 1968.
32. Широков К. П. Вопросы теории и повышения точности электроизмерительных приборов постоянного и переменного тока. Авторский доклад по опубликованным работам, представленным по совокупности к защите на соискание ученой степени доктора технических наук. ВНИИМ, 1963.
33. Рабинович С. Г., Селибер Б. А. Поверочный потенциометр. Авторское свидетельство № 105873. «Бюлл. изобр.», 1957, № 4.
34. Иванов Б. Н., Ткалин И. М. и др. Технология приборостроения. Госэнергоиздат, 1959.
35. Установки для поверки электроизмерительных приборов. ЦИНТИ, 1962.
36. Вербенко Е. Г. Устройство для поверки амперметров и ваттметров. Авторское свидетельство № 143916. «Бюлл. изобр.», 1952, № 1.
37. Вербенко Е. Г. Производительный метод поверки образцовых амперметров, вольтметров и ваттметров повышенной точности. Труды институтов Комитета стандартов, вып. 82 (142). Изд-во стандартов, 1965.
38. Пирожков Н. В., Разумовский В. А., Шнейдер Р. И. Полуавтоматическая установка для поверки и градуировки электроизмерительных приборов постоянного тока. Авторское свидетельство № 154946. «Бюлл. изобр.», 1963, № 11.
39. Рабинович С. Г. Потенциметрическая установка для поверки электроизмерительных приборов с автоматической записью поправок. Авторское свидетельство № 180259. «Бюлл. изобр.», 1966, № 7.
40. Тавровский В. Л. Одно из основных направлений автоматизации поверочных работ. «Измерительная техника», 1969, № 7.

41. Славина Н. П. Образцовый прибор системы ВНИИМ для измерения твердости по Виккерсу и Бриеллю. «Измерительная техника», 1964, № 8.
42. Кессельман С. М., Кипнис А. М. Проверка бесшкальных измерительных приборов. «Измерительная техника», 1967, № 5.
43. Пак В. В. Новые методы и аппаратура для исследования температурных полей в электропроводных средах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук, Ленинград, 1963.
44. Арапов П. П. Высокоточные измерительные приборы, разработанные метрологическими институтами на выставке «Автоматизация-69». «Измерительная техника», 1969, № 9.
45. Земельман М. А., Вострокнутов Н. Н., Кюпфер А. П. Транзисторный аналого-цифровой преобразователь с автоматической коррекцией систематических и сильно коррелированных случайных погрешностей для точных измерительных систем. Тезисы докладов на 5-й научно-технической конференции «Кибернетические пути совершенствования измерительной аппаратуры». Изд. ВНИЭП, Л., 1966.
46. Безикович А. Я., Зорин Д. И., Приккер В. И., Эскин С. П. Цифровое устройство для автоматического измерения малых медленно изменяющихся напряжений. Труды метрологических институтов СССР, вып. 98 (158), Изд-во стандартов, 1968.
47. Таубе Б. С. Способ измерения напряжения переменного тока. Авторское свидетельство № 205139, «Бюлл. изобр.», 1967, № 23.
48. Таубе Б. С., Шапиро Е. З., Эскин С. П., Приккер В. И. Высокостабильный компенсационный источник опорного напряжения. «Измерительная техника», 1969, № 6.
49. Зорин Д. И., Шестопалов Ю. Н. Высоковольтные стабилизаторы для питания малоомных постоянных нагрузок. Труды метрологических институтов СССР, вып. 97 (157), Изд-во стандартов, 1968.
50. Драпкин М. Я., Шестопалов Ю. Н. Транзисторные усилители постоянного и переменного тока к фотоэлектрическим преобразователям сигналов от оптических интерферометров. Труды метрологических институтов СССР, вып. 98 (158), Изд-во стандартов, 1968.
51. Дюжин А. Г. Прецизионные системы автоматического регулирования для объектов управления с большой постоянной времени. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук, ВНИИФТРИ 1967.
52. Ковалев Г. И., Каверина И. Я., Шкабордя М. С. О принципах построения агрегатного комплекса средств измерительной техники. «Приборы и системы управления», 1969, № 6.
53. Амауни Н. Л., Васильев Б. В. Выбор оптимальных размеров катушки взаимной индуктивности. Труды институтов Госкомитета стандартов, вып. 79 (139), Стандартгиз, 1965.
54. Долинский Е. Ф., Васильев Б. В. Способ наименьших квадратов при нелинейных условиях уравнениях совместных измерений. «Измерительная техника», 1969, № 1.
55. Зедгинидзе Г. П. Методы кибернетики и средства вычислительной техники в метрологии. «Измерительная техника», 1969, № 9.
56. Фралкензон А. Г., Варгасова Э. В. Расчетная формула для определения предельного равномерного удлинения при различных температурах и скоростях испытания. Труды СГНИИМ, вып. 1. Исследования в области механических и тепловых измерений, Новосибирск, 1969.
57. Цибил Г. И., Степанов В. П. Способ динамической аттестации датчиков силы. Труды СГНИИМ, вып. 1. Исследования в области механических измерений, Новосибирск, 1969.
58. Смирнова Н. А. Теория автоматических коромысловых весов с электрическим компенсатором веса. «Измерительная техника», 1960, № 10.
59. Бахтадзе Ш. Н., Безикович А. Я., Зорин Д. И., Свездличенко В. Д., Шестопалов Ю. Н., Эскин С. П. Оптико-электронные методы и средства автоматизации метрологических работ. «Измерительная техника», 1969, № 5.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

А. Я. БЕЗИКОВИЧ, Д. И. ЗОРИН
Ю. Н. ШЕСТОПАЛОВ, С. П. ЭСКИН
ВНИИМ

О ПРИНЦИПАХ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ В МЕТРОЛОГИИ

Технические средства, применяемые для воспроизведения, хранения и передачи единиц можно подразделить на две категории [1]: эталоны, служащие для воспроизведения и хранения единиц, и образцовые средства измерений, служащие для хранения единиц и передачи их размера рабочим приборам и мерам.

Рациональная система соподчинений этих средств отражена в поверочных схемах [2].

Одной из основных задач современной метрологии является повышение точности всех звеньев поверочной схемы и как непрерывное условие этого — повышение точности их поверки. Решению этой проблемы в значительной степени способствует автоматизация поверочных работ, основанная на привлечении новых и новейших средств автоматики и электроники. В соответствии с этим могут быть названы главные направления работ по автоматизации.

1. Создание автоматических поверочных средств на всех этапах передачи размера единицы, в том числе от первичного вторичным эталонам и далее рабочим мерам и приборам.

2. Создание автоматических средств измерений величин в статическом и динамическом режимах, а также при экстремальных их значениях.

3. Разработка средств, обеспечивающих проведение физических исследований с целью использования их для метрологических работ, и средств стабилизации или автоматической регистрации режимов воспроизведения и хранения единицы.

4. Использование вычислительной техники для повышения точности измерений. Это направление в свою очередь может быть подразделено на два:

а) создание специализированных вычислительных машин как элементов автоматических измерительных систем, предназначенных для обработки результатов и для управления экспериментом;

б) разработка аппаратуры, обеспечивающей сопряжение ЦВМ с измерительным устройством или системой.

Пути разработки всех названных направлений имеют свою специфику и поэтому целесообразно рассмотреть их отдельно.

Автоматические поверочные средства

Поверкой называют [3] определение погрешности средства измерений и установление его пригодности к применению. В отличие от работы [4], где под поверкой понимают определение погрешностей только рабочих приборов, мы будем распространять это понятие на все средства измерений независимо от их положения в поверочной схеме. Различным будет только подход при решении вопроса о необходимости автоматизации тех или иных видов поверки. Автоматизация поверки рабочих приборов целесообразна даже в том случае, если она, при сохранении точности неавтоматической поверки, приводит к повышению производительности труда. Автоматизация процессов сличения мер высших разрядов и эталонов целесообразна как средство повышения точности воспроизведения единицы и передачи ее размера. Снижение же времени сличения, являющееся естественным следствием автоматизации процесса, должно рассматриваться не как самоцель, а как одна из возможностей повышения точности за счет таких факторов, как снижение влияния внешних условий, устранение неопределенности, связанной с нестабильностью поверяемой меры, возможность увеличения числа входящих в групповой эталон элементов, возможность более углубленного исследования их свойств и др. [5]

Несмотря на огромное разнообразие средств поверки, можно выделить пять методов ее [2]:

- а) непосредственное сличение прибора с образцовым прибором или меры с образцовой мерой,
- б) измерение образцовым прибором величины, воспроизводимой поверяемой мерой,
- в) прямое измерение поверяемым прибором величины, воспроизводимой образцовой мерой,
- г) сличение образцовой и поверяемой мер с помощью компарирующего прибора,
- д) поверка с применением косвенных измерений.

Метод непосредственного сличения мер с точки зрения автоматизации поверок неперспективен, так как не обеспечивает необходимой точности сличения. До последнего времени придерживались той же точки зрения и для показывающих приборов. Однако уже доказано, что автоматические измерительные приборы обладают точностью, соизмеримой с точностью неавтоматических приборов сравнения, и поэтому их можно применять наравне с последними в качестве образцовых, а их разработку следует считать одной из важных задач по автоматизации поверок. Создание таких приборов оправдано и тем, что они могут обеспечить поверку с применением косвенных измерений.

Однако мы по-прежнему считаем неперспективным метод сличения при полной автоматизации процесса поверки, включая

отсчитывание показаний приборов, так как в этом случае аппаратура будет неоправданно усложнена [6], соотношение времени подготовки автоматической поверочной аппаратуры к работе ко времени поверки будет невыгодным. Метод поверки меры по прибору, обеспечивая высокую точность, несвободен в ряде случаев от методических погрешностей, связанных с потреблением мощности прибором, и не может быть в таком виде рекомендован для автоматизации поверок мер. Замена же прибора устройством сравнения приводит эту схему к указанному выше в п. «г» методу поверки. Таким образом, автоматические поверочные устройства для поверки приборов должны базироваться на методе сличения с образцовой мерой, а для поверки мер — на методах сличения с помощью компарирующих приборов. Задача автоматизации поверок при использовании метода непосредственного сличения приборов сводится к разработке образцовых автоматических приборов, принципы построения которых рассмотрены в дальнейшем.

Любая поверка заключается в определении тем или иным способом разности показания прибора или меры и действительного значения величины, определяемого по образцовому прибору или мере. Очевидно, что автоматическое поверочное устройство должно включать в себя образцовый прибор или меру и следующие устройства:

- а) задающее измеряемую величину;
- б) обеспечивающее отсчитывание показаний поверяемого прибора для приборов и многозначных мер, снабженных отсчетными шкалами;
- в) обработки и записи результатов поверки;
- г) управления.

Указанная структура автоматической поверочной установки составлена в предположении, что участие человека сводится только в подготовке автоматической поверочной установки и прибора к поверке.

Для реализации выбранных методов автоматической поверки следует использовать компенсационный принцип. В этом случае для приборов и мер, снабженных отсчетными устройствами, может быть предложена обобщенная структурная схема поверочной установки, обеспечивающей полную автоматизацию процесса поверки, представленная на рис. 1 [7]. Схема пригодна для поверки приборов и мер как в динамическом (ключ K в положении 1), так и в статическом (ключ K в положении 2) режимах. В последнем случае автоматическая система из разомкнутой преобразуется в замкнутую с цепью обратной связи, охватывающей объект поверки. Устройство состоит из двух ветвей, одна из которых предназначена для фиксации границ поверяемых интервалов штриховых шкал (положения штриха относительно некоторой опорной координаты $OК$ или указателя относительно щели сканирующего устройства), вторая ветвь предназначена для изме-

рения погрешности меры или прибора. Поверяемый прибор или меру $ПП (M)$ помещают в поле зрения оптической системы $ОС$, выходной сигнал которой Y сравнивают с опорной координатой Y_0 в элементе сравнения $ЭС$, и на выходе последнего образуется разностный сигнал ΔY , поступающий в фотоэлектрический преобразователь $ФЭП$. После дешифровки этого сигнала в устройстве $ДР$ он поступает в систему управления $СУ$ устройством задания измеряемой величины $УЗИВ$, сигнал с которого попадает на $ПП (M)$ и одновременно на преобразователь рода и масштаба

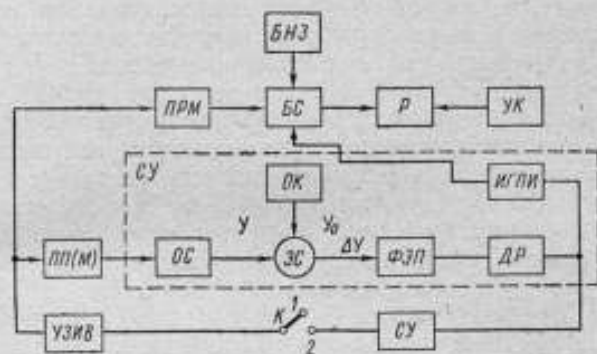


Рис. 1. Обобщенная блок-схема опико-электронного автоматического поверочного устройства.

$УЗИВ$ — устройство задания измеряемой величины, $ПП (M)$ — поверяемый прибор или мера, $ОС$ — оптическая система, $ЭС$ — элемент сравнения, $ФЭП$ — фотоэлектрический преобразователь, $ДР$ — устройство дешифровки, $ИГПИ$ — индикатор границ поверяемых интервалов, $ОК$ — опорная координата, $УК$ — устройство коррекции, $Р$ — устройство регистрации, $БС$ — блок сравнения, $ПРМ$ — преобразователь рода и масштаба, $БНЗ$ — блок номинальных значений, $СУ$ — система управления, Y — выходной сигнал оптической системы.

Y_0 — опорная координата, ΔY — разностный сигнал, K — ключ.

$ПРМ$. Последний преобразует этот сигнал в форму, удобную для сравнения с номинальным значением величины, соответствующей поверяемой отметке и получаемой от блока номинальных значений $БНЗ$. Это сравнение осуществляется в блоке сравнения $БС$ в момент, когда величина, поступающая от $УЗИВ$ на поверяемый прибор, достигнет размера, при котором сигнал рассогласования становится равным нулю и индикатор границ поверяемых интервалов $ИГПИ$ выдает импульсы-команды на $БС$. Сигнал с $БС$, равный разности между показанной прибором (мерой) величиной и номинальным ее значением, есть погрешность поверяемого средства измерений и она регистрируется в устройстве регистрации $Р$, в которое одновременно с помощью устройств коррекции $УК$ вводятся поправки на различные влияния, могущие искажать результат поверки.

При динамическом режиме поверки (ключ K в положении 1) входной сигнал на поверяемый прибор поступает от $УЗИВ$, непрерывно изменяясь по заданной программе.

Анализ погрешностей такой обобщенной схемы, выполненный в работе [7], показывает, что не все элементы ее одинаково сказываются на погрешности поверки приборов (мер). Наиболее существенная погрешность определяется блоками «прямого преобразования», к числу которых относятся преобразователь рода и масштаба, устройство задания опорной координаты, оптическая система. Погрешности блоков «граничного преобразования», таких как элементов системы автоматической установки на опорную координату, заключенных между ЭС и УЗНВ по цепи обратной связи, и индикатора границ поверяемых интервалов, ввиду малости отношения значения границы поверяемого интервала к измеряемой величине, малы и являются погрешностями второго порядка малости по сравнению с погрешностями блоков «прямого преобразования». Погрешности блоков, обуславливающих компенсационное преобразование, складываются из погрешности блока сравнения и погрешности блока номинальных значений. При достаточной степени компенсации и при высокой точности БНЗ погрешностью блока сравнения можно пренебречь.

Рассмотренная обобщенная блок-схема оптико-электронной автоматической установки весьма перспективна для создания поверочных средств, в основу которых может быть положен интерференционный метод измерений. В частности, для автоматической поверки штриховых мер длины ее реализация показана в работе [7], а для случая поверки электроизмерительных приборов — в [8].

Для создания поверочных средств на основе рассмотренной обобщенной схемы необходима разработка устройств отсчитывания, обладающих достаточной универсальностью, систем управления, устройств задания измеряемых величин, преобразователей рода и масштаба измеряемых величин, устройств задания опорных величин, устройств сравнения, измерения и регистрации погрешности, а также устройств коррекции влияния внешних воздействий. Естественно, что при решении каждого конкретного вопроса, связанного с различными областями измерений, возникают специфические задачи при создании большей части из перечисленных устройств. Например, в случае автоматической установки для поверки мер длины устройством задания измеряемой величины является привод, перемещающий каретку с поверяемой мерой, а в случае поверки электроизмерительного прибора — источник входного сигнала, подаваемого на прибор. То же можно сказать о преобразователях рода и масштаба и блоках задания номинальных величин. Только при создании аппаратуры для поверки электронизмерительных приборов, учитывая легкость трансформации электрических величин, вполне разрешима задача создания блоков номинальных значений (БНЗ), универсальных в известной мере [9] и основанных на источниках опорных напряжений с масштабными преобразователями. Во всех остальных случаях, как правильно отмечено в работе [10], даже при орга-

низации поверок рабочих приборов приходится сталкиваться с таким разнообразием пределов измерений и классов точности, что внедрение БНЗ затруднено.

Общими для всех автоматических поверочных установок являются устройства отсчитывания, стабилизированные источники питания, блоки памяти, регистрации и обработки информации. Указанные блоки целесообразно унифицировать для всех видов измерений.

В последнее время, когда вопросам автоматизации поверочных работ придается большое значение, создаются установки, в которых применяются так называемые активные образцовые меры, или калибраторы, с выхода которых возможно получить заданный сигнал с нормированной погрешностью. В качестве примеров можно назвать калибратор фазы [11] и калибраторы постоянного тока и напряжения [12], калибраторы переменного напряжения [13]. В ряде случаев эти калибраторы снабжены устройствами, позволяющими непосредственно отсчитать значение погрешности без каких-либо промежуточных вычислений. Нам представляется, что использование калибраторов для поверки рабочих приборов оправдано и что их разработке должно уделяться внимание.

Это подтверждается, в частности, приведенным в работе [14] описанием универсальной системы программированной поверки амперметров и вольтметров, в которой автоматизированы все операции поверки за исключением отсчитывания показаний, и подробным анализом вопроса о возможности обеспечить поверку электроизмерительных приборов с помощью калибраторов [9]. В обеих работах особо подчеркивается, что создание поверочных устройств на базе калибратора обеспечивает требуемую для периодических поверок приборов точность и существенно повышает производительность труда поверителей.

Самостоятельным кругом вопросов, требующим особого подхода, является создание автоматических поверочных средств для мер, не имеющих отсчетных устройств, таких как, например, меры э. д. с., сопротивления, наборы гирь и др.

В настоящее время для автоматической поверки мер сопротивления, емкости, индуктивности и др. в промышленности разработан ряд цифровых приборов [15, 16], позволяющих определять погрешности мер в цифровой форме до сотых долей процента. Для метрологических исследований необходимо совершенствовать эти методы с целью повышения с их помощью точности измерений.

Применительно к сличению нормальных элементов в работе авторов * показано, что автоматизация может быть частичной — с привлечением средств вычислительной техники на стадии обработки результатов измерений, подобно принятой в НБЭ, так и полной [5].

* См. стр. 135.

Использование устройств подобного рода весьма перспективно для повышения точности верхнего звена поверочной схемы и должно быть распространено на все групповые эталоны и в первую очередь — на электрические. При создании таких устройств, естественно, следует обеспечить автоматизацию самого процесса уравнивания в измерительной его части и в частности — разработку компенсаторов постоянного тока, мостов постоянного и переменного тока с автоматическим уравниванием по всем параметрам и др.

Автоматическая измерительная аппаратура для метрологических исследований

В качестве одного из аспектов развития метрологии в литературе [17] указано направление работ по созданию новых принципов измерений и, в частности, создание приборов для измерений величин в импульсном режиме и экстремумов величин.

Основываясь на том положении, что наивысшей точности измерений можно достичь, используя метод сравнения или один из его видов — метод замещения, при создании автоматических измерительных систем следует в основу закладывать именно этот принцип. Даже если автоматизируется только вспомогательная операция — уравнивание [18], то и в этом случае автоматические измерительные установки приобретают новые свойства, обусловленные быстродействием электронных устройств. В частности, это позволяет при использовании в измерительных системах средств вычислительной техники повысить точность измерений известными методами, снижая влияние как случайных, так и систематических погрешностей [19, 20]. Кроме того, автоматика позволяет создавать новые методы, обеспечивающие измерения быстро изменяющихся величин и величин импульсного характера, весьма медленно изменяющихся величин, а также получение объективных результатов измерений и снижение инструментальных погрешностей, обусловленных как отдельными элементами измерительных устройств, так и каналами преобразования в целом.

Для иллюстрации указанных положений на рис. 2—7 приведены структурные схемы автоматических измерительных установок, разработанных во ВНИИМ для метрологических исследований в различных областях измерений.

На рис. 2, а приведена схема автоматической установки для измерений температуры импульсных источников, основанной на сравнении амплитуд измеряемого импульса излучения с амплитудами импульсов излучения образцовой температуры лампы.

Измеряемая величина IV через преобразователь рода и масштаба $ПРМ$ поступает на устройство сравнения $УС$. На это же устройство поступают два импульса от образцовой температурной лампы $ОЛ$, каждый через свой преобразователь рода и масштаба

$ПРМ_1$ и $ПРМ_2$ соответственно. Импульсы температуры T_{01} и T_{02} от лампы $ОЛ$ расположены во времени симметрично по отношению к измеряемому, а их амплитуды выбирают неодинаковыми и такими, чтобы амплитуда измеряемого импульса T_x , ослабленная в известное число раз, оказалась между амплитудами от лампы $ОЛ$. Результат сравнения фиксируется в устройстве регистрации $УР$. Измерение амплитуды импульса излучения производится в четыре такта по командам, поступающим от синхронизирующего устройства $СУ$, управляющего электронными ключами $K_1—K_4$. В качестве $УС$ используется электронно-луче-

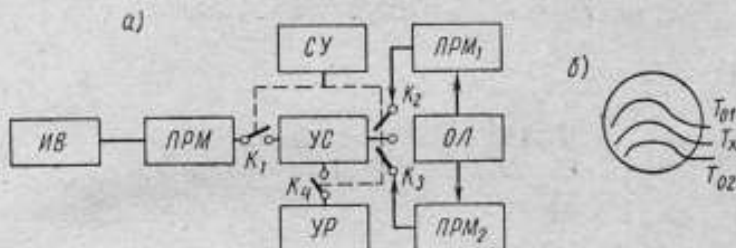


Рис. 2. Схема автоматической установки для измерений температуры импульсных источников (а) и осциллограмма (б).

