

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
ИМЕНИ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

6/VII-77

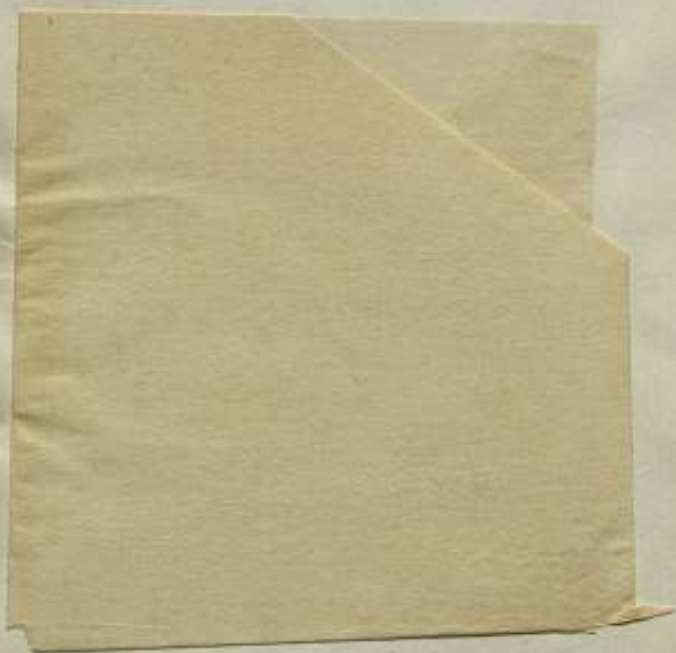
# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 200(260)



2  
11/10



ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

БИБЛИОТЕКА  
Всесоюзного научно-исследова-  
тельского института метрологии  
имени Д. И. Менделеева

2  
Б9991.м  
ш 16669

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 200 (260)

Под редакцией *К. П. Широкова*



«ЭНЕРГИЯ»  
ЛЕНИНГРАД 1977

Сборник посвящен работам ВНИИМ им. Д. И. Менделеева по общим вопросам метрологии. Рассматриваются вопросы, связанные с построением систем единиц. Предлагается взаимосвязанная система единиц длины, угла и времени. Освещаются вопросы теории погрешностей при статических и динамических измерениях, а также теории надежности средств измерений. Дается анализ и сравнительная оценка непараметрических критериев проверки групп наблюдений; рассматриваются способы нормирования погрешностей измерений и т. п. Излагаются проблемы автоматизации и стандартизации измерений. Предлагается два пути решения проблемы автоматизации: разработкой комплексных автоматических устройств и созданием системы унифицированных элементов. Формируется условие набора средств автоматизации и области их применения.

Сборник рассчитан на инженерно-технических и научных работников.

И 30306-115  
051(01)-77

© Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева (ВНИИМ), 1977



## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ УРАВНЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Физическая величина относится к фундаментальным понятиям метрологии, так как она является необходимым элементом всякого измерения. Чтобы измерять, нужно иметь, что измерять, и измеряют именно физические величины как свойства или состояния конкретных объектов.

Но физические законы при переходе от объекта к объекту сохраняются и можно выражать их, понимая под величинами обобщенные свойства с незафиксированной заранее количественной стороной, которая в каждом объекте конкретизируется. Обобщенную величину, например, длину вообще, измерять нельзя, для этого нужно указать, к какому объекту она относится и вообще уточнить измерительную задачу.

Таким образом, смысл термина «величина» может изменяться аналогично тому, как это происходит со многими словами при переходе от определенного значения к неопределенному.

К физическим величинам относят те свойства или состояния объектов, которые можно выражать количественно, т. е. представлять в виде произведения отвлеченного числа на принятую единицу\*

$$X = \{X\} [X], \quad (1)$$

где  $X$  — данная конкретная величина (точнее, ее значение);  $\{X\}$  — числовое значение (отвлеченное число);  $[X]$  — единица величины  $X$ .

Отметим еще раз, что выражение (1) — это не сама физическая величина, а лишь ее оценка в виде некоторого числа единиц, количественное знание о ней. Проведение четкой границы между реальностью и ее отражением в сознании особенно полезно в метрологии, так как обе эти категории присутствуют в каждом измерении [2].

Значение величины становится известным лишь после измерения, откуда следует, что измерить значение величины нельзя, его до измерения просто не существует. Измеряют величину, и таким путем определяют, находят ее значение, поэтому правильнее говорить не об измерении, а об определении значения величины.

Все многообразие величин, используемых для описания некоторого класса физических явлений, можно разделить на две категории: основные и производные. К основным относят наиболее фундаментальные величины, которые могут быть введены и измерены независимо от других. Паладиос [3] называет такие величины первичными. Основных величин, вообще говоря, больше, чем

\* Здесь использованы обозначения, рекомендованные в [1].

требуется, поэтому выбор их до некоторой степени произволен. Так, для описания явлений механики в качестве основных величин иногда выбирают длину, массу и время, а иногда — длину, силу и время.

Производные величины вводят с помощью основных, для чего используют так называемые определяющие уравнения. Пусть, например, уже введены понятия массы и объема, и хотим ввести производную от них величину — плотность. Если сжимать порцию газа постоянной массы,  $\tau$ , е. уменьшать его объем, то в той же мере будет увеличиваться его плотность. Обозначив массу газа  $m$ , объем —  $v$  и плотность —  $\rho$ , можно записать

$$\rho = \frac{m}{v}. \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой определяющее уравнение в простейшей, алгебраической форме. В общем виде, сохраняя алгебраическую форму, уравнение, определяющее некоторую производную величину  $X$ , можно представить в виде:

$$X = ZX_1^{\alpha_1} X_2^{\alpha_2} \dots X_n^{\alpha_n}, \quad (3)$$

где  $X_1, \dots, X_n$  — величины, через которые она определяется;  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  — отвлеченные числа;  $Z$  — коэффициент.

Существуют и другие, более сложные определяющие уравнения, в частности, они могут иметь дифференциальную, интегральную, показательную, тригонометрическую и другие формы.

В правой части выражения (3) могут фигурировать различные величины, через которые определяется одна и та же производная величина. Так, электрическое сопротивление можно определить через напряжение на концах участка электрической цепи и силу тока в ней, а также через мощность, затрачиваемую в участке, и квадрат силы тока. Поэтому между совокупностью величин может существовать много перекрестных связей.

Совокупность величин, используемая для описания какого-либо достаточно широкого класса явлений, носит название системы величин. Понятие «система величин» довольно редко встречается в литературе, однако введение его следует считать полезным с точки зрения установления логической связи с понятиями «система единиц» и «система размерностей» или «размерная система». Понятие «система величин» введено также в международный стандарт [1].

Производные величины могут быть как размерными, так и безразмерными. Под последними понимаются величины, в размерность которых размерности основных величин входят в степени, равной нулю, и некоторые величины, безразмерные в одной системе, могут иметь размерность в другой. К безразмерным во всех системах принадлежат относительные и логарифмические величины. Относительной величиной называется отношение двух одноименных величин, логарифмической — логарифм (при том или ином основании) относительной величины.

В общем виде относительные  $X_r$  и логарифмические  $X_{\log}$  величины выражаются следующим образом:

$$X_r = \frac{X_2}{X_1}, \quad (4)$$

$$X_{\log} = \log \left( \frac{X_2}{X_1} \right), \quad (5)$$

где  $\log$  — знак логарифма при некотором незаданном основании;  $X_2/X_1$  — отношение некоторой величины к одноименной, принятой за опорную.

К относительным величинам принадлежит большой класс величин, например, относительное удлинение  $\Delta l/l$ , коэффициент усиления  $U_{вых}/U_{вх}$ , угол  $\lg \alpha = h/l$ , коэффициент преломления света  $n = \sin \alpha / \sin \beta$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi = P/UI$ , коэффициент полезного действия  $\eta = P_{полн}/P_{отр}$ , от-

носительные проницаемости — диэлектрическая  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$  и магнитная  $\mu_r = \mu/\mu_0$ , относительная атомная масса и многие другие.

Относительные величины весьма разнообразны и неповторимы по своему физическому содержанию. Однако во всех случаях уравнение, определяющее величину, представляет собой отношение двух одноименных, размерных или безразмерных величин. Таким образом, для отнесения величины к категории относительных необходимо и достаточно, чтобы определяющее уравнение представляло собой отношение двух одноименных величин. Этим, между прочим, доказывается, что плоский и телесный углы (если не изменять их общепринятые определения соответственно как отношение дуги к радиусу и как отношение площади поверхности участка сферы к квадрату радиуса) тоже принадлежат к этой категории величин, хотя по этому вопросу существуют различные точки зрения, что находит отражение в документах международных метрологических организаций. Так, в резолюциях ГКМВ единицы углов отнесены к дополнительным единицам, поскольку не решено, следует ли их отнести к основным или производным. Излагаемые здесь принципы не оставляют на этот счет сомнения.

В ряде случаев используют не саму относительную величину, а ее логарифм. Это бывает удобно, когда при возрастании одной из двух связанных между собой величин вторая растет пропорционально логарифму ее отношения к некоторому начальному значению. Так, при возрастании звукового давления слышимость возрастает пропорционально логарифму его отношения к начальному (закон Вебера—Фехнера). Поэтому обычно пользуются величиной, называемой уровнем звукового давления и выражаемой через логарифм отношения звукового давления к начальному давлению, соответствующему порогу слышимости для человека со средним по остроте слухом. При этом получают линейную зависимость между уровнем звукового давления и слышимостью.

К логарифмическим относятся также величины, производные от логарифмических, получаемые с участием длины, и отношения логарифмической величины к другой величине, например, к времени. К часто применяемым логарифмическим величинам относятся свойства четырехполосников и линий, например, ослабление и усиление; абсолютный уровень, разность уровней, относительный уровень; частотный интервал и др. От выбора основания логарифма зависит единица логарифмической величины.

Общепринято изображать физические величины буквенными символами и использовать их в физических уравнениях. Однако по вопросу о том, как интерпретировать уравнения и входящие в них символы, единого мнения нет. Многие авторы считают, что символы в уравнениях не могут означать ничего иного, кроме числовых значений величин, так как нельзя представить себе как можно множить или делить друг на друга разноименные величины [4, 5]. Согласно этой точке зрения, приведенное выше уравнение (2) следует трактовать как соотношение между числовыми значениями плотности, массы и объема, выраженных в единицах некоторой системы.

При такой трактовке физические уравнения отождествляются с соотношениями между чисто математическими величинами, т. е. между отвлеченными числами. Между тем физические величины, кроме количественной, обладают и качественной стороной, и физические уравнения отражают связи не только между количествами, но и между качествами. Следовательно, математические действия над символами в физических уравнениях нужно понимать не в прямом смысле, а как способ изображения характера связей между величинами в модели объекта или явления, описываемого уравнением.

Так, в уравнении (2) математическую операцию над символами массы и объема следует понимать не как простое деление одного количества на другое, а в более широком смысле — как выражение в математической форме взаимосвязи между количественной и качественной сторонами массы, объема и плотности. Уравнение (2) в лаконичной форме определяет плотность как величину, которая возрастает с увеличением массы порции вещества и уменьшается с увеличением ее объема.

Принятие той или иной интерпретации физических уравнений по существу означает выбор способа описания явлений. Но способ описания всегда условен, и в принципе невозможно доказать истинность или ложность любого из них, можно лишь сопоставить их и отдать предпочтение лучшему.

«Числовая» трактовка уравнений физики делает их менее содержательными, менее информативными. Поскольку числовые значения величин в принципе становятся известными только после выбора единиц и выполнения измерений (или вычислений), принятие числовой трактовки означает отказ от возможности описывать с помощью уравнений объективно существующие физические закономерности, т. е. является следствием позитивистского подхода к описанию явлений. Кроме того, если строго придерживаться этой трактовки, то нельзя производить действия и над единицами, так как единицы — это те же величины, только с изперед установленным размером. Следовательно, нужно было бы отказаться от образования производных единиц путем умножения или деления одних единиц на другие. Все это приводит к выводу, что следует отдать безусловное предпочтение интерпретации уравнений физики как описаний объективных связей между величинами.

Необходимость придания уравнениям физики большей общности и расширения их на объекты и явления независимо от отражения их в сознании человека была понята уже давно. По-видимому, первым на такую необходимость указал Лодж [6], более широко эта идея была развита Валлотом [7, 8], после него появилось много других работ [9—13], и, наконец, был издан международный стандарт ИСО [1], в котором декларируется возможность умножения и деления величин в соответствии с правилами алгебры и рекомендуется применение уравнений связи между величинами как не зависящих от выбора единиц.

В ряде работ указана возможность подразделять уравнения на три категории: уравнения связи между величинами, между числовыми значениями и между единицами. Пусть уравнение связи между величинами имеет алгебраическую форму (3), тогда уравнение связи между числовыми значениями запишется в виде

$$\{X\} = z \{X_1\}^{\alpha_1} \{X_2\}^{\alpha_2} \dots \{X_n\}^{\alpha_n}. \quad (6)$$

Разделив (3) на (6), получим уравнение связи между единицами

$$[X] = \zeta [X_1]^{\alpha_1} [X_2]^{\alpha_2} \dots [X_n]^{\alpha_n}. \quad (7)$$

Основное различие между уравнениями (3) и (6) заключается в том, что входящий в первое из них коэффициент  $Z$  не зависит от выбора единиц, в которых выражены величины, в то время как во втором он целиком зависит от этого выбора. Последнее, между прочим, является характерным признаком всех уравнений между числовыми значениями.

Наибольший интерес представляют уравнения связи между величинами. Их можно трактовать как уравнения связи между обобщенными величинами, между конкретными величинами и между значениями величин. В первых двух случаях уравнения связывают величины, существующие объективно, в третьем — оценки величин, полученные путем измерений. Способ интерпретации не влияет на форму уравнений, и каждое из них в зависимости от поставленной цели можно трактовать любыми из трех способов.

Казалось бы, номенклатура величин достаточно устоялась, все они хорошо известны, и нет необходимости заниматься вопросом об идентификации величин, т. е. вопросом о признаках, уточняющих физическую природу той или иной величины. Однако четкое определение признаков облегчает установление принципа инвариантности величин при рационализации уравнений и, в конечном счете, прояснение этого запутанного вопроса.

Физические величины вводятся в ходе раскрытия закономерностей явлений путем проведения многочисленных опытов по воспроизведению изучаемого явления и измерениям характеризующих его величин. При этом всегда конструируются измерительные приборы, вводятся единицы, одним

словом, изыскивается метод измерений интересующей величины. Каждую величину можно измерять одним или несколькими методами, однако эти методы применимы только для нее одной, различные по природе величины одним и тем же методом измерять нельзя. Поэтому указание хотя бы одного метода измерений достаточно для идентификации величины. Этот путь особенно ценен при идентификации основных величин, для которых не существует определяющих уравнений. Для идентификации основной величины необходимо указать метод прямых измерений. Так, для длины может быть указан метод наложения элементарного отрезка линии, для массы — взвешивание тела на рычажных весах, для промежутка времени — счет колебаний маятника и т. д. Правда, основных величин немного и они хорошо известны, поэтому обычно не возникает надобности в их идентификации. Тем не менее, принципиальная ее возможность имеет большое значение для решения тех же вопросов рационализации и преобразования размерностей, а, следовательно, и для анализа систем единиц.

Указание метода измерений существенно и при идентификации производных величин, особенно для тех из них, физическая природа которых не очевидна. Но обычно производные величины измеряются косвенно в соответствии с определяющим уравнением, поэтому указание метода измерений может быть заменено указанием определяющего уравнения, что обычно и делают. Часто определяющие уравнения рассматривают в отрыве от тех физических ситуаций, для которых они написаны. Между тем, уравнение следует рассматривать как описание определенной физической ситуации. Для другой ситуации изменится форма уравнения. Например, площади различных геометрических фигур определяются различными по форме уравнениями, а именно:

для прямоугольника

$$S_{\text{пр}} = ab; \quad (8)$$

для треугольника

$$S_{\text{тр}} = \frac{1}{2} ab; \quad (9)$$

для эллипса

$$S_{\text{эл}} = \pi ab, \quad (10)$$

где  $S$  — площадь соответствующей фигуры;  $a$  и  $b$  — характеристические элементы (параметры): длина сторон, полуосей, высота.

Иначе можно сказать, что прямоугольник является моделью класса объектов (геометрических фигур), площадь которых определяется по уравнению (8), треугольник — по уравнению (9) и эллипс — по уравнению (10).

Другой пример. Понятие скорости обычно вводят из примера прямолинейного равномерного движения с помощью уравнения

$$v = s/t, \quad (11)$$

где  $v$  — скорость;  $s$  — перемещение;  $t$  — время.

Можно сказать, что прямолинейное равномерное движение является моделью движения, скорость которого определяется по уравнению (11). Вообще каждое уравнение, определяющее производную величину, отражает ее связь с другими величинами, существующую в принятой модели объекта или явления. Чаще всего встречаются уравнения связи между величинами, имеющие вид (3). Коэффициент  $Z$  в таком уравнении может быть как безразмерным, так и размерным. В первом случае, как видно из приведенного выше примера, коэффициент может изменяться при переходе от одного класса объектов к другому (от одной модели к другой). Общепринято, что для одной из моделей, обычно наиболее простой, коэффициент принимают равным единице. Например, в случае определения площади простейшей фигурой является прямоугольник, и в уравнении (8), определяющем его площадь, коэффициент равен единице. Очевидно, что при этом в уравнениях (9) и (10), определяющих площади других фигур, должны появиться коэффи-



пенты, не равные единице. В принципе, можно было бы принять коэффициент равным единице не в уравнении (8), а, например, в уравнении (10), тогда в (8) и (9) появились бы коэффициенты  $\frac{1}{\pi}$  и  $\frac{1}{2\pi}$  соответственно, т. е. изменилась бы форма уравнений.

Целесообразно для упрощения изложения простейшую модель, для которой коэффициент в определяющем уравнении приравнивается единице, называть головной, а величины, через которые определяется данная производная величина — характеристическими элементами (параметрами) модели (ХЭМ). В примере с площадью за головную модель принят прямоугольник, характеристическими элементами являются длины его сторон.

Обычно в качестве моделей объектов выбирают строго правильные, «идеальные» фигуры или явления, поэтому коэффициенты, входящие в уравнения, описывающие неголовые модели, представляют собой точные числа, т. е. могут быть вычислены сколь угодно точно. Иначе обстоит дело с размерными коэффициентами.

Следует также отметить, что рассматриваемые безразмерные коэффициенты не зависят от выбора единиц, в которых выражены величины, и в этом заключается их принципиальное отличие от коэффициентов в уравнениях связи между числовыми значениями, целиком зависящих от выбора единиц.

Размерные коэффициенты, как правило, представляют собой так называемые универсальные постоянные и входят в уравнения связи между величинами, уже определенными ранее. Эти уравнения выражают собой опытные законы, значения универсальных постоянных могут быть установлены только путем измерений, и поэтому имеют ограниченную точность.

Примерами универсальных постоянных являются: гравитационная постоянная  $G$ , входящая в закон всемирного тяготения

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (12)$$

постоянная Больцмана  $k$ , связывающая энергию  $\bar{\epsilon}$  с абсолютной температурой  $T$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} kT, \quad (13)$$

постоянная Планка  $h$ , связывающая энергию фотона  $\epsilon$  с частотой  $\nu$

$$\epsilon = h\nu, \quad (14)$$

скорость света  $c$ , входящая в уравнение Эйнштейна

$$E = mc^2, \quad (15)$$

и некоторые другие. Из этих универсальных постоянных можно образовывать произведения степеней, которые представляют собой новые универсальные постоянные. Так можно получить постоянные Вина, Стефана — Больцмана, универсальную газовую постоянную, постоянную Фарадея и др.