$УР$ — устройство регистрации, $ИВ$ — измеряемая величина, $ПРМ_{1,2}$ — преобразователи рода и масштаба, $СУ$ — синхронизирующее устройство, $УС$ — устройство сравнения, $ОЛ$ — образцовая температурная лампа, $K_1—K_4$ — электронные ключи.

вая трубка, на экране которой благодаря наличию памяти (послесвечению) фиксируются по окончании цикла измерения все три импульса (рис. 2,б).

Точность измерений амплитуды импульса излучения, являющаяся функцией температуры, зависит от точности опорного элемента — в данном случае от образцовой температурной лампы, точности масштабных преобразователей — светофильтров, от соотношения коэффициентов масштабных преобразователей, обеспечивающих достаточно малую разность сравниваемых величин, и от точности измерений этой разности, осуществляемых с помощью устройств сравнения и регистрации ($УС$ и $УР$). Фотоэлектрическая спектрометрическая установка типа ИПСП-1 для измерения температуры плазменных излучателей [21], основанная на этом принципе [22], обеспечивает измерения амплитуд импульсов температур до $40\ 000^\circ$ при их длительности порядка $150—450$ мкс с погрешностью не более $2,0—2,5\%$, что является до настоящего времени непревзойденным результатом.

Рассмотренное устройство не совсем типично для автоматических измерительных систем, так как в нем отсутствует цепь обратной связи с устройством управления, охватывающая образцовый источник излучения. Последнее объясняется тем, что установка предназначена для измерений одного значения температуры.

На рис. 3 приведена структурная схема установки для автоматических измерений медленно изменяющихся напряжений (инфразвукового диапазона частот) [23], в основу которой положен термокомпараторный метод измерений действующего значения напряжения переменного тока [24], а возможность измерений медленно изменяющихся напряжений обеспечивается цифровым интегрирующим устройством.

На вход компарирующего устройства $KУ$ поочередно поступают измеряемый переменный ток X_I и эквивалентный ему по тепловому действию известный постоянный ток X_0 . Выходной сигнал $KУ$ поступает на интегрирующее устройство $ИУ$, состоя-

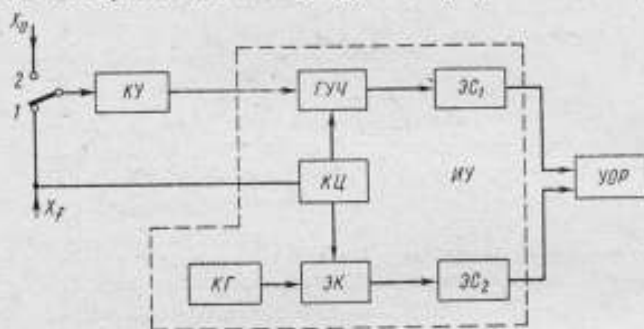


Рис. 3. Структурная схема установки для автоматических измерений медленно изменяющихся напряжений.

$KУ$ — компарирующее устройство, $ГУЧ$ — генератор управляемой частоты, $ЭС_1$, $ЭС_2$ — электронные счетчики импульсов, $КЦ$ — коммутационная цепь, $ИУ$ — интегрирующее устройство, $КГ$ — кварцевый генератор, $ЭК$ — электронный ключ, $УОР$ — устройство обработки и регистрации.

щее из генератора управляемой частоты $ГУЧ$, электронных счетчиков импульсов $ЭС_1$ и $ЭС_2$, коммутационной цепи $КЦ$, кварцевого генератора $КГ$ и электронного ключа $ЭК$. Принцип действия устройства заключается в преобразовании выходной величины $KУ$ в цифровой эквивалент — частоту следования импульсов. Интервал времени интегрирования, равный одному или нескольким периодам X_I , обеспечивается цепью $КЦ$, задачей которой является запуск и остановка в соответствующие моменты времени процесса суммирования импульсов в счетчике $ЭС_1$. Кроме того, $КЦ$ управляет цепью измерений времени интегрирования, состоящей из генератора $КГ$, ключа $ЭК$ и счетчика $ЭС_2$. Результаты счета из счетчиков $ЭС_1$ и $ЭС_2$ поступают в устройство обработки и регистрации $УОР$, осуществляющее автоматическое определение средней частоты следования импульсов за время измерений.

На рис. 4 приведена структурная схема автоматического диоптриметра, иллюстрирующая возможность получения объективных результатов измерений рефракции линз методом компенсационного преобразования. Фокусное расстояние поверяемой

линзы *ПЛ* через оптическую систему *ОС₁* сравнивается с фокусным расстоянием образцовой линзы *ОЛ*, состоящей из оптической системы *ОС₂* со шкалой диоптрий *ШД*.

Наличие цепи обратной связи, охватывающей образцовую линзу через устройство управления *УУ*, обеспечивает автоматическое оптическое уравнивание измеряемой величины (фокусного расстояния линзы *ПЛ*) опорной величиной — шкалой диоптрий *ОЛ*. По последней отсчитывается перемещение вспомогательной оптической системы, восстанавливающей при своем

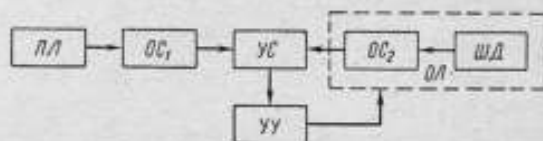


Рис. 4. Структурная схема автоматического диоптриметра.

ПЛ — поверяемая линза, *ОС₁*, *ОС₂* — оптические системы, *УС* — устройство сравнения, *ОЛ* — образцовая линза, *ШД* — шкала диоптрий, *УУ* — устройство управления.

перемещению нарушенную введением исследуемой линзы фокусировку оптической системы диоптриметра [25]. Погрешность измерений рефракции линз не превышает 0,02 диоптрий.

На рис. 5—7 изображены схемы автоматических установок для измерений электрических величин постоянного тока и звукового диапазона частот. Первая из рассматриваемой группы

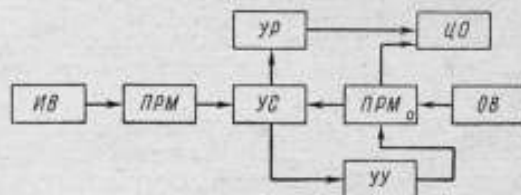


Рис. 5. Схема автоматической установки для измерений электрических величин, основанная на компенсационном принципе.

ИВ — измеряемая величина, *ПРМ*, *ПРМ₀* — преобразователи рода и масштаба, *УР* — устройство регистрации, *УС* — устройство сравнения, *УУ* — устройство управления, *ЦО* — устройство цифрового отсчета, *ОВ* — опорная величина.

установок (рис. 5) основана на компенсационном принципе и имеет цифровой выход, обеспечивающий объективность измерений и отсчитывания. Быстродействие, свойственное таким автоматическим измерительным установкам, позволяет также обеспечить измерения сигналов постоянного тока с низкочастотной наложенной переменной составляющей. Здесь, независимо от того, осуществляется ли полная или неполная компенсация измеряемой величины *ИВ* опорной величиной *ОВ*, установка содержит преобразователи рода и масштаба *ПРМ* и *ПРМ₀* и устройства: сравнения *УС*, регистрации *УР*, управления *УУ* и цифрового

отсчета ЦО. Различие же установок для обоих видов компенсации заключается в выполнении преобразователя $ПРМ_0$ и устройства регистрации УР. При полной компенсации преобразователь $ПРМ_0$ должен обеспечить дискретность уравнивания, соответствующую точности измерений, а при неполной — обеспечить только компенсацию заданных уровней с достаточной степенью точности, при этом в устройстве регистрации УР должна быть предусмотрена возможность измерения некомпенсированного остатка. Очевидно, что требования к точности этого устройства могут быть существенно снижены по сравнению с требованиями к точности приборов, использующих принцип прямого преоб-

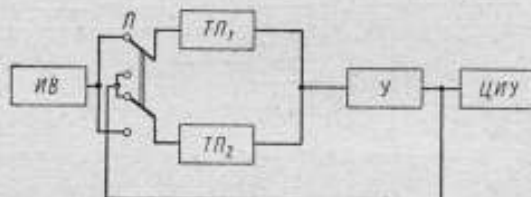


Рис. 6. Структурная схема прибора для автоматических измерений напряжений переменного тока.

ИВ — измеряемая величина, П — переключатель, ТП₁ и ТП₂ — термопреобразователи, У — усилитель, ЦИУ — цифровое измерительное устройство.

зования. Результаты измерений регистрируются в устройстве ЦО в случае полной компенсации непосредственно с преобразователя $ПРМ_0$, а при неполной компенсации — как сумма показаний преобразователя $ПРМ_0$ и устройства УР.

Для подтверждения положения о возможности исключения инструментальных погрешностей в автоматических измерительных системах на рис. 6 приведена структурная схема прибора для измерений напряжения переменного тока [26] с двумя преобразователями, каждый из которых имеет значительные погрешности. Измерение производится в два такта, во время которых термопреобразователи ТП₁ и ТП₂ меняются местами автоматическим переключателем П: преобразователь, который был в цепи измеряемой величины, подключается к цепи обратной связи, и наоборот. Очевидно, что теперь результат измерения будет иметь ту же погрешность, что и при первом измерении, но с обратным знаком. Таким образом, усреднением результатов обоих измерений в цифровом измерительном приборе ЦИУ существенно уменьшаются погрешности преобразователей. Неполное исключение погрешностей определяется ограниченным коэффициентом усилителя У и приближенностью операции суммирования результатов измерений. Теоретический анализ, проведенный в работе [27], показывает, что этот метод устраняет погрешности, связанные с погрешностями отдельных элементов цепи и таким образом осуществ-

ляется возможность полного исключения систематических погрешностей или такого их уменьшения, которое позволяет перевести их в разряд случайных.

Примером исключения инструментальных погрешностей целого тракта преобразования служит приведенная на рис. 7 структурная схема установки для измерений напряжений переменного тока. Измерение происходит в два такта. При первом — переключатель Π находится в положении 1 и измеряемое напряжение U поступает на вход линейного преобразователя напряжения в число импульсов в ПНИ, которое фиксируется реверсивным счетчиком РС, находящимся в положении прямого счета. Параллель-

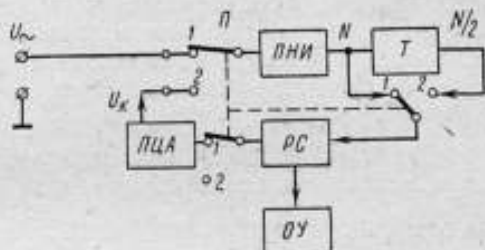


Рис. 7. Структурная схема установки для автоматических измерений напряжения переменного тока.

Π — переключатель, ПНИ — преобразователь напряжения в число импульсов, Т — триггер, ЦА — цифро-аналоговый преобразователь, РС — реверсивный счетчик, ОУ — отсчетное устройство.

ный выход РС соединен с цифро-аналоговым преобразователем ЦА, на выходе которого получается напряжение U_k , с высокой степенью точности определяемое числом импульсов N , зафиксированным в реверсивном счетчике. После получения U_k первый такт заканчивается, и переключатель Π автоматически переходит в положение 2. При этом напряжение U_k проходит через весь тракт прямого преобразования. Число импульсов N , пропорциональное U_k , делится в счетном триггере Т и фиксируется в счетчике РС при обратном счете. Результат измерения определяется с помощью отсчетного устройства ОУ как разность числа импульсов при первом и втором тактах измерений. Этот метод назван автором [28] методом обратных преобразований и пригоден для измерений действующих и средних значений переменного тока с использованием источника опорного напряжения переменного тока.

На основе этого метода создан цифровой прибор, в котором автоматизирован весь процесс уравнивания и измерения, пригодный, как уже указывалось, для измерений средних и действующих значений напряжения переменного тока в диапазоне частот от 50 Гц до 20 кГц с погрешностью $(3 \div 5) \cdot 10^{-2} \%$. Этот

прибор разработан с целью использования его в качестве образцового при поверке вольтметров среднего и действующего значения методом непосредственного сличения.

При физических исследованиях, проводимых в метрологических институтах с целью использования их для создания естественных эталонов, определения физических констант и т. п., весьма важно располагать приборами, позволяющими, в зависимости от характера исследуемой величины (процесса), управлять частотой измерений. В частности, такая задача возникает при ядерных исследованиях, при анализе процесса распада. В этом случае требуются приборы большого быстродействия (до 10^6 измерений в секунду) и, в зависимости от требуемого режима (фиксации экстремальных значений или измерений с частотой, зависящей от скорости изменения измеряемой величины) необходимы приборы, получившие название адаптирующихся систем [29].

Создание вспомогательных средств для метрологических исследований

Это направление работ представляет наибольшие трудности ввиду огромного разнообразия требований, предъявляемых к вспомогательным средствам при многочисленных исследованиях, проводимых в самых различных областях измерений. Кроме того, аппаратура, применяемая для физических исследований, а также для определения физических констант и создания эталонов, разрабатывается в единичных экземплярах, поэтому комплексная их автоматизация нецелесообразна, и необходима автоматизация только тех элементов, которые обеспечат либо самую возможность осуществления исследования, либо необходимую точность получения результатов измерений. В последнем случае задача должна решаться в направлении как разработки аппаратуры с более высокими метрологическими показателями, так и обеспечения условий проведения эксперимента, т. е. их стабилизации или регистрации с последующим введением поправок.

Анализ потребностей различных научных отделов ВНИИМ в электронной и автоматической аппаратуре показал, что характерными являются требования к созданию систем автоматического регулирования (температуры, магнитного поля, тока и др.), поддерживающих измеряемую или влияющую величину на заданном уровне, т. е. систем стабилизации. Задачами подобного рода занимаются различные научные и промышленные учреждения. Как правило, достигаемые в результате этих работ параметры стабилизирующих устройств не удовлетворяют требованиям метрологии. Обеспечивать эти требования в серийном производстве не всегда целесообразно, а в ряде случаев и не представляется возможным, поэтому такие задачи должны решаться метрологическими учреждениями — их подразделениями по автоматизации метрологических работ.

В тех случаях, когда технически и экономически нецелесообразно создавать такие системы даже для метрологических исследований, необходимо идти по пути слежения за изменяющимися величинами, т. е. по пути их автоматических измерений с последующим введением поправок.

С точки зрения создания автоматических систем эти задачи могут быть подобны, но чаще они различны, так как в случае создания систем стабилизации необходима разработка систем регулирования с обратной связью, замкнутой на объект регулирования, а во втором случае (регистрации) — с разомкнутой цепью обратной связи. Таким образом, и здесь задача распадается на два направления, о которых мы говорили в предыдущих разделах настоящей статьи.

Разработка вычислительных машин для метрологических исследований

В настоящее время достаточно четко можно выделить две группы задач, решаемых с помощью ЦВМ, предназначенных для использования в измерительных системах:

- а) обработка измерительной информации, поступающей из измерительных систем,
- б) управление экспериментом.

В обширной литературе, посвященной данным вопросам [19, 20 и др.] достаточно подробно раскрыто содержание этих задач и показано [30], что для их решения целесообразна разработка недорогих небольших ЦВМ, обладающих необходимыми характеристиками по быстродействию и точности. На примере работ лаборатории автоматизации метрологических исследований ВНИИМ можно показать, что даже при создании специализированных ЦВМ, представляющих собой по существу неотъемлемую часть измерительных (поверочных) установок, и предназначенных для выполнения операций, связанных с реализацией самого метода измерений или поверки (например, интегрирования с целью определения значения некоторого параметра за известный промежуток времени [19], обработки результатов двухскоростного метода поверки [6], исключения погрешности тракта преобразования [27]), не возникает задач, которые привели бы к необходимости разработки подобных ЦВМ непосредственно в метрологических учреждениях.

Наличие специализированных СКБ, разрабатывающих вычислительные машины и обладающих высокой компетенцией в этом вопросе, дает возможность совместного решения этого круга задач. Роль метрологических учреждений будет ограничена постановкой задачи, выдачей технического задания на проектирование ЦВМ, разработкой методики исследования метрологических показателей ЦВМ. Вопрос о специальной аппаратуре, обеспечивающей сопряжение ЦВМ с измерительными устройствами

(поверочными), должен решаться одновременно с созданием самой ЦВМ.

В тех случаях, когда функции вычислительного устройства ограничены производством небольшого числа операций, требования к емкости памяти невелики и возможно использование типовых узлов вычислительных машин; такие устройства целесообразно создавать как элементы метрологических установок. Примерами этого могут служить рассмотренные в статье цифровые приборы для измерений напряжения в звуковом диапазоне частот [26].

В тех случаях, когда по тем или иным соображениям создание специализированных вычислительных машин нецелесообразно и предполагается использование универсальных ЦВМ, вопросы, связанные с разработкой устройств ввода данных в ЦВМ, должны решаться при создании измерительного комплекса одним из способов, указанных в работе [30].

Здесь не рассмотрены задачи, решаемые ЦВМ в метрологической практике, так как эти вопросы выходят за рамки содержания настоящей статьи и являются предметом самостоятельного исследования [31, 32].

Выводы

1. Автоматизация метрологических исследований целесообразна как средство повышения точности воспроизведения, хранения единиц и передачи их размера на всех ступенях поверочных схем, а также как средство повышения производительности экспериментальных работ в метрологии.

2. В основу создаваемых автоматических поверочных установок должны быть положены следующие принципы: для проверки приборов — метод проверки по образцовой мере, для мер — метод сличения с образцовой мерой с помощью компарирующих устройств.

Задача автоматизации проверок при использовании метода непосредственного сличения сводится к разработке образцовых автоматических измерительных приборов.

3. Полная автоматизация эталонных и образцовых средств целесообразна в тех областях измерений, где только она обеспечивает возможность выполнения измерений или воспроизведения единиц (быстро изменяющихся величин и величин импульсного характера, величин в динамическом режиме и т. п.), или если она приводит к повышению производительности метрологических работ.

Для всех звеньев поверочной схемы следует применять также частичную автоматизацию метрологических средств путем создания устройств, обеспечивающих совершенствование методов измерений, автоматизацию процесса измерений, поддержание и контроль условий проведения эксперимента. При этом одним из

перспективных направлений следует считать разработку активных мер измеряемых величин (калибраторов) и устройств, обеспечивающих автоматизацию процесса уравнивания в компенсационных измерительных системах.

4. Для облегчения внедрения автоматки необходимо создание унифицированных элементов, общих для различных видов систем автоматизации, таких как устройства отсчитывания показаний, стабилизированные источники питания, устройства задания измеряемых величин, масштабные и функциональные преобразователи, устройства сравнения, блоки памяти, регистрации и обработки информации, специализированные вычислительные машины и устройства сопряжения их с метрологическими системами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Широков К. П. Общие вопросы метрологии. Лекции заочного института НТО Приборпром, М., 1967.
2. Сборник поверочных схем, ред. К. П. Широков, Изд-во стандартов, 1965.
3. ГОСТ 16263—70. Метрология. Термины и определения. Изд. Комитета стандартов, 1970.
4. Тиходеев П. М. Очерки об исходных измерениях. Машгиз, 1954.
5. Brandwoy David W. Automatic testing of standard cells ISA Trans., 1966, v. 5, № 3, p. 211.
6. Эскин С. П. Разработка и исследование методов и образцовой аппаратуры для автоматической поверки показывающих электроизмерительных приборов на постоянном токе, Автореферат диссертации, ВНИИМ, Л., 1967.
7. Бахтадзе Ш. Н., Безикович А. Я., Зорин Д. И., Свердловдиченко В. Д., Шестопалов Ю. Н., Эскин С. П. Оптико-электронные методы автоматизации метрологических работ. «Измерительная техника», 1969, № 5.
8. Безикович А. Я., Грудинина Т. И., Зорин Д. И., Кончаева Л. Б., Прицкер В. И., Эскин С. П. Аппаратура для автоматической поверки амперметров, вольтметров и ваттметров на постоянном токе. «Измерительная техника», 1969, № 6.
9. Тавровский В. П. Одно из основных направлений автоматизации поверочных работ. «Измерительная техника», 1969, № 7.
10. Кипнис А. М. Основные направления автоматизации поверочных работ, «Измерительная техника», 1968, № 3.
11. Колтик Е. Д., Кравченко С. А., Поздняков И. К. Метрологические работы ВНИИМ по фазометрии. «Измерительная техника», 1967, № 11.
12. Шнейдер Р. И., Пирожков Н. В., Разумовский В. А. Калибратор постоянного напряжения и тока для поверки приборов. «Измерительная техника», 1969, № 6.
13. Ройтман М. С., Фомичев Ю. М., Цимбалист Э. И. Стабильный источник калиброванного переменного напряжения. «Автометрия», 1968, № 3.
14. Schomburg Richard. Система программированной поверки приборов. «Экспресс-информация. Контрольно-измерительная техника», 1968, № 33.
15. Гриневич Ф. Б. Автоматические мосты переменного тока. Изд-во СО АН СССР, 1964.
16. Метрология за рубежом. Стандартгиз, 1968.
17. Арутюнов В. О. Содержание и основные задачи современной метрологии. «Измерительная техника», 1967, № 9.