Размерность универсальных постоянных вытекает из принципа размерной однородности, которому должны удовлетворять уравнения.

Вопрос о форме уравнений связи между величинами имеет существенное значение при анализе систем единиц, так как он связан с интерпретацией рационализации уравнений электромагнитного поля, влияющей на образование ряда электрических и магнитных единиц. В науке создавалось такое положение, что большинство физиков при описании явлений электромагнетизма пользуются нерационализованной формой уравнений, в то время как в электротехнике почти исключительно применяется рационализованная форма. Вследствие этого в зависимости между одними и теми же величинами вхо-



дят либо множитель  $4\pi$ , либо электродинамическая постоянная  $c$ , либо и то и другое, что сильно усложняет пользование литературой, излагающей уравнения в разных формах. Неудобство усугубилось тем, что возникли разногласия, как именно интерпретировать рационализацию уравнений: как рационализацию входящих в них величин или как рационализацию единиц. По этому поводу в рамках Международной электротехнической комиссии (МЭК) длительное время велась оживленная дискуссия, однако и она не внесла полной ясности. Решение этого вопроса возможно только при рассмотрении уравнений как математических моделей связей между величинами в описываемых ими моделях материальных объектов или физических явлений, с использованием понятий о головных моделях и характеристических элементах. Подробно проблема рационализации уравнений электромагнетизма с сопоставлением существующих точек зрения и разбором примеров уравнений для площадей геометрических фигур и напряженности магнитного поля рассмотрена в [14], поэтому ограничимся рассмотрением задачи в общем виде.

Алгебраическое определяющее уравнение (3) можно представить в виде

$$X = Z \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i}. \quad (16)$$

Пусть выбраны две модели объектов, которым свойственны величины  $X, X_1, X_2, \dots, X_n$ , причем первая считается головной для рационализованной формы уравнений, а вторая — для нерационализованной. Назовем первую «рациональной», а вторую — «нерациональной» головной моделью. Тогда при определении величины  $X$  с помощью рациональной головной модели ее можно обозначить  $X_{\text{ргм}}$ , а с помощью нерациональной —  $X_{\text{нргм}}$ . Для каждой из них можно написать уравнение, определяющее величину  $X$ , приняв в нем коэффициент  $Z$  равным единице, причем уравнение для рациональной головной модели будет иметь рационализованную форму, а для нерациональной нерационализованную

$$X_{\text{ргм}} = \left( \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \right)_p; \quad (17)$$

$$X_{\text{нргм}} = \left( \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \right)_n. \quad (17a)$$

Можно написать также уравнения, определяющие величину  $X$  по рациональной головной модели в нерационализованной форме и по нерациональной головной модели в рационализованной форме

$$X_{\text{ргм}} = \left( Z \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \right)_n; \quad (18)$$

$$X_{\text{нргм}} = \left( \frac{1}{Z} \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \right)_p. \quad (18a)$$

Рассмотрение равенств (17) и (18) позволяет установить, что различие их формы (появление во втором из них коэффициента  $Z$ ) не может повлиять ни на природу, ни на размер определяемой ими величины  $X_{\text{ргм}}$ , так как оба они описывают одну и ту же модель объекта, имеющую одни и те же ХЭМ  $X_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ). Аналогично и в равенствах (17a) и (18a), хотя величина  $X_{\text{нргм}}$  при тех же ХЭМ может отличаться по размеру от величины  $X_{\text{ргм}}$ , поскольку взята другая модель объекта, однако природа определяемой величины будет та же. Это положение, которое можно назвать принципом инвариантности величин по отношению к форме определяющих уравнений, имеет исключительно важное значение при анализе вопроса о рационализации

уравнений. По существу, уже оно одно опровергает концепцию рационализации величин.

Объединение уравнений (17) и (18) и соответственно (17а) и (18а) дает

$$X_{\text{ргм}} = \left( \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \right)_p = \left( Z \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \right)_n; \quad (19)$$

$$X_{\text{нгм}} = \left( \frac{1}{Z} \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \right)_p = \left( \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \right)_n. \quad (20)$$

Полученные равенства на первый взгляд кажутся парадоксальными, так как  $X_i$  одни и те же, и наличие нарушение правил алгебры. Но все дело в том, что правое и левое выражения каждой строки написаны, исходя из разных головных моделей, т. е. принадлежат разным формам уравнений.

Парадоксальная форма равенств (19) и (20) исчезает, если правые части их разложить на множители, соответствующие числовым значениям и единицам величин  $X_i$ , учти при этом, что при когерентных единицах произведение степеней единиц ХЭМ будет равно единице величины  $X$ , т. е.

$$\prod_{i=1}^n [X_i]^{\alpha_i} = [X]. \quad (21)$$

Тогда равенства примут вид:

$$X_{\text{ргм}} = \left( \prod_{i=1}^n [X_i]^{\alpha_i} \right) [X]_p = Z \left( \prod_{i=1}^n [X_i]^{\alpha_i} \right) [X]_n \quad (22)$$

и

$$X_{\text{нгм}} = \frac{1}{Z} \left( \prod_{i=1}^n [X_i]^{\alpha_i} \right) [X]_p = \left( \prod_{i=1}^n [X_i]^{\alpha_i} \right) [X]_n. \quad (23)$$

При условии неизменности величины  $X$  характеристические элементы  $X_i$  одной и той же модели не изменятся при переходе от одной формы уравнения к другой и можно сохранить неизменными их единицы и числовые значения. Но если равны числовые значения  $\{X_i\}$  ХЭМ, то равны и произведения их степеней, поэтому их можно сократить. При этом индексы  $p$  и  $n$  перейдут к соответствующим единицам величины  $X$ .

После сокращения на  $\prod_{i=1}^n [X_i]^{\alpha_i}$  оба уравнения дают одно и то же соотношение между когерентными единицами величины  $X$ :

$$[X]_n = \frac{1}{Z} [X]_p. \quad (24)$$

Таким образом, при переходе от одной формы уравнений к другой, вызывающем изменение числового коэффициента в уравнении, определяющем некоторую величину  $X$ , должна быть изменена ее когерентная единица. Иными словами, если одна и та же величина определяется по одной и той же модели объекта с одинаковыми характеристическими элементами, но с помощью двух определяющих уравнений, имеющих различные числовые коэффициенты, это возможно только при условии, что определяемая величина выражается в различных когерентных единицах, находящихся в отношении, обратном отношению коэффициентов.

Для иллюстрации можно воспользоваться примером определения площади поверхности (или просто площади) с помощью двух головных моделей —

рациональной и иррациональной, причем в качестве первой взят прямоугольник, в качестве второй — эллипс:

$$S_{\text{прм}} = S_{\text{пр}} = (ab)_p; \quad (25)$$

$$S_{\text{нрм}} = S_{\text{эл}} = (a_1 b_1)_n. \quad (25a)$$

где  $a$  и  $b$  — длины сторон прямоугольника;  $a_1$  и  $b_1$  — длины полуосей эллипса.

Можно написать вторую пару равенств, определяющих площадь прямоугольника в иррационализованной форме и эллипса в рационализованной

$$S_{\text{прм}} = S_{\text{пр}} = \left( \frac{1}{\pi} ab \right)_n; \quad (26)$$

$$S_{\text{нрм}} = S_{\text{эл}} = (\pi a_1 b_1)_p. \quad (26a)$$

Не вызывает сомнений, что если выражения (25) и (26) относятся к одному и тому же прямоугольнику, то его площадь  $S_{\text{пр}}$  в обоих случаях остается одной и той же, хотя и выразится по-разному. То же относится и к площади эллипса  $S_{\text{эл}}$ , если выражения (25a) и (26a) относятся к одному и тому же эллипсу (хотя вследствие различия моделей, даже при  $a_1 = a$  и  $b_1 = b$  имеем  $S_{\text{эл}} \neq S_{\text{пр}}$ ). Иначе говоря, данный прямоугольник (или соответственно эллипс) имеет одну и ту же площадь независимо от того, выражается ли она в рационализованной или иррационализованной форме, что и является иллюстрацией принципа инвариантности величин по отношению к форме определяющих уравнений.

Следовательно, можно приравнять выражения для  $S_{\text{пр}}$  и для  $S_{\text{эл}}$

$$S_{\text{прм}} = S_{\text{пр}} = (ab)_p = \left( \frac{1}{\pi} ab \right)_n; \quad (27)$$

$$S_{\text{нрм}} = S_{\text{эл}} = (\pi a_1 b_1)_p = (a_1 b_1)_n. \quad (28)$$

После разложения выражений (27) и (28) на множители аналогично уравнениям (22) и (23) получим

$$S_{\text{прм}} = S_{\text{пр}} = \{a\} \{b\} [S]_p = \frac{1}{\pi} \{a\} \{b\} [S]_n; \quad (29)$$

$$S_{\text{нрм}} = S_{\text{эл}} = \pi \{a_1\} \{b_1\} [S]_p = \{a_1\} \{b_1\} [S]_n. \quad (30)$$

Из этих выражений путем деления на числовые значения можно получить одно и то же соотношение между когерентными единицами

$$[S]_n = \pi [S]_p, \quad (31)$$

которое находится в согласии с (24), поскольку во взятом примере  $Z = \frac{1}{\pi}$ .

Изложенные теоретические положения находят приложение в электротехнике, где ряд определяющих уравнений подвергается рационализации. Особое внимание привлекает пример напряженности магнитного поля  $H$ , обсуждавшийся в ряде работ и подробно рассмотренный в работе [14], которая также может быть использована для иллюстрации развитых здесь положений.

В заключение можно сделать следующие выводы:

физические величины выражают свойства материальных объектов или параметры физических явлений;

физические уравнения представляют собой описания в математической форме связей между величинами, существующих в моделях материальных объектов или явлений, поэтому их следует рассматривать совместно с моделями, которые они описывают;

символы в уравнениях связи между величинами могут обозначать обобщенные величины, конкретные величины или значения величин, и действия

над символами величины следует понимать как выражение количественных связей, существующих в моделях объектов или явлений;

определяющие уравнения отражают связи между некоторой производной величиной и величинами, именуемыми в статье характеристическими элементами модели;

в одном из определяющих данную величину уравнений коэффициент можно выбрать произвольно, в частности, принять его равным единице в уравнении для головной модели, при этом однозначно определяются коэффициенты в уравнениях, описывающих другие, неголовные, модели;

при рационализации уравнений происходит переход от одной головной модели к другой, но величины остаются инвариантными, изменяется только размер когерентной единицы производной величины, определяемой уравнением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International standard ISO 31/0 1974. "General Introduction to ISO 31—General principles concerning quantities, units and symbols", 14 p.
2. Широков К. П. Об основных понятиях метрологии.— «Труды метрологических институтов СССР», вып. 130 (190), 1972, М.—Л., Изд-во стандартов, с. 6—18.
3. Palacios J. Analyse dimensionnelle. Paris, Gauthier—Villars, 1970, 206 p.
4. Хвольсон О. Д. Курс физики, т. 1, Л.—М., ГТТИ, 1933, 642 с., с ил.
5. Сена Л. А. Единицы физических величин и их размерности. М., «Наука», 1969, 304 с.
6. Lodge A. The multiplication and division of concrete quantities.— "Nature", 1888, v. 38, p. 281—283.
7. Wallot J. Die physikalischen und technischen Einheiten.— ETZ, 1922, v. 43, p. 132—933, 1381—86.
8. Wallot J. Größengleichungen, Einheiten und Dimensionen, Leipzig, Barth, 1957, 220 s.
9. Landolt M. Concrete and abstract quantities and units after rationalisation.— "El. Eng.", 1961, sept., p. 690—695.
10. Page C. H. Physical entities and mathematical representation.— "Journ. of research of the NBS", 1961, v. 65B, p. 227—235.
11. Stille U. Messen und Rechnen in der Physik. Braunschweig, Vieweg, 1961, 431 s.
12. Castelliz H. On quantity algebra and rationalisation.— "El. Eng.", 1961, N 8, p. 587—589.
13. Cornelius P. Quantity equations and system variation in electricity.— "Physica", 1964, v. 30, p. 1446—1452.
14. Широков К. П. Еще раз о рационализации уравнений электромагнитного поля.— «Измерительная техника», 1965, № 6, с. 1—5.

Поступила в редакцию 5/IX—1975 г.

УДК 53.081.4

К. П. Широков

ВНИИМ

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ ЕДИНИЦ

Объективная количественная информация о физической величине может быть получена только при условии выражения этой величины в общепринятой единице. На уровне эксперимента такую информацию получают путем измерений, для чего единица должна быть не только выбрана, но и материализована в средствах измерений, последние должны быть сделаны ее носителями.

Однако физические объекты и явления сложны, для их познания введены многие величины и соответствующие единицы. Широкое применение получили системы единиц, развитие которых в значительной степени обусловлено наличием связей между величинами, существующих в реальных объектах и явлениях и выражаемых в виде уравнений. Действительно, поскольку производные величины вводятся с помощью уравнений, определяющих их через другие величины, естественно и единицы образовывать, используя те же уравнения. Этот метод лежит в основе построения систем единиц, в том числе и Международной системы единиц (СИ), охватывающей все разделы физики и открывающей возможность унифицировать единицы во всем мире.

Некоторые вопросы, возникающие в ходе развития СИ, до настоящего времени остаются неясными и вызывают споры, например, вопросы о характере соотношений между единицами трех- и четырехмерных систем, о влиянии рационализации, о категориях угловых единиц и другие. Поэтому остается актуальной проблема создания системы теоретических положений о характере связей между единицами, которыми можно было бы руководствоваться при решении многих вопросов метрологии.

В другой статье (см. стр. 3) автор попытался развить современные представления об уравнениях связи между величинами, интерпретируя их как описания в математической форме связей между величинами, реально существующих в физических объектах или явлениях. Согласно этим представлениям, каждое уравнение описывает некоторую модель объекта или явления, причем одна из величин определяется через другие, уже введенные величины, которые автором названы характеристическими элементами модели (ХЭМ). Могут существовать модели объектов или явлений одного и того же рода, но с различной геометрией, что влияет на коэффициенты в уравнениях. Если одна из моделей, называемая автором головной, описывается уравнением с коэффициентом, равным числу 1, то в уравнениях для других моделей (неголовных) появляются коэффициенты, отличные от единицы. Эти положения использованы и в настоящей статье, в которой освещается принципиальная сторона образования и экспериментального воспроизведения производных единиц.

Обычно для указания размера единицы приводят только уравнения их связи с другими единицами, например,  $1 \text{ Н} = 1 \text{ м} \cdot 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ с}^{-2}$ . Однако такие указания недостаточны, так как они не конкретизируют физическую ситуацию или, в принятых здесь терминах, модель объекта и ее характеристические элементы, к которым относится данное уравнение связи между единицами. Между тем нередки случаи, когда без этих указаний нельзя определить размер единицы. Например, в случае единицы напряженности магнитного поля — А/м, уравнение  $1 \text{ А/м} = 1 \text{ А} : 1 \text{ м}$  не дает представления о конфигурации проводника с током 1 А и о расстоянии 1 м, от которых в конце концов и зависит создаваемая напряженность поля. Так, в центре кольцевого проводника диаметром 1 м, несущего ток 1 А, напряженность поля будет в 2 π раз больше, чем в точке на расстоянии 1 м от прямолинейного проводника с тем же током. Для внесения полной определенности в физическую природу и размер единицы следует, кроме определяющего уравнения, указать описываемую им модель объекта или явления и характеристические элементы этой модели (ХЭМ). Для головной модели алгебраическое уравнение, связывающее величину X с ХЭМ, имеет следующий общий вид:

$$X = X_1^{\alpha_1} X_2^{\alpha_2} \dots X_n^{\alpha_n} = \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i}, \quad (1)$$

где  $X_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) — ХЭМ.

Для любой из неголовных моделей уравнение будет содержать некоторый коэффициент  $Z \neq 1$ :

$$X = Z \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i}. \quad (2)$$



Простейшим способом единицу величины  $X$  можно образовать по головной модели, описываемой уравнением (1), используя единичные (т. е. равные единицам) ХЭМ  $X_i$ . Однако в принципе, и иногда это практически полезнее, можно использовать неединичные ХЭМ. Возможно также образовывать единицу по неголовной модели, описываемой уравнением (2). Ниже будут рассмотрены различные случаи, начиная с самого общего.

Пусть поставлена задача образовать когерентную единицу\* величины  $X$  по неголовной модели [уравнение (2)]. Единица всегда равна отношению величины к ее числовому значению. Поскольку при когерентных единицах уравнение связи между числовыми значениями имеет вид

$$\{X\} = \{Z\} \prod_{i=1}^n \{X_i\}^{\alpha_i}, \quad (3)$$

можно сразу написать выражение для когерентной единицы величины  $X$ , воспроизводимой данной моделью

$$\{X\} = \frac{X}{\{Z\} \prod_{i=1}^n \{X_i\}^{\alpha_i}}. \quad (4)$$

Когерентная единица меньше величины  $X$ , воспроизводимой неголовной моделью, в число раз, равное числовому значению коэффициента  $Z$ , умноженному на произведение степеней числовых значений ХЭМ. Отметим, что эта формула пригодна для моделей, описываемых уравнениями как с размерным, так и с безразмерным коэффициентом  $Z$ , в последнем случае числовое значение  $\{Z\}$  будет равно самому коэффициенту  $Z$ .

ХЭМ могут быть взяты как равными по размерам их единицам, так и не равными. В первом случае будет соблюдаться условие

$$\{X_1\} = \{X_2\} = \dots = \{X_n\} = 1 \quad (5)$$

со следствием

$$\prod_{i=1}^n \{X_i\}^{\alpha_i} = 1, \quad (6)$$

в силу чего уравнение (4) приобретет вид:

$$\{X\} = \frac{X}{\{Z\}}, \quad (7)$$

т. е. при единичных ХЭМ когерентная единица величины  $X$ , воспроизводимой с использованием неголовной модели, будет в  $\{Z\}$  раз меньше самой величины.

Формула (7) действительна и для случая неединичных ХЭМ, но удовлетворяющих условию (6).

Можно потребовать, чтобы модель воспроизводила величину  $X$ , равную когерентной единице  $\{X\}$ . Для этого нужно сделать, чтобы знаменатель уравнения (4) был равен числу 1, т. е. чтобы

$$\prod_{i=1}^n \{X_i\}^{\alpha_i} = \frac{1}{\{Z\}}. \quad (8)$$

Это значит, что размеры ХЭМ должны быть подобраны так, чтобы их числовые значения удовлетворяли соотношению (8).

\* Когерентными называются единицы, при использовании которых в уравнении связи между числовыми значениями величины сохраняется тот же коэффициент, что и в уравнении связи между самими величинами



Приведенные выше рассуждения относились к неголовной модели ( $Z \neq 1$ ). Очевидно, что для головной модели ( $Z=1$ ) они упростятся, в частности, выражение (4) примет вид

$$[X] = \frac{X}{\prod_{i=1}^n [X_i]^{\alpha_i}}, \quad (9)$$

т. е. при использовании головной модели когерентная единица меньше величины  $X$  в число раз, равное произведению степеней числовых значений ХЭМ.

Если требуется, чтобы воспроизведенная головной моделью величина  $X$  равнялась своей когерентной единице, то для этого достаточно соблюсти условие (6), что наиболее просто достигается выбором единичных ХЭМ, т. е. выполнением (5), хотя в принципе условие (6) может быть соблюдено и при ином подборе размеров ХЭМ.

Подстановка в формулу (9) выражения (1) дает

$$[X] = \prod_{i=1}^n [X_i]^{\alpha_i}, \quad (10)$$

что и является условием когерентности единиц при использовании головной модели объекта.