18. Карандеев К. Б. Специальные методы электрических измерений. Госэнергиздат, 1963.
19. Кавалеров Г. И., Мандельштам С. М. О критериях оценки средств и качества измерений. «Измерительная техника», 1965, № 12.
20. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. «Энергия», 1968.
21. Амброк Г. С., Беспалов Ю. С., Бражниченко Г. Н., Долицкий И. Н., Зорин Д. И., Каандер М. С., Киренков И. И., Королева Е. А. Фотозлектрическая спектрометрическая установка типа ИПСП-1 ВНИИМ для измерения температуры плазменных излучателей. Труды метрологических институтов СССР, вып. 105 (165), Изд-во стандартов, 1969.
22. Амброк Г. С. и др. Способ измерения температуры импульсных источников света. Авторское свидетельство № 186736, «Бюлл. изобр.», 1966, № 19.
23. Грaвин О. Н. Разработка и исследование методов и аппаратуры для точных измерений тока, напряжения и мощности в диапазоне частот 0,001—20 Гц. Автореферат диссертации, ВНИИМ, 1966.
24. Рождественская Т. Б. Электрические компараторы для точных измерений тока, напряжения и мощности. Стандартгиз, 1964.
25. Стракун Г. И., Зорин Д. И., Долицкий И. Н. Прибор для объективного измерения рефракции неастигматических очковых линз. «Оптико-механическая промышленность», 1967, № 9.
26. Таубе Б. С. Устройство для измерения действующего значения переменного тока или напряжения. Авторское свидетельство № 194183, «Бюлл. изобр.», 1967, № 8.
27. Зорин Д. И., Таубе Б. С. Анализ погрешности автоматических компараторов одновременного сравнения. Труды метрологических институтов СССР, вып. 98 (158), Изд-во стандартов, 1968.
28. Таубе Б. С. Способ измерения напряжения переменного тока. Авторское свидетельство № 205139, «Бюлл. изобр.», 1967, № 23.
29. Зейденберг Е. Д. Кибернетика и электронизмерительная техника. «Знание», 1968.
30. Achlier Ch. Der Kleinrechner als Messinstrument. I Messtechnik, 1968, Bd 7, № 7, S. 147.
31. Амауни Н. Л., Васильев Б. В. Выбор оптимальных размеров катушки взаимной индуктивности. Труды институтов Госкомитета, вып. 79 (139), Изд-во стандартов, 1965.
32. Долинский Е. Ф., Васильев Б. В. Способ наименьших квадратов при нелинейных условных уравнениях совместных измерений. «Измерительная техника», 1969, № 1.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

А. Я. БЕЗИКОВИЧ, Д. И. ЗОРИН, С. П. ЭСКИН
ВНИИМ

О ПОВЕРКЕ ПОКАЗЫВАЮЩИХ ПРИБОРОВ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Методы и образцовая аппаратура, применяемые в настоящее время для поверки показывающих приборов, основаны на статическом режиме поверки, имитирующем условия эксплуатации приборов. Этот режим характерен тем, что основную погрешность и вариацию показаний прибора определяют при полной остановке указателя на поверяемых отметках шкалы.

В последнее время исследуют методы автоматической поверки показывающих приборов и разрабатывают образцовую аппаратуру, обеспечивающую автоматическую поверку приборов в динамическом режиме [1—3], т. е. в режиме, при котором автоматическое отсчитывание показаний и определение погрешности поверяемого прибора производится в процессе непрерывного перемещения указателя вдоль шкалы*. Динамический режим, обеспечивая существенное упрощение схемы и конструкции автоматической аппаратуры, повышение ее производительности и надежности [4], связан с возникновением методической, так называемой динамической погрешности, зависящей от динамических характеристик поверяемого прибора и от скорости изменения подаваемого на прибор (входного) сигнала. Вопросы оценки этой погрешности поверки приборов и методов ее исключения достаточно подробно рассмотрены в ряде работ [5—7] и здесь мы на них останавливаться не будем.

Целью настоящей статьи является рассмотрение возможного влияния динамического режима поверки на изменение основной погрешности поверяемого прибора и вариации его показаний вследствие изменения трения подвижной части приборов на кернах при переходе от статического режима поверки к динамическому. Решение этой задачи имеет принципиальное значение

* Здесь и далее под автоматическим отсчитыванием понимают фиксацию показаний приборов при их автоматической поверке.

для ответа на вопрос об адекватности статического и динамического режимов поверки и, следовательно, о допустимости последнего.

В наиболее общем виде зависимость момента трения $M_{тр}$ подвижной части при ее вращении можно представить в виде трехчленного полинома, что подтверждается, в частности, исследованиями трения в электрических счетчиках [8]:

$$M_{тр} = a + b \frac{d\alpha}{dt} + c \frac{d^2\alpha}{dt^2}, \quad (1)$$

где a , b , c — постоянные, определяемые видом и конструкцией подвижной части прибора;

α — угол поворота подвижной части.

В этом случае общее уравнение движения подвижной части поверяемого прибора преобразуется к виду [9]

$$(J \mp c) \frac{d^2\alpha}{dt^2} + (P \mp b) \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = M \pm a, \quad (2)$$

где J и P — соответственно момент инерции и коэффициент успокоения подвижной части,

W — удельный противодействующий момент,

M — вращающий момент.

Знаки плюс и минус перед постоянными a , b и c в уравнении (2) относятся к возрастающим и убывающим показаниям прибора соответственно.

Решая уравнение (2) относительно α и пренебрегая быстро затухающей переменной составляющей переходного процесса, подобно тому, как это сделано в работе [5], а также учитывая, что знаки погрешности от трения и динамической погрешности $\delta_{др}$ совпадают, получим выражение последней

$$\delta_{др} = - \left(\frac{2\beta'}{\omega_0' t_m} + \frac{a}{W\alpha_m} \right), \quad (3)$$

где $\beta' = \frac{P+b}{2\sqrt{(J+c)W}}$ и $\omega_0' = \sqrt{\frac{W}{J+c}}$ — соответственно степень успокоения и круговая частота собственных колебаний подвижной части прибора при наличии момента трения, изменяющегося по закону (1);

t_m — время линейного изменения подаваемого на прибор сигнала от нуля до максимального значения, соответствующего отклонению α_m .

Заменяя в выражении (3) динамические характеристики β' и ω_0' на конструктивные, входящие в общее уравнение движения, получим

$$\delta_{др} = \left(\frac{P+b}{W t_m} + \frac{a}{W\alpha_m} \right). \quad (4)$$

При отсутствии трения, как показано в работе [5], динамическая погрешность равна

$$\delta_d = -\frac{2\beta}{\omega_0 t_m} = -\frac{P}{W t_m}, \quad (5)$$

где $\beta = \frac{P}{2\sqrt{JW}}$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{W}{J}}$.

Из сравнения выражений (4) и (5) следует, что наличие момента трения приводит к увеличению динамической погрешности на величину

$$\Delta\delta_{дт} = -\left(\frac{b}{W t_m} + \frac{a}{W \alpha_m}\right) = -\frac{1}{W} \left(\frac{b}{t_m} + \frac{a}{\alpha_m}\right). \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет сделать вывод о том, что дополнительная составляющая динамической погрешности $\Delta\delta_{дт}$, обусловленная моментом трения подвижной части поверяемого прибора (первый член), есть постоянная для данной скорости изменения входного сигнала и увеличивает несколько абсолютное значение динамической погрешности по сравнению с погрешностью (5). Поэтому ее влияние при двухскоростной поверке устраняется [7].

Второй член выражения (6) является неизменной величиной, характеризующей статическое трение, одинаковое как для статического, так и для динамического режимов поверки.

Полученные результаты являются теоретическим обоснованием допустимости динамического режима поверки при использовании метода исключения динамической погрешности, основанного на обработке результатов при двухскоростной поверке [7].

Указанные выводы не противоречат и второй точке зрения на природу трения, согласно которой [10], при сухом трении скольжения для чистых поверхностей и малых скоростей движения (случае, отвечающем условиям работы пары керн — подпятник) трение при установившемся движении не зависит от скорости. В этом случае в выражении (1) следует постоянные b и c положить равными нулю, тогда в выражении (6) первый член также будет равен нулю, и общее заключение о допустимости поверки приборов в динамическом режиме остается в силе.

Из проведенного анализа остается, правда, неясным вопрос о влиянии на изменение вариации показаний перехода от трения покоя к трению в движении при некоторой, достаточно малой скорости вращения подвижной части. Выяснение этого вопроса возможно только экспериментальным путем. Для этой цели, а также для подтверждения полученных теоретических положений, было проведено тщательное экспериментальное исследование на примере большой группы электронизмерительных приборов различной конструкции и классов точности. При исследовании приборы со стрелочными указателями многократно поверяли на макете автоматической поверочной установки [3]. Моменты совмещений указателя с поверяемыми отметками шкалы опреде-

лялись автоматически с помощью оптико-электронного считывающего устройства, а погрешности поверяемого прибора в статическом и динамическом режимах также автоматически измерялись быстродействующим цифровым измерительным устройством. Условия поверки в обоих режимах (положение прибора, окружающая температура, влажность, время прогрева, механические условия и т. д.) сохранялись неизменными.

Исследование проводили в два этапа, целью которых было соответственно:

1) проверка линейной зависимости динамической погрешности от скорости изменения входного сигнала и соответствия ее значений теоретическим выражениям;

2) сличение результатов поверки и вариации показаний приборов с трением при поверке в статическом и динамическом режимах в широком диапазоне изменения скоростей входного сигнала (соответствующих $t_m = 25 + 400$ с).

В процессе первого этапа исследования была поверена в динамическом режиме большая группа магнитоэлектрических приборов разной конструкции (типов М108, М1107, МВА-47/5 и др.), динамические характеристики которых (β и ω_0) были предварительно измерены. Динамические погрешности определяли путем сравнения результатов поверки в статическом и динамическом режимах при различных скоростях изменения входного сигнала. Поверки осуществлялись в одних и тех же условиях непосредственно одна за другой при неизменном положении поверяемых приборов, чтобы исключить возможность искажения результатов от изменения внешних влияний и вариации показаний приборов.

В табл. 1 приведены результаты исследования одного из приборов типа М108/1, кл. 0,2. Эти и аналогичные данные, полученные для других приборов, с высокой точностью подтверждают теоретические положения о линейной зависимости динамической погрешности поверки приборов разных конструкций от скорости изменения подаваемого на них сигнала и о точном соответствии этих значений теоретическим выражениям. Эти результаты являются одновременно и косвенным подтверждением постоянства погрешности от трения при переходе от статического режима к динамическому, а также и при переходе на разные скорости поверки в динамическом режиме.

Для прямой проверки и подтверждения указанного положения на втором этапе исследования был проведен специальный эксперимент по изучению характера вариации показаний и основной погрешности поверяемого прибора при переходе от статического к динамическому режиму поверки. Для повышения достоверности результатов каждый прибор многократно поверяли на одной из отметок шкалы в одних и тех же условиях, при неизменном положении поверяемого прибора и чередовании статического и динамического режимов. Получаемые результаты статистически обрабатывали и определяли средние арифметические значения

погрешностей в статическом и динамическом режимах, динамической погрешности и средние квадратические погрешности результатов измерений. При этом полагали, что характер изменения вариации показаний в каждом из циклов поверки носит случайный характер. На основе этих данных рассчитывали среднее значение вариации показаний прибора при поверке в статическом и динамическом режимах при указанных скоростях изменения входного сигнала.

Применяемая при исследовании образцовая аппаратура обеспечивала автоматическую регистрацию совмещений указателя с поверяемой отметкой шкалы с погрешностью менее 0,002—

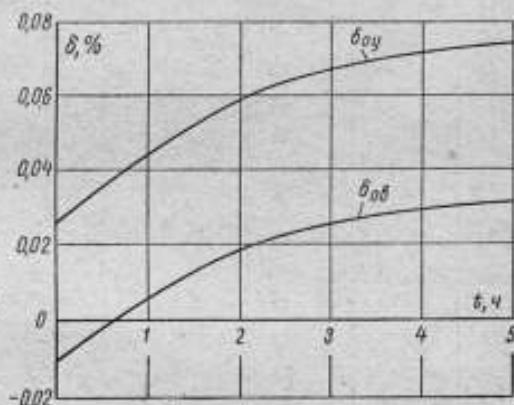


График временной нестабильности показаний поверяемого прибора.

0,005%, автоматическое измерение погрешности с неточностью порядка 0,005% при временной нестабильности менее $\pm 0,002\%$ за время циклов поверки. Все это обеспечивало высокую точность и воспроизводимость результатов поверки.

В процессе подготовки к исследованию выяснилось, что при той чувствительности и точности автоматической аппаратуры, которые имеют место и которые необходимы в данном эксперименте, начинает сказываться собственная нестабильность поверяемого прибора, обусловленная изменением его показаний во времени вследствие нагрева от измеряемого тока. Поэтому для более достоверного сравнения значений вариации показаний при поверках в статическом и динамическом режимах последние производили циклически с обоими режимами в каждом цикле. Результаты двух непосредственно следующих друг за другом поверок сравнивали между собой. В первые полтора часа наиболее интенсивного изменения показаний прибора поверку производили только в статическом режиме для выяснения характера этих изменений.

В табл. 2 сведены экспериментальные и расчетные данные исследования прибора M108/1 при автоматической поверке его на отметке «40» и при числе измерений $n = 20$. На рисунке по результатам этого исследования представлен график изменения

Результаты поверки прибора типа М108/1, кл. 0,2 (в процентах)

Поверяемые отметки	Статистический режим (средние арифметические результаты, $\sigma = 0,005\%$)		Динамический режим (средние арифметические)							
	$\delta_{ов}$	$\delta_{оу}$	$t_m = 500$ с				$t_m = 200$ с			
			$\delta_{в}$	$\delta_{у}$	$\delta_{дв}$	$\delta_{ду}$	$\delta_{в}$	$\delta_{у}$	$\delta_{дв}$	$\delta_{ду}$
10	+0,01	+0,04	-0,05	+0,09	-0,06	+0,04	-0,15	+0,19	-0,16	+0,14
20	05	08	03	13	07	05	13	20	17	13
30	06	09	02	14	08	05	09	22	15	14
40	08	08	01	14	09	06	10	21	18	13
50	03	07	04	12	08	05	12	21	16	14
60	05	10	02	14	07	04	11	23	16	13
70	04	08	03	12	07	04	11	23	15	15
80	07	08	02	12	07	04	11	24	17	16
90	04	07	02	14	06	07	11	23	15	16
100	07	10	01	15	08	05	10	24	17	14
110	08	10	01	15	09	05	10	23	18	13
120	06	09	01	14	07	05	08	22	15	13
130	05	06	03	13	08	07	13	20	18	14
140	06	12	02	17	07	05	09	25	15	13
150	06	10	01	14	07	04	11	22	16	13
Значения динамической погрешности:										
средние арифметические, $\delta_{д ср}$, %			±0,061				±0,15			
средние квадратические, $\sigma_{д}$, %			±0,012				±0,018			
Расчетные значения динамической погрешности, %			0,06				0,15			

Примечание. Через $\delta_{в}$ и $\delta_{у}$ с индексами «в» и «у», соответствующими мерным погрешностям прибора на каждой из поверяемых отметок в статическом $\delta_{д}$ — вычисленная динамическая погрешность; В последних двух столбцах таблицы приведены значения динамической погрешности, рассчитанные по формулам (5) и известным динамическим характеристикам приборов.

Таблица 1

результаты, $\sigma = 0,01 \div 0,03\%$								Расчетное значение $\delta_{д1} = \delta_{д2} - \delta_{д1}$ ($t_{m1} = 100, t_{m2} = 50,$ $n = 2$)		
$t_m = 100$ с				$t_m = 50$ с				$\delta_{дв}$	$\delta_{ду}$	
$\delta_{в}$	$\delta_{у}$	$\delta_{вд}$	$\delta_{ду}$	$\delta_{в}$	$\delta_{у}$	$\delta_{дв}$	$\delta_{ду}$			
-0,31	+0,33	-0,32	+0,28	-0,59	+0,66	-0,60	+0,61	-0,28	+0,33	
25	39	32	31	54	70	59	62	27	31	
26	38	32	29	55	71	61	62	29	33	
26	35	34	27	54	68	62	60	28	33	
27	38	31	31	54	70	58	63	27	32	
27	39	32	29	54	72	59	62	27	33	
27	36	31	28	54	70	58	62	27	34	
24	37	30	29	52	69	59	61	29	32	
26	38	30	31	55	71	59	64	29	33	
25	39	32	29	53	73	60	63	28	34	
23	38	31	28	51	70	59	60	28	32	
25	36	31	27	56	70	62	61	31	34	
27	33	32	28	56	64	61	58	29	30	
25	39	31	27	55	69	61	57	30	30	
27	39	32	29	54	70	60	60	28	31	
			±0,301				±0,603		±0,302	
			±0,024				0,028		0,031	
			0,30				0,60		0,30	

возрастающим и убывающим показаниям поверяемого прибора, обозначены из динамическом режиме соответственно; σ — средние квадратические погрешности результата, грешности, рассчитанные по результатам двухскоростной поверки для $t_m = 100$ с, теоретическим формулам (5) и известным динамическим характеристикам при-

показаний поверяемого прибора, характеризующий его собственную нестабильность во времени и построенный по данным поверки в статическом режиме для всех последовательных во времени циклов поверки. Из графика видно, в частности, что после 1,5-часового прогрева прибора изменение его показаний за время порядка 10—15 мин, необходимое для осуществления цикла поверки (в статическом и динамическом режимах), не превышает 0,002%, что допустимо для требуемой точности исследования.

Рассмотрение результатов исследования, приведенных в табл. 2, показывает, что в большом диапазоне изменения скоростей входного сигнала, охватывающем практически все возможные случаи поверки в динамическом режиме, среднее значение вариации показаний и основной погрешности с большой точностью остается неизменным при переходе от статического режима поверки к динамическому. Это прямо свидетельствует о независимости момента трения подвижной части от скорости движения указателя при исследованных скоростях изменения входного сигнала и, следовательно, объективно подтверждает допустимость поверки показывающих электроизмерительных приборов в динамическом режиме.

Более того, анализ результатов поверки в динамическом режиме показывает, что стабильность и воспроизводимость их в этом режиме гораздо более высокая, чем при поверке в статическом режиме. Большой разброс результатов в последнем случае объясняется, очевидно, различным характером ручного наведения указателя на поверяемую отметку при отдельных измерениях. Действительно, как нетрудно заметить из полученных значений средней арифметической погрешности поверки, приведенных в табл. 2, относительное значение средней квадратической погрешности $W = \sigma/\delta_{\text{ср}}$ («коэффициент вариации») при поверке в статическом режиме составляет в среднем $W_{\text{ст}} \cong 0,1 + 0,2$, а в динамическом режиме $W_{\text{д}} \cong 0,005 + 0,01$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Немировский А. С., Горшков Б. П. Способ поверки шкальных приборов. Авт. свидет. СССР № 181315, «Бюлл. изобр.», 1966, № 9.
2. Эскин С. П. Устройство для поверки электроизмерительных приборов. Авт. свид. СССР № 194948, «Бюлл. изобр.», 1967, № 9.
3. Безикович А. Я., Зорин Д. И. и др. Аппаратура для автоматической поверки в динамическом режиме амперметров, вольтметров и ваттметров на постоянном токе. «Измерительная техника», 1969, № 6.
4. Безикович А. Я., Зорин Д. И., Эскин С. П. Пути создания аппаратуры для автоматической поверки показывающих электроизмерительных приборов. «Измерительная техника», 1967, № 11.
5. Эскин С. П. О методической погрешности поверки приборов непосредственной оценки в динамическом режиме. Труды метрологических институтов СССР, вып. 97 (157), Изд-во стандартов, 1968.
6. Эскин С. П. Об одном методе уменьшения погрешности поверки электроизмерительных приборов в динамическом режиме. Труды метрологических институтов СССР, вып. 98 (158), Изд-во стандартов, 1968.

7. Зорни Д. И., Эскин С. П. Способ автоматической поверки измерительных приборов. Авт. свид. № 197003, «Бюлл. изобр.», 1967, № 13.
8. Горюнов П. Н., Пигин С. М., Шумиловский Н. Н. Электрические счетчики. Госэнергоиздат, 1951.
9. Под ред. Пономарева Н. Н. Теория, расчет и конструирование электронизмерительных приборов. Госэнергоиздат, 1943.
10. Зайцев А. К. Основы учения о трении, износе и смазке машин, ч. 1. Машгиз, 1947.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

А. Я. БЕЗИКОВИЧ, В. И. ПРИЦКЕР
ВНИИМ

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СЧИТЫВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ * В МЕТРОЛОГИИ

Устройства, применяемые для преобразования оптических сигналов в электрические и получившие название оптико-электронных считывающих устройств (ОЭСУ), широко используют в области линейных измерений и при поверке измерительных приборов. ОЭСУ находят применение при решении таких задач, как отсчитывание показаний по шкале измерительных приборов с целью передачи их на расстояние и ввода в ЭЦВМ, при измерении расстояний между несколькими объектами, для обработки информации, представленной в графической форме, и т. д. При решении каждой конкретной задачи к ОЭСУ могут предъявлять самые разнообразные требования, в связи с чем представляет интерес рассмотрение вопроса об области применения ОЭСУ того или иного типа.

Наиболее существенной характеристикой ОЭСУ является точность преобразования оптических сигналов в электрические.

Точность преобразования, являющуюся характеристикой интегральной, определяемой совокупностью свойств всех звеньев ОЭСУ, нельзя рассматривать в отрыве от характера задачи, решаемой считывающим устройством.

Все задачи, связанные с преобразованием оптических сигналов в электрические, в первом приближении можно свести к двум основным:

измерение расстояния между двумя границами «свет—тень»;
регистрация момента совмещения двух границ (или штрихов)
при их взаимном сближении.

* В соответствии с ГОСТ 16263—70 «Метрология. Термины и определения», операция, выполняемая рассматриваемыми устройствами, должна называться «отсчитыванием показаний», следовательно, устройства должны называться отсчитывающими. Термин, примененный в статье, сохранен как принятый в ранее опубликованных работах. *Ред.*

Первая задача возникает в области линейных измерений, при автоматической поверке измерительных приборов с установкой показаний образцового прибора [1, 2] и отсчитывании показаний по шкале поверяемого прибора [3]. Вторая задача является основной при поверке приборов с установкой показаний поверяемого прибора [1]. Под углом зрения этих двух задач и будут рассмотрены ниже возможности применения и точностные характеристики ОЭСУ.

На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема ОЭСУ. Оптический сигнал от объекта 1 через оптическую систему 2 и сканирующее устройство 3 поступает на фотоприемник 4,

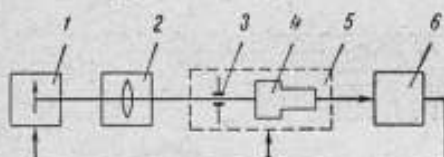


Рис. 1. Структурная схема ОЭСУ.

1 — объект поверки, 2 — оптическая система, 3 — сканирующее устройство, 4 — фотоприемник; 5 — устройство обработки информации, 6 — опто-электронный преобразователь.

преобразующий его в электрический сигнал. Затем последний с помощью устройства обработки информации (УОИ) 6 преобразуется в соответствии с поставленной задачей. Совокупность сканирующего устройства и фотоприемника образует опто-электронный преобразователь (ОЭП) 5.

В зависимости от назначения и характера решаемой задачи структурная схема ОЭСУ может быть разомкнутой или замкнутой [4]. В последнем случае выходной сигнал УОИ по цепи обратной связи воздействует на ОЭП (автоматические измерительные системы) или на объект (автоматические поверочные системы) [4].

Как известно, сканирующее устройство должно обеспечить последовательное восприятие оптических сигналов от отдельных достаточно малых участков объекта. Это достигается обычно путем периодически повторяющегося перемещения (сканирования) диафрагмы относительно фотоприемника, вследствие чего на последний попадает световой поток лишь от определенного элемента изображения. Классификация ОЭП по принципу сканирования представлена в табл. 1.

Таблица 1

Принципы сканирования в опто-электронных преобразователях (ОЭП)

Группа	Тип опто-электронных преобразователей		
	механические	электронно-лучевые	с бегущим световым лучом
1	Колебания: диафрагмы при неподвижном изображении	Отклонения: электронного луча	Перемещение светового луча: электромеханическими средствами
2	изображения при неподвижной диафрагме	электромагнитного поля	электронными средствами

В механических ОЭП роль диафрагмы выполняет отверстие в непрозрачном экране, либо перемещаемое в плоскости изображения с помощью электромагнитной системы (группа 1), либо неподвижное (группа 2). В последнем случае изображение объекта приводят в колебательное движение с помощью отражающих или преломляющих оптических элементов, обычно электрически управляемых.

В электронно-лучевых ОЭП роль диафрагмы выполняет сканирующий электронный луч (группа 1) или электромагнитное поле, отбирающее в данный момент времени электроны лишь с определенного участка фотослоя преобразователя (группа 2). Особенностью ОЭП этого типа является конструктивное единство сканирующего устройства и фотоприемника, что представляет, несомненно, их преимущество.

Типичные представители электронно-лучевых ОЭП: телевизионные передающие трубки с накоплением световой энергии (видикон, суперортикон и т. д., группа 1) и без накопления энергии (диссектор, группа 2).

И, наконец, в ОЭП с бегущим световым лучом функцию сканирующей диафрагмы выполняет сфокусированный световой луч, перемещаемый по полю объекта посредством отражающих или преломляющих оптических элементов (группа 1) или с помощью электронных средств (световое пятно электронно-лучевой трубки—группа 2).

В механических ОЭП и ОЭП с бегущим световым лучом сканирующее устройство и фотоприемник конструктивно разделены, причем в качестве последнего чаще всего используют фотоэлектрические устройства с умножением тока сигнала (ФЭУ) и значительно реже — фотоэлементы, фотодиоды и фототранзисторы.

Уже из этой краткой характеристики ОЭП видно, что возможности применения и свойства различных ОЭП далеко не одинаковы. Однако из-за многообразного применения ОЭСУ не представляется возможным дать окончательные рекомендации по выбору типа ОЭП. Тем не менее, можно привести некоторые общие соображения, облегчающие решение этой задачи.

Существенное влияние на выбор ОЭП оказывает характер объекта, параметры которого подлежат измерению. Действительно, ряд объектов принципиально не допускает освещения внешним дополнительным источником света (излучающие объекты, информация о которых искажается или теряется полностью при их освещении), а другие объекты оказываются недоступными для такого освещения (например, астрономические объекты). Очевидно, что в этом случае возможно использовать лишь механические или электронно-лучевые ОЭП. Зачастую яркость объекта оказывается настолько малой, что приходится применять наиболее чувствительные ОЭП (механические с ФЭУ в качестве фотоприемника или электронно-лучевые с накоплением световой энергии).

При решении задач, связанных с измерением расстояний, к оптико-электронному преобразователю, как правило, предъявляют требование большого поля зрения. Применение механических ОЭП группы 1 в этом случае не всегда возможно, так как поле зрения этих преобразователей ограничивается максимально достижимой амплитудой колебаний диафрагмы и не превышает 1—2 мм. Преобразователи других типов могут обеспечить значительно большее поле зрения, ограничиваемое лишь размером светочувствительного слоя фотоприемника (10—20 мм).

И, наконец, при предварительном выборе типа ОЭСУ должна быть принята во внимание требуемая траектория сканирования. В большинстве случаев для решения поставленной задачи достаточно прямолинейная траектория, легко осуществляемая в ОЭП любого типа. Однако при измерениях координат объекта на плоскости, для слежения за произвольно перемещающимся объектом и т. д. может потребоваться более сложная траектория сканирования: криволинейная или многострочная, при которой диафрагма последовательно проходит ряд параллельно расположенных «строк». Электронно-лучевые ОЭП и ОЭП с бегущим световым лучом группы 2, позволяющие сравнительно просто обеспечить любую траекторию сканирования, имеют в этом случае существенное преимущество перед всеми прочими ОЭП.

Подводя некоторые итоги, отметим, что электронно-лучевые ОЭП с накоплением энергии могут быть с успехом использованы для решения практически всех перечисленных задач, в то время как область применения преобразователей других типов ограничивается в той или иной мере ограниченной либо свойствами объекта, либо возможностями самого преобразователя.

Для оценки метрологических свойств различных ОЭСУ рассмотрим погрешности, вносимые считывающим устройством при решении двух основных сформулированных выше задач: измерений расстояний, заданных двумя оптическими границами, и регистрации совмещений этих границ.

Проанализируем погрешности для случая использования электронно-лучевых преобразователей, отмечая особенности применения ОЭП других типов.

Измерения расстояний

При измерении расстояния l_x , заданного двумя границами «свет—тень», ОЭСУ последовательно преобразует сигнал l_x в интервал времени t_x и далее в число импульсов N_x , причем уравнение измерения имеет вид

$$l_x = \beta k_1 k_2 N_x, \quad (1)$$

где β — увеличение оптической системы,
 k_1, k_2 — коэффициенты указанных выше преобразований,
 равные $k_1 = l_x/t_x$ и $k_2 = t_x/N_x$.

Ниже дан анализ наиболее существенных погрешностей, возникающих в отдельных звеньях считывающего устройства: ОЭП, УОИ и оптической системе.

Погрешности, обусловленные шумами выходного сигнала и конечным значением крутизны переходной характеристики ОЭП

При сканировании идеально резкой оптической границы «свет—тень» выходной сигнал ОЭП, как известно, имеет конечную крутизну, определяемую поперечным (в направлении сканирования) размером диафрагмы и распределением энергии в ней.

Если наклон $\operatorname{tg} \alpha_0$ переходной характеристики $h(x)$ в точке, соответствующей истинному положению границы «свет—тень», и среднее квадратическое значение ψ отношения сигнал—шум известны, то среднее квадратическое значение искомой погрешности, согласно рис. 2, определится выражением

$$\sigma_\psi = \frac{1}{\beta \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot \psi} \quad (2)$$

Выражения для $h(x)$, $\operatorname{tg} \alpha_0$ и ψ для различных типов ОЭП и конфигураций диафрагм приведены в работе [5]. В табл. 2 эти выражения даны для механических ОЭП с ФЭУ в качестве фотоприемника и для электронно-лучевых ОЭП с накоплением энергии.

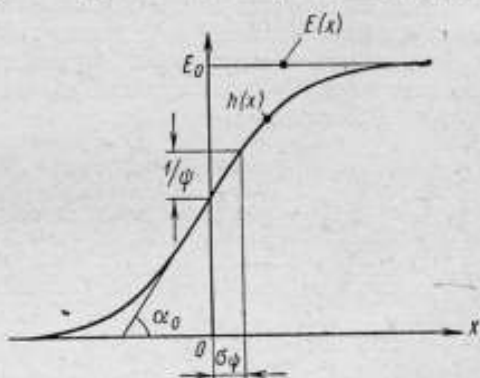


Рис. 2. Переходная характеристика и погрешность от шумов электронно-лучевого ОЭП.

Таблица 2

Сравнительные данные механических и электронно-лучевых ОЭП

ОЭП	$h(x)$	$\operatorname{tg} \alpha_0$	ψ	η
Механические	$1/2 \left[1 + 2 \left(\frac{x}{d} \right) \right]$	$\frac{1}{d}$	$\sqrt{\frac{\varepsilon E_0 d^2}{4e \Delta f_0}}$	1
Электронно-лучевые	$1/2 \left[1 + \Phi \left(\frac{2x}{d_e} \right) \right]$	$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{d_e}$	$\sqrt{\frac{\pi e E_0 d_e^2 Z_x Z_y}{8e \Delta f_0}}$	$\frac{1}{\sqrt{2Z_x Z_y}}$

В табл. 2:

d — сторона квадратной диафрагмы (распределение энергии внутри диафрагмы равномерное).

- d_e — условный диаметр круглой диафрагмы с нормальным распределением энергии,
 ϵ, E_0 — чувствительность и освещенность фотослоя преобразователя,
 Δf_0 — полоса частот выходного сигнала ОЭП,
 Z_x — отношение поля зрения ОЭП к размеру диафрагмы,
 Z_y — число строк при многострочном сканировании,
 Φ — интеграл вероятности,
 η — относительный параметр.

Так как погрешность (2) возникает на каждой из границ измеряемого расстояния l_x , то, считая погрешности статистически независимыми и подставляя выражение для $\text{tg } \alpha_0$, получим относительную шумовую погрешность измерения l_x электронно-лучевыми ОЭП в виде

$$\sigma_{\text{оф}} = \sqrt{2\pi} \frac{r_e}{\psi \beta l_x}, \quad (3)$$

где $r_e = d_e/2$ — условный радиус поперечного сечения электронного луча.

Для сравнения этой погрешности с аналогичной погрешностью $\sigma_{\text{офм}}$ механического ОЭП в табл. 2 приведены выражения для отношения $\eta = \sigma_{\text{оф}}/\sigma_{\text{офм}}$ при условии, что значения $\epsilon, E_0, \Delta f_0$ для обоих ОЭП одинаковы и поперечные размеры диафрагм равны, т. е. $d = d_e$. Как видно из таблицы, для электронно-лучевых ОЭП $\eta \ll 1$ ($Z_x \geq 300, Z_y \geq 1$), что говорит о преимуществе электронно-лучевых преобразователей с накоплением энергии.

Выражение (2) является общим и может быть использовано для анализа шумовых погрешностей ОЭП с бегущим световым лучом.

Для группы 1 преобразователей этого типа наклон переходной характеристики в первом приближении совпадает с $\text{tg } \alpha_0$ механических ОЭП, а для группы 2 — с $\text{tg } \alpha_0$ электронно-лучевых ОЭП.

Погрешность от нелинейности сканирования

Погрешность этого рода возникает в ОЭП в процессе преобразования сигнала длины l_x в интервал времени t_x .

Для электронно-лучевых ОЭП нелинейность сканирования определяется нелинейностью отклоняющего тока (или напряжения), закон изменения которого в большинстве случаев носит экспоненциальный характер.

В этом случае закон движения электронного луча может быть написан в виде

$$l = f(t) = l_x + \frac{B}{2} = \frac{B}{1 - e^{-\alpha t}} (1 - e^{-\alpha T_x}), \quad (4)$$

где l_x — координата центра луча в момент t_x , отсчитанная от центра поля зрения;

B, T — поле зрения и время прямого хода луча;

α — постоянная, определяемая коэффициентом нелинейности k_n тока отклонения.

Обычно k_n определяют как

$$k_n = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_{\text{cp}}}, \quad (5)$$

где v — скорость движения луча максимальная, минимальная и средняя соответственно.

Установим связь между k_n и α . Дифференцируя уравнение (4) и подставляя в выражение (5)

$$v_{\max} = \left. \frac{dl}{dt} \right|_{t=0}, \quad v_{\min} = \left. \frac{dl}{dt} \right|_{t=T}, \quad v_{\text{cp}} = \frac{B}{T},$$

получим

$$k_n = \alpha T. \quad (6)$$

Покажем, что при сканировании по закону (4) скорость движения луча dl/dt становится равной скорости идеально линейного сканирования $v_{\text{cp}} = B/T$ приблизительно в центре поля зрения.

Приравняв $dl/dt \approx B/T$ и решая полученное уравнение, с помощью разложения вида

$$e^{-x} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^n}{n!} \quad (7)$$

и

$$\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{x^n}{n}, \quad (8)$$

получим

$$\frac{t_0}{T} \approx \frac{1}{2} - \frac{\alpha T}{6} + \frac{\alpha^2 T^2}{24} - \dots,$$

откуда с достаточной степенью точности следует $t_0 = T/2$. Поэтому погрешности измерений длин двух отрезков, лежащих по разные стороны от центра поля зрения, будут иметь противоположные знаки. Можно также показать, что модули этих погрешностей с точностью до величин второго порядка малости одинаковы. Таким образом, оказывается достаточным определить погрешность измерения отрезка, лежащего, например, справа от центра поля зрения ($x > 0$).

Как следует из рис. 3а, абсолютное значение этой погрешности равно

$$\Delta t_x = t_{x1} - t_{x0} = \Delta t_0 - \Delta t_1.$$

Для указанных интервалов времени из уравнения (4) получим

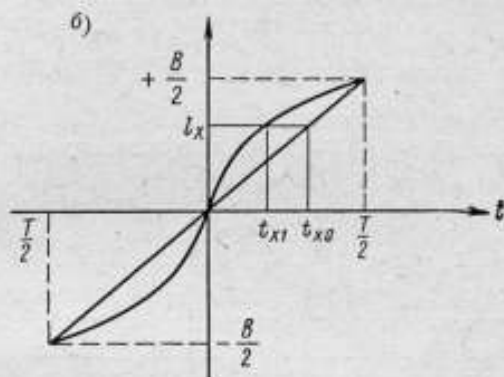
$$\Delta t_0 = \frac{T}{2} + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1 - e^{-\alpha T}}{2},$$

$$\Delta t_1 = \frac{T}{B} \left(l_x + \frac{B}{2} \right) + \frac{1}{\alpha} \ln \left[1 - \frac{(1 - e^{-\alpha T})(l_x + B/2)}{B} \right]. \quad (9)$$

можно считать случайной и распределенной по закону Симпсона, вследствие чего ее среднее квадратическое значение будет, согласно работе [6], равно

$$\sigma_{\text{оис}} = \frac{k_{\text{н}}}{4\sqrt{6}}. \quad (12)$$

Полученные выше выражения остаются справедливыми для ОЭП с бегущим световым лучом группы 2, так как принцип сканирования в этих преобразователях аналогичен рассмотренному.



б — при синусоидальном законе сканирования.

Найдем погрешность нелинейности при синусоидальном законе движения диафрагмы (рис. 3 б)

$$l_x = f(t) = \frac{B}{2} \sin \frac{\pi t x_1}{T}, \quad (13)$$

характерном для механических сканирующих устройств.

Как и ранее, находя из равенств (13) абсолютную погрешность измерения l_x , равную $\Delta t = t_{x1} - t_{x0}$, и относя ее к t_{x0} , для относительной погрешности получим

$$\Delta_{\text{оис}} = \frac{\Delta t}{t_{x0}} = - \left(1 - \frac{B}{\pi l_x} \arcsin \frac{2l_x}{B} \right). \quad (14)$$

Анализ погрешности (14) показывает, что для отрезка $l_x \leq B/4$, расположенного по одну сторону от центра поля зрения, погрешность $\Delta_{\text{оис}}$ достигает 27%.

Последнее обстоятельство практически исключает возможность использования синусоидального закона сканирования при измерении расстояний.

Разумеется, в механических ОЭП, так же как и в электронно-лучевых, может быть обеспечен закон сканирования, близкий к линейному, однако частота сканирования при этом резко снижается, что приводит к возрастанию динамической погрешности, рассмотренной ниже.

Погрешность от изменения амплитуды сканирования

Изменение амплитуды сканирования приводит к изменению коэффициента преобразования измеряемого расстояния в интервал времени.

Напишем уравнение (4) в виде

$$l_x = k I_{\max} (1 - e^{-\alpha t_x}), \quad (15)$$

где k — коэффициент преобразования «ток—отклонение»,
 I_{\max} — максимальное значение отклоняющего тока.

При изменении I_{\max} на ΔI получим для отрезка l_x

$$l_x = k (I_{\max} \pm \Delta I) [1 - e^{-\alpha (t_x \pm \Delta t)}]. \quad (16)$$

Приравнивая правые части уравнений (15) и (16) и воспользовавшись разложением (7), найдем относительную погрешность измерения

$$\delta_{0c} = \frac{\Delta t}{t_x} \cong \frac{\Delta I}{I_{\max}} = \delta I_{\max},$$

где δI_{\max} — относительное изменение тока отклонения.

Считая изменение тока отклонения пропорциональным напряжению питания отклоняющей системы, согласно работе [6] найдем среднюю квадратическую погрешность в виде

$$\sigma_{0c} = \frac{\delta B}{\sqrt{3}},$$

где δB — относительное изменение амплитуды сканирования, пропорциональное изменению отклоняющего тока δI_{\max} .

Отметим, что с точки зрения влияния δI_{\max} электронно-лучевые ОЭП не имеют преимуществ перед механическими, однако зависимость амплитуды сканирования последних от механических деформаций, тряски, вибраций и т. д. приводит в общем случае к несколько большим значениям погрешности σ_{0c} преобразователей с механическими сканирующими устройствами.

Динамическая погрешность

Погрешность этого рода возникает лишь при изменении измеряемого расстояния во времени и вызвана дискретностью процесса сканирования.

Здесь возможны два основных случая.

1. Сканирующее устройство используют в ждущем режиме, т. е. движение диафрагмы начинается по сигналу, формируемому в момент измерения. В этом случае динамическая погрешность будет распределена в интервале $[0, \delta_{од}]$.

Здесь $\delta_{од} = v_0 T / l_x$ — предельное значение относительной динамической погрешности, где v_0 — скорость изменения l_x в момент измерения.

Согласно работе [6], такая погрешность будет содержать систематическую и случайную составляющие, которые находим по формулам

$$\Delta'_{0д} = + \frac{1}{2} \delta_{0д} = \frac{v_0 T}{2l_x}$$

и

$$\sigma'_{0д} = \frac{\delta_{0д}}{2\sqrt{3}} = \frac{v_0 T}{2\sqrt{3}l_x},$$

где T — время прямого хода диафрагмы.

2. Сканирующее устройство используют в автоколебательном режиме. При этом составляющие погрешности дискретности возрастают до

$$\Delta_{0д} = \frac{v_0}{2F_0 l_x} \text{ и } \sigma_{0д} = \frac{v_0}{2\sqrt{3}F_0 l_x},$$

где F_0 — частота сканирования ($F_0^{-1} > T$).

Следует отметить, что в механических сканирующих системах ждущий режим практически не может быть реализован из-за инерционности этих систем.

Рассмотрим теперь погрешности, вносимые устройством обработки информации УОИ.

Погрешность от нестабильности порогового уровня

Согласно рис. 2, момент совмещения центра сканирующей диафрагмы с истинным положением границы «свет—тень» соответствует моменту достижения выходным сигналом ОЭП уровня $U_{п0} = 0,5U_0$, где U_0 — амплитудное значение сигнала. Указанный момент времени проще всего фиксировать с помощью порогового устройства с порогом, равным $U_{п0}$.

Изменение этого уровня ΔU_n приведет к погрешности фиксации положения оптической границы, равной

$$\delta_{п1} = \pm \frac{1}{\beta \operatorname{tg} \alpha_0} \cdot \frac{\Delta U_n}{U_0} = \pm \frac{\delta U_n}{2\beta \operatorname{tg} \alpha_0}, \quad (17)$$

где $\delta U_n = \Delta U_n / U_{п0}$ — относительная нестабильность порогового уровня.

Общая погрешность δ_n измерения l_x от нестабильности $U_{п0}$ будет равна разности погрешностей, возникающих при фиксации положения каждой границы измеряемого расстояния: $\delta_n = \delta_{п1} - \delta_{п2}$.

При этом, если интервал l_x задан одноименными оптическими границами, соответствующими, например, фронту выходного сигнала ($\operatorname{tg} \alpha_0 > 0$), то $\delta_{п1} = \delta_{п2}$ и $\delta_n = 0$. В противном случае $\delta_n = 2\delta_{п1}$, а среднее квадратическое значение относительной погрешности будет

$$\sigma_{0п} = \frac{2\delta U_n}{\sqrt{3}\beta \operatorname{tg} \alpha_0 l_x} = \sqrt{\frac{\pi}{3}} \cdot \frac{r_s \delta U_n}{\beta l_x}. \quad (18)$$

Выражение (18) получено для электронно-лучевого ОЭП и остается справедливым для ОЭП с бегущим световым лучом (группа 2).