Аналогичными рассуждениями можно прийти к формулам, связывающим величины, выраженные в некогерентных единицах. Обозначив некогерентные единицы ХЭМ через  $\zeta_i[X_i]$ , где  $\zeta_i$  множитель некогерентности, и соответствующие этим единицам числовые значения ХЭМ — через  $z_i[X_i]$ , где  $z_i = 1/\zeta_i$ , уравнение (2) можно написать в виде

$$X = Z \prod_{i=1}^n (z_i[X_i] \zeta_i[X_i])^{\alpha_i}. \quad (11)$$

Чтобы не усложнять выражения, в дальнейшем предполагается, что размерный коэффициент  $Z$  выражен в когерентных единицах (т. е. в единицах первоначально взятой системы, например СИ).

На основе равенства (11) можно написать выражение для когерентной единицы величины  $X$ , выраженной через некогерентные единицы ХЭМ

$$[X] = \frac{Z \prod_{i=1}^n (\zeta_i[X_i])^{\alpha_i}}{(Z) \prod_{i=1}^n \zeta_i^{\alpha_i}}. \quad (12)$$

Умножение обеих частей этого равенства на множитель некогерентности  $\zeta_X$  даст искомую некогерентную единицу величины

$$\zeta_X[X] = \frac{\zeta_X Z \prod_{i=1}^n (\zeta_i[X_i])^{\alpha_i}}{(Z) \prod_{i=1}^n \zeta_i^{\alpha_i}}. \quad (13)$$

Разделив это выражение на (11), перенеся  $X$  в правую часть и сократив, можно найти

$$\zeta_X[X] = \frac{X}{\eta \prod_{i=1}^n (z_i[X_i])^{\alpha_i}}, \quad (14)$$

где

$$\eta = \frac{Z \prod_{i=1}^n \zeta_i^{\alpha_i}}{\zeta_x}$$

Некогерентная единица величины  $X$ , воспроизводимой неголовной моделью, меньше этой величины в некоторое число раз, определяемое множителем некогерентности  $\zeta_x$  и  $\zeta_i$ , числовым значением размерного коэффициента  $Z$  и числовыми значениями ХЭМ.

Выражение (14) позволяет найти выражения некогерентной единицы для различных частных случаев. Так, при единичных ХЭМ, т. е. при

$\prod_{i=1}^n (z_i \{X_i\})^{\alpha_i} = 1$ , единица будет равна

$$\zeta_x \{X\} = \frac{X}{\eta}, \quad (15)$$

если же пожелать, чтобы модель воспроизводила величину  $X$ , равную заданной некогерентной единице, то должно выполняться условие

$$\eta \prod_{i=1}^n (z_i \{X_i\})^{\alpha_i} = 1. \quad (16)$$

Далее, если коэффициент  $Z$  в определяющем уравнении безразмерный, то будет иметь место равенство  $Z = \{Z\}$ , и выражение для некогерентной единицы напишется в виде

$$\zeta_x \{X\} = \frac{\zeta_x \prod_{i=1}^n (\zeta_i \{X_i\})^{\alpha_i}}{\prod_{i=1}^n \zeta_i^{\alpha_i}}. \quad (17)$$

Поскольку это выражение не содержит коэффициента  $Z$ , оно действительно и для случая  $Z=1$ , т. е. для образования некогерентной единицы с использованием головной модели.

Этим исчерпываются все основные варианты образования единиц как по головным, так и по неголовным моделям.

Для пояснения полученных выражений приведем некоторые примеры.

Пусть требуется образовать когерентную единицу площади  $S$  на основе головной модели прямоугольника, описываемой уравнением

$$S_{\text{пр}} = ab, \quad (18)$$

где  $a$  и  $b$  — длины сторон прямоугольника.

Согласно формуле (9), когерентная единица площади

$$\{S\} = \frac{S_{\text{пр}}}{[a] [b]}, \quad (19)$$

при условии, что  $[a] [b] = 1$ , прямоугольник будет иметь площадь, равную единице, например, равную  $1 \text{ м}^2$ , если  $a$  и  $b$  выражены в метрах. Это будет иметь место, в частности, и при единичных ХЭМ, когда прямоугольник превратится в квадрат со стороной  $1 \text{ м}$ .

Если хотим образовать когерентную единицу на основе неголовной модели, например, эллипса, описываемой уравнением

$$S_{эл} = \pi ab, \quad (20)$$

где  $a$  и  $b$  — длины полуосей, то следует применить формулу (4), согласно которой, когерентная единица площади

$$[S] = \frac{S_{эл}}{\pi \{a\} \{b\}}. \quad (21)$$

Если сделать  $\{a\} \{b\} = 1$ , то площадь эллипса будет равна  $\pi$  когерентным единицам площади, например, если  $a$  и  $b$  выражены в метрах, то площадь будет равна  $\pi$  м<sup>2</sup>. Можно потребовать, чтобы эллипс имел площадь, равную единице, тогда, согласно условию (8), произведение  $\{a\} \{b\}$  должно быть равно  $\frac{1}{\pi}$ , например,  $\{a\} = 1$ ,  $\{b\} = \frac{1}{\pi}$  или  $\{a\} = \frac{1}{2}$ ,  $\{b\} = \frac{2}{\pi}$  и т. д.

Другим примером использования неединичных ХЭМ может служить образование когерентной единицы момента инерции площади плоской фигуры по модели в виде прямоугольника с осью, проходящей через центр инерции параллельно длинной стороне. Как известно, момент инерции такой фигуры равен

$$J = bh^3/12, \quad (22)$$

где  $b$  — длина;  $h$  — высота прямоугольника. Модель не является головной ввиду наличия коэффициента  $1/12$ . Головной моделью был бы прямоугольник бесконечно малой ширины, имеющий площадь 1 м<sup>2</sup> и расположенный на расстоянии 1 м от параллельной ему оси, однако ввиду практической неосуществимости такой модели удобнее определять единицу по уравнению (22).

На основании уравнения (4) когерентная единица момента инерции будет равна

$$[J] = \frac{J}{1/12 \{b\} \{h\}^3}, \quad (23)$$

если же пожелать, чтобы момент инерции  $J$  был равен своей когерентной единице, необходимо, чтобы знаменатель был равен единице. Этого можно достигнуть различными способами, но проще всего сделать, чтобы  $b$  было равно 12  $\{b\}$  и  $h = \{h\}$ . Тогда

$$[J] = \frac{1}{12} (12 \{b\} \{h\}^3), \quad (24)$$

а в Международной системе при  $\{b\} = \{h\} = 1$  м

$$[J] = 1 \text{ м}^4.$$

В приведенных примерах коэффициент  $Z$  был безразмерным. В качестве примера уравнения с размерным коэффициентом  $Z$  можно взять закон всемирного тяготения

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (25)$$

где  $F$  — сила притяжения двух материальных точек с массами  $m_1$  и  $m_2$ ;  $r$  — расстояние между ними;  $G$  — гравитационная постоянная, имеющая размерность, определяемую из условия размерной однородности обеих частей уравнения.



Исходя снова из равенства (4), можно для когерентной единицы силы написать

$$[F] = \frac{F}{\{G\} \{m_1\} \{m_2\} \{r\}^{-2}} \quad (26)$$

Выбирая размеры ХЭМ так, чтобы знаменатель правой части стал равным единице, можно сделать силу притяжения равной своей когерентной единице (в СИ — ньютону). Очевидно, что это можно сделать самыми различными способами. Пусть, например, массы  $m_1$  и  $m_2$  будут равны  $\frac{[m]}{\sqrt{\{G\}}}$ ,

т. е.  $\frac{1}{\sqrt{\{G\}}}$  кг, и расстояние  $r = [r]$ , т. е. 1 м.

Тогда, подставляя вместо  $F$  его выражение, получим

$$[F] = G \left( \frac{[m]}{\sqrt{\{G\}}} \right)^2 [r]^{-2} \quad (27)$$

В единицах Международной системы  $G = 6,670 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ , т. е.  $\{G\} = 6,670 \cdot 10^{-11}$  и  $\sqrt{\{G\}} = 8,15 \cdot 10^{-6}$ . Следовательно, для того, чтобы сила притяжения между материальными точками была равна 1 ньютону, можно сделать массы точек приблизительно равными 123 т каждая и расстояние между ними равным 1 м.

В другом варианте можно массы точек оставить равными 1 кг, а на коэффициент  $\sqrt{\{G\}}$  умножить расстояние  $r$ . Тогда выражение для единицы силы примет вид

$$[F] = G [m]^2 (\sqrt{\{G\}} [r])^{-2} \quad (28)$$

Для того, чтобы между точками с массой 1 кг каждая создать силу притяжения 1 Н, нужно расстояние между ними сделать равным  $8,15 \cdot 10^{-6}$  м.

Из приведенных примеров видно, что практически невозможно воспроизвести силу 1 Н на основе закона всемирного тяготения, поэтому не следует требовать, чтобы модель воспроизводила когерентную единицу силы. Напротив, малую долю такой единицы воспроизвести вполне возможно. Это можно проследить на примере воспроизведения некогерентной единицы на основе формулы (13). Пусть, например, поставлена задача воспроизвести этим способом единицу силы 1 нН ( $10^{-9}$  Н), причем выразить ХЭМ также в некогерентных единицах: массы  $m_1$  и  $m_2$  — в англ. фунтах (1 lb = 0,454 кг), расстояние  $r$  — в футах (1 ft = 0,3048 м). Множители некогерентности в этом случае будут:  $\xi_F = 10^{-9}$ ,  $\xi_m = 0,454$  и  $\xi_r = 0,3048$ . Тогда формула (13) примет вид

$$\xi_F [F] = \frac{F}{\{G\} \xi_m^2 \xi_r^{-2} \xi_F^{-1} (\xi_m [m])^2 (\xi_r [r])^{-2}} \quad (29)$$

Выражая силу  $F$  в некогерентных единицах и введя аналогично (14) обозначение  $\eta = \frac{\{G\} \xi_m^2 \xi_r^{-2}}{\xi_F}$ , можно получить

$$\xi_F [F] = \frac{G (\xi_m [m])^2 (\xi_r [r])^{-2}}{\eta} \quad (30)$$

Подстановка  $\{G\} = 6,670 \cdot 10^{-11}$ ;  $\xi_F = 10^{-9}$ ;  $\xi_m = 0,454$  и  $\xi_r = 0,3048$  дает для  $\eta$  значение 0,148. Его можно распределить различными способами между множителями числителя (кроме множителя  $G$ , являющегося фундаментальной

константой), например так, как уже было сделано выше, т. е. в первом случае принять

$$\zeta_F [F] = G \left( \frac{\zeta_{in} [m]}{V \eta} \right)^2 (\zeta_r [r])^{-2}, \quad (31)$$

во втором

$$\zeta_F [F] = G (\zeta_{in} [m])^2 (V \eta \zeta_r [r])^{-2}. \quad (32)$$

Так как  $V \eta = 0,385$ , то для создания силы притяжения 1 нН нужно в первом случае массы точек взять равными  $\frac{1 lb}{0,385} \approx 2,6$  lb; а расстояние между ними равным 1ft, во втором — массы точек взять равными 1lb и расстояние между ними — 0,385 ft ( $\approx 4,6$  in = 118 мм).

Выше рассмотрена теоретическая сторона образования производных единиц с использованием важнейших типов моделей, причем, как и обычно в подобных теоретических рассуждениях, принят постулат идеальности моделей. На экспериментальном уровне такие модели, конечно, неосуществимы, поэтому приходится, кроме основных соотношений, учитывать неполное соответствие условий эксперимента идеальным.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Исходя из положения, что при образовании производной единицы некоторой величины определяющее уравнение следует рассматривать совместно с описываемой им моделью объекта или явления, выведены соотношения между величиной, воспроизводимой данной моделью, и единицей этой величины как в общем случае модели, описываемой уравнением с произвольным коэффициентом, так и в важнейших частных случаях.

В общем случае когерентная производная единица равна величине, воспроизводимой моделью, уменьшенной в некоторое число раз, зависящее от коэффициента в уравнении и размеров характеристических элементов модели (ХЭМ).

При единичных ХЭМ когерентная единица равна величине, деленной на числовое значение коэффициента в уравнении. Если при этом используется головная модель, т. е. коэффициент в уравнении равен единице, то когерентная единица равна воспроизводимой моделью величине.

При образовании некогерентной единицы производной величины должны быть приняты во внимание множители некогерентности этой единицы и единиц, в которых выражены ХЭМ.

Материал статьи может быть использован при решении некоторых сложных и спорных вопросов построения систем единиц.

*Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.*

# ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 519.262

Т. Н. Сирая

ВНИИМ

## МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ ГРУПП НАБЛЮДЕНИЯ

В метрологии часто экспериментальные данные получают в результате наблюдений, проводимых в несколько этапов или несколькими наблюдателями. В связи с тем, что числовые характеристики групп наблюдений различны, требуется определить, являются ли эти различия существенными или они объясняются случайными факторами, т. е. проверить статистическую однородность групп. Если группы результатов наблюдений однородны, то их можно объединить и обрабатывать как одну выборку. Статистическая обработка неоднородных групп наблюдений значительно сложнее.

Наиболее точные результаты при проверке однородности получают, исходя из предположения, что каждая группа является выборкой из нормального распределения [1, 2]. Однако на практике это предположение не всегда выполняется, кроме того, применять критерии, полученные для нормальных распределений, иногда нецелесообразно из-за их трудоемкости.

Рассмотрим основные непараметрические критерии однородности, в которых не вводится предположение о функции распределения.

### Постановка задачи

Пусть имеются  $k$  независимых выборок ( $k > 2$ ), функции распределения которых неизвестны

$$X_{i1}, \dots, X_{in_i}; \quad i = 1 \dots k.$$

Требуется проверить гипотезу  $H_0$  о том, что функции распределения этих выборок совпадают.

В теории параметрических критериев возможные функции распределения выборок зависят от конечного числа неизвестных параметров

$$F_i = F(\theta_1^{(i)}, \dots, \theta_r^{(i)}).$$

В этом случае задача сводится к проверке  $r$  гипотез относительно параметров

$$\theta_j^{(1)} = \dots = \theta_j^{(k)} = \theta_j, \quad j = 1 \dots r.$$

Если известно, что все выборки имеют нормальные распределения, то параметрами являются:  $\theta_1 = m$  — математическое ожидание;  $\theta_2 = \sigma^2$  — дисперсия. Тогда проверяют две гипотезы [2]

$$\sigma_1^2 = \dots = \sigma_k^2;$$

$$m_1 = \dots = m_k.$$



В теории непараметрических критериев класс возможных функций распределений очень широк, обычно в него входят все непрерывные функции распределения. Представить функцию распределения  $F_i$  в виде известной функции конечного числа параметров невозможно, поэтому для проверки однородности используют некоторые признаки или следствия однородности, например, равенство математических ожиданий или медиан, равенство частот попадания в интервалы группировки.

### Основные понятия

Напомним основные понятия, связанные с проверкой статистических гипотез [1, 3]. Гипотеза  $H$  проверяется следующим образом. Выбирают критическую область  $W$  в пространстве возможных значений совокупности наблюдений  $X = (X_1, \dots, X_n)$ . Гипотеза  $H$  отвергается, если наблюдаемое значение  $X$  попадает в критическую область  $W$ , и принимается, если  $X$  не попадает в  $W$ . В результате можно принять правильное решение или совершить ошибку. Ошибка 1-го рода совершается, когда отвергают верную гипотезу, ошибка 2-го рода — когда принимают неверную гипотезу. При выборе критической области  $W$  задают уровень значимости  $\alpha$ , где  $0 < \alpha < 1$ , и налагают условие, что вероятность ошибки 1-го рода не превосходит  $\alpha$ .

Как правило, критерий основывается на некоторой функции от наблюдений  $t = t(X_1, \dots, X_n)$ , называемой статистикой критерия, а критическая область бывает одного из трех типов

$$W = \{(X_1, \dots, X_n) : t(X_1, \dots, X_n) > c_1\};$$

$$W = \{(X_1, \dots, X_n) : t(X_1, \dots, X_n) < c_2\};$$

$$W = \{(X_1, \dots, X_n) : t(X_1, \dots, X_n) > c_1, \text{ или } t(X_1, \dots, X_n) \leq c_2\}.$$

При критической области первого и второго типа критерий называют односторонним, а для третьего типа — двусторонним, основанным на статистике  $t$ . Выбор одностороннего или двустороннего критерия зависит от альтернативы, против которой проверяется гипотеза  $H$ , т. е. от того, каких нарушений гипотезы мы опасаемся. Статистика  $t$  выбирается так, что если гипотеза  $H$  верна, можно найти (точно или приближенно) ее функцию распределения  $F_t$ . Задав уровень значимости  $\alpha$ , верхнее и нижнее критические значения  $c_1$  и  $c_2$  для односторонних критериев находят из условий

$$F_t(c_1) > 1 - \alpha;$$

$$F_t(c_2) \leq \alpha;$$

а для двустороннего условия

$$F_t(c_1) - F_t(c_2) = 1 - \alpha \quad (\text{как правило, берут такие } c_1 \text{ и } c_2, \text{ при которых } F_t(c_1) > 1 - \frac{\alpha}{2}, F_t(c_2) \leq \frac{\alpha}{2}).$$

Результат проверки гипотезы зависит от выбранного уровня значимости  $\alpha$ . Если увеличивать  $\alpha$ , то критическая область расширяется, и гипотеза отвергается чаще (вероятность ошибки 1-го рода растет). Если уменьшать  $\alpha$ , то критическая область сужается, и гипотеза отвергается реже, снижается чувствительность критерия (растет вероятность ошибки 2-го рода). При фиксированном уровне значимости критическая область должна выбираться так, чтобы мощность критерия (вероятность отвергнуть гипотезу, если она неверна) была наибольшей.

По способу построения критерии делятся на параметрические и непараметрические. Непараметрические критерии не используют предположений о виде функций распределения выборок и поэтому не требуют предварительной проверки соответствующих гипотез. Кроме того, применение их менее трудоемко. Непараметрические критерии обладают меньшей мощностью, чем параметрические (при тех же альтернативах), однако ввиду небольшой потери мощности во многих случаях не следует отказываться от применения

этих простых и удобных критериев, в особенности для получения быстрых первоначальных выводов и тогда, когда распределения не являются нормальными.

Непараметрические критерии однородности можно разделить на две группы: критерии, основанные на разности эмпирических распределений (или эмпирических функций распределения), и порядковые (ранговые). К первой группе относятся критерий  $\chi^2$  для проверки однородности, критерии Колмогорова—Смирнова и близкие к ним. Ко второй группе относятся критерий знаков, критерий серий, критерии Уилкоксона и Манна—Уитни, критерий Вандер Вардена и др. Ранговые критерии целесообразно применять для определения различия средних значений распределений, однако они позволяют обнаружить и другие различия.

Хотя непараметрический критерий не зависит от функции распределения выборок, мощность его будет меняться с изменением этой функции. Для каждого критерия можно найти такую функцию распределения, при которой он будет асимптотически наиболее мощным [4].

Непараметрические критерии будем сравнивать по мощности с критерием Стьюдента для проверки равенства средних значений двух нормальных распределений с одинаковыми дисперсиями. Критерий Стьюдента состоит в следующем [1—3]. Предположим, что  $X_1, \dots, X_n$  и  $Y_1, \dots, Y_m$  — выборки из нормальных распределений с дисперсией 1 и математическими ожиданиями  $\mu$  и 0. Проверяется гипотеза  $H_0: \mu = 0$  против альтернативы  $H_1: \mu > 0$  или  $H_2: \mu \neq 0$ . Критерий Стьюдента основан на статистике

$$t = \frac{(\bar{X} - \bar{Y})}{s},$$

где

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i; \quad \bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_i;$$

$$s^2 = \frac{1}{m+n-2} \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{m} \right) \left[ \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 + \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2 \right].$$

Критическая область имеет вид:  
для одностороннего критерия

$$W_\alpha = \{ \bar{X} - \bar{Y} > t_{1-\alpha} s \};$$

для двустороннего

$$W_\alpha = \left\{ |\bar{X} - \bar{Y}| > t_{1-\frac{\alpha}{2}} s \right\};$$

где  $t_{1-\alpha}$  — квантиль порядка  $1-\alpha$  распределения Стьюдента с  $m+n-2$  степенями свободы.