Для преобразователей других типов легко могут быть получены аналогичные выражения путем подстановки в уравнение (17) соответствующего им $\text{tg } \alpha_0$. Значение погрешности σ_{0n} для этих устройств будет значительно больше за счет больших поперечных размеров диафрагмы.

Погрешность дискретности заполнения интервала времени импульсами опорной частоты

Эта погрешность возникает при преобразовании сформированного пороковым устройством интервала времени в число импульсов N_x .

Как известно [6], погрешность дискретности заполнения, являясь композицией двух одинаковых погрешностей, распределенных равномерно, распределена по закону Симпсона в интервале $[0, 2\delta_{дз}]$. Здесь $\delta_{дз} = B/\beta f_0 T$ — погрешность дискретности, равная ступени квантования, где f_0 — частота импульсов заполнения.

Известно также, что при синхронизации импульсов заполнения с началом измеряемого интервала времени t_x и сдвиге этих импульсов на время $\Delta t_x = 1/2f_0$ погрешность дискретности заполнения уменьшается вдвое, а интервал, внутри которого она распределена, становится симметричным.

Таким образом, с учетом закона распределения для средней квадратической относительной погрешности, вызванной дискретностью заполнения, получим

$$\sigma_{0дз} = \frac{B}{2\sqrt{6}\beta f_0 T t_x}.$$

Выше были рассмотрены частные погрешности, возникающие при измерении расстояния l_x в оптико-электронном преобразователе и устройстве обработки информации. В дополнение к рассмотренным погрешностям в общем случае возникает также погрешность $\delta\beta = \Delta\beta/\beta_0$ из-за отклонения увеличения оптической системы от номинального значения β_0 . Однако эта погрешность легко исключается, например предварительной калибровкой всего тракта измерения, и поэтому ниже при нахождении суммарной погрешности измерения ее не учитывали.

Регистрация совмещения

Рассмотрим теперь погрешности, возникающие при регистрации совмещения двух границ «свет—тень».

Очевидно, что в этом случае некоторые из рассмотренных выше погрешностей отсутствуют, так как преобразование «время—число импульсов» перестает быть необходимым, а к преобразова-

нию «длина—время» не предъявляется требование линейности. В соответствии с этим погрешность регистрации совмещения будут вызывать лишь шумы выходного сигнала, нестабильность уровня срабатывания порогового устройства и дискретность сканирования.

Чтобы найти указанные погрешности, рассмотрим форму выходного сигнала при сканировании двух близко расположенных границ «свет—тень». Переходная характеристика ОЭП в этом случае может быть определена как сумма переходных характеристик $h(u_1)$ и $h(u_2)$, возникающих при сканировании каждой из границ в отдельности (рис. 4).

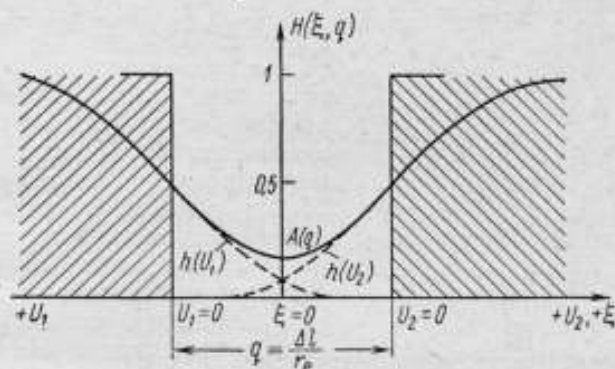


Рис. 4. Переходная характеристика ОЭП при сканировании двух близко расположенных границ «свет—тень». Пунктиром изображены переходные характеристики, возникающие при сканировании каждой границы в отдельности.

Здесь u_1 , u_2 — относительные текущие координаты сканирования $u_{1,2} = x_{1,2}/r_e$, нулевые значения которых совпадают с положением сканируемой границы, а направления соответствуют переходу со светлого участка изображения на темный.

Запишем переходные характеристики $h(u_1)$ и $h(u_2)$ в единой системе координат, в которой начало совмещено с серединой расстояния между границами, а положительное направление абсциссы совпадает с положительным направлением координаты u_2 :

$$\left. \begin{aligned} h(u_1) &= h(-\xi - q/2), \\ h(u_2) &= h(\xi - q/2), \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где $q = \Delta l/r_e$ — относительное расстояние между границами,

$$\xi = -(u_1 - q/2) = u_2 + q/2.$$

Из выражений (19) для суммарной переходной характеристики получим

$$H(\xi, q) = h(u_1) + h(u_2) = h(-\xi - q/2) + h(\xi - q/2). \quad (20)$$

Согласно равенствам (20), минимум $H(\xi, q)$ будет при $\xi = 0$ и равен

$$A(q) = h(-q/2) + h(-q/2) = 2h(-q/2).$$

Учитывая, что для осесимметричных диафрагм $h(-u) = 1 - h(u)$ [5], получим

$$A(q) = 2[1 - h(q/2)]. \quad (21)$$

На рис. 5 изображен график $A = f(q)$, построенный согласно выражению (21) для электронно-лучевого ОЭП. Как видно из графика, истинное совмещение границ соответствует отсутствию провала [$A(0) = 1$] и, следовательно, автоматически его зарегистрировать нельзя. Однако с помощью порогового устройства легко можно зафиксировать момент увеличения минимума переходной характеристики $A(q)$ до некоторого порогового значения $A_n = U_{no}/U_0$, где U_{no} — порог срабатывания порогового устройства. Очевидно, что погрешность регистрации такого совмещения, вызванная шумами и нестабильностью порогового уровня, будет тем меньше, чем больше крутизна $A(q)$ в точке A_n . С точки зрения надежности фиксации совмещения целесообразно выбрать $A_n = 0,5$, тем более, что крутизна функции $A(q)$ в этой точке лишь на 25% меньше максимальной, соответствующей $q = 0$.

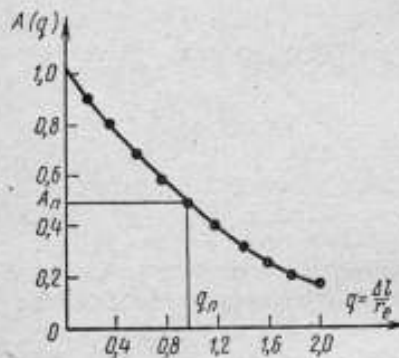


Рис. 5. График функции $A = f(q)$ электронно-лучевого ОЭП.

Из рис. 5 видно, что действительное расстояние между сканируемыми границами в момент автоматической регистрации совмещения равно $\Delta l_n = q_n r_e \approx 0,95 r_e$.

Таким образом, автоматическая регистрация совмещения двух границ «свет—тень» из-за ненулевого поперечного размера диафрагмы всегда связана с возникновением систематической погрешности $\Delta_n = -\Delta l_n$, пропорциональной этому размеру.

Найдем теперь абсолютное значение случайных погрешностей регистрации совмещения, обусловленных шумами и нестабильностью порогового уровня A_n .

По аналогии с выражением (2), среднее квадратическое значение шумовой погрешности можно записать в виде

$$\sigma_{\psi} = \frac{1}{\beta \psi A'(q_n)},$$

где $A'(q_n)$ — наклон функции $A(q)$ в точке $q = q_n$.

Так как, согласно равенству (21) и табл. 3, для электронных ОЭП

$$A'(q_n) = \frac{1}{r_e \sqrt{\pi}} e^{-q_n^2/4},$$

то погрешности от шумов и нестабильности порогового уровня будут равны

$$\sigma_\psi = \frac{r_e e^{q_n^2/4}}{\beta \psi},$$

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{\pi} r_e e^{q_n^2/4}}{2 \sqrt{3} \beta} \delta U_n.$$

Что касается погрешности дискретности сканирования, возникающей при регистрации совмещения движущихся границ, то абсолютное значение ее, как и ранее, определяется выражением $\delta_d = v_0/F_0$ и имеет систематическую и случайную погрешности, соответственно равные $\Delta_d = v_0/2F_0$ и $\sigma_d = v_0/2\sqrt{3}F_0$.

Выражения, полученные для частных погрешностей, сведены в табл. 3.

В соответствии с данными табл. 3 вычислены значения частных погрешностей и найдены значения суммарных погрешностей. Погрешности вычислены для типовых значений параметров считывающего устройства автоматической поверочной установки, указанных в таблице (в качестве ОЭП использован электронно-лучевой преобразователь с накоплением энергии типа видикон).

Частные погрешности суммированы по формулам [6]

$$\Delta_\Sigma = \sum_{i=1}^n \Delta_i, \quad \sigma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2},$$

где Δ_i, σ_i — систематическая и случайная (среднее квадратическое значение) составляющие i -й частной погрешности.

Выводы

1. Рассмотрение свойств различных оптико-электронных преобразователей показывает, что электронно-лучевые ОЭП с накоплением энергии пригодны для решения самого широкого круга задач. Возможности применения преобразователей других типов ограничены либо характером объекта, параметры которого подлежат измерению, либо свойствами самого преобразователя.

2. Для измерений расстояний наиболее пригодны считывающие устройства с электронным сканированием (электронно-лучевые ОЭП групп 1 и 2 и ОЭП с бегущим световым лучом группы 2). Применение для этой цели механических ОЭСУ группы 1 затруднительно из-за малого поля зрения этих преобразователей.

Погрешности измерений расстояния и регистрации совмещения
при использовании электронно-лучевых ОЭП

Причины возникновения погрешности	Измерение расстояния l_x , %	Регистрация совмещения, мкм
Шумы и конечное значение крутизны переходной характеристики	$\sigma_{\text{шф}} = \sqrt{2\pi} \frac{r_e}{\psi \beta l_x} = 6,3 \cdot 10^{-2}$	$\sigma_{\text{ф}} = \sqrt{\pi} \frac{r_e}{\psi \beta} e^{\frac{\sigma_{\text{ш}}^2}{4}} = 5,7$ $\Delta_{\text{ш}} = -q_{\text{ш}} r_e = 22$
Нелинейность сканирования	$\sigma_{\text{нлс}} = \frac{k_{\text{н}}}{4\sqrt{6}} = 0,14$	—
Изменение амплитуды сканирования	$\sigma_{\text{нлс}} = \frac{\delta B}{\sqrt{3}} = 5,7 \cdot 10^{-2}$	—
Дискретность сканирования	$\Delta_{\text{нд}} = \frac{v_0}{2F_0 l_x} = 5,0 \cdot 10^{-2}$ $\sigma_{\text{нд}} = \frac{v_0}{2\sqrt{3} F_0 l_x} = 2,8 \cdot 10^{-2}$	$\Delta_{\text{н}} = \frac{v_0}{2F_0} = 5$ $\sigma_{\text{н}} = \frac{r_e v_0}{2\sqrt{3} F_0} = 2,8$
Нестабильность порогового уровня	$\sigma_{\text{нп}} = \sqrt{\pi} \frac{r_e \delta U_{\text{п}}}{3 \beta l_x} = 5 \cdot 10^{-2}$	$\sigma_{\text{н}} = \sqrt{\frac{\pi}{3}} \frac{r_e}{2\beta} \delta V_{\text{п}} e^{\frac{\sigma_{\text{н}}^2}{4}} = 0,16$
Дискретность заполнения интервалов времени	$\sigma_{\text{ндз}} = \frac{B}{2\sqrt{6} \beta l_x T l_x} = 2,1 \cdot 10^{-2}$	—
Суммарная погрешность	$\Delta_{0\Sigma} = +0,05; \sigma_{0\Sigma} = 0,18$	$\Delta_{\Sigma} = -18; \sigma_{\Sigma} = 6,1$

Значения параметров ОЭСУ: $r_e = 25$ мкм, $\beta = 1$, $\psi = 10$, $l_x = 10$ мм, $k_{\text{н}} = 0,01$, $\delta B = 0,01$, $F_0 = 100$ Гц, $v_0 = 1$ мм/с, $\delta V_{\text{п}} = 0,02$, $q_{\text{ш}} = 0,95$, $f_0 = 1$ МГц, $T = 1$ мс.

3. При регистрации совмещения границ «свет—тьень» могут быть использованы ОЭСУ любых типов, однако применение считывающих устройств с электронно-лучевыми ОЭП обеспечивает меньшую погрешность регистрации совмещения.

4. Расчет погрешностей, проведенный для электронно-лучевых ОЭСУ типа видикон, показал, что при увеличении оптической системы $\beta = 1$ суммарная погрешность измерения расстояния, соизмеримого с размером поля зрения ОЭП, не превышает 0,6% от этого размера, а погрешность регистрации совмещения границ — не более 40 мкм, т. е. 0,4% от размера поля зрения ОЭП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безикович А. Я., Зорин Д. И., Эскин С. П. Пути построения аппаратуры для автоматической поверки показывающих электроизмерительных приборов. «Измерительная техника», 1967, № 11.
2. Прицкер В. И. Установка для поверки измерительных приборов. Авторское свидетельство СССР № 226718, «Бюллетень изобретений», № 29, 1968.
3. Горшков Б. П. Применение фотоэлектрического время-импульсного метода при разработке автоматических считывающих устройств. «Измерительная техника», 1968, № 5.
4. Бахтадзе Ш. Н., Безикович А. Я., Зорин Д. И., Свердличенко В. Д., Шестопалов Ю. Н., Эскин С. П. Оптико-электронные методы и средства автоматизации метрологических работ. «Измерительная техника», 1969, № 5.
5. Прицкер В. И. Особенности работы оптико-электронных преобразователей в считывающих устройствах автоматических поверочных установок. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 117 (177). Изд-во стандартов, 1970.
6. Рабинович Б. Е. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 57 (117). Стандартгиз, 1962.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.

ПОГРЕШНОСТИ ОКРУГЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В ДВОИЧНОЙ СИСТЕМЕ СЧИСЛЕНИЯ

В метрологической практике все более широко используются для обработки результатов измерений вычислительные машины и специализированные вычислительные устройства. Для наиболее экономичного конструирования последних, а также рационального составления алгоритмов и программ для вычислительных машин необходимо уметь надежно оценивать погрешности, вносимые в вычислительный процесс благодаря ограниченности разрядной сетки чисел, представляемых в вычислительном устройстве. В настоящее время хорошо разработаны методы определения максимальной погрешности округления результатов, получаемых с помощью вычислительных устройств [1—3]. Однако эти оценки оказываются, как правило, очень завышенными, а в ряде случаев практически и недостижимыми [4].

По источникам возникновения погрешности вычислений можно разбить на три группы: погрешности метода вычислений, связанные с применением приближенных методов решения конкретной задачи, приближенных формул для математических функций и даже нерациональной последовательности вычислений; погрешности, вносимые в вычислительный процесс благодаря использованию приближенных числовых значений величин, входящих в формулы, и, наконец, погрешности округления, возникающие в процессе вычислений из-за необходимости ограничения разрядности результатов арифметических действий*. Если погрешности двух первых групп можно, по крайней мере в принципе,

* Обычно не принято рассматривать отбрасывание младших разрядов числа как округление, так как возникающие при этом погрешности имеют математическое ожидание, отличное от нуля. На наш взгляд, округлением следует считать любое ограничение разрядности числа вне зависимости от того, приводит такое ограничение к погрешности с математическим ожиданием, близким к нулю, или нет.

ликвидировать, применяя точные методы и точные значения исходных величин, то погрешности, возникающие в результате округления, можно только уменьшать. Кроме того, эти погрешности являются источником погрешностей второй группы, так как в результате операций над точными числами появляются приближенные числа, используемые в дальнейшем вычислительном процессе. Настоящая работа посвящена изучению источников и нахождению статистических оценок погрешностей округления отдельных арифметических операций над точными двоичными числами при различных видах их представления.

В большинстве современных вычислительных устройств применяется двоичная система счисления. Конструкция этих устройств неизбежно ограничивает разрядность числа, т. е. наибольшее количество разрядов чисел, представляемых в них точно. Поэтому сформулированная выше задача сводится к анализу погрешностей вычислений в двоичной системе счисления при конечной разрядности чисел.

Числа в современных вычислительных машинах могут быть представлены в режиме с фиксированной запятой и в режиме с плавающей запятой. При представлении чисел в режиме с фиксированной запятой число записывают в виде n -значного двоичного числа

$$a = \alpha_1 \cdot 2^{-1} + \alpha_2 \cdot 2^{-2} + \dots + \alpha_n \cdot 2^{-n},$$

где $\alpha_i = 0, \pm 1$ для $1 \leq i \leq n$. Все числа, представленные в режиме с фиксированной запятой, по модулю меньше единицы, т. е. являются правильными дробями. При необходимости применения чисел, превышающих единицу, употребляются масштабные множители.

В режиме с плавающей запятой каждое число представляется парой чисел: порядком r и мантиссой q — таких, что

$$a = (r, q) = 2^r \cdot q.$$

Порядок — целое число, мантисса — дробное число, записанное в режиме с фиксированной запятой. Мантисса числа нормализована, т. е. $0,5 \leq |q| < 1$ при $a \neq 0$ и $q = 0$ при $a = 0$.

Погрешность округления числа будем характеризовать*:

а) математическим ожиданием $M(\Delta)$ погрешности $\Delta = a^* - a$

$$M(\Delta) = M(a^* - a),$$

где a и a^* — соответственно точное и приближенное числовые значения величины a ,

* В работе рассматривается погрешность числа, являющегося результатом одной операции над точными числами. Поэтому абсолютное среднее квадратическое отклонение результата операции равно корню квадратному из дисперсии погрешности округления, а относительное среднее квадратическое отклонение — квадратному корню из относительной дисперсии [4].

б) дисперсией погрешности $D(\Delta)$, равной

$$D(\Delta) = M(\Delta - M(\Delta))^2,$$

в) относительной дисперсией погрешности

$$\frac{D(\Delta)}{a^2} \approx \frac{D(\Delta)}{a^{*2}}.$$

Операции над числами в режиме с фиксированной запятой являются основанием для операций над числами с плавающей запятой. Поэтому сначала рассмотрим вычислительное устройство, функционирующее в режиме с фиксированной запятой и обладающее следующими свойствами.

1. Вычислительное устройство может выполнять четыре арифметические операции — сложение, вычитание, умножение и деление чисел, представленных в режиме с фиксированной запятой.

2. Результат c операции над двумя двоичными n -разрядными числами может содержать $2n$ разрядов, т. е.

$$c = \gamma_1 \cdot 2^{-1} + \gamma_2 \cdot 2^{-2} + \dots + \gamma_n \cdot 2^{-n} + \gamma_{n+1} \cdot 2^{-n-1} + \dots + \gamma_{2n} \cdot 2^{-2n},$$

и округляться некоторым способом до n старших разрядов.

Множество чисел (в дальнейшем — операционное поле), представляемых точно в таком вычислительном устройстве, обладает следующими свойствами:

- 1) операционное поле содержит нуль,
- 2) любое число операционного поля по модулю меньше единицы,
- 3) любое число операционного поля — целое кратное 2^{-n} , причем абсолютное значение коэффициента кратности меньше 2^n .

Погрешности представления значений величин числами операционного поля

Как уже отмечалось, точное значение результата операции может содержать в двоичном представлении количество разрядов большее, чем n . Например:

$$c = \gamma_1 \cdot 2^{-1} + \gamma_2 \cdot 2^{-2} + \dots + \gamma_n \cdot 2^{-n} + \gamma_{n+1} \cdot 2^{-n-1} + \dots + \gamma_{n+k} \cdot 2^{-n-k} \quad (k > 0). \quad (1)$$

Значение c не может быть представлено числами операционного поля точно, так как последние содержат только n двоичных разрядов. Возникает необходимость округления — представления точного значения приближенным, содержащимся в операционном поле. Очевидно, что в нем имеются два ближайших числа c' и $c' + 2^{-n}$ такие, что

$$c' \leq c \leq c' + 2^{-n},$$

где $c' = \gamma_1 \cdot 2^{-1} + \gamma_2 \cdot 2^{-2} + \dots + \gamma_n \cdot 2^{-n}$.

Одно из этих чисел (в зависимости от способа округления) можно принять в качестве приближенного значения c^* величины c

$$c^* = \gamma_1 \cdot 2^{-1} + \gamma_2 \cdot 2^{-2} + \dots + \gamma_{n-1} \cdot 2^{-n+1} + \gamma_n \cdot 2^{-n},$$

где содержимое последнего разряда γ_n зависит как от содержимого этого разряда до округления (т. е. от γ_n), так и от способа округления. Возникающая при этом погрешность Δ округления числа равна

$$\Delta = c^* - c = -(\gamma_n - \gamma_n') \cdot 2^{-n} - \gamma_{n+1} \cdot 2^{-n-1} - \dots - \gamma_{n+k} \cdot 2^{-n-k}. \quad (2)$$

Вычислим математическое ожидание и дисперсию погрешности округления, полагая, что вероятности появления единиц во всех необходимых для расчетов разрядах можно найти.

Математическое ожидание $M(\Delta)$ и дисперсия $D(\Delta)$ погрешности округления соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} M(\Delta) &= \sum_{j=n}^{n+k} M(\Delta_j) \\ \text{и} \\ D(\Delta) &= \sum_{j=n}^{n+k} D(\Delta_j), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $M(\Delta_j)$ — математическое ожидание погрешности округления, вызываемой j -м разрядом,

$D(\Delta_j)$ — дисперсия погрешности округления, вызываемой j -м разрядом.