**Критерий  $\chi^2$  для проверки однородности нескольких групп наблюдений**

Пусть имеется  $k$  выборок ( $k \geq 2$ ). Предположим, что элементы выборок классифицируются по некоторому признаку. Если признак может принимать  $r$  значений ( $r \geq 2$ ), то получают  $r$  классов. Например, если выборки состоят из размеров деталей, а признаком является годность деталей, то получают два класса, соответствующих годным и негодным деталям. Если группировка нескольких выборок производится по одной системе из  $r$  интервалов, то классы соответствуют интервалам группировки.

Проверяется гипотеза об однородности выборок по отношению к данному признаку: найдутся такие  $p_i$ ,  $i = 1, \dots, r$ , что для каждой из  $k$  выборок веро-

ятность попадания элемента в  $i$ -й класс равна  $p_i$ . Обозначим объемы выборок через  $n_j$ ,  $j=1 \dots k$ , число элементов  $j$ -й выборки, попадающих при классификации в  $i$ -й класс, через  $n_{ij}$ ,  $i=1 \dots r$ ,  $j=1 \dots k$ , а  $n_i = \sum_{j=1}^k n_{ij}$  — общее число элементов, попадающих в  $i$ -й класс. Распределение выборок по классам обычно представляют в виде таблицы однородности (см. табл. 1)

Таблица 1

Классы	Выборки					Суммы по строкам
	1	...	$j$	...	$k$	
1	$n_{11}$	...	$n_{1j}$	...	$n_{1k}$	$n_1$
...	...	...	...	...	...	...
$i$	$n_{i1}$	...	$n_{ij}$	...	$n_{ik}$	$n_i$
...	...	...	...	...	...	...
$r$	$n_{r1}$	...	$n_{rj}$	...	$n_{rk}$	$n_r$
Объемы выборок	$n_1$	...	$n_j$	...	$n_k$	$n$

Критерий однородности основан на статистике

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^k \frac{\left( n_{ij} - n_j \frac{n_i}{n} \right)^2}{n_j \frac{n_i}{n}},$$

которая асимптотически имеет распределение  $\chi^2$  с числом степеней свободы  $R = (r-1)(k-1)$ . При проверке однородности двух групп наблюдений ( $k=2$ ) выражение для  $\chi^2$  можно упростить

$$\chi^2 = n_1 n_2 \sum_{i=1}^r \frac{1}{n_{i1} + n_{i2}} \left( \frac{n_{i1}}{n_1} - \frac{n_{i2}}{n_2} \right)^2,$$

при этом число степеней свободы составит  $R=r-1$ . Для одностороннего критерия  $\chi^2$  критическая область имеет вид

$$k_\alpha = \{ \chi^2 > \chi^2(\alpha) \},$$

т. е. гипотеза однородности отвергается, если полученное значение статистики  $\chi^2$  превосходит  $\chi^2(\alpha)$ . Верхнее критическое значение  $\chi^2(\alpha)$ , отвечающее уровню значимости  $\alpha$ , берется равным квантили порядка  $1-\alpha$  распределения  $\chi^2_R$  с  $R = (r-1)(k-1)$  степенями свободы, т. е.  $P\{ \chi^2_R > \chi^2(\alpha) \} = \alpha$ .

Критерий  $\chi^2$  дает хорошие результаты, если общее число наблюдений  $n = \sum_{j=1}^k n_j$  достаточно велико (обычно рекомендуют его применять, если  $n > 40$ ). Классы наблюдений не должны быть малы; обычно этот критерий рекомендуют, когда все ожидаемые частоты  $n_j \frac{n_i}{n} > 5$ . Для небольших

значений  $n$  и малого числа степеней свободы при нахождении критических значений используют не распределение  $\chi_n^2$ , а точное распределение статистики  $\chi^2$  [4].

Мощность критерия зависит, главным образом, от общего объема выборок  $n$ . При небольшом  $n$  она мала, и даже при значительном нарушении однородности гипотеза может быть принята. При больших значениях  $n$ , наоборот даже при незначительном отклонении от однородности гипотеза может быть отвергнута. Если гипотеза однородности проверяется против более точно определенной альтернативы, то можно построить более мощный критерий, чем критерий  $\chi^2$ .

Критерий  $\chi^2$  [1, 4, 5] позволяет сравнивать частоты по классам. При применении этого критерия к выборкам из совокупностей с непрерывными функциями распределения необходимо предварительно группировать данные по интервалам, поэтому он будет зависеть от группировки. Интервалы группировки рекомендуется брать равной длины (кроме крайних), а примерное число интервалов:  $r=10 \dots 12$  при  $n=100 \dots 200$ ,  $r=20$  при  $n=400$ .

### Критерии Колмогорова—Смирнова

Критерии Колмогорова—Смирнова и близкие к ним дают возможность проверять однородность двух выборок с непрерывными функциями распределения.

Пусть  $X_1, \dots, X_n$  — выборка из совокупности с функцией распределения  $F_1$ ;  $Y_1, \dots, Y_m$  — с функцией распределения  $F_2$ ; где  $F_1$  и  $F_2$  непрерывны. Проверяется гипотеза  $H_0: F_1(x) = F_2(x)$ .

Построим по данным выборкам эмпирические функции распределений:

$$F_n^1(x) = \frac{1}{n} \left\{ \text{число } i: X_i < x \right\};$$

$$F_m^2(x) = \frac{1}{m} \left\{ \text{число } i: Y_i < x \right\}.$$

Критерии Колмогорова—Смирнова [1, 4, 6] основаны на сравнении эмпирических функций распределений  $F_n^1$  и  $F_m^2$ . Вводятся статистики, задающие «расстояние» между эмпирическими функциями распределений

$$D_{nm}^+ = \max_x \left\{ F_n^1(x) - F_m^2(x) \right\};$$

$$D_{nm} = \max_x \left| F_n^1(x) - F_m^2(x) \right|.$$

Известны асимптотические распределения этих статистик: если  $n \rightarrow \infty$ ,  $m \rightarrow \infty$  так, что  $\frac{n}{n+m} \rightarrow \rho > 0$ , то

$$P \left\{ \sqrt{\frac{nm}{n+m}} D_{nm} < z \right\} \rightarrow K(z);$$

$$P \left\{ \sqrt{\frac{nm}{n+m}} D_{nm}^+ < z \right\} \rightarrow K_+(z),$$

где  $K(z) = K_+(z) = 0$  при  $z \leq 0$ , а при  $z > 0$

$$K(z) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} (-1)^j e^{-2j^2 z^2}; \quad K_+(z) = 1 - e^{-2z^2}.$$

Предельные функции распределения табулированы [4].

Уровню значимости  $\alpha$  отвечают следующие критические области:

$$W_{\alpha} = \{D_{nm} > z(\alpha)\};$$

$$W_{\alpha}^{+} = \{D_{nm}^{+} > z^{+}(\alpha)\}.$$

Верхние критические значения  $z(\alpha)$  и  $z^{+}(\alpha)$  находят, используя предельные функции распределения  $K$  и  $K_{+}$ .

$$1 - K\left(\sqrt{\frac{nm}{n+m}} z(\alpha)\right) = \alpha,$$

$$1 - K_{+}\left(\sqrt{\frac{nm}{n+m}} z^{+}(\alpha)\right) = \alpha.$$

При применении критериев Колмогорова—Смирнова полезно вычертить графики эмпирических функций распределения, которые позволяют выявить некоторые особенности выборок.

При сравнении этих критериев с предыдущим видно, что критерии Колмогорова—Смирнова целесообразно применять в случае непрерывных функций распределений выборок, а критерий  $\chi^2$  в случае дискретных распределений или группированных выборок. Критерии Колмогорова—Смирнова являются интегральными и сравнивают функции распределения как целое, а критерий  $\chi^2$  лучше учитывает отклонения в интервалах группировки.

При выборе критерия однородности следует учитывать конкретную задачу, так как часто возможны лишь определенные отклонения от однородности. С другой стороны, различные критерии выявляют разного вида отклонения от однородности. Если хотя бы один критерий отвергает гипотезу однородности, то считать группы наблюдений однородными нельзя.

### Критерий знаков

Простейшим непараметрическим критерием однородности является критерий знаков. Обычно он применяется для сравнения двух параллельных выборок или парных наблюдений.

Пусть имеются две выборки равных объемов

$$X_1, \dots, X_n \text{ и } Y_1, \dots, Y_n.$$

Проверяется гипотеза  $H_0$  о том, что при всех  $i=1, \dots, n$  случайные величины  $X_i$  и  $Y_i$  независимы и одинаковы распределены.

Рассмотрим попарные разности  $z_i = X_i - Y_i$ ,  $i=1, \dots, n$ . Если среди разностей  $z_i$  имеются нулевые, то их можно отбросить. Обычно накладывают условие:  $P\{X_i - Y_i = 0\} = 0$ .

Обозначим число положительных разностей  $z_i$  через  $\mu_{+}$ , а число отрицательных разностей через  $\mu_{-}$ . Если гипотеза  $H_0$  верна, то

$$P\{X_i - Y_i > 0\} = P\{X_i - Y_i < 0\} = \frac{1}{2}.$$

Тогда статистика  $\mu_{+}$  имеет биномиальное распределение  $B(n, \frac{1}{2})$ , т. е.

$$P\{\mu_{+} = k\} = C_n^k 2^{-n}.$$

Критерий знаков, основанный на статистике  $\mu_{+}$ , позволяет проверить условие симметрии:

$$H_0': P\{X_i - Y_i > 0\} = P\{X_i - Y_i < 0\} = \frac{1}{2}.$$

Заметим, что это условие является следствием гипотезы попарной однородности  $H_0$ , т. е. оно слабее, чем однородность.



Критерий знаков можно в некотором смысле параметризовать: если ввести параметр  $\theta = P\{X_i - Y_i > 0\}$ , то гипотеза принимает вид  $H_0: \theta = \frac{1}{2}$ .

Односторонний критерий знаков применяют для проверки гипотезы  $H_0'$  против альтернативы  $H_1: \theta = P\{X_i - Y_i > 0\} < \frac{1}{2}$ . Критическая область одностороннего критерия знаков имеет вид

$$W_\alpha = \{\mu_+ < m_\alpha\},$$

т. е. гипотеза отвергается, когда число положительных разностей оказывается меньше  $m_\alpha$ . Критическое значение  $m_\alpha$  определяется по заданному уровню значимости  $\alpha$  из условия: при  $\theta = \frac{1}{2}$

$$P\{\mu_+ < m_\alpha\} \leq \alpha; \quad P\{\mu_+ < m_\alpha + 1\} > \alpha.$$

Для  $n \leq 90$   $m_\alpha$  определяется по таблицам [4], для  $n > 90$  значения  $m_\alpha$  можно принять равными

$$m_\alpha = \left\lfloor \frac{n-1}{2} - k_\alpha \sqrt{\frac{n+1}{2}} \right\rfloor,$$

где коэффициенты  $k_{0,1} = 0,82$ ;  $k_{0,05} = 0,98$ ;  $k_{0,01} = 1,29$ .

Чаще применяют двусторонний критерий знаков; гипотеза  $H_0'$  в этом случае проверяется против альтернативы  $H_2: \theta \neq \frac{1}{2}$ . Критическая область имеет вид

$$W_\alpha = \left\{ \mu_+ < \frac{m_\alpha}{2} \text{ или } \mu_- < \frac{m_\alpha}{2} \right\},$$

т. е. гипотеза однородности отвергается, когда число положительных или отрицательных разностей окажется меньше  $\frac{m_\alpha}{2}$ .

Критерий знаков применяется для сравнения не только двух выборок, но и двух рядов наблюдений при изменении некоторого параметра (парные наблюдения), если требуется выявить различие воздействия этого параметра на два объекта. Если нет пар наблюдений (например, сравнивают две выборки разных объемов, например  $n$  и  $m$ ), то можно составить всевозможные разности  $z_{ij} = X_i - Y_j$ ,  $i = 1 \dots n$ ,  $j = 1 \dots m$ , и к этому набору разностей применить критерий знаков.

Таблица 2

$\theta$	Уровни значимости					
	0,01		0,05		0,1	
	$n$	$m_\alpha$	$n$	$m_\alpha$	$n$	$m_\alpha$
0,45	1777	833	1297	612	1080	512
0,40	442	193	327	145	267	119
0,30	106	39	79	30	67	26
0,20	44	13	35	11	28	9
0,10	24	5	17	4	13	3
0,05	15	2	12	2	11	2



Ввиду исключительной простоты критерий знаков весьма широко применяется, но мощность его невысока. Чтобы проиллюстрировать мощность критерия, определим минимальный объем выборки  $n = n(\alpha, \theta)$ , для которого вероятность попадания в критическую область  $W_\alpha$  (при условии  $P\{X_i - Y_i > 0\} = \theta$ ) не менее 0,95. Значения  $n$ , а также соответствующие критические значения  $m_\alpha$  приведены для  $\alpha = 0,01; 0,05; 0,1$  в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что если  $\theta$  близко к  $1/2$ , то объем выборки велик, т. е. незначительные отклонения от однородности критерий знаков позволяет обнаружить лишь при больших  $n$ . Если же  $\theta$  близко к 0 или 1 (в табл. 2 приведены  $\theta < \frac{1}{2}$ ), то значение  $n$  невелико. Поэтому резкие отклонения от однородности ( $\theta$  близко к 0 или 1) хорошо обнаруживаются с помощью критерия знаков уже для небольших выборок.

Подробное изложение критерия и примеры его применения можно найти в работах [1, 2, 5].

### Критерии Уилкоксона и Манна — Уитни

Критерий, предложенный Уилкоксоном и затем усовершенствованный Манном и Уитни, применяется для проверки равенства двух непрерывных функций распределения [3, 4, 6, 7, 8]. Он является наиболее мощным из непараметрических критериев, заменяющих критерий Стьюдента.

Пусть  $X_1, \dots, X_n$  и  $Y_1, \dots, Y_m$  — выборки с непрерывными функциями распределений  $F_1$  и  $F_2$ . Проверяется гипотеза  $H_0: F_1(x) = F_2(x)$ .

Расположим  $n+m$  чисел  $X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_m$  в порядке возрастания. Если отбросить индексы, то получится последовательность из  $n$  символов  $X$  и  $m$  символов  $Y$ ; общее число возможных последовательностей равно  $C_{m+n}^n$ . Обозначим через  $u_i$  число символов  $Y$ , предшествующих  $X_i$ , а через  $r_i$  — ранг  $X_i$ , т. е. его номер в последовательности. Далее считаем, что  $n \leq m$ .

Статистика Манна—Уитни  $U$  и статистика Уилкоксона  $T$  задаются выражениями

$$U = \sum_{i=1}^n u_i, \quad T = \sum_{i=1}^n r_i.$$

Между  $U$  и  $T$  имеется простая зависимость:  $T = U + \frac{n(n+1)}{2}$ , поэтому критерии, основанные на  $U$  и  $T$  — два варианта одного критерия. Рассмотрим критерий  $T$ , так как он более удобен.

При выполнении гипотезы  $H_0$  все последовательности символов  $X$  и  $Y$  равновероятны. Используя это, можно найти распределения  $U$  и  $T$  и построить критерии, основанные на этих статистиках.

Односторонний критерий Уилкоксона позволяет проверить гипотезу  $H_0$  против альтернативы  $H_1: F_1(x) \leq F_2(x)$ , т. е. случайная величина  $X$  стохастически больше, чем  $Y$ . Критическая область имеет вид

$$W_\alpha = \{T > T_\alpha\},$$

т. е. гипотеза отвергается, когда наблюдаемое значение  $T$  превосходит критическое значение  $T_\alpha$ . Действительно, если верна  $H_1$ , то большинство символов  $X$ , по-видимому, окажется в конце последовательности, а тогда  $U$  и  $T$  будут велики.

Критическое значение  $T_\alpha$  определяется условием: число последовательностей, для которых  $T > T_\alpha$ , не превосходит  $\alpha C_{m+n}^n$ . Для небольших  $n$  и  $m$  критические значения табулированы [1]. При больших  $n$  и  $m$  случайная величина

$$\tilde{T} = \sqrt{\frac{12}{mn(m+n+1)}} \left( T - \frac{n(m+n+1)}{2} - \frac{1}{2} \right)$$

имеет приближенно нормальное распределение с параметрами 0 и 1, поэтому при  $m > 25$  можно принять

$$T_{\alpha} = \frac{n(n+m+1)}{2} - \frac{1}{2} + z(1-\alpha) \sqrt{\frac{mn(m+n+1)}{12}},$$

где  $z(1-\alpha)$  — квантиль порядка  $1-\alpha$  для нормального распределения с параметрами 0 и 1, т. е.  $\Phi[z(1-\alpha)] = 1-\alpha$ .

Двусторонний критерий позволяет проверить гипотезу  $H_0$  против альтернативы  $H_2: F_1 \neq F_2$ , т. е. распределения различны. Критическая область имеет вид

$$W_{\alpha} = \left\{ T > T_{\frac{\alpha}{2}} \text{ или } T < n(n+m+1) - T_{\frac{\alpha}{2}} \right\}.$$

Сравним критерий Уилкоксона с критерием Стьюдента. Мощность критерия Уилкоксона в случае нормальных распределений с равными дисперсиями немного ниже, а именно: критерий Уилкоксона, построенный по выборкам объемов  $n$  и  $m$ , имеет примерно ту же мощность, что и критерий Стьюдента,

построенный по выборкам объемов  $\frac{3n}{\pi} \approx \frac{21}{22}n$  и  $\frac{3m}{\pi} \approx \frac{21}{22}m$ .

Таким образом, если совокупности нормальны, то преимущество критерия Стьюдента невелико, если же распределения отличны от нормальных, то критерий Уилкоксона может оказаться мощнее. При проверке однородности для плотности распределения вида  $f(x) = e^x(e^x + 1)^{-2}$  против альтернативы различия средних критерий Уилкоксона является наиболее мощным.

### Критерий Ван дер Вардена и критерий числа серий

В заключение рассмотрим два порядковых критерия, сходных с ранее изложенными. Критерий Ван дер Вардена близок к критерию Уилкоксона. Они отличаются тем, что критерий Уилкоксона основан на статистике

$T = \sum_{i=1}^n r_i$ , а критерий Ван дер Вардена — на статистике

$$X = \sum_{i=1}^n z \left( \frac{r_i}{n+m+1} \right),$$

где  $r_i$  — ранги величины  $X_i$ ;  $z(p)$  — квантиль порядка  $p$  нормального распределения со средним 0 и дисперсией 1.

Односторонний критерий Ван дер Вардена позволяет проверить гипотезу однородности  $H_0: F_1 = F_2$  против альтернативы  $H: F_1(x) \leq F_2(x)$ . Критическая область имеет вид

$$W_{\alpha} = \{X > X_{\alpha}\}$$

критические значения  $X_{\alpha}$  табулированы [4].

Критическая область двустороннего критерия Ван дер Вардена имеет вид  $W_{\alpha} = \left\{ X > X_{\frac{\alpha}{2}} \text{ или } X < -X_{\frac{\alpha}{2}} \right\}$ .

Критерий Ван дер Вардена [3, 4, 6, 9] целесообразно применять, когда альтернатива состоит в различии средних значений двух выборок, особенно, когда выборки близки к нормальным. Критерий имеет довольно высокую

мощность; для нормального распределения он имеет асимптотически такую же мощность, как и критерий Стьюдента, а при отклонениях от нормального распределения он часто оказывается мощнее критерия Стьюдента.

Критерий числа серий — один из самых простых. Рассмотрим последовательность символов  $X$  и  $Y$ , построенную по исходным выборкам  $X_1, \dots, X_n$  и  $Y_1, \dots, Y_m$ , как в критерии Уилкоксона. Критерий основан на статистике  $\gamma$ , равной общему числу серий в данной последовательности (серией называется часть последовательности, состоящая из одинаковых символов).

Критическая область имеет вид

$$W_\alpha = \{\gamma < g(\alpha, n, m) \text{ или } \gamma > G(\alpha, n, m)\}.$$

При  $n \leq m \leq 20$  критические значения  $g(\alpha, n, m)$  и  $G(\alpha, n, m)$  табулированы [4]. При  $m > 20$  для нахождения критических значений используют нормальную аппроксимацию распределения статистики  $\gamma$ , и критическая область принимает вид:

$$(\gamma - E\gamma)^2 > D\gamma \left[ z \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) + \frac{1}{2\sqrt{D\gamma}} \right]^2,$$

$$E\gamma = 1 + \frac{2mn}{m+n};$$

$$D\gamma = \frac{2mn(2mn - m - n)}{(m+n)^2(m+n-1)}.$$

Мощность критерия числа серий невысока, но он прост и удобен [3, 4, 6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крамер Г. Математические методы статистики. М., Изд-во иностр. лит., 1948, 632 с.
2. Кудряшова Ж. Ф., Рабинович С. Г., Резник К. А. Рекомендация по методам обработки результатов наблюдений при прямых измерениях. — В сб. «Труды метрологических институтов СССР», М., Изд-во стандартов, вып. 134 (194), 1972, 118 с.
3. Ван дер Варден Б. Л. Математическая статистика. М., Изд-во иностр. лит., 1960, 434 с. ил.
4. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М., «Наука», 1965, 464 с. ил.
5. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применение. М., «Наука», 1968, 548 с. ил.
6. Крюков В. Ф. Статистические критерии проверки гипотезы однородности двух выборок. — В сб. «Труды государственного гидрологического института», Л., Гидрометеоиздат, вып. 196, 1973, с. 97—123.
7. Кудряшова Ж. Ф., Рабинович С. Г. Методы обработки результатов наблюдений при косвенных измерениях. — В сб. «Труды метрологических институтов СССР», Л., «Энергия», вып. 172 (232), 1975, с. 3—58.
8. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М., «Мир», 1974.
9. Гаек Я., Шидак З. Теория ранговых критериев. М., «Наука», 1971, 376 с. с ил.

Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.

### ОБЩИЕ МЕТОДЫ НОРМИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель настоящей работы—выявить выработанные практикой общие методы нормирования погрешностей средств измерений (СИ) и пути их экспериментального определения. Актуальность вопроса обусловлена тем, что нормирование предопределяет свойства СИ и, следовательно, играет важную роль в обеспечении единства измерений.

Нормирование представляет собой волевой акт, отражающий соглашение между изготовителями средств измерений (СИ) и теми, кто их затем применяет. Однако многолетний опыт изготовления и применения СИ выработал некоторые общие правила решения этой задачи и соответственно достижения тех целей, ради которых в конечном счете и осуществляется нормирование.

Общие цели нормирования свойств СИ можно сформулировать следующим образом:

- а) достижение необходимого качества СИ, единообразия и взаимозаменяемости СИ каждого типа;
- б) обеспечение возможности по установленным нормам оценивать инструментальные погрешности измерений;
- в) создание условий для установления рациональных градаций СИ по точности.

Анализ ряда рекомендаций международных организаций\*, а также отечественных стандартов\*\* позволяет назвать следующие общие правила нормирования свойств СИ:

- а) нормировать следует все свойства СИ, влияющие на точность измерений, выполняемых с их использованием;
- б) каждое из подлежащих нормированию свойств следует нормировать по отдельности;
- в) нормирование следует осуществлять так, чтобы можно было экспериментально проверить каждый экземпляр СИ на соответствие назначенным нормам;
- г) нормирование следует осуществлять так, чтобы проверка соответствия СИ установленным нормам была максимально простой.

Приведенные правила относятся к таким утверждениям, правильность которых непосредственно нельзя доказать, о ней можно судить по признанию их специалистами и по результатам применения. В данном случае оба названных критерия выполняются. О согласии с мнением коллег можно судить по работе [1], а о последствиях применения—по ряду примеров того, как невыполнение хотя бы одного из названных правил приводило к решениям, которые приходилось затем пересматривать.

В соответствии с приведенными правилами при нормировании рассматривают по отдельности основную погрешность СИ (погрешность в нормальных условиях), дополнительные погрешности (погрешности, обусловленные регламентированными отклонениями каждой из влияющих величин от их нормаль-

\* Публикация 51 МЭК «Рекомендации для показывающих электроизмерительных приборов»; Рекомендация 34 МОЗМ «Классы точности средств измерений».

\*\* ГОСТ 13600—68 «ГСИ. Средства измерений. Классы точности. Общие требования»; ГОСТ 1845—59 «Приборы электроизмерительные. Общие технические требования»; ГОСТ 2405—72 «Манометры, вакуумметры, мановакуумметры показывающие. Общие технические требования»; ГОСТ 9763—67 «Приборы электронные измерительные. Общие технические требования».

ных значений) и все другие свойства, влияющие на погрешности измерений с применением СИ данного типа. Для каждой из погрешностей устанавливают допускаемые пределы. Для дополнительных погрешностей при возможности устанавливают функциональные зависимости погрешности от соответствующих влияющих величин (функции влияния) и допускаемые отклонения от них.

В принципе возможно нормировать и обобщенные показатели свойств СИ

(например  $\epsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^n \epsilon_{oi}^2}$ , где  $\epsilon_{oi}$  — погрешность, вызванная  $i$ -й влияющей величиной).

Однако ясно, что раздельная регламентация свойств СИ ведет к значительно лучшей взаимозаменяемости и единообразию СИ каждого типа и тем самым — к лучшему качеству СИ. Следовательно, принятый способ наилучшим образом отвечает приведенной в п. а цели нормирования.

Погрешности СИ выражают в форме абсолютных, приведенных или относительных погрешностей. Предпочтительной является относительная погрешность, так как в этом случае легче судить о получаемой погрешности измерения и, кроме того, удобно сравнивать СИ по точности. Однако применение для нормирования приведенных погрешностей также позволяет сравнивать СИ по точности независимо от их диапазонов измерений. На примере совершенствования Публикации 51 МЭК можно проследить все усиливающуюся тенденцию так устанавливать нормирующее значение, чтобы предел допускаемой основной приведенной погрешности был не абстрактной величиной, а совпадал с допускаемым пределом относительной инструментальной погрешности измерения хотя бы в одной точке диапазона СИ данного типа. Интересно заметить, что этот принцип более последовательно реализован в недавно принятой Рекомендации 34 МОЗМ, чем в Публикации 51 МЭК.

Среди свойств СИ, подлежащих нормированию, необходимо выделить динамические свойства, на которые до последнего времени не обращали должного внимания. Сопоставления по их нормированию приведены в [2].

В развитых областях приборостроения нормирование погрешностей СИ сопровождается установлением классов точности [3]. Класс точности — обобщенная характеристика, отражающая уровень допускаемых как основной, так и всех дополнительных погрешностей и норм для других свойств СИ, влияющих на точность измерений. Применение классов точности позволяет упорядочить номенклатуру СИ и существенно облегчает выбор СИ для измерений с заданной точностью.

Таким образом, достигается и цель нормирования, указанная в п. а. Однако обозначение классов точности становится затруднительным, когда одно и то же средство предназначено для воспроизведения, преобразования или измерения различных величин и при этом для разных величин нужно устанавливать разные классы точности. Такие приборы встречаются чаще всего в радиотехнике (измерительные генераторы, осциллографы). В этих случаях классы точности могут не устанавливаться.

При выпуске из производства и при дальнейшей эксплуатации СИ подлежат проверке. Главный вопрос при проверке заключается в том, чтобы выяснить, удовлетворяет ли основная погрешность СИ установленным нормам. Как известно, для этого используются образцовые СИ.

Если пределы допускаемых погрешностей образцовых СИ в 5—10 раз меньше, чем поверяемых, то погрешностью образцовых СИ на практике всегда пренебрегают. Однако часто такой запас точности не удается обеспечить. К чему же приведет уменьшение разницы в точности образцовых и поверяемых СИ? При проверке какая-то часть негодных СИ может быть признана годными (брак поверки первого рода) и часть годных СИ признана негодными (брак поверки второго рода). Естественно оценить вероятности  $p_1$  и  $p_2$  брака поверки первого и второго рода

$$p_1 = P \{ |\xi - \gamma| \leq \Delta / |\xi| > \Delta \};$$

$$p_2 = P \{ |\xi - \gamma| > \Delta / |\xi| \leq \Delta \},$$

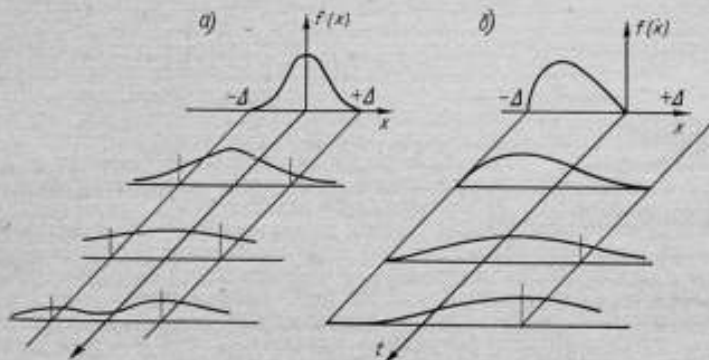


где  $\xi$ ,  $\gamma$  — погрешности поверяемого и образцового СИ;  $\Delta$  — предел допускаемой погрешности поверяемых СИ.

Для вычисления указанных вероятностей нужно знать функции плотности распределения погрешностей поверяемых  $f(\xi)$  и образцовых  $\varphi(\gamma)$  СИ:

$$p_1 = \int_{-\infty}^{-\Delta} f(\xi) \left[ \int_{\xi-\Delta}^{\xi+\Delta} \varphi(\gamma) d\gamma \right] d\xi + \int_{\Delta}^{\infty} f(\xi) \left[ \int_{\xi-\Delta}^{\xi+\Delta} \varphi(\gamma) d\gamma \right] d\xi,$$

$$p_2 = \int_{-\Delta}^{\Delta} f(\xi) \left[ \int_{-\infty}^{\xi-\Delta} \varphi(\gamma) d\gamma + \int_{\xi+\Delta}^{\infty} \varphi(\gamma) d\gamma \right] d\xi.$$



Характер изменений исходных распределений погрешностей средств измерений во времени: а — нормального; б — асимметричного.

Допускаемые значения  $p_1$  и  $p_2$  определяются назначением СИ, например, теми экономическими потерями, к которым приводит брак первого и второго рода. К сожалению, в общем случае нельзя оценить потери от применения СИ, погрешности которых выходят за установленные нормы. Поэтому исходить из экономических соображений при решении этого вопроса удастся только в отдельных случаях.

Принципиальную проблему составляет также определение функций распределения погрешностей СИ, и более того, сомнительна правомерность применения вероятностной модели для описания распределений основных погрешностей СИ. Причина сомнения состоит в том, что погрешности СИ изменяются с течением времени.

На рисунке показан характер изменения двух исходных распределений: а) нормального (усеченного) и б) асимметричного. Первое относится к сравнительно сложным СИ, второе можно считать соответствующим распределению погрешностей гирь в момент их выпуска из производства. Действительная картина еще более сложна, так как парк СИ каждого типа может периодически изменяться еще и за счет поступления новых СИ. Из приведенных соображений ясно, что распределения погрешностей СИ в момент их выпуска из производства непригодны для описания свойств СИ, находящихся в эксплуатации. Весьма возможна статистическая неустойчивость распределений основных погрешностей.

Изложенное приводит к мысли о том, что при расчетах вероятностей  $p_1$  и  $p_2$  следует опираться на наилучшие распределения. Но какое распределение считать наилучшим? И кроме того, найденные при этом значения  $p_1$  и  $p_2$  уже нельзя будет принимать за вероятности брака поверки.



Таким образом, если погрешностью образцовых СИ пренебречь нельзя, то вероятностная оценка последствий представляет большие трудности. Нельзя ли принять иное правило выделения негодных СИ и тем самым обойти указанные проблемы?

Решение можно получить следующим путем.

Пусть  $\Delta_0$  — предел допускаемых погрешностей образцовых СИ, а  $x$  и  $y$  — показания поверяемого и образцового приборов (для простоты будем говорить о поверке приборов).

Очевидно, что в случае

$$|x - y| \leq (\Delta - \Delta_0)$$

можно утверждать, что погрешности поверяемого прибора не превышают  $\Delta$ , и этот прибор годен к дальнейшему применению.

Если

$$|x - y| > (\Delta + \Delta_0),$$

то, наоборот, несомненно, что поверяемый прибор имеет погрешность, превышающую допускаемый предел, и его нельзя допускать к применению.

Часть поверяемых приборов может иметь погрешности, лежащие в интервале

$$(\Delta - \Delta_0) < |x - y| < (\Delta + \Delta_0).$$

Такие приборы, если быть строгим, нельзя ни забраковать, ни признать годными, т. е. их поверку нельзя считать законченной.

Самый надежный способ завершения поверки — повторить измерения с помощью более точных образцовых СИ. В тех случаях, когда более точные образцовые СИ применить не удастся, повторные измерения можно осуществить и с помощью других экземпляров образцовых СИ номинально той же точности, что и примененные первоначально. Поскольку погрешности разных СИ не совпадают, то результаты сравнения с ними при поверке будут также различны. Благодаря этому часть сомнительных приборов перейдет в категорию безусловно годных, а часть можно с уверенностью забраковать.

В зависимости от стоимости поверяемых СИ длительность рассмотренной процедуры может быть разной, но на заключительном этапе поверки сомнительные приборы следует отнести к категории негодных.

Рассмотренная методика по существу снимает вопрос о выборе соотношения между пределами допускаемых погрешностей поверяемых и образцовых СИ, но вместе с тем стимулирует применение возможно более точных образцовых СИ.

Остается выяснить вопрос об оценивании инструментальной погрешности измерения при рассмотренном методе нормирования погрешностей СИ.

В нормальных условиях при прямых измерениях, выполняемых с помощью одного прибора, очевидно, что инструментальная погрешность измерения не превышает основную погрешность использованного СИ. При косвенных измерениях или при оценивании погрешности измерения, выполняемого с помощью специально собранной измерительной системы (установки), нужно осуществить суммирование погрешностей. Естественно вероятностное суммирование составляющих, так как оно отвечает природе образования погрешности измерения. Однако для такого суммирования необходимо знать функции распределений погрешностей применяемых СИ. Как уже отмечалось, возможность получить фактические функции распределений этих погрешностей проблематична. Однако можно попытаться подобрать такое абстрактное распределение, чтобы фактические распределения при всей их неустойчивости были «лучше» абстрактного. При известных границах (предельных значениях) погрешностей таким наихудшим распределением обычно считают равномерное распределение.

В предположении о равномерности распределений составляющих общую инструментальную погрешность  $\theta$  можно оценить по формуле

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2},$$

где  $\theta_i$  — граница  $i$ -й составляющей погрешности;  
 $k$  — коэффициент.

При доверительной вероятности 0,95 с достаточной для практики точностью можно считать  $k=1,1$ .

Иногда выбором способа суммирования погрешностей стараются компенсировать недостаточную надежность оценок составляющих, обусловленную тем, что проверка осуществляется с недостаточным запасом точности или тем, что применяются СИ, после проверки которых прошло значительное время. Для этой цели при двух-трех слагаемых часто рекомендуют суммирование модулей составляющих. Такую процедуру можно считать оправданной, но, по-видимому, лучше скорректировать оценки границ составляющих и во всех случаях суммирование выполнять вероятностными методами.

В рабочих условиях применения СИ доминирующее значение приобретают дополнительные погрешности. Для них обычно оценивают верхние и нижние границы. Суммирование целесообразно выполнять вероятностными методами, причем при отсутствии данных о распределениях соответствующих свойства СИ и влияющих величин приходится так же, как и в предыдущем случае, обращаться к условным наилучшим моделям распределений.

Если необходимо повысить точность конкретного измерения, то либо применяют более точные СИ, либо, как это принято в метрологической практике, устанавливают индивидуальные свойства используемых СИ, измеряют влияющие величины и вносят соответствующие поправки в получаемые результаты.

Таким образом, выработанные практикой методы нормирования свойств СИ позволяют достичь тех целей, ради которых осуществляется нормирование.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земельман М. А., Кнюпфер А. П., Кузнецов В. П. О методах нормирования метрологических характеристик измерительных устройств. — «Измерительная техника», 1969, № 1, с. 32—35.
2. Арутюнов В. О., Грановский В. А., Рабинович С. Г. Нормирование и определение динамических свойств средств измерений. — В сб. «1-й Всесоюзный симпозиум «Динамические измерения» (Тезисы докладов), ЛОП НТО Приборпром, ВНИИМ, 1974, с. 25—30.
3. Широков К. П., Рабинович С. Г. О классах точности средств измерений. — «Измерительная техника», 1969, № 4, с. 3—7.

Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.

УДК 681.2.088:519.271

Т. Л. Яковлева

ВНИИМ

#### СТАБИЛЬНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Определению вида и параметров распределений погрешностей измерительных приборов посвящен ряд работ, однако стабильность распределений погрешностей ансамбля средств измерений до сих пор не исследовалась. Впервые этот вопрос был поднят С. Г. Рабиновичем (см. стр. 32). С целью экспе-

риментальной проверки стабильности параметров и вида распределений погрешностей измерительных приборов были исследованы погрешности электроизмерительных и радиоизмерительных приборов, поверенных в 1974—1975 гг. При этом были отобраны приборы тех типов, анализ погрешностей которых был произведен в работе [1] по результатам поверки 1968—1969 гг.

Результаты анализа погрешностей одного из типов электроизмерительных приборов — амперметра Э59 — приведены в табл. 1, а одного из типов радиоизмерительных приборов — измерителя мощности с в. ч. МЗ—1 — в табл. 2. В этих таблицах приняты следующие обозначения:  $n$  — количество поверенных приборов (объем выборки);  $m_1$  и  $m_2$  — соответственно первый начальный и второй центральный моменты исследуемой выборки;  $A$  — коэффициент асимметрии;  $\mathcal{E}$  — эксцесс;

$$A = \frac{m_3}{\sigma^3}; \quad \mathcal{E} = \frac{m_4}{\sigma^4} - 3. \quad (1)$$

Таблица 1

Параметры распределений	Поверенная отметка шкалы			
	30	60	80	100
$n$	129	131	133	133
$m_1$	+0,069	+0,081	+0,092	+0,115
$m_2$	+0,025	+0,034	+0,043	+0,090
$A$	+1,455	+0,844	+1,480	+1,234
$\mathcal{E}$	+3,720	+1,780	+3,973	+2,863
$m_1 - m_1^*$	+0,057	-0,011	-0,016	-0,012
$m_2 - m_2^*$	+0,004	+0,014	+0,021	+0,044
$A - A^*$	+1,473	+1,134	+1,720	+1,894
$\mathcal{E} - \mathcal{E}^*$	+4,170	+1,930	+3,563	+2,773

Моменты порядка выше четвертого не вычислены, так как сколько-нибудь надежное их определение потребовало бы выборки очень большого объема. В табл. 1—4 данные со знаком \* взяты из работы [1] или получены на их основе. В [1] значения эксцесса вычислены по формуле

$$\mathcal{E}^* = \frac{m_4}{\sigma^4};$$

в настоящей статье разности  $\mathcal{E} - \mathcal{E}^*$  приведены в соответствии с формулой (1).