Содержимым любого разряда двоичного числа ($c^* - c$) может быть нуль, плюс единица или минус единица. Следовательно,

$$M(\Delta_j) = p_{+j} \cdot 2^{-j} - p_{-j} \cdot 2^{-j} + (1 - p_{+j} - p_{-j}) \times \\ \times 0 \cdot 2^{-j} = (p_{+j} - p_{-j}) \cdot 2^{-j}$$

и

$$D(\Delta_j) = p_{+j}(2^{-j} - M(\Delta_j))^2 + p_{-j}(-2^{-j} - M(\Delta_j))^2 + \\ + (1 - p_{+j} - p_{-j}) \cdot (0 \cdot 2^{-j} - M(\Delta_j))^2 = (p_{+j} + p_{-j} - \\ - (p_{+j} - p_{-j})^2) \cdot 2^{-2j},$$

где p_{+j} и p_{-j} — вероятности появления соответственно плюс и минус единиц в j -м разряде погрешности округления.

Математическое ожидание и дисперсия погрешности округления Δ числа на основании выражений (3) равны

$$M(\Delta) = \sum_{l=-n}^{n+k} (p_{+l} - p_{-l}) \cdot 2^{-l} \quad (4)$$

и

$$D(\Delta) = \sum_{l=-n}^{n+k} (p_{+l} + p_{-l} - (p_{+l} + p_{-l})^2) \cdot 2^{-2l} \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) для математического ожидания и дисперсии погрешности округления числа носят общий характер. Они применимы для нахождения оценки погрешности округления значений любых случайных величин при любом способе округления, если вероятности появления единиц в любом разряде погрешности известны. Из сравнения выражений (1) и (2) видно, что вероятности появления минус единиц в младших разрядах погрешности совпадают с вероятностями появления единиц в соответствующих им младших разрядах округляемого числа s , в то время как вероятность появления единиц в старшем разряде погрешности зависит еще и от способа округления, т. е. от способа получения γ_n .

Таким образом, нахождение погрешности представления точных значений величин (в частности, результатов арифметических операций) числами операционного поля требует вычисления вероятностей появления единиц в отбрасываемых разрядах округляемых значений. При решении этой задачи относительно результатов арифметических операций предположим, что операции выполняются над точными равномерно распределенными числами операционного поля.

Операции в режиме с фиксированной запятой

В работе [5] автором показано, что при вычислениях в режиме с фиксированной запятой сложение и вычитание двух чисел выполняются точно, в то время как операции типа умножения являются источниками погрешностей округления. При этом было показано, что вероятность p_j появления единиц в младших ($n < j \leq 2n$) разрядах произведения двух равномерно распределенных чисел равна

$$p_j = \frac{1}{2} - 2^{-2n-2+j} \quad (6)$$

Вероятность появления единиц в разрядах отбрасываемой части частного двух чисел можно найти методом вычисления частот появления единиц в соответствующих разрядах частных двух

чисел операционного поля. При вычислениях в режиме с фиксированной запятой делимое a и делитель b связаны условием

$$2^{-n} \leq a < b,$$

так как делимое и делитель принадлежат операционному полю, и только в этом случае их частное ($c = \frac{a}{b}$) меньше единицы и, следовательно, также может принадлежать операционному полю.

Делимое и делитель можно разложить на простые множители

$$a = 2^{-n} \prod_{i=1}^{m_1} A_i \text{ и } b = 2^{-n} \prod_{i=1}^{m_2} B_i,$$

где A_i и B_i — простые множители чисел соответственно $a \cdot 2^n$ и $b \cdot 2^n$,

m_1 и m_2 — их количество.

Среди простых множителей делимого и делителя могут быть общие множители, после сокращения которых частное принимает вид

$$c = \frac{2^{-n} \prod_{i=1}^{m_1} A_i}{2^{-n} \prod_{i=1}^{m_2} B_i} = \frac{\prod_{i=1}^{m_1} A_i'}{\prod_{i=1}^{m_2} B_i'}$$

где штрихом обозначены соответствующие величины после сокращения общих множителей.

Некоторые простые множители B_i могут равняться двум. Их количество j не может превосходить $n - 1$, так как двоичное представление $\prod_{i=1}^{m_2} B_i$ не может содержать более n разрядов и, следовательно, не может оканчиваться более, чем $n - 1$ нулем. После сокращения общих множителей среди B_i' останется только $0 \leq j' \leq j < n$ простых множителей, равных двум. Их выделение в явном виде дает

$$c = \frac{\prod_{i=1}^{m_1} A_i'}{\prod_{i=1}^{m_2} B_i''} \cdot 2^{-j'},$$

где B_i'' — множители B_i' , не равные двум.

Далее возможны два случая:

$$\prod_{i=1}^{m_2} B_i'' = 1 \text{ или } \prod_{i=1}^{m_2} B_i'' \neq 1.$$

При $\prod_{i=1}^{m_2} B_i = 1$ частное удовлетворяет соотношению

$$1 > c = 2^{-l'} \prod_{i=1}^{m_1} A_i \geq 2^{-l'} \geq 2^{-l} > 2^{-n},$$

где $1 \leq \prod_{i=1}^{m_1} A_i \leq 2^{-l'}$.

Следовательно, частное является конечной правильной двоичной l' -разрядной ($l' < n$) дробью, т. е. частное содержится в операционном поле. В то же время из

$$\frac{a}{b} = 2^{-l'} \prod_{i=1}^{m_1} A_i \geq 2^{-l}$$

следует, что найдется такое число $l = 2^{l-1} \prod_{i=1}^{m_2} A_i$, что

$$a = bl \cdot 2^{-l} (l = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1).$$

Таким образом, если число b имеет (кроме общих с числом a простых множителей) только множители, равные двум, то частное c является конечной дробью, содержащейся в операционном поле. Количество таких случаев для каждого b , заканчивающегося нулями, равно 2^j . Среди всех двоичных n -разрядных чисел b заканчиваются j нулями только

$$2^{n-j} - 1 - (2^{n-(j+1)} - 1) = 2^{n-1-j}$$

чисел, так как из двоичного представления чисел b ясно, что $2^{n-j} - 1$ чисел заканчивается не более j нулями, а $2^{n-(j+1)} - 1$ чисел — не более $j + 1$ нулем. Следовательно, частное c вычисляется точно с помощью двоичного n -разрядного вычислительного устройства только в

$$\sum_{j=0}^{n-1} 2^j \cdot 2^{n-1-j} = n \cdot 2^{n-1}$$

случаях.

При $\prod_{i=1}^{m_2} B_i \neq 1$ частное является бесконечной периодической двоичной дробью

$$c = \gamma_1 \cdot 2^{-1} + \gamma_2 \cdot 2^{-2} + \dots + \gamma_n \cdot 2^{-n} + \gamma_{n+1} \cdot 2^{-n-1} + \dots + \gamma_{2n} \cdot 2^{-2n} + \dots,$$

так как делитель (после сокращения общих множителей) содержит множители, отличные от множителей основания системы счисления, т. е. от 2. Аналогично предыдущему

$$c = \frac{\prod_{i=1}^{m_1'} A_i'}{\prod_{i=1}^{m_2''} B_i''} \cdot 2^{-I'}$$

и найдется такое целое число $I = 2^{l-I'} \left[\prod_{i=1}^{m_1'} A_i' \left/ \prod_{i=1}^{m_2''} B_i'' \right. \right]$, что

$$I \cdot 2^{-l} < c < (I+1) \cdot 2^{-l} \quad (l = 0, 1, 2, \dots, 2^l - 1).$$

Так как числа a пробегает все значения с шагом 2^{-n} , то

$$c = \frac{lb \cdot 2^{-l} + k 2^{-n}}{b} = I \cdot 2^{-l} + k \frac{2^{-n}}{b},$$

где k — целое число, удовлетворяющее условию

$$0 < k \leq b \cdot 2^{n-l} - 1 = k_0.$$

В дроби a/b первое слагаемое — конечная дробь, бóльшая 2^{-l} , а второе — бесконечная двоичная дробь, меньшая 2^{-l} , которую можно представить в виде суммы

$$k \frac{2^{-n}}{b} = \sum_{l=j+1}^{\infty} \gamma_{lk} \cdot 2^{-l}, \quad \text{где } \gamma_{lk} = 0, 1.$$

Обозначим частоту появления единиц в l -м разряде через p_l . Эту частоту можно найти, если заметить, что сумма всех бесконечных дробей $k \frac{2^{-n}}{b}$ равна

$$\sum = \sum_{k=1}^{k_0} \sum_{l=j+1}^{\infty} \gamma_{lk} \cdot 2^{-l} = \sum_{k=1}^{k_0} k \frac{2^{-n}}{b} = \frac{k_0}{2} \cdot 2^{-l} = \sum_{l=j+1}^{\infty} \frac{k_0}{2} \cdot 2^{-l}.$$

С другой стороны, изменяя порядок суммирования, для \sum имеем

$$\begin{aligned} \sum &= \sum_{l=j+1}^{\infty} \sum_{k=1}^{k_0} \gamma_{lk} \cdot 2^{-l} = \sum_{l=j+1}^{\infty} \frac{(1 + 1 + \dots + 1)}{p_l k_0} \cdot 2^{-l} = \\ &= \sum_{l=j+1}^{\infty} p_l k_0 \cdot 2^{-l}. \end{aligned}$$

Сравнение обоих результатов суммирования дает

$$p_l k_0 = \frac{k_0}{2}.$$

Таким образом, во втором случае количество единиц в любом l -м ($n < l$) разряде частных равно половине их количества. Так как количество всех частных равно $1/2 (2^n \cdot 2^n - 2^n) = 2^{n-1} (2^n - 1)$ и из них $n \cdot 2^{n-1}$ частных вычисляются точно (см. первый случай), то в l -м разряде единицы содержат только

$$\frac{2^{n-1} (2^n - 1) - n \cdot 2^{n-1}}{2} = 2^{n-2} \cdot (2^n - n - 1)$$

частных. Следовательно, вероятность появления единиц в l -м ($n < l$) разряде частных двух равномерно распределенных двоичных n -разрядных чисел в режиме с фиксированной запятой равна

$$p_l = \frac{2^{n-2} \cdot (2^n - n - 1)}{2^{n-1} \cdot (2^n - 1)} = \frac{1 - (n+1) 2^{-n}}{2 \cdot (1 - 2^{-n})} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2}.$$

Таким образом, вероятность появления единицы в отбрасываемых разрядах частного при больших n близка к половине, так как практически $n \geq 25$ и, следовательно,

$$\frac{1}{2} - \left[\frac{1 - (n+1) 2^{-n}}{2(1 - 2^{-n})} \right]_{n \geq 25} < 0,373 \cdot 10^{-6}.$$

Погрешности округления результатов операций в режиме с фиксированной запятой

Как было показано выше, только операции умножения и деления в режиме с фиксированной запятой могут давать результаты, точное значение которых имеет разрядность, большую допустимой (т. е. n). Поэтому ниже рассматривается округление результатов только этих двух операций.

Более того, вероятности появления единиц в младших разрядах частного и результата операции «сдвиг вправо на k разрядов» равны половине. Однако количество отбрасываемых разрядов частного бесконечно, в то время как количество отбрасываемых разрядов результата операции «сдвиг» равно k . Это обстоятельство позволяет применять все оценки погрешностей округления результата «сдвига» для оценки погрешностей округления частного, если в выражениях для них принять $k = \infty$. Поэтому ниже оценивается погрешность округления результатов только операций умножения и его частного случая — «сдвига вправо на k разрядов» — при различных способах округления.

Округление методом отбрасывания младших разрядов округляемого числа (методом «урезания» числа [6])

дает $\gamma'_n = \gamma_n$ (2) и, следовательно, вероятности появления положительной и отрицательной единиц в n -м разряде погрешности равны нулю, так как в этом случае $\gamma_n - \gamma'_n \equiv 0$. Поэтому из формул (4), (5) и (6) находим, что математическое ожидание $M(\Delta)$ и дисперсия $D(\Delta)$ погрешности округления отбрасыванием последних n разрядов произведения равновероятных случайных чисел равны *

$$M(\Delta) = - \sum_{j=n+1}^{2n} \left(\frac{1}{2} - 2^{-2n-2+j} \right) \cdot 2^{-j} = \\ = -2^{-n-1} + (n+2) \cdot 2^{-2n-2} \quad (7)$$

и

$$D(\Delta) = \sum_{j=n+1}^{2n} \left(\frac{1}{2} - 2^{-2n-2+j} \right) \cdot \left(\frac{1}{2} + 2^{-2n-2+j} \right) \cdot 2^{-2j} = \\ = \frac{1}{12} \cdot 2^{-2n} - \frac{3n+4}{48} \cdot 2^{-4n}. \quad (8)$$

Так как вычислительные устройства имеют большую разрядность ($n > 30$), то для математического ожидания $M(\Delta)$ и дисперсии $D(\Delta)$ погрешности округления произведения вместо точных формул (7) и (8) можно предложить приближенные

$$M(\Delta) \approx -\frac{1}{2} \cdot 2^{-n} \quad (9)$$

и

$$D(\Delta) \approx \frac{1}{12} \cdot 2^{-2n}, \quad (10)$$

имеющие достаточную для практики точность.

Для частного случая операции умножения — операции «сдвиг вправо на k разрядов» (умножение числа на 2^{-k}) — вероятность появления единицы в j -м разряде результата равна

$$p_j = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{при } n+1 \leq j \leq n+k \\ 0 & \text{при } n+k < j \leq 2n, \end{cases} \quad (11)$$

так как первый сомножитель — равновероятное случайное число и при умножении на 2^{-k} любого числа содержимые последних $n-k$ разрядов $2n$ -разрядного результата равны нулю.

* Для положительных произведений вероятности появления единиц в j -м разряде погрешности округления равны $p_{+j} = 0$ и $p_{-j} = p_j$ для $n < j \leq 2n$.

Следовательно, аналогично предыдущему, с учетом формул (4), (5) и (11) математическое ожидание и дисперсия погрешности $\Delta_{\text{сдвиг}}$ округления отбрасыванием младших разрядов результата операции «сдвиг вправо на k разрядов» равны

$$M(\Delta_{\text{сдвиг}}) = - \sum_{j=n+1}^{2n} p_j \cdot 2^{-j} = - \frac{1}{2} (1 - 2^{-k}) \cdot 2^{-n} \approx -2^{-n-1} \quad (12)$$

и

$$D(\Delta_{\text{сдвиг}}) = \sum_{j=n+1}^{2n} p_j (1 - p_j) \cdot 2^{-2j} = \frac{1}{12} (1 - 2^{-2k}) \cdot 2^{-2n} \approx \frac{1}{12} \cdot 2^{-2n}. \quad (13)$$

Таким образом, при округлении методом отбрасывания младших разрядов результата операций возникает погрешность округления, математическое ожидание которой сравнимо с единицей последнего сохраняемого разряда, т. е. 2^{-n} .

Прибавление единицы старшего отбрасываемого разряда. Если к округляемому числу предварительно прибавить единицу старшего отбрасываемого разряда и только после этого отбросить младшие разряды полученной суммы [7] *, то вероятности появления единиц и нулей в старших разрядах $(-\gamma_n - \gamma'_n)$ и $-\gamma_{n+1}$ погрешности Δ_+ округления выражения (2) определяются следующим образом. С вероятностью p_{n+1} в $(n+1)$ -м разряде округляемого числа содержится единица. После прибавления к округляемому числу 2^{-n-1} (единицы старшего отбрасываемого разряда) γ_n принимает значение $\gamma_n + 1$, т. е. $\gamma_n - \gamma'_n = -1$. Поэтому

$$-(\gamma_n - \gamma'_n) \cdot 2^{-n} - \gamma_{n+1} \cdot 2^{-n-1} = 2^{-n-1}.$$

С вероятностью $1 - p_{n+1}$ содержимое $(n+1)$ -го разряда округляемого числа равно нулю и после прибавления к нему 2^{-n-1} значение n -го разряда сохраняется прежним, т. е. $\gamma_n - \gamma'_n = 0$, откуда

$$-(\gamma_n - \gamma'_n) \cdot 2^{-n} - \gamma_{n+1} \cdot 2^{-n-1} = 0.$$

Таким образом, при выбранном способе округления содержимое n -го разряда погрешности округления (2) всегда равно нулю. Поэтому вероятности появления единиц в этом разряде равны нулю ($p_n = 0$). В $(n+1)$ -ом разряде с вероятностью p_{n+1} появляется плюс единица, и с вероятностью $1 - p_{n+1}$ — нуль.

* Такой способ округления возможен только в том случае, если сумматор вычислительного устройства имеет более n разрядов. Это позволяет округляемый в дальнейшем результат операции вычислять предварительно с большим количеством разрядов и произвести прибавление единицы $(n+1)$ -го разряда.

Вероятности появления единиц и нулей в остальных разрядах погрешности округления равны вероятностям появления единиц и нулей в соответствующих разрядах округляемого числа.

Поэтому выражения (4) и (5) для математического ожидания $M(\Delta_+)$ и дисперсии $D(\Delta_+)$ погрешности округления при данном способе преобразуются к виду

$$M(\Delta_+) = p_{n+1} \cdot 2^{-n-1} - \sum_{j=n+2}^{2n} p_j \cdot 2^{-j}$$

и

$$\begin{aligned} D(\Delta_+) &= p_{n+1}(1-p_{n+1}) \cdot 2^{-2n-2} + \sum_{j=n+1}^{2n} p_j(1-p_j) \cdot 2^{-2j} = \\ &= \sum_{j=n+1}^{2n} p_j(1-p_j) \cdot 2^{-2j}. \end{aligned}$$

Откуда, как следует из формулы (6):

$$\begin{aligned} M(\Delta_+) &= \left(\frac{1}{2} - 2^{-n-1}\right) \cdot 2^{-n-1} - \sum_{j=n+2}^{2n} \left(\frac{1}{2} - 2^{-2n-2+j}\right) \cdot 2^{-j} = \\ &= n \cdot 2^{-2n-2} \approx 0 \end{aligned} \quad (14)$$

и

$$\begin{aligned} D(\Delta_+) &= \sum_{j=n+1}^{2n} \left(\frac{1}{2} - 2^{-2n-2+j}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + 2^{-2n-2+j}\right) \cdot 2^{-2j} = \\ &= \frac{1}{12} \cdot 2^{-2n} - \frac{3n+4}{3} \cdot 2^{-4n-4} \approx \frac{1}{12} \cdot 2^{-2n}. \end{aligned} \quad (15)$$

При сдвиге равновероятного случайного числа на k разрядов вправо для математического ожидания $M(\Delta_+)$ и дисперсии $D(\Delta_+)$ погрешности округления имеем

$$\left. \begin{aligned} M(\Delta_+) &= -2^{-n-2} + \sum_{j=n+2}^{n+k} 2^{-j-1} = -2^{-n-k-1} \\ \text{и} \\ D(\Delta_+) &= \sum_{j=n+1}^{n+k} \frac{1}{4} \cdot 2^{-2j} = \frac{1}{12} (1 - 2^{-2k}) \cdot 2^{-2n} \approx \\ &\approx \frac{1}{12} \cdot 2^{-2n}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Величина $M(\Delta_+)$ много меньше [см. формулы (14) и (16)] содержимого последнего сохраняемого разряда (2^{-n}). Поэтому прибавление к округляемому числу единицы старшего отбрасы-

ваемого разряда с последующим отбрасыванием младших разрядов практически не приводит к возникновению заметных систематических погрешностей округления.

Занесение единицы в младший сохраняемый разряд также приводит к погрешностям округления, математическое ожидание которых мало по сравнению с 2^{-n} . Действительно, приближенное значение числа (1) при этом способе округления равно

$$c^* = \gamma_1 \cdot 2^{-1} + \gamma_2 \cdot 2^{-2} + \dots + \gamma_{n-1} \cdot 2^{-n+1} + 2^{-n}, \text{ если } c \neq 0.$$

Получаемая при этом погрешность округления равна

$$\Delta_0 = -(\gamma_n - 1) \cdot 2^{-n} - \gamma_{n+1} \cdot 2^{-n-1} - \dots - \gamma_{2n} \cdot 2^{-2n}.$$

Выражение для Δ_0 показывает, что n -й разряд погрешности содержит с вероятностью p_n нуль и с вероятностью $1 - p_n$ — плюс единицу. Вероятность p_n можно принять равной $1/2$, так как известно, что средняя часть $2n$ -разрядного произведения двух случайных равновероятных чисел — псевдослучайное равновероятное число. Поэтому из формул (4) и (5) математическое ожидание и дисперсия погрешности Δ_0 равны

$$\begin{aligned} M(\Delta_0) &= \frac{1}{2} \cdot 2^{-n} - \sum_{i=n+1}^{2n} \left(\frac{1}{2} - 2^{-2n-2+i} \right) \cdot 2^{-i} = \\ &= (n+2) \cdot 2^{-2n-2} \approx 0 \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} D(\Delta_0) &= \frac{1}{4} \cdot 2^{-2n} + \sum_{i=n+1}^{2n} \left(\frac{1}{2} - 2^{-2n-2+i} \right)^2 \times \\ &\times \left(\frac{1}{2} + 2^{-2n-2+i} \right) \cdot 2^{-2i} = \frac{1}{3} \cdot 2^{-2n} - \frac{3n+4}{48} \cdot 2^{-4n} \approx \frac{1}{3} \cdot 2^{-2n}. \end{aligned} \quad (17)$$

Таким образом, умножение и деление двух чисел с округлением результата до n разрядов в двоичной системе счисления осуществляется с погрешностью, статистические характеристики которой для различных способов округления можно вычислить по формулам (7)—(17). Операции типа умножения и деления являются основными источниками погрешностей округления при вычислениях в режиме с плавающей запятой.

Операции в режиме с плавающей запятой

Для упрощения анализа погрешностей округления результатов операций в режиме с плавающей запятой предположим, что в вычислительном устройстве реализован метод округления,

приводящий к погрешностям округления с математическим ожиданием, близким к нулю (т. е. малыми по сравнению с 2^{-n}), и дисперсией, равной $d \cdot 2^{-2n}$. Такое предположение равносильно предположению о наличии только случайных погрешностей округления.