Результаты изменений отмечены в табл. 1—2 в виде разности значений параметров, полученных при поверке приборов в 1974—1975 гг. и приведенных в [1]. Сравнивая параметры функций исследуемых распределений, можно заметить, что они существенно изменились.

Выясним, не влечет ли изменение параметров функций этих распределений качественного изменения вида распределений, т. е. определим, стабилен ли сам вид распределений погрешностей. К сожалению, в работе [1] не приведены гистограммы рассматриваемых погрешностей, поэтому сравнение распределений по их гистограммам произвести невозможно. Для решения задачи примем гипотезу о нормальности распределений этих погрешностей и

Таблица 2

Параметры распределений	Проверочный диапазон				200 мГц
	1000 мГц			Ослабление × 100	
	Ослабление × 1				~10 мВт
	1-3 мВт	3-5 мВт	7-9 мВт	5-8 мВт	
$n$	160	160	160	168	160
$m_1$	+0,744	+0,481	+0,425	-1,342	+2,194
$m_2$	+15,311	+15,094	+13,572	+32,884	+16,572
$A$	+0,603	+0,136	+0,523	+0,449	-0,125
$\mathcal{E}$	-0,403	-0,180	-0,222	+0,503	-0,084
$m_1 - m_1^*$	+3,544	+4,841	+4,695	-0,602	+3,164
$m_2 - m_2^*$	-13,589	-6,506	-10,021	-45,816	-47,328
$A - A^*$	+0,243	-0,744	-0,247	-0,921	-0,815
$\mathcal{E} - \mathcal{E}^*$	-0,493	-2,160	-2,152	-3,107	-1,284

произведем приближенную проверку ее с помощью коэффициентов асимметрии и эксцесса [2]. Вычислим средние квадратические отклонения асимметрии  $\sigma_A$  и эксцесса  $\sigma_{\mathcal{E}}$  по формулам

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}}; \quad (2)$$

$$\sigma_{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}. \quad (3)$$

Таблица 3

Характеристика распределений	Проверочная отметка шкалы			
	30	60	80	100
$\sigma_A$	0,162	0,212	0,208	0,208
$\sigma_{\mathcal{E}}$	0,413	0,410	0,408	0,408
нормальность	—	—	—	—
$\sigma_A^*$	0,257	0,257	0,257	0,257
$\sigma_{\mathcal{E}}^*$	0,496	0,496	0,496	0,496
нормальность	нормальное	нормальное	нормальное	нормальное

Примечание. Знак тире обозначает отсутствие нормальности распределения.

Если значения асимметрии и эксцесса, полученные по результатам наблюдений, больше, чем соответствующие им  $\sigma_A$  и  $\sigma_{\Sigma}$ , вычисленные по приведенным формулам, то гипотеза о нормальности отклоняется.

Таблица 4

Характеристики распределений	Поверенный диапазон				
	1—3 мВг	3—5 мВг	7—9 мВг	5—8 мВг	10 мВг
$\sigma_A$	0,191	0,191	0,191	0,186	0,191
$\sigma_{\Sigma}$	0,365	0,365	0,365	0,361	0,365
нормальность	—	нормальное	—	—	нормальное
$\sigma_A^*$	0,186	0,185	0,184	0,190	0,194
$\sigma_{\Sigma}^*$	0,361	0,364	0,365	0,402	0,380
нормальность	—	—	—	—	—

Результаты вычислений для приборов типа Э59 приведены в табл. 3, для приборов типа МЗ—1 — в табл. 4. Из данных, приведенных в этих таблицах, следует, что погрешности приборов типа Э59, первоначально имевшие нормальное распределение, изменили вид распределения во всех исследуемых точках шкалы настолько, что его нельзя считать нормальным. Наоборот, погрешности приборов типа МЗ—1, которые раньше имели распределение, отличное от нормального, в двух из пяти случаев имеют нормальное распределение. Таким образом, исследование стабильности распределений погрешностей двух произвольно взятых типов приборов показало, что в обоих случаях существенно изменились как параметры, так и виды распределений погрешностей. Следовательно, при определении вида распределения погрешностей измерительных приборов использовать однажды определенные параметры функций этих распределений неправомерно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резник К. А. О реальных распределениях погрешностей измерительных приборов. — «Метрология», 1970, № 3, с. 8—14.
2. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. М., «Наука», 1959, 231 с. с ил.

Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.

УДК 621.391.822.3.088.7:006.7

Е. А. Троицкий

ВНИИМ

#### ВЫБОР НОРМИРУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЛУКТУАЦИЙ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Высокочувствительные приборы с флуктуациями выходного сигнала, обусловленными шумами их элементов, как и большинство средств измерений, обладают значительной систематической составляющей погрешности. При снятии показаний таких приборов флуктуации выходного сигнала визуальным



усредняются наблюдателем, причем время усреднения зависит от частотных свойств флуктуаций. При этом случайная составляющая погрешности определяется диапазоном возможных значений флуктуаций выходного сигнала и их частотными свойствами. Для нормирования погрешностей средств измерения (см. стр. 30) необходимо установить предел общей погрешности и некоторую норму для флуктуаций выходного сигнала с тем, чтобы контролировать диапазон возможных значений и частотные свойства шума. Это позволяет обеспечить однородность характеристик флуктуаций выходного сигнала для приборов одного и того же типа.

В настоящее время в качестве нормируемых характеристик, определяющих флуктуации выходного сигнала, применяется среднее квадратическое отклонение (например, для измерительного приемника ИП-5) или расстояние от пика до пика (для нановольтметра Ф118). Среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  характеризует диапазон возможных значений шумов, но не содержит информации об их частотных свойствах. Расстояние от пика до пика без ука-

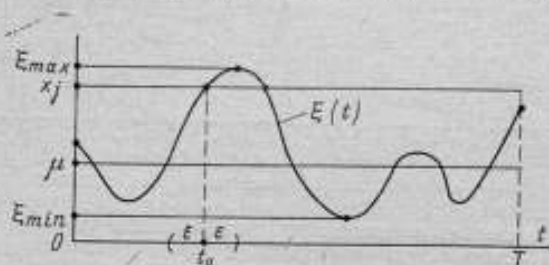


Рис. 1. Реализация шума

завия длительности реализации шума, которой оно соответствует, не несет конкретной информации о диапазоне возможных значений и частотных свойствах шумов. В то же время частота выбросов флуктуаций выходного сигнала относительно некоторого фиксированного уровня и математическое ожидание размаха флуктуаций с указанием длительности реализации содержат информацию о мощности и частотных свойствах шумов [1, 2]. Рассмотрим эти характеристики и оценим возможности их применения в качестве нормируемых.

Выбросом шума  $\xi(t)$  относительно уровня  $x_j(t)$  будем называть событие, состоящее в том, что шум превышает этот уровень (рис. 1). Начало выброса шума  $\xi(t)$  за уровень  $x_j$  соответствует моменту времени  $t_0$ , если существует такое  $\epsilon > 0$ , при котором  $\xi(t) \leq x_j$  в интервале  $(t_0 - \epsilon, t_0)$  и  $\xi(t) \geq x_j$  в интервале  $(t_0, t_0 + \epsilon)$ . Момент окончания выброса шума  $\xi(t)$  за уровень  $x_j$  определяется аналогичным образом с заменой знаков в неравенствах на противоположные. Выбросы образуют случайный поток событий и для стационарного нормального шума частота выбросов относительно фиксированного уровня определяется выражением [3]

$$E_j = E_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \gamma_j^2\right), \quad (1)$$

где  $\gamma_j = \frac{x_j - \mu}{\sigma}$  — нормированный уровень;  $\mu$  — математическое ожидание шума;  $E_0$  — частота выбросов относительно уровня  $x_j = \mu$ .

Частота выбросов  $E_0$  однозначно определяется частотными свойствами шума. В связи с этим, согласно (1), частота выбросов  $E_j$  относительно уровня  $x_j$  определяется частотными свойствами шума и его средним квадратическим отклонением.

Размах  $H_T$  реализации шума длительностью  $T$  (рис. 1) определяется выражением

$$H_T = \xi_{\max}(T) - \xi_{\min}(T),$$

где  $\xi_{\max}(T)$ ,  $\xi_{\min}(T)$  — соответственно максимальное и минимальное значения реализации в интервале  $(0, T)$ , т. е. наибольший из локальных максимумов и наименьший из локальных минимумов шума в данном интервале.

Математическое ожидание размаха (средний размах) реализации стационарного нормального шума имеет вид [2]

$$M[H_T] = \mu_{TH}\sigma, \quad (2)$$

где  $\mu_{TH}$  — средний размах реализации длительностью  $T$  нормированного

$$\text{шума } \xi_T(t) = \frac{\xi(t) - \mu}{\sigma}.$$

Параметр  $\mu_{TH}$  однозначно определяется значением  $E_0T$ , т. е. частотными свойствами шума и длительностью реализации [2]. Следовательно, средний размах при заданной длительности реализации шума определяется частотными свойствами шума и его средним квадратическим отклонением. Таким образом, кроме общей погрешности, в качестве нормируемых характеристик могут быть приняты средний размах флуктуаций выходного сигнала с указанием их длительности, либо частота выбросов этих флуктуаций, причем рассматриваемые характеристики шума можно оценить визуально. Нормы на указанные характеристики следует устанавливать в виде пределов, т. е. предела допускаемой погрешности и предела допускаемого среднего размаха (или предела допускаемой частоты выбросов). Соответствие характеристик заданным нормам должно проверяться путем определения каждой из характеристик.

Проверка соответствия частоты выбросов и среднего размаха установленным нормам производится по их оценкам, которые ввиду конечной длительности реализации шума являются случайными величинами. Поэтому эта проверка относится к задаче проверки статистических гипотез о том, что нормируемая характеристика  $d$  меньше или больше установленного предела  $d_0$ . Гипотезы являются сложными, так как определяются областями, содержащими непрерывное множество реализаций характеристики. Проверка гипотез в этом случае может быть выполнена путем последовательного статистического анализа. С этой целью рассчитывают непересекающиеся области: «годен», «негоден» и «продолжить проверку» в зависимости от объема статистического материала [4]. Границы этих областей определяются в соответствии с вероятностями ошибок 1-го и 2-го рода при условии, что нормируемая характеристика  $d = d_0$ . В этом случае вероятность попадания оценки нормируемой характеристики в область «годен» меньше или равна вероятности  $P_2$  ошибки 2-го рода, а вероятность попадания оценки в область «негоден» — меньше или равна вероятности  $P_1$  ошибки 1-го рода. Попадание оценки в одну из областей «годен» или «негоден» позволяет принять соответствующее решение:  $d < d_0$  или  $d > d_0$ .

Оценивание нормируемой характеристики выполняют последовательно, постепенно увеличивая объем статистического материала, что уменьшает дисперсию оценки нормируемой характеристики и соответственно сужает область «продолжать проверку». Проверка продолжается, пока оценка не попадет в одну из областей «годен» или «негоден». Очевидно, такая процедура проверки требует в среднем меньшего объема статистического материала, чем процедура при фиксированном объеме выборки (времени наблюдения флуктуаций выходного сигнала) и том же уровне достоверности поверки.

**Частота выбросов.** Процедура проверки соответствия частоты выбросов заданной норме представляет собой проверку двух гипотез:  $H_0$ , состоящей в том, что  $E < E_d$ , и  $H_1$ , состоящей в том, что  $E > E_d$  при заданном значении абсолютного уровня  $C$ , где  $E_d$  — предел допускаемой частоты выбросов.

Абсолютный уровень  $C = x - \mu$  целесообразно указывать таким, чтобы нормированный уровень  $\gamma \approx 2$ . Вблизи этого уровня выбросы образуют практически пуассоновский поток событий, что облегчает визуальный подсчет числа

выбросов. Далее при  $\gamma \approx 2$  поток выбросов несет максимальную информацию о дисперсии процесса [1].

Для пуассоновского потока выбросов имеем

$$P\{N(T) = M\} = \frac{(ET)^M}{M!} \exp(-ET),$$

где  $M$  — целое положительное число;  $N(T)$  — число выбросов реализации шума относительно рассматриваемого уровня.

Если длительность реализации  $T$  такова, что  $ET > 9$ , то случайная величина  $N(T)$  распределена приблизительно нормально с математическим ожиданием  $ET$  и дисперсией  $ET$  [5]. Если  $ET$  неизвестно, то условие  $ET > 9$  можно заменить условием  $NT > 15$ . В этом случае нормированная случайная величина

$$U = \frac{N(T) - ET}{\sqrt{ET}}$$

распределена приблизительно нормально с параметрами  $(0,1)$ . Поэтому случайная величина

$$\lambda = \frac{N(T)}{ET} - 1 = \frac{U}{\sqrt{ET}}$$

также распределена нормально и квантили ее распределения определяются по соответствующим квантилям нормированного нормального распределения путем деления на  $\sqrt{ET}$ . Для построения трех областей «годен», «негоден», «продолжить проверку» в соответствии с указанной выше методикой необходимо определить квантили  $\lambda$  в функции от числа выбросов  $ET$  для заданных вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода.

Результаты расчетов при вероятностях ошибок 1-го и 2-го рода  $P_1 = P_2 = 0,10$  и  $P_1 = P_2 = 0,05$  приведены

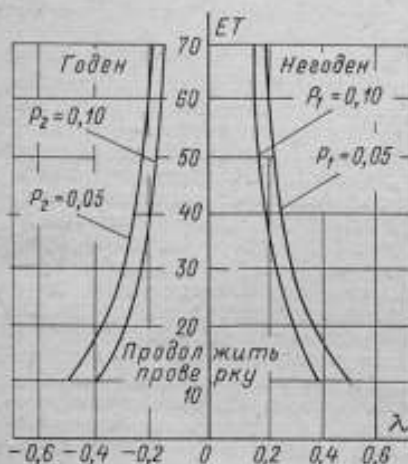


Рис. 2. Зоны последовательной процедуры проверки частоты выбросов флуктуаций входного сигнала установленной норме

на рис. 2. При выполнении последовательной процедуры положение точки на графике определяется координатами

$$E_0 T \text{ и } \lambda = \frac{N(T)}{E_0 T} - 1.$$

Зона «продолжить проверку» сужается с увеличением длительности реализации. Очевидно, последовательную процедуру проверки целесообразно ограничить. Если в процессе проверки ни одна из зон «годен» или «негоден» не достигнута, то необходимо принять волевое решение. В этом случае при  $N = \frac{N(T)}{T} < E_0$  целесообразно принять решение — «годен», а при  $N > E_0$  — решение «негоден».

Можно было бы принять решение «негоден», если  $\lambda$  находится в зоне «продолжить проверку», однако предпочтение отдано первому варианту, так как контролируется только однородность свойства шума.

Для нормальных шумов предел допускаемой частоты выбросов может быть установлен по формуле (1), если известны дисперсия шума и частота выбросов шума относительно его математического ожидания. Длительность реализации следует устанавливать, исходя из условия  $E_0 T = 10$ , т.е.  $T = \frac{10}{E_0}$ .

К недостатку выбора частоты выбросов в качестве нормируемой характеристики флуктуаций выходного сигнала следует отнести то, что абсолютный уровень  $S$  при оценивании характеристики  $E$  устанавливается относительно среднего значения реализации, которое определяется путем усреднения шума наблюдателем. Кроме того, при высокочастотном шуме даже на уровне  $S=2$  о визуальный подсчет числа выбросов без регистрации шума может быть затруднительным.

**Средний размах.** Процедура проверки соответствия среднего размаха заданной норме представляет собой проверку двух сложных гипотез:  $H_0$ , состоящей в том, что  $\bar{H}_T < \mu_{H\delta}$  и  $H_1$ , состоящей в том, что  $\bar{H}_T > \mu_{H\delta}$  при заданной длительности  $T$  реализации шума, где  $\mu_{H\delta}$  — предел допускаемого среднего размаха. Предел допускаемого среднего размаха в случае нормальных шумов может быть установлен в соответствии с данными, приведенными в [2] для заданной длительности реализации и известной частоты выбросов  $E_s$ .

Выбор длительности реализации флуктуаций выходного сигнала должен удовлетворять двум условиям. С одной стороны, целесообразно выбрать длительность минимально возможной в целях сокращения времени проверки прибора. С другой стороны, длительность реализации шума должна быть достаточно представительной. Кроме того, желательно, чтобы число выбросов реализации заданной длительности относительно математического ожидания шума было не менее шести, так как средний размах рассчитан для  $E_s T \geq 6$  [2]. Поэтому длительность реализации должна быть не менее нескольких интервалов корреляции, значение характеристики  $E_s T$  должно быть не менее шести.

Функция распределения размаха имеет сложный вид [2] и, очевидно,

сложность определения функции распределения среднего размаха  $H_T = \frac{\sum_{i=1}^k H_{T_i}}{k}$

( $k$  — число реализаций шума) будет возрастать с увеличением  $k$ . Поэтому области последовательной процедуры проверки соответствия среднего размаха флуктуаций выходного сигнала установленной норме были рассчитаны только для случая, когда его функцию распределения можно считать приближенно нормальной, т. е. для  $k \geq 30$ . Расчеты показали, что зона «продолжить проверку» медленно сужается с увеличением  $k$  и усечение процедуры целесообразно производить уже при  $k=30$ . В связи с этим проверку соответствия среднего размаха флуктуаций выходного сигнала установленной норме целесообразно представить в следующем виде. По 10 реализациям шума оценивают средний размах и в случае  $\bar{H}_T < \mu_{H\delta}$  принимают решение «годен» и при  $\bar{H}_T \geq \mu_{H\delta}$  принимают решение «продолжить проверку». В последнем случае рассматривают 10 новых реализаций шума и снова оценивают средний размах с учетом предыдущих данных. Если  $\bar{H}_T \geq \mu_{H\delta}$ , то берут еще 10 реализаций флуктуаций выходного сигнала. После этого принимают окончательное решение. Если  $\bar{H}_T$ , вычисленное по 30 реализациям, меньше  $\mu_{H\delta}$ , то принимают решение «годен». При  $\bar{H}_T \geq \mu_{H\delta}$  принимают решение «негоден». Дальнейшее уточнение значения среднего размаха флуктуаций выходного сигнала нецелесообразно, так как существенное сужение зоны «продолжить проверку» связано с резким увеличением требуемого количества реализаций и, как следствие этого, трудоемкости проверки.

Выбор среднего размаха шума в качестве нормируемой характеристики имеет преимущество перед частотой выбросов в том, что для оценивания среднего размаха не требуются сведения о математическом ожидании шума и процедура оценивания среднего размаха проще, чем подсчет частоты выбросов.

В связи с этим в качестве нормируемых характеристик погрешностей высокочувствительных приборов с флуктуациями выходного сигнала,

обусловленных шумами их элементов, целесообразно принять общую погрешность и средний размах флуктуаций выходного сигнала с указанием их длительности.

В качестве примера рассмотрим нормирование погрешностей нановольметра НФК на нижнем диапазоне измерений ( $2 \cdot 10^{-8} \dots 0 \dots 2 \cdot 10^{-8}$ ) В [6].

Пусть пределы погрешностей установлены в форме приведенных погрешностей. Систематическая составляющая погрешности определяется погрешностью показывающего прибора, статизмом нановольметра, погрешностью изготовления компенсационных сопротивлений и температурной нестабильностью медных компенсационных сопротивлений. На основании этих составляющих была рассчитана систематическая составляющая погрешности  $\gamma = \pm 1,6\%$ .

Флуктуации выходного сигнала нановольметра обусловлены тепловым шумом сопротивления цепи рамки гальванометра. Как показали исследования флуктуаций выходного сигнала, выполненные с использованием самописца НЗ7-1 (более чувствительного, чем показывающий прибор нановольметра), они имеют нормальное распределение со средним квадратическим отклонением  $\sigma = 2,1 \cdot 10^{-10}$  В. Минимально различимое условное деление  $h$  шкалы прибора составляет  $2 \cdot 10^{-10}$  В. Отсюда следует, что соотношение между делением  $h$  и уровнем флуктуаций выходного сигнала  $m = \frac{h}{\sigma} \approx 1$  и, следовательно, погрешность отсчитывания пренебрежимо мала [7].

Если в качестве результата измерений принимается разность двух мгновенных отсчетов шумов соответственно при наличии сигнала на входе прибора НФК и его отсутствии, то составляющая погрешности, обусловленная флуктуациями выходного сигнала, при доверительной вероятности 0,95 равна  $\Delta_4 = 6,1 \cdot 10^{-10}$  В, т. е.  $\gamma_4 = 1,5\%$  [7]. Следует заметить, что за счет усреднения флуктуаций выходного сигнала можно несколько уменьшить эту составляющую погрешности. Однако общую погрешность целесообразно рассчитывать по максимальным ее составляющим.

В соответствии с ГОСТ 1845-59 «Приборы электронизмерительные. Общие технические требования» устанавливаем для НФК предел допускаемой общей погрешности равным  $\gamma = 4\%$ . Средний размах шумов определяем по реализациям длительностью  $T = \frac{E_0}{9}$  в соответствии с формулой (2). Параметр

$\mu_{тл} = 4,18$  для  $E_0 T = 6$  [2]. Частота выбросов  $E_0$  флуктуаций выходного сигнала нановольметра относительно их математического ожидания равна  $0,12 \text{ с}^{-1}$ . С учетом изложенного и результатов исследования флуктуаций выходного сигнала устанавливаем предел допускаемого среднего размаха шумов равным  $1 \cdot 10^{-8}$  В при длительности реализации  $T = 50 \text{ с}$ .

В заключение можно сделать следующие выводы: в качестве нормируемых характеристик погрешностей высокочувствительных приборов с флуктуациями выходного сигнала целесообразно принять общую погрешность и средний размах флуктуаций с указанием их длительности; для проверки соответствия среднего размаха установленной норме целесообразно применять последовательную процедуру проверки, как требующую в среднем меньшего объема статистического материала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троицкий Е. А. Оценки математического ожидания и дисперсии случайных процессов по выбросам. — «Автометрия», 1971, № 5, с. 32—38.
2. Троицкий Е. А. Оценивание математического ожидания и среднего квадратического отклонения случайных процессов по экстремальным статистикам. — «Автометрия», 1973 № 6, с. 22—26.
3. Крамер Г., Лидбеттер М. Стационарные случайные процессы, М., «Мир», 1969, 378 с. вкл.
4. Богдановский Э. М., Солопченко Г. Н. Проверка статических гипотез о некоторых метрологических характеристиках средств измерений. — В сб. «Труды ВНИИЭП», вып. 2 (6), Л., 1969, с. 13—21.



5. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями, М., Изд-во иностр. лит., 1956, 664 с. с ил.

6. Троицкий Е. А. Вопросы разработки высокочувствительных фотогальванометрических автокомпенсаторов тока и напряжения и исследование их предельных возможностей. Автореф. дисс., Л., ВНИИМ, 1972, 16 с.

7. Троицкий Е. А. Флуктуационный предел чувствительности приборов.— «Измерительная техника», 1972, № 8, с. 20—22.

Поступила в редакцию 5/IX—1975 г.

УДК 621.317.725.089.52—501.22:006.7

В. А. Грановский, С. Г. Рабинович

ВНИИМ

## ОСОБЕННОСТИ СРЕДСТВ ДЛЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В работах [1, 2] были даны определения статических и динамических измерений, а также указаны принципы нормирования динамических свойств средств измерений (СИ). Рассмотрим специфику задач при статических и динамических измерениях, а также обусловленные ею особенности СИ.

В работе [1] термины «статические измерения» и «динамические измерения» употребляются как сокращение терминов «измерения в статическом режиме» и «измерения в динамическом режиме». В свою очередь, статический и динамический режимы связываются, соответственно, с постоянством и непостоянством выходных сигналов СИ. Введение понятия «динамические измерения» имело целью выделить такие случаи применения СИ в различных областях измерений, которые характеризуются общими методами, отличными от применяемых при статических измерениях. Эти методы разрабатываются в теории измерений на основе положений теории автоматического управления и связи. Для них характерно использование определенного математического аппарата: функционального анализа, дифференциальных, интегральных и матричных уравнений, экстремальных задач. В [3] сказано по этому поводу следующее: «Законность и целесообразность объединения различных физических явлений по общим закономерностям и плодотворность изучения этих явлений при помощи единого математического аппарата, адекватного рассматриваемому кругу задач, в настоящее время ни у кого не вызывает сомнений».

Одной из основных задач при динамических измерениях является оценивание динамических погрешностей. Следует отметить, что динамические погрешности имеют место и при статических измерениях. Для оценивания этих погрешностей требуется знание динамических свойств СИ— таким образом, возникает общая задача нахождения этих свойств. В работе [2] указано, что представление динамических свойств различно в зависимости от того, в каком режиме предусмотрено применение СИ.

Рассмотрим специфику оценивания динамических погрешностей средств статических и динамических измерений последовательно для простых СИ и сложных, т. е. состоящих из простых.

### Простые СИ

Рассмотрим вначале измерительные преобразователи и регистрирующие СИ. Отнесение этих измерительных устройств к средствам статических или динамических измерений на основании принятого определения не вызывает затруднений. При применении этих устройств в динамическом режиме необходимо, чтобы переменный выходной сигнал воспроизводил по форме изменение измеряемой величины, причем искажения, т. е. динамические погрешности, не

превышали заданного уровня. Чтобы убедиться в выполнении этого условия, необходимо оценить динамические погрешности. Задача ставится следующим образом. Пусть переменные входной и выходной сигналы СИ описываются функциями  $x(t)$  и  $y(t)$ , соответственно. Предполагая, что  $y(t)$  не содержит статической погрешности и что статический коэффициент преобразования СИ равен единице, находим, что динамическая погрешность представляет собой функцию

$$\delta(t) = y(t) - x(t), \quad (1)$$

и задача состоит в нахождении этой функции или ее нормы [1].

В общем виде связь между входным и выходным сигналами устанавливается операторным уравнением

$$y = Bx, \quad (2)$$

где оператор  $B$  выражает динамические свойства СИ.

По назначению рассматриваемые СИ можно разделить на универсальные и специализированные [2]. Для универсального СИ задача оценивания динамической погрешности по соотношениям (1) и (2) тождественна задаче нахождения формы и параметров входного сигнала\* по известным выходному сигналу и динамическим свойствам СИ, т. е. решению операторного уравнения (2) относительно  $x$  при известном  $y$ . Эта задача в общем случае является некорректно поставленной [3], и решение ее может представить значительные трудности, однако принципиально она разрешима. Постановка указанной задачи теоретически не связана с ограничениями вида входных сигналов, хотя на практике такие ограничения могут существенно упростить решение. Нужно отметить, что универсальные СИ создаются редко.

Для специализированных СИ методы оценивания динамических погрешностей более просты, но очень разнообразны и зависят от вида входных сигналов [1]. Как правило, для таких СИ определяют ту или иную числовую характеристику (норму) динамической погрешности, а не всю ее как функцию времени. Однако при необходимости достижения предельной точности при применении конкретного специализированного СИ приходится решать задачу восстановления.

Обратимся к средствам статических измерений. В случае постоянного входного сигнала динамические погрешности не возникают. При переменном входном сигнале измеряемая величина  $A$  вводится как некоторый функционал от переменной величины, воздействующей на вход СИ [4], т. е.

$$A = \Phi(x). \quad (3)$$

В результате измерения получаем значение величины  $A$  в виде некоторого числа принятых единиц.

Пусть оценкой истинного значения измеряемой величины  $A$  служит показание СИ, обозначаемое  $D$ . Сохраняя принятые ранее допущения и предполагая, что  $D$  отличается от  $A$  лишь вследствие инерционности СИ, найдем, что разность

$$\Delta = D - A = D - \Phi(x) \quad (4)$$

представляет собой динамическую погрешность.

Для нахождения оценки  $\Delta$  требуется в соответствии с выражением (4) оценить функционал  $\Phi(x)$ . С этой целью прежде всего необходимо было бы из экспериментальных данных, т. е. на основании показания  $D$ , оценить функцию  $x(t)$ . Однако это невозможно, так как в соответствии с общими свойствами функционалов одно и то же показание  $D$  может соответствовать разным сигналам  $x'(t)$  и  $x''(t)$ . Поэтому для решения задачи необходимо полу-

\* В литературе нахождение формы и параметров входного сигнала часто именуется восстановлением сигнала, однако этот термин нельзя признать удачным, так как речь идет лишь о получении информации о сигнале (прим. ред.)

чить определенную информацию об  $x(t)$  помимо той, которую дает используемое СИ. В общем случае сигнал на входе можно представить выражением

$$x = x(t, A, \beta, \dots, v), \quad (5)$$

где  $x(\ )$  — вид функции, определяющей форму сигнала;  $\beta, \dots, v$  — неинформативные параметры;  $t$  — текущее время.

Тогда

$$\Phi[x(t, A, \beta, \dots, v)] = A, \quad (6)$$

аналогично

$$\Phi[x(t, D, \beta, \dots, v)] = D. \quad (7)$$

Показание  $D$  можно представить как некоторый функционал  $F$ , отличный (вследствие инерционности СИ) от  $\Phi$ . Градуировкой СИ по известному сигналу  $x_0(t)$  добиваются того, чтобы СИ для этого сигнала реализовывал функционал, практически совпадающий с  $\Phi$ . Однако для сигналов, отличных от  $x_0$ , справедливо  $F \neq \Phi$ . Соотношение (4) может быть преобразовано следующим образом:

$$\Delta = D - \Phi[x(t, A, \beta, \dots, v)] = F[x(t, A, \beta, \dots, v)] - \Phi[x(t, A, \beta, \dots, v)]. \quad (8)$$

Если известен функционал  $F$  и все неинформативные параметры входного сигнала, то подставляя в (8) вместо  $A$  ее оценку  $D$ , можно получить оценку динамической погрешности, которая отличается от истинного ее значения только ввиду того, что  $D \neq A$ . В действительности неинформативные параметры входного сигнала известны с ограниченной точностью. Подставив в формулу (8) вместо  $A$  ее оценку  $D$  и вместо параметров  $\beta, \dots, v$  их оценки  $\bar{\beta}, \dots, \bar{v}$ , получим оценку динамической погрешности

$$\bar{\Delta} = F[x(t, D, \bar{\beta}, \dots, \bar{v})] - D,$$

которая будет тем точнее, чем точнее известна функция  $x$  и ее неинформативные параметры  $\beta, \dots, v$ . Приведенный метод оценивания динамической погрешности слишком сложен для повседневного применения СИ, и его можно использовать только в исключительных случаях, поэтому практика выработала другой метод.

Прежде всего СИ постоянных величин конструируется как специализированное, предназначенное для входных сигналов определенного вида. При этом СИ стремится сделать нечувствительным к неинформативным параметрам. Однако на практике этого удается достигнуть лишь для части параметров. В общем случае влияние неинформативных параметров ослабляется. Далее, для всех неинформативных параметров можно установить такие границы, что при изменении параметров внутри этих границ суммарная погрешность СИ будет изменяться незначительно. Это позволяет установить нормальные условия применения СИ.

Если какой-либо неинформативный параметр выходит за границы нормальной области его изменения, то возникающую погрешность нужно учитывать как дополнительную. Этой погрешности можно дать общее название динамической, но при нескольких параметрах это мало информативно. Целесообразнее каждой погрешности дать собственное наименование, как это делается в электро- и радиоизмерительной технике.

Дополнительные погрешности часто нормируются в документации на СИ в виде зависимостей от соответствующих неинформативных параметров. Эти зависимости представляют собой дополнительные динамические характеристики СИ [2]. Если вид входного сигнала и значения неинформативных параметров могут быть установлены с помощью простых средств, а также если необходимо достичь предельных точностных показателей СИ, указанные зависимости используются для введения поправок. В общем же случае стремятся установить, в каких границах находятся неинформативные параметры, и на

основе указанных зависимостей оценить дополнительные погрешности. Если сведения о том, что неинформативные параметры находятся в установленных границах, не могут быть получены с помощью достаточно простых средств, то их получают путем накопления информации об объекте исследований и рассматривают как априорные, а при оценивании дополнительных погрешностей принимают значения неинформативных параметров. Проиллюстрируем это на примере применения вольтметра типа В4-11 для измерений амплитуд переменных напряжений. Этот серийный прибор создан на основе разработанного во ВНИИМ образцового вольтметра ОКВ-5 [5]. Он предназначен для измерений амплитуд напряжений импульсной, импульсно-модулированной и синусоидальной формы и для проверки импульсных и высокочастотных вольтметров и генераторов в лабораторных и цеховых условиях. Для него нормируется основная погрешность при измерениях амплитуд напряжений видеопульсов прямоугольной формы, а также синусоидальных и радиоимпульсных напряжений с синусоидальной несущей и прямоугольной огибающей. Отклонение формы импульсного напряжения от прямоугольной характеризуется коэффициентами  $\alpha$  и  $v_{oc}$

$$\alpha = \frac{\tau_{f1} + \tau_{f2}}{2\tau_{0,5}}$$

$$v_{oc} = \frac{v_c}{v_m}$$

где  $\tau_{f1}$ ,  $\tau_{f2}$  — длительности фронта и спада импульса соответственно;  $\tau_{0,5}$  — длительность импульса на относительном уровне, равном 0,5;  $v_c$  — спад плоской части импульса;  $v_m$  — амплитуда импульса.

В технической документации вольтметра приведены графики зависимостей дополнительных погрешностей от этих коэффициентов при представлении фронта, спада и вершины импульса прямолинейными отрезками. Следовательно, оценивание погрешностей возможно лишь в случае, если входной сигнал достаточно хорошо аппроксимируется прямой линией, состоящей из трех участков. Для определения коэффициентов  $\alpha$  и  $v_{oc}$  рекомендуется использовать осциллограф, обеспечивающий измерение длительности с погрешностью в пределах  $\pm 5\%$ .

Относительно погрешности измерений амплитуды напряжения с формой, близкой к синусоидальной, но все же искаженной, в описании прибора сказано: «Учесть эту погрешность с помощью поправок в практике измерений не удастся, так как фаза и состав гармоник, как правило, бывают неизвестны. Целесообразно лишь определить пределы погрешности измерения напряжения вольтметром В4-11 в положении «Синусоида» при искажениях синусоидальной формы как в сторону притупления до прямоугольной, так и в сторону заострения до треугольной».

Таким образом, рассмотрение особенностей нормирования метрологических свойств вольтметра типа В4-11 и его применения на практике подтверждает правильность высказанных выше положений о нормировании свойств статических средств измерений с переменными входными сигналами.

### Сложные СИ

Сказанное выше относительно нормирования динамических свойств и оценивания динамических погрешностей средств статических измерений с переменными входными сигналами верно для простых СИ. Если же СИ применяется как установка или система, т. е. как функционально (а, возможно, и конструктивно) объединенная совокупность СИ, с нормированными по отдельности динамическими свойствами, то измерительные устройства, входящие в состав такого СИ, могут находиться в различных режимах. В связи с этим способы нормирования и оценивания динамических погрешностей этих устройств будут различны. Например, СИ импульсных давлений может содержать пьезоэлектрический измерительный преобразователь и импульсный

вольтметр. Если это СИ будет применяться как специализированное, то целесообразно нормировать его динамические свойства в целом и так, как это предусмотрено для импульсного вольтметра. Если же указанное СИ применяется как универсальное, то следует нормировать по отдельности основную динамическую характеристику преобразователя и дополнительные динамические характеристики вольтметра, учитывающие влияние изменяющихся неинформативных параметров входного сигнала. Для применения СИ в условиях изменяющихся влияющих величин необходимо также нормировать соответствующие дополнительные динамические характеристики преобразователя. В случае применения составного СИ, сконструированного как единое целое, на пределе его возможностей придется индивидуально исследовать динамические свойства входящих в его состав измерительных устройств. Применение такого СИ по существу не будет отличаться от применения системы.

Таким образом, между средствами для статических и динамических измерений имеются следующие существенные различия, которые проявляются при применении СИ и обуславливают различия в нормировании их динамических свойств.

1. При применении СИ в динамическом режиме может возникнуть задача оценивания динамической погрешности как функции времени. При высокой требуемой точности она сводится к нахождению формы и параметром входного сигнала и может решаться на основе использования любой из полных динамических характеристик СИ.

2. При применении СИ в статическом режиме при переменном входном сигнале динамическая погрешность выражается числом. Задача оценивания этой погрешности (обратная задача) в общем случае не может быть решена, так как требует чрезвычайно большого объема информации о входном воздействии. Поэтому рассматриваемые СИ всегда создают как специализированные.

3. Сложное средство статических измерений может создаваться и применяться как единое целое или как установка или система. В первом случае оно проектируется как специализированное, и его динамические свойства в целом нормируются аналогично простым СИ. Во втором случае динамические свойства измерительных устройств, образующих сложное СИ, нормируются по отдельности, и это позволяет использовать его как универсальное.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Широков К. П., Арутюнов В. О., Грановский В. А. и др. Основные понятия теории динамических измерений.— «Измерительная техника», 1975, № 12, с. 9—13.
2. Арутюнов В. О., Грановский В. А., Рабинович С. Г. Нормирование и определение динамических свойств средств измерений.— «Измерительная техника», 1975, № 12, с. 25—27.
3. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Фinitные функции в физике и технике. М., «Наука», 1971. 408 с. с ил.
4. Грановский В. А., Рабинович С. Г. Автоматизация экспериментов и вопросы методологии измерений.— Материалы Всесоюзной конференции «Методы и средства автоматизации научного эксперимента», М., ЦНИИТЭИприборостроения, 1972, с. 1—4.
5. Рабинович Б. Е. Точные измерения мощности и напряжения на высоких частотах. В сб.: «Труды институтов Госкомитета», вып. 76 (136), М.—Л., Изд-во стандартов, 1965, с. 191—202.

Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.



**СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПОГРЕШНОСТЯМИ  
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ СКАЧКООБРАЗНОМ  
И МОНОТОННОМ ВХОДНЫХ СИГНАЛАХ**

Одним из способов нормирования динамических свойств средств измерений (СИ) является установление предела для одного из параметров динамической погрешности СИ при некотором стандартизованном испытательном сигнале. Рассмотрим случай, когда испытательным сигналом служит единичный скачок (единичная функция)  $\varepsilon(t) = \begin{cases} 0 & t < 0, \\ 1, & t > 0. \end{cases}$  При этом предполагается, что СИ представляет собой линейную стационарную систему с переходной характеристикой  $h(t)$  и импульсной характеристикой  $g(t) = \frac{dh(t)}{dt}$ .

А. А. Харкевичем [1] было сформулировано (без доказательства) следующее положение: квадратическая норма погрешности преобразования линейной стационарной системой сигнала  $x(t)$  меньше такой же нормы погрешности преобразования единичного скачка, если сигнал  $x(t)$ : а) тождественно равен нулю при  $t < t'$ ; б) монотонно изменяется в интервале  $t' \leq t < \infty$  и в) находится в промежутке между 0 и 1. Математическая формулировка этого положения при коэффициенте преобразования СИ, равном 1, такова:

$$\int_0^{\infty} [h(t) - \varepsilon(t)]^2 dt > \int_0^{\infty} \left[ \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right]^2 dt. \quad (1)$$

Приведем обоснования этого положения для важнейших частных случаев.