С л о ж е н и е. Порядок (r_3) и мантисса (q_3) суммы двух чисел, записанных в режиме с плавающей запятой, определяются соотношением (для определенности $r_1 \geq r_2$)

$$\begin{aligned}(r_3, q_3) &= (r_1, q_1) + (r_2, q_2) = 2^{r_1} \cdot q_1 + 2^{r_2} \cdot q_2 = \\ &= 2^{r_1} \cdot (q_1 + 2^{r_2-r_1} \cdot q_2),\end{aligned}$$

откуда $r_3 = r_1 + r_n$ и $q_3 = (q_1 + 2^{r_2-r_1} \cdot q_2) \cdot 2^{-r_n}$, где r_n — порядок нормализации мантиссы суммы, определяемый так, чтобы

$$\frac{1}{2} \leq | (q_1 + 2^{r_2-r_1} \cdot q_2) \cdot 2^{-r_n} | < 1.$$

Из выражения для мантиссы суммы видно, что при $r_2 \neq r_1$ происходит сдвиг мантиссы меньшего по модулю числа вправо, сопровождаемый погрешностью с дисперсией $d \cdot 2^{-2n+2r_1}$. Нормализация мантиссы суммы при $r_n < 1$ производится точно, а при $r_n = 1$ сопровождается погрешностью округления с дисперсией, равной

$$\frac{3}{4} d \cdot 2^{-2n} \cdot 2^{2r_1} = 3d \cdot 2^{-2n+2r_1}.$$

Исм. формулу (16)!, если результат округляется после нормализации.

Следовательно, дисперсия погрешности округления суммы двух чисел в режиме с плавающей запятой не превосходит $d \times 2^{-2n+2r_1}$ при $r_n < 0$ и $4d \cdot 2^{-2n+2r_1}$ при $r_n = 1$. И только при равенстве одного из слагаемых нулю, операция выполняется точно.

Относительная дисперсия суммы равна

$$\frac{D(\Delta)}{(r_3, q_3)^2} = \begin{cases} \frac{d \cdot 2^{-2n+2r_1}}{2^{2r_1} \cdot q_3^2} = \frac{d \cdot 2^{-2n-2r_n}}{q_3^2} & \text{при } r_n \leq 0 \\ \frac{4d \cdot 2^{-2n+2r_1}}{2^{2r_1} \cdot q_3^2} = \frac{4d \cdot 2^{-2n}}{q_3^2} & \text{при } r_n = 1, \end{cases}$$

откуда

$$d \cdot 2^{-2n-2r_n} < \frac{D(\Delta)}{(r_3, q_3)^2} \leq 4d \cdot 2^{-2n+2r_n} \text{ при } r_n \leq 0$$

и

$$d \cdot 2^{-2n} < \frac{D(\Delta)}{(r_3, q_3)^2} \leq 4d \cdot 2^{-2n} \text{ при } r_n = 1.$$

Таким образом, относительная дисперсия суммы увеличивается при нормализации мантиссы суммы влево, т. е. при $r_n \leq 0$. Умножение. Порядок и мантисса произведения двух чисел определяются соотношением

$$(r_3, q_3) = (r_1, q_1) \cdot (r_2, q_2) = 2^{r_1} q_1 \cdot 2^{r_2} q_2 = 2^{r_1+r_2} q_1 q_2,$$

откуда $r_3 = r_1 + r_2 + r_n$ и $q_3 = q_1 q_2 \cdot 2^{-r_n}$, где r_n — порядок нормализации мантиссы произведения, определяемый из соотношения

$$\frac{1}{2} \leq |q_1 q_2 \cdot 2^{-r_n}| < 1.$$

В этом случае погрешности возникают из-за необходимости округления мантиссы произведения. Значение дисперсии погрешности существенно зависит от последовательности выполнения округления и нормализации результата. Если нормализация предшествует округлению мантиссы произведения, как рекомендуется в работе [8], то дисперсия погрешности округления мантиссы q_3 равна $d \cdot 2^{-2n+2r_3}$. Относительная дисперсия произведения в этом случае находится в пределах

$$d \cdot 2^{-2n} < \frac{D(\Delta)}{(r_3, q_3)^2} \leq 4d \cdot 2^{-2n}.$$

Если округление предшествует нормализации, то дисперсия погрешности округления мантиссы произведения равна $d \cdot 2^{-2n+2r_3-2r_n}$. Относительная дисперсия произведения в этом случае находится в пределах

$$d \cdot 2^{-2n-2r_n} < \frac{D(\Delta)}{(r_3, q_3)^2} \leq 4d \cdot 2^{-2n-2r_n},$$

где r_n может принимать только два значения: нуль или минус единица, так как

$$\frac{1}{4} \leq |q_1 q_2| < 1 \quad (q_1 \cdot q_2 \neq 0).$$

Таким образом, относительная дисперсия произведения двух чисел превосходит $4d \cdot 2^{-2n}$ только при $r_n = -1$ (т. е. при $\frac{1}{4} \leq |q_1 q_2| < \frac{1}{2}$). Это возрастание относительной дисперсии погрешности произведения ликвидируется, если мантисса произведения округляется после ее нормализации.

Деление. Порядок и мантисса частного двух чисел определяется соотношением

$$(r_3, q_3) = \frac{(r_2, q_2)}{(r_1, q_1)} = \frac{2^{r_2} q_2}{2^{r_1} q_1} = 2^{r_2-r_1} \cdot \frac{q_2}{q_1} \quad (q_1 \neq 0).$$

Мантиссы обоих чисел удовлетворяют условиям $1/2 \leq |q_1| < 1$ и $1/2 \leq |q_2| < 1$. Поэтому частное мантисс лежит в пределах

$$\frac{1}{2} \leq \left| \frac{q_2}{q_1} \right| < 2.$$

Если вычислительное устройство не допускает получения мантиссы, большей единицы, то необходимо предварительно уменьшить q_2 в два раза. Тогда

$$\frac{1}{4} \leq \left| \frac{q_2}{2} \right| < \frac{1}{2} \text{ и } \frac{1}{4} \leq \left| \frac{q_2/2}{q_1} \right| < 1,$$

т. е. мантисса частного находится в допустимых пределах. При этом порядок и нормализованная мантисса частного определяются окончательно по формулам

$$r_3 = r_2 - r_1 + 1 + r_n \text{ и } q_3 = \frac{q_2/2}{q_1} \cdot 2^{-r_n},$$

где r_n — порядок нормализации мантиссы частного, определяемый из соотношения

$$\frac{1}{2} \leq \left| \frac{q_2/2}{q_1} \cdot 2^{-r_n} \right| < 1.$$

Очевидно, что $r_n = 0$ или $r_n = -1$.

Погрешность вычисления частного возникает в процессе сдвига q_2 вправо и деления $q_2/2$ на q_1 . Дисперсия первой погрешности равна $d \cdot 2^{-2n+2r_1}$ и уменьшается в результате деления в $q_1^2 \cdot 2^{2r_1}$ раз. Поэтому составляющая погрешности, обусловленная предварительным сдвигом мантиссы делимого на один разряд вправо, равна

$$\frac{1}{q_1^2} \cdot d \cdot 2^{-2n+2r_1-2r_1}.$$

Дисперсия погрешности, возникающей при делении мантисс, равна

$$d \cdot 2^{-2n+2(r_2-r_1+1)}.$$

Поэтому дисперсия погрешности частного равна

$$D(\Delta) = d \left(4 + \frac{1}{q_1^2} \right) \cdot 2^{2(-n+r_2-r_1)}.$$

Следовательно, относительная дисперсия погрешности частного равна

$$\frac{D(\Delta)}{(r_2 \cdot q_2)^2} = \frac{d \left(4 + \frac{1}{q_1^2} \right) \cdot 2^{2(-n+r_2-r_1)}}{q_3^2 \cdot 2^{2r_3}} = d \frac{4 + 1/q_1^2}{q_3^2} 2^{-2(n+1+r_n)},$$

откуда при $r_n = 0$

$$\frac{5}{4} d \cdot 2^{-2n} \leq \frac{D(\Delta)}{(r_n, q_n)^2} < 8d \cdot 2^{-2n}$$

и при $r_n = -1$

$$5d \cdot 2^{-2n} \leq \frac{D(\Delta)}{(r_n, q_n)^2} < 32d \cdot 2^{-2n}.$$

Таким образом, при необходимости нормализации мантиссы частного влево ($r_n = -1$) относительная дисперсия погрешности частного резко возрастает, так как для предотвращения переполнения разрядной сетки числа производился сдвиг вправо мантиссы делимого ($q_2/2$).

Если вычислительное устройство допускает получение частного $\frac{1}{2} \leq |q_2/q_1| < 2$, то необходимость предварительного сдвига q_2 отпадает и погрешность вычисления частного резко уменьшается. Действительно, в этом случае порядок и мантисса частного вычисляются по формулам

$$r_n = r_2 - r_1 + r_n \text{ и } q_n = \frac{q_2}{q_1} \cdot 2^{-r_n}, \text{ где } \frac{1}{2} \leq \left| \frac{q_2}{q_1} \cdot 2^{-r_n} \right| < 1,$$

т. е. $r_n = 0$ при $\frac{1}{2} \leq \left| \frac{q_2}{q_1} \right| < 1$ и $r_n = +1$ при $1 \leq \left| \frac{q_2}{q_1} \right| < 2$.

Дисперсия погрешности округления, возникающей при делении мантиссы, равна $d \cdot 2^{-2n+2(r_2-r_1)}$. И, если необходима нормализация мантиссы вправо ($1 \leq \left| \frac{q_2}{q_1} \right| < 2$), то дополнительно возникает погрешность с дисперсией, равной $d \cdot 2^{-2n+2(r_2-r_1)+2}$. Поэтому относительная дисперсия погрешности частного в обоих случаях ($r_n = 0$ и $r_n = 1$) лежит в пределах

$$d \cdot 2^{-2n} \leq \frac{D(\Delta)}{(r_n, q_n)^2} < 4d \cdot 2^{-2n}.$$

Таким образом, если при выполнении операции деления округление промежуточных результатов происходит на каждом этапе, то в целях уменьшения относительной дисперсии погрешности вычисления частного необходимо, чтобы вычислительное устройство позволяло получать частное мантиссы в пределах $1/2 \leq |q_2/q_1| < 2$.

Заключение

Арифметические операции при ограничении разрядности результата являются источниками погрешностей округления результатов вычислений на ЭЦВМ. Путем вычисления вероятностей появления единиц в младших ($n < j \leq 2n$) разрядах результатов

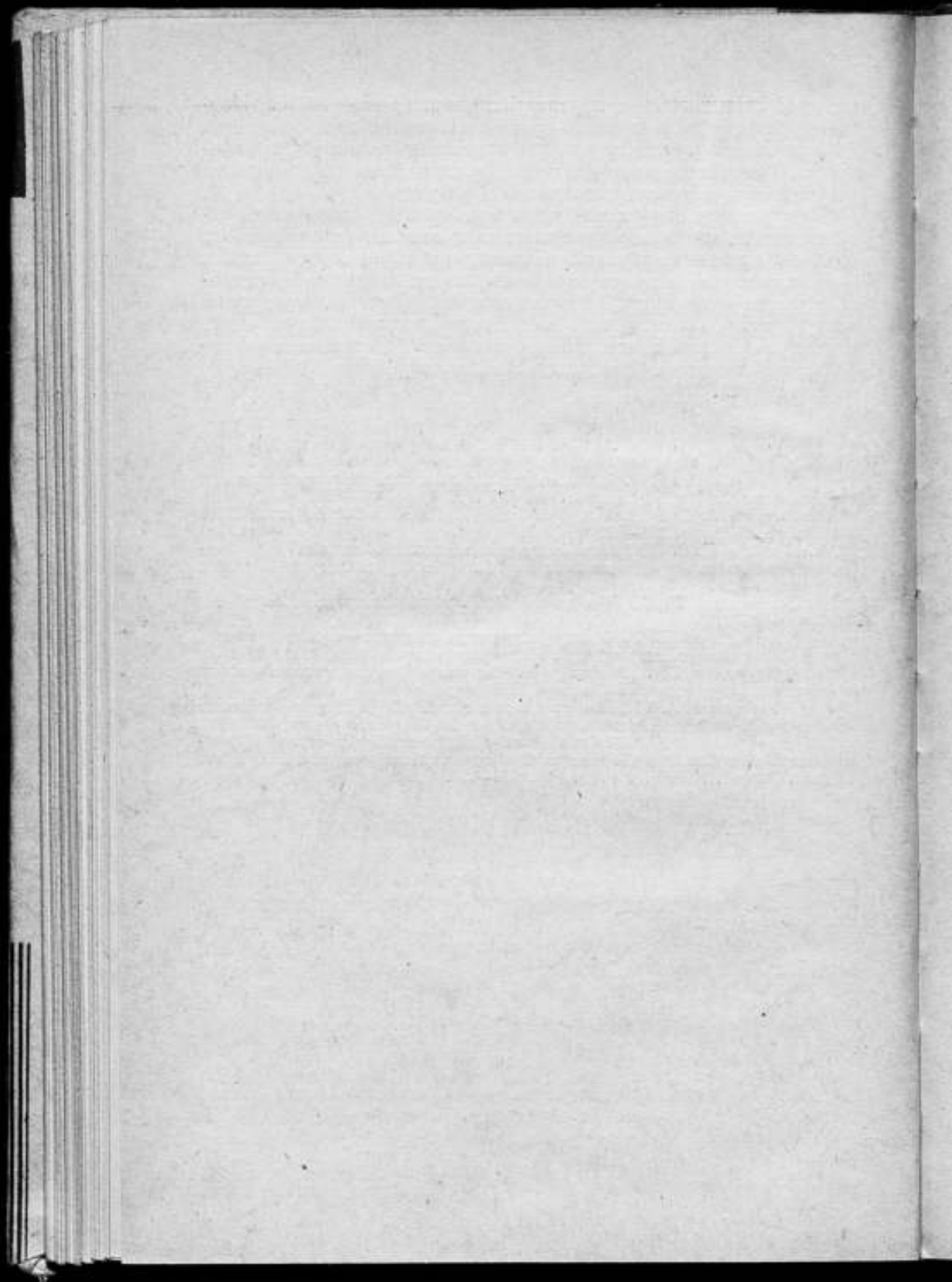
найлены статистические характеристики погрешностей округления произведения и частного тремя различными способами. Два из них вносят в вычислительный процесс погрешности, математическое ожидание которых пренебрежимо мало по сравнению с единицей последнего сохраняемого разряда.

Погрешности округлений промежуточных результатов и, соответственно, их дисперсии существенно зависят от конкретного хода выполнения операций. Поэтому их эффективная оценка возможна только в процессе выполнения вычислений. Проведенный анализ погрешностей результатов арифметических операций может служить основанием для создания специализированной интерпретирующей программы, позволяющей одновременно с выполнением вычислений находить оценки погрешностей вычисляемых значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ashenburt R. L. Techniques for automatic error monitoring and control. *Error in Digital Computation*, 1965, v. 1, pp. 43—59.
2. Bruce A. Chartres. Automatic Controlled Precision Calculation. *J. ACM*, 1996, v. 13, № 3, pp. 386—403.
3. Moore R. E. The automatic analysis and control of error in digital computing based on the use of interval numbers. *Error in Digital Computation*, 1965, v. 1, pp. 61—130.
4. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений, т. 1. М., Физматгиз, 1962.
5. Васильев Б. В. Ошибки округления на вычислительных машинах в режиме с фиксированной запятой. «Измерительная техника», 1964, № 11.
6. Форсайт Дж., Молер К. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. М., «Мир», 1969.
7. Биркган А. Ю., Воскресенский Г. П. Программирование для цифровой вычислительной машины «Урал-2». М., «Сов. радио», 1962.
8. Gregory Robert T. On the design of the arithmetic unit of a fixed-wordlength computer from the standpoint of computational accuracy. *IEE Trans. Electron Comput.* 1966, v. 15, № 2, pp. 255—257.

Поступила в редакцию
6/1 1970 г.



Приложение

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ
В СБОРНИКЕ

УДК 389.00.11

Об основных понятиях метрологии

К. П. Широков

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190) 1972 г. стр. 6—18.

Повышение требуемой точности измерений, являющихся объективным способом количественного познания свойств физических объектов, связано с развитием и углублением науки об измерениях и об обеспечении их единства — метрологии. Однако в метрологической литературе до сих пор еще не развита общая теория измерений, в частности, не очерчен круг и не раскрыта взаимосвязь основных понятий. В статье рассмотрена сущность понятий: физическая величина, измерение, средства измерений, единица физической величины, значение физической величины и некоторых других, проанализированы отличительные признаки этих понятий и приведена схема, иллюстрирующая их взаимосвязь. В приложении помещены термины и определения, принятые в новом государственном стандарте «Метрология. Термины и определения».

Библиографий 13.

УДК 389 : 53.057

Что считать наблюдением

М. Н. Селиванов

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190) 1972 г. стр. 19—22

Дается определение термина «наблюдение», который различными авторами трактуется по-разному. Приводятся два толкования этого термина: наблюдение в процессе деятельности (кратко — наблюдение) и наблюдение научное.

Библиографий 10.

УДК 53.081

Об определении зависимостей между физическими величинами

К. П. Широков

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190) 1972 г. стр. 23—26.

Поскольку измерение представляет собой акт количественного познания физической реальности, зависимости между величинами, если их понимать как наши знания о реальности, можно определять, но не измерять. Если же зависимости понимать как связи между величинами, реализуемые в процессе изменения состояния объектов, то и в этом случае нельзя говорить об измерении процесса, а лишь об измерении характеризующих его величин.

Библиографий 6.

УДК 389.151 : 389.6

**Рекомендации ИСО
по единицам физических величин**

К. П. Широков

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190) 1972 г. стр. 27—48.

Дан краткий обзор решений Международной организации по стандартизации (ИСО) об использовании в рекомендациях ИСО единиц Международной системы (СИ) и полный перевод рекомендации ИСО R 1000/69 «Правила применения единиц СИ и выбор десятичных кратных и дольных от единиц СИ».

Библиографий 3, таблиц 3.

УДК 53.081 (09)

Значения физических констант по результатам определений за последние 60 лет

С. В. Горбачевич, В. М. Холин

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190) 1972 г. стр. 49—63.

В статье приведены значения основных фундаментальных физических констант, полученные различными авторами за последние 60 лет. Эти результаты позволяют проследить направление и развитие исследований в области измерения физических констант и повышение их точности.

Статья может быть полезна для лиц, работающих в области физики и метрологии.

Таблиц 25.

УДК 389 : 537.312.62

**Применение эффектов Джозефсона
в метрологии**

*С. В. Горбачевич, В. В. Жуков,
К. А. Краснов, В. С. Тунинский*

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190), 1972 г. стр. 64—84.

Рассматриваются возможности использования эффектов Джозефсона для измерения кванта магнитного потока, поддержания единицы э. д. с., а также для создания высокочувствительных магнитометров, гальванометров и измерений малых сопротивлений.

Таблиц 3, иллюстраций 19, библиографий 35.

УДК 539.125.4 : (538.112 : 546.27)

**Состояние работ по определению отношения
магнитного момента протона к магнетону Бора**

В. Н. Носаль

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190) 1972 г. стр. 85—101.

Дан обзор работ по определению магнитного момента протона в магнетонах Бора, выполненных за последние 20 лет. Рассмотрены отдельные вопросы теории и методики проведения экспериментов. Приводятся значения магнитного момента протона в магнетонах Бора, полученные в рассмотренных работах, и даются наиболее достоверное его значение.

Таблиц 1, иллюстраций 4, библиографий 21.

УДК 53.088

**О методике определения погрешностей
результата измерения**

*А. Н. Гордов, В. С. Пеллинец,
А. Е. Синельников*

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190) 1972 г. стр. 102—106.

Рассмотрены принципы построения методики определения погрешности результата измерения применительно к многозвенным измерительным системам, находящимся в условиях одновременного воздействия большого числа влияющих величин. Предлагаемая методика позволяет установить совокупность характеристик, подлежащих введению в техническую документацию на прибор, и найти условную характеристику точности средства измерений.

Таблиц 1, библиографий 5.

УДК 681.2.088

Изменение погрешностей измерительных приборов во времени

Л. К. Исаев, А. И. Механиков

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190). 1972 г., стр. 109—118.

В настоящее время порядок передачи размера единицы от эталонных средств рабочим приборам описывается с помощью поверочных схем. При этом погрешность измерительного прибора устанавливается во время его поверки и предполагается неизменной в межповерочный период. Однако вследствие «старения» прибора наблюдается дрейф его погрешности.

Предлагается ввести дополнительные метрологические параметры, описывающие динамику погрешности прибора во времени и позволяющие оценить доверительный интервал этой погрешности (при заданной доверительной вероятности) в любой момент эксплуатации прибора. Найдены формулы для доверительного интервала, как функции времени, для различных случаев начального распределения погрешности (в период поверки), наиболее широко распространенных в метрологической практике.

Таблиц 3, библиографий 11.

УДК 519.251.8 + 519.283

Графо-аналитический метод построения полуэмпирических функций распределения малых выборок

И. П. Демаков, В. Е. Потепун

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190). 1972 г., стр. 119—129.

Излагается графо-аналитический метод построения функции распределения случайной величины по малому числу наблюдений. Метод предусматривает более полное использование априорной информации о распределении случайной величины и апостериорной информации, заключенной в единичных наблюдениях.

Таблиц 1, иллюстраций 3, библиографий 10.

**Основные задачи и перспективы работ
по применению средств электроники,
автоматики и вычислительной техники
в метрологических исследованиях**

*В. О. Арутюнов, А. Я. Безикович,
Г. П. Зедгинидзе*

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190), 1972 г., стр. 130—134.

Назван круг вопросов, связанный с внедрением в метрологию средств автоматки и вычислительной техники и разработкой принципов метрологического обслуживания измерительных систем. Приведен перечень первоочередных работ этого направления, выполнение которых в значительной степени повысит эффективность метрологических исследований.

Показана технико-экономическая целесообразность разработки методов и аппаратуры для телеслещений рабочей измерительной аппаратуры непосредственно с эталонными установками.

Библиографий 3.

**Состояние и уровень работ по автоматизации
метрологических исследований**

*А. Я. Безикович, Ю. Н. Шестопалов,
С. П. Эскин*

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190) 1972 г., стр. 135—149.

Рассмотрено состояние и уровень работ по автоматизации метрологических исследований за рубежом и в СССР.

Приведены результаты работ специализированных отделов метрологических учреждений и организаций различных стран по применению средств электроники, автоматки и вычислительной техники при создании комплексных автоматических метрологических устройств в различных областях измерений, типовых функциональных модулей и цифровых измерительных средств высокой точности, устройств стабилизации и регистрации внешних влияющих величин.

Показаны перспективные направления работ по автоматизации метрологических исследований.

Библиографий 59.

О принципах автоматизации экспериментальных работ в метрологии

А. Я. Безикович, Д. И. Зорин,
Ю. Н. Шестопапов, С. П. Эскин

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190) 1972 г. стр. 150—166.

Рассмотрены различные методы поверки и даны рекомендации по их выбору при создании автоматических поверочных установок.

Рассмотрена и проанализирована обобщенная структурная схема поверочной установки, обоснованы условия, при которых требуется создание эталонных образцовых средств как с полной автоматизацией измерительных операций, отсчитывания показаний, задания измеряемой величины, обработки результатов измерений, поддержания режимов воспроизведения размеров единиц физических величин, введения поправок на условия проведения эксперимента и т. д., так и частичной автоматизации.

Показана целесообразность проведения работ по созданию отдельных элементов (модулей) с заданными метрологическими параметрами для компоновки различных поверочных и измерительных установок и приведен перечень модулей, разработка которых наиболее перспективна.

Иллюстраций 7, библиографий 32.

О поверке показывающих приборов в динамическом режиме

А. Я. Безикович, Д. И. Зорин, С. П. Эскин

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190) 1972 г., стр. 167—176.

Рассматривается вопрос о возможном влиянии динамического режима поверки на оценки основной погрешности прибора и вариации его показаний.

Приведено общее уравнение движения подвижной части поверяемого прибора при наличии момента трения, выраженного трехчленным полиномом. Решение его показывает, что погрешность, свойственная методу в этом случае, изменяется только количественно и устраняется известными средствами.

Теоретически обоснованное в статье положение об адекватности результатов поверки приборов с трением как в статическом, так и в динамическом режимах и, следовательно, о допустимости последнего, подтверждено экспериментальными данными.

Таблиц 2, иллюстраций 1, библиографий 10.

УДК 389.14 : 62—791.4

**Применение оптико-электронных
считывающих устройств в метрологии**

А. Я. Безикович, В. И. Прицкер

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190), 1972 г., стр. 177—183.

В работе рассмотрены структурная схема оптико-электронных считывающих устройств, классификация оптико-электронных преобразователей по принципу сканирования и указаны области применения преобразователей различных типов.

Дан анализ погрешностей отдельных звеньев считывающего устройства при измерении расстояний и регистрации совмещений границ «свет—тьень» и найдены суммарные погрешности оптико-электронного преобразования.

Таблиц 3, библиографий 6, иллюстраций 5.

УДК 389 : 681.3.055

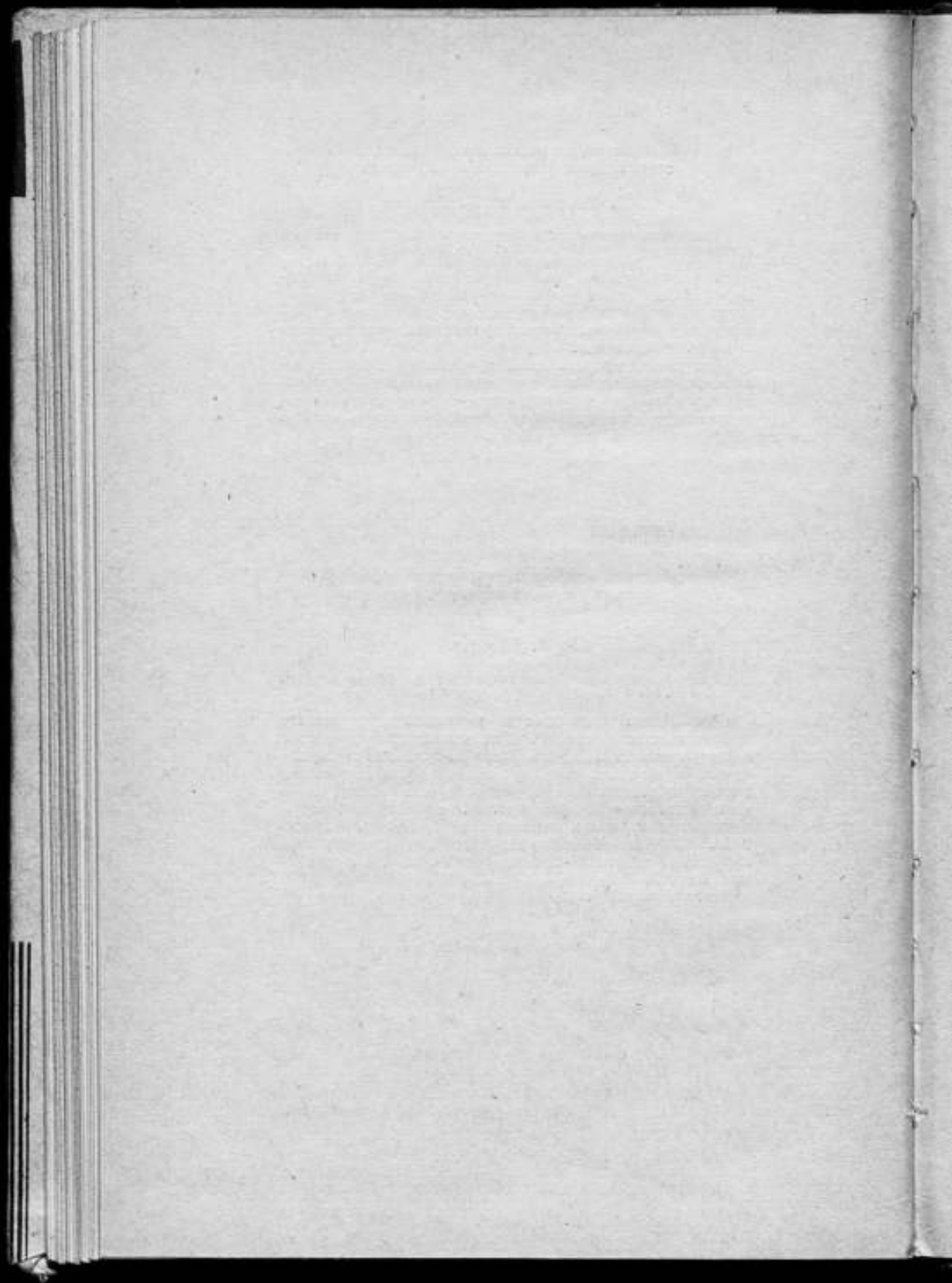
**Погрешности округления результатов
арифметических операций в двоичной системе
счисления**

Б. В. Васильев

Труды метрологических институтов СССР. Общие вопросы метрологии, вып. 130 (190), 1972 г., стр. 194—211.

Дан анализ погрешностей округления результатов арифметических операций. Для вычислений в режиме с фиксированной запятой найдены вероятности появления единиц в младших разрядах произведения и частного двух случайных равномерно распределенных чисел. Получены статистические характеристики погрешностей округления произведения и частного тремя различными способами. Определены границы дисперсий погрешностей округления арифметических операций в режиме с плавающей запятой.

Библиографий 8.



СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Основные понятия

К. П. Широков. Об основных понятиях метрологии	6
М. Н. Селиванов. Что считать наблюдением	19
К. П. Широков. Об определении зависимостей между физическими величинами	23
К. П. Широков. Рекомендации ИСО по единицам физических величин	27

Определение физических констант

С. В. Горбачевич, В. М. Холли. Значения физических констант по результатам определений за последние 60 лет	49
С. В. Горбачевич, В. В. Жуков, К. А. Краснов, В. С. Тунинский. Применение эффектов Джозефсона в метрологии	64
В. Н. Носаль. Состояние работ по определению отношения магнитного момента протона к магнетону Бора	85

Погрешности измерений

А. Н. Гордов, В. С. Пеллинец, А. Е. Синельников. О методике определения погрешностей результата измерения	102
Л. К. Исаев, А. И. Механиков. Изменение погрешностей измерительных приборов во времени	109
И. П. Демаков, В. Е. Потепун. Графо-аналитический метод построения полуэмпирических функций распределения малых выборок	119

Средства автоматизации и вычислительной техники в метрологии

В. О. Арутюнов, А. Я. Безикович, Г. П. Зедгинидзе. Основные задачи и перспективы работ по применению средств электроники, автоматизации и вычислительной техники в метрологических исследованиях	130
А. Я. Безикович, Ю. Н. Шестопалов, С. П. Эскин. Состояние и уровень работ по автоматизации метрологических исследований	135
	221

А. Я. Безикович, <u>Д. И. Зорин</u> , Ю. Н. Шестопалов, С. П. Эскин. О принципах автоматизации экспериментальных работ в метрологии	150
А. Я. Безикович, <u>Д. И. Зорин</u> , С. П. Эскин. О поверке показывающих приборов в динамическом режиме	167
А. Я. Безикович, В. И. Прицкер. Применение оптико-элек- тронных считывающих устройств в метрологии	177
Б. В. Васильев. Погрешности округления результатов арифме- тических операций в двоичной системе счисления	194
Рефераты статей, опубликованных в сборнике	213

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

Труды метрологических институтов СССР

В ы п у с к 130 (190)

Редактор *Н. Н. Александра*

Техн. редактор *З. Г. Вазер*

Сдано в набор 31/VII 1970 г.

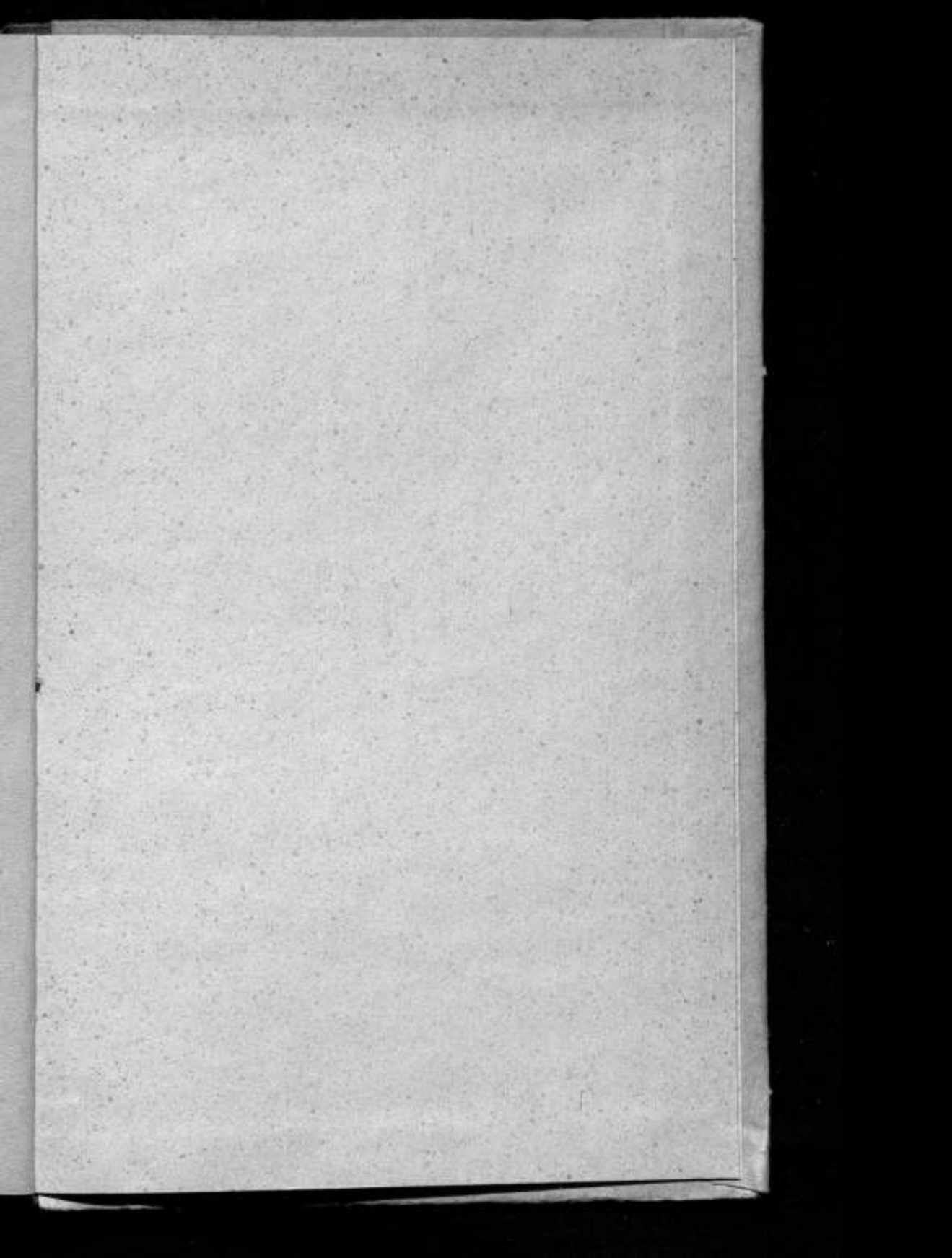
Подписано к печати 5/IV 1972 г.

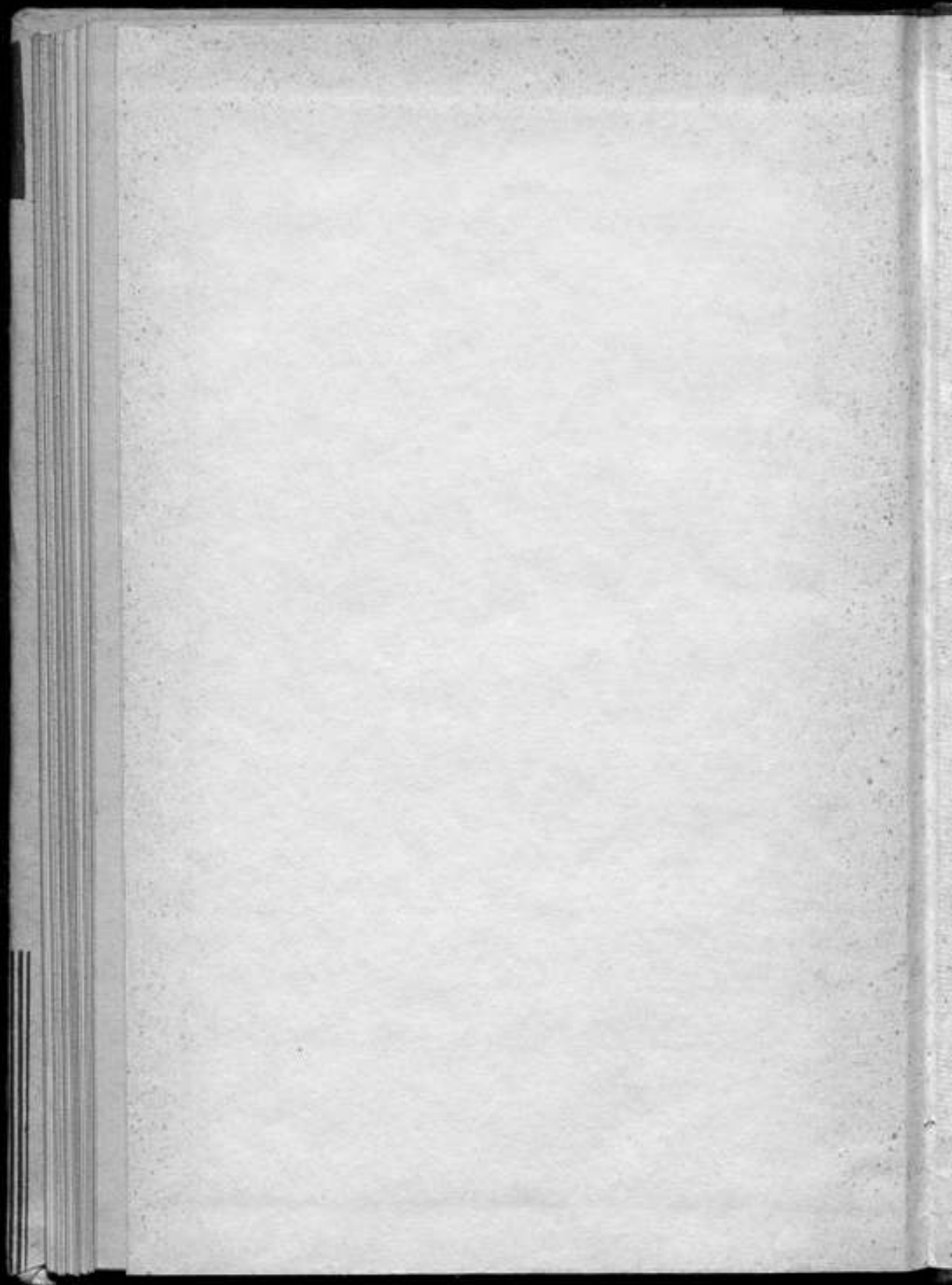
Формат бумаги $60 \times 90 \frac{1}{16}$. М-11882. Печ. л. 14

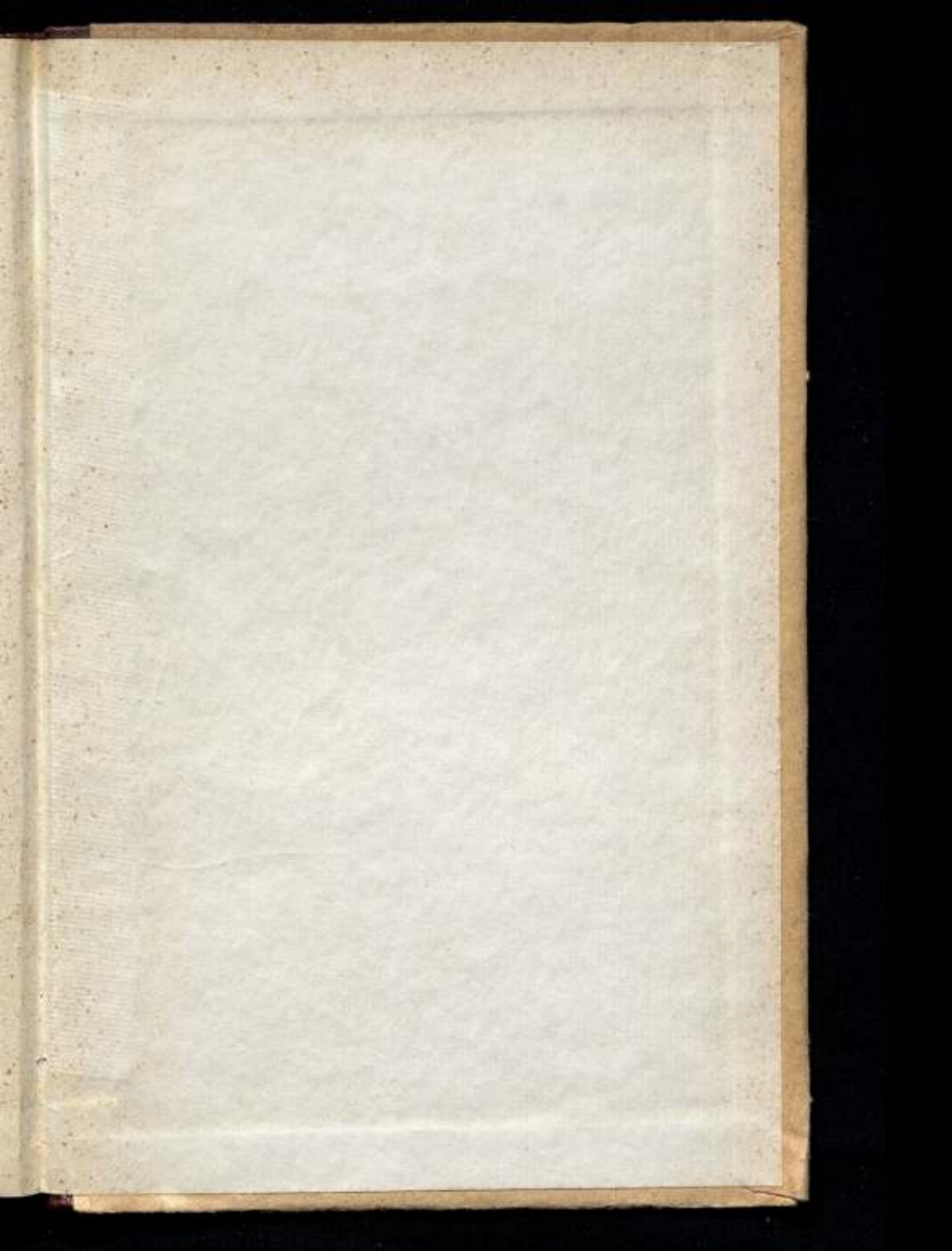
Уч.-изд. л. 17,4. Тираж 2000 экз. Цена 1 р. 68 к. Заказ 1319

Типография № 6 Главполиграфпрома
193144, Ленинград, ул. Моисеенко, 10

C
B
D
T
T







Гр. 68 к.