1.  $x(t)$  — монотонно возрастающая функция. Без ограничения общности можно считать, что  $t' = 0$  и  $x(\infty) = 1$ .

а) Время наблюдения конечно. Этот случай представляет самостоятельный интерес для практики. Если представить  $x(t)$  как предел мажорирующей равномерно-ступенчатой функции при стремлении к нулю высоты ступенек, т. е.

$$x(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \varepsilon(t - t_k), \quad (2)$$

где  $x(t_k) = \frac{k}{n}$ , то из монотонности  $x(t)$  следует, что

$$t_{k+1} \geq t_k, \quad k=0, 1, \dots, n-1. \quad (3)$$

Подставляя (2) в правую часть (1), где верхние пределы интегрирования заменены на  $T$  — время наблюдения, можно получить

$$\int_0^T \left[ \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right]^2 dt = \int_0^T \left[ \int_0^t g(t-\tau) \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \varepsilon(\tau - t_k) - \right. \\ \left. - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \varepsilon(t - t_k) \right]^2 dt. \quad (7)$$

По теореме Лебега о сходимости [2] возможна перестановка знаков интегрирования и предельного перехода во внутреннем интеграле. Далее, используя правило Коши для произведения двух бесконечных рядов [2], применяя вторично теорему Лебега к внешнему интегралу и разбивая промежуток интегрирования  $[0, T]$  на  $[0, t_k]$  и  $[t_k, T]$ , можно прийти к соотношению

$$\int_0^T \left[ \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right]^2 dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} \left\{ \sum_{k=1}^{n-1} \int_0^T [h(t-t_k) - \varepsilon(t-t_k)]^2 dt + \right. \\ \left. + 2 \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=1}^{n-1-k} \int_{t_{k+l}}^T [h(t-t_k) - \varepsilon(t-t_k)] [h(t-t_{k+l}) - \varepsilon(t-t_{k+l})] dt \right\}.$$

Использование неравенства Буняковского — Шварца и (3) дает выражение

$$\int_0^T \left[ \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right]^2 dt \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \int_0^{T-t_k} [h(t) - \varepsilon(t)]^2 dt + \right. \\ \left. + 2 \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=1}^{n-1-k} \sqrt{\int_0^{T-t_{k+l}} [h(t+t_{k+l}-t_k) - \varepsilon(t)]^2 dt} \int_0^{T-t_{k+l}} [h(t) - \varepsilon(t)]^2 dt \right\}.$$

Если справедливо соотношение

$$\int_0^{\theta} [h(t) - \varepsilon(t)]^2 dt > \int_{\tau}^{\tau+\theta} [h(t) - \varepsilon(t)]^2 dt, \text{ при } \tau > 0, \quad \theta \rightarrow 0,$$

предъявляющее определенные требования к характеру установления функции  $h(t)$ , которые выполняются на практике для всех СИ, пропускающих постоянную составляющую сигнала, а также для СИ, не пропускающих постоянную составляющую, у которых порядок убывания переходной характеристики на бесконечности меньше порядка роста в нуле, то расширение промежутка интегрирования до  $[0, T]$  и вынесение интеграла за знаки сумм и предела, позволяет прийти к искомому неравенству

$$\int_0^T \left[ \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right]^2 dt \leq \int_0^T [h(t) - \varepsilon(t)]^2 dt. \quad (4)$$

б) Время наблюдения бесконечно. Соотношение (4) справедливо для любого конечного значения  $T$ , поэтому

$$\int_0^{\infty} [h(t) - \varepsilon(t)]^2 dt - \int_0^{\infty} \left[ \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right]^2 dt = \\ = \lim_{T \rightarrow \infty} \left\{ \int_0^T [h(t) - \varepsilon(t)]^2 dt - \int_0^T \left[ \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right]^2 dt \right\} > 0.$$

2.  $x(t)$  — монотонно убывающая функция.

В работе [1] в качестве примера, иллюстрирующего справедливость неравенства (1), рассмотрены искажения сигнала  $x(t) = e^{-\beta t} \varepsilon(t)$ . Таким образом, в [1] монотонность трактуется как свойство сигнала на открытом интервале  $(0, \infty)$  в то время, как промежуток интегрирования  $[0, \infty]$  полуоткрыт. При такой трактовке невозможно доказательство неравенства (1) в общем случае.

Пусть, например,

$$x(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \frac{1 - e^{-(T-t)}}{1 - e^{-T}}; & 0 \leq t \leq T, \\ 0, & t > T, \end{cases}$$

$$h(t) = 1 - e^{-t}, \quad t > 0.$$

Как видно из непосредственного подсчета, при  $T \geq 3$  неравенство (4) не выполняется. Таким образом, в случае монотонно убывающего на интервале  $(0, T]$  сигнала  $x$  соотношение (4) и, следовательно, (1) не имеют места. Очевидной причиной этого является неэквивалентность постановки задачи для возрастающей и убывающей на  $(0, T]$  функций  $x(t)$  при условии  $x(0) = 0$ . В формуле (4) убывающая функция  $x(t)$  содержит один положительный скачок при  $t=0$  и в пределе, как видно из рассмотренного примера, может стремиться к отрицательному скачку в какой-либо другой точке промежутка  $[0, T]$ . Монотонно возрастающая функция может иметь лишь один предельный скачок в промежутке  $[0, T]$ . Если рассматривать  $x(t)$ , равную

$$x(t) = \begin{cases} 1, & -\infty < t < 0, \\ x(t), & 0 \leq t < T, \end{cases}$$

то неравенство (4) примет вид

$$\int_0^T \left[ \int_{-\infty}^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right]^2 dt \leq \int_0^T [h(t) - \varepsilon(t)]^2 dt. \quad (5)$$

Выполнение этого неравенства доказывается, как и выше, при представлении  $x(t)$ , аналогичном (2):

$$x(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \varepsilon(t_k - t).$$

На практике иногда требуется сохранить форму сигнала безотносительно к его положению на временной оси. Тогда в выражение для динамической погрешности преобразования должен быть введен сдвиг сигналов, компенсирующий чистое запаздывание. При этом возможны два случая.

1) Сдвиг не зависит от каждого сигнала, а определяется из условия минимизации погрешности преобразования одного стандартного сигнала, например, скачкообразного. Неравенство (1) в этом случае имеет вид

$$\min_{\theta} \int_0^{\infty} [h(t) - \varepsilon(t - \theta)]^2 dt > \int_0^{\infty} \left[ \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t - \theta) \right]^2 dt. \quad (6)$$

Легко показать, что неравенство (6) справедливо.

2) Сдвиг для каждого сигнала определяется из условия минимизации погрешности его преобразования. Неравенство (1) тогда принимает вид

$$\min_{\theta} \int_0^{\infty} [h(t) - \varepsilon(t - \theta)]^2 dt > \min_{\theta'} \int_0^{\infty} \left[ \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t - \theta') \right]^2 dt.$$

Справедливость этого неравенства следует из неравенства (6), так как минимизация правой части (6) лишь усиливает последнее.

Для практики может представлять интерес соотношение, аналогичное (4), в метрике  $C, \tau, \varepsilon$ .

$$\max_{[0, T]} |h(t) - \varepsilon(t)| > \max_{[0, T]} \left| \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right|. \quad (7)$$

При тех же предположениях, что и выше, рассмотрим аналогичные два случая.

а) Время наблюдения конечно.

Имеем

$$\max_{[0, T]} \left| \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right| = \max_{[0, T]} \left| \int_0^t [h(t-\tau) - 1] \frac{dx(\tau)}{d\tau} d\tau \right|.$$

Так как функция  $x(t)$  монотонна, то по обобщенной теореме о среднем получим

$$\max_{[0, T]} \left| \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right| = \max_{[0, T]} |h(t-\theta t) - x(t)| x(t),$$

где  $0 \leq \theta \leq 1$ .

Поскольку  $|x(t)| \leq 1$ , то

$$\max_{[0, T]} \left| \int_0^t g(t-\tau) x(\tau) d\tau - x(t) \right| \leq \max_{[0, T]} |h(t-\theta t) - x(t)| \leq \max_{[0, T]} |h(t) - x(t)|.$$

б) На случай бесконечного времени наблюдения соотношение (7) распространяется аналогично приведенному выше для квадратической метрики.

Таким образом, доказано, что суммарная квадратическая (и, следовательно, средняя квадратическая) и максимальная динамические погрешности преобразования любого монотонного ограниченного сигнала не превосходят соответствующих погрешностей преобразования скачкообразного сигнала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харкевич А. А. О применении критерия квадратичной погрешности к оценке линейных искажений. — «Журнал теоретической физики», 1937, т. VII, вып. 5, с. 515—530.

2. Кори Г., Кори Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., «Наука», 1974, 832 с. с ил.

Поступила в редакцию 5/IX — 1973 г.

УДК 681.2.08:519.251

А. Э. Фридман

ВНИИМ

#### СВЯЗЬ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ НАДЕЖНОСТИ И ТОЧНОСТИ СОВОКУПНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИИ

Важнейшим качеством средства измерений (СИ), обуславливающим допустимость его применения, является точность. Уровень точности, заложенный при проектировании СИ и обеспеченный при его изготовлении и юстировке, во время эксплуатации не остается неизменным. Погрешность СИ, обусловленная физико-химическими процессами старения материалов элементов, износом трущихся поверхностей, разрегулированием кинематических соединений и т. п., с течением времени возрастает. С другой стороны, в результате различных восстановительных мероприятий: текущего ремонта, проверок, градуировок, юстировок, регламентных замен элементов — погрешность СИ уменьшается. Таким образом, возникает типичная задача надежности — попеременное действие двух групп факторов, одна из которых приводит к утрате, а дру-

гая — к восстановлению работоспособности изделия. Вместе с тем прямое перенесение методов теории надежности в метрологию для обеспечения точности СИ необоснованно. Дело в том, что в математических моделях, построенных этими методами, СИ идентифицируется только по альтернативному признаку («работоспособный» — «неработоспособный»), а значение погрешности СИ не учитывается. В конечном итоге возникает несоответствие между реальной картиной и отображающей ее математической моделью. Так, анализ [1—3] показывает, что построенные в них модели эксплуатации СИ вынужденно предполагают выполнение марковского свойства, заключающегося в том, что вероятность изменения работоспособности СИ (отказ функционирования, метрологический отказ\*, восстановление работоспособности и т. д.) зависит только от состояния, в котором оно находится в рассматриваемый момент времени, и не зависит от того, когда и сколько раз до этого происходили изменения состояния СИ. Например, с равной вероятностью могут наступить метрологические отказы следующих пар СИ: СИ с погрешностями, близкими к нулю и равными пределу допускаемой погрешности; СИ после поверки (или даже ремонта и юстировки) и СИ перед поверкой; СИ, часто попадавшие в ремонт вследствие низкой стабильности, и СИ высокостабильные, не подвергавшиеся ранее ремонту.

Очевидно, что такие утверждения не всегда соответствуют действительности.

Существенным недостатком альтернативных моделей является также то, что они используются в качестве исходных неизвестные на практике распределения наработки СИ до наступления метрологического отказа. В то же время моделирование системы эксплуатации СИ возможно, но оно должно учитывать фактический уровень основной погрешности СИ. В настоящей статье и строится такая модель.

#### Взаимосвязь понятий «точность», «стабильность» и «надежность»

Для анализа указанных понятий построим пространство траекторий случайного процесса изменения систематических погрешностей СИ одной модели (рис. 1). На рисунке обрыв траекторий означает функциональный отказ функционирования, после которого невозможно проведение измерений. Пересечение траекторией границ  $\Delta_1$  или  $\Delta_2$  означает наступление метрологического отказа.

Точность, стабильность и надежность СИ соответствуют различным свойствам данного случайного процесса, а их показатели — различным функционалам, построенным на траекториях процесса.

Точность СИ оценивается значением погрешности в рассматриваемый момент времени, а по совокупности СИ-распределением погрешности в этот момент времени, т. е. временным сечением случайного процесса.

Стабильность СИ, как качество, отражающее неизменность во времени его метрологических свойств, оценивается изменениями ординат траекторий за заданный промежуток времени. Показателем стабильности СИ может быть распределение приращений ординат траекторий, т. е. производная от случайного процесса.

Надежность (точнее, безотказность, как одно из обуславливающих ее свойств) есть свойство изделия выполнять заданные функции без вынужденных перерывов из-за возникновения отказов. Поэтому показатели надежности являются функционалами не самого процесса изменения значений погрешности, а лишь моментов наступления отказов. При этом, группируя отказы по их последствиям, можно оценивать отдельно надежность функционирования, под которой понимается свойство СИ выполнять заданные функции без отказов функционирования, и метрологическую надежность, под которой понимается свойство СИ выполнять заданные функции, сохраняя свои метрологические характеристики в заданных пределах.

\* Определения этих понятий даны ниже.



Стабильность и метрологическая надежность — существенно различные качества СИ. Стабильность несет больше информации о неизменности показаний, она является как бы «внутренним» качеством, так как зависит только от конструкции и технологии изготовления СИ. Метрологическая на-

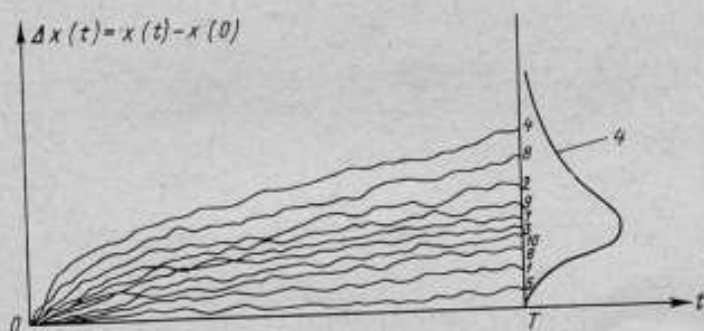
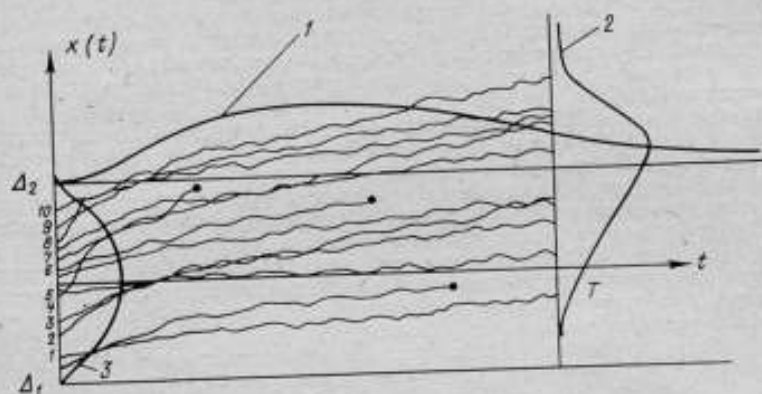


Рис. 1. Распределение показателей точности, стабильности и надежности СИ.

1 — распределение наработки до отказа (характеристика метрологической надежности); 2 — распределение погрешности (характеристика точности в момент проверки); 3 — распределение приращения погрешности (характеристика стабильности); 4 — распределение приращения погрешности (характеристика стабильности)

дежность зависит как от стабильности СИ, так и от его начальной точности и пределов допускаемой погрешности, поэтому она является по отношению к стабильности «внешним» качеством СИ. Для рабочих СИ обычно достаточно оценить метрологическую надежность. В то же время для эталонов и образцовых СИ, по которым важно установить не столько факт нахождения погрешности внутри поля допуска, сколько само значение погрешности, предпочтительной является оценка стабильности.

### Определение установившегося процесса эксплуатации СИ

Закономерные связи между точностью и надежностью могут проявляться в установившемся процессе эксплуатации совокупности СИ, отличающейся стабильностью распределений основных характеристик СИ. Будем считать, что процесс эксплуатации установился с заданной точностью в некотором интервале лет, если в эти годы будут оставаться неизменными с погрешностью, не превышающей заданную, законы распределения: возраста СИ, наблюдаемой при поверках систематической погрешности, показателей надежности и стабильности СИ.

Введем следующие обозначения:  $N_i$  — общее число СИ, находящихся в эксплуатации в  $i$ -м, считая с первого года выпуска, году;  $n_i$  — число вновь изготовленных СИ, поступивших в эксплуатацию в  $i$ -м году;  $l_i$  — число СИ, изъятых в  $i$ -м году из эксплуатации в связи с окончанием их сроков службы;  $S$  — регламентированный срок службы в годах, по истечении которого эксплуатация СИ прекращается независимо от его состояния;  $P$  — вероятность функционирования СИ в течение года без невозможности или экономической нецелесообразности, принимаемая постоянной, так как такие отказы, как правило, распределены по экспоненциальному закону.

В  $i$ -м году изымаются СИ, поступившие в эксплуатацию в  $(i-S)$ -м году, отсюда

$$l_i = \begin{cases} 0, & i = 1, \dots, S; \\ n_{i-S} P^S, & i = S+1, \dots \end{cases} \quad (1)$$

Общее число  $N_i$  подчиняется рекуррентному соотношению

$$N_i = N_{i-1} P + \Delta N_i, \quad i = 2, \dots \quad (2)$$

где

$$\Delta N_i = \begin{cases} n_i, & i = 2, \dots, S; \\ n_i - n_{i-S} P^S, & i = S+1, \dots \end{cases} \quad (3)$$

выражает абсолютный прирост числа СИ.

Пусть

$$\frac{\Delta n_{i+1}}{n_i} = \frac{n_{i+1} - n_i}{n_i} = r - 1 = \text{const}, \quad i = 1, \dots$$

и, следовательно,

$$n_{i+1} = r n_i, \quad i = 1, \dots \quad (4)$$

Тогда совокупность СИ, начиная с  $S$ -го года серийного выпуска, будет иметь следующие свойства:

а) Относительный прирост объема совокупности за год остается постоянным

$$\frac{\Delta N_{i+1}}{N_i} = \frac{N_{i+1} - N_i}{N_i} = \text{const} \quad i = S, \dots \quad (5)$$

Действительно, из (1), (3) и (4) имеем

$$n_i = N_i r^{i-1}, \quad i = 1, \dots \quad (6)$$

$$\Delta N_i = n_i, \quad i = 2, \dots, S,$$

$$\Delta N_i = n_i \left[ 1 - \left( \frac{P}{r} \right)^S \right], \quad i = S+1, \dots \quad (7)$$

Система уравнений относительно  $N_i$  будет следующей:

$$\left. \begin{aligned} N_i &= N_{i-1}P + N_1 r^{i-1}, \quad i = 2, \dots, S; \\ N_i &= N_{i-1}P + N_1 r^{i-1} \left[ 1 - \left( \frac{P}{r} \right)^S \right], \quad i = S+1, \dots \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Решая (8), получим

$$N_i = \begin{cases} N_1 \frac{r^i - P^i}{r - P}, & i = 1, \dots, S-1; \\ N_1 r^{i-S} \frac{r^S - P^S}{r - P}, & i = S, \dots \end{cases} \quad (9)$$

и  $N_{i+1} = rN_i$  для  $i = S, \dots$

Следует заметить, что таким образом доказана необходимость более слабого условия, чем (4) — линейность изменения  $n_i$ , начиная с  $S$ -го года эксплуатации СИ. Кроме того, из (9) при  $S = \infty$  видно, что когда срок службы СИ не регламентируется, (5) выполняется асимптотически.

б) Распределение совокупности СИ по возрасту остается постоянным.

Если в  $(i-j)$ -м году ( $i \geq S, j < S$ ) в эксплуатацию поступило  $n_{i-j}$  новых СИ, то в  $i$ -м году из них будет эксплуатироваться  $n_{i-j}P^j$  единиц.

Поэтому

$$N_i = \sum_{j=0}^{S-1} n_{i-j} P^j, \quad (10)$$

а доля СИ, возраст которых составляет  $j$  лет,

$$a_j^{(i)} = \frac{n_{i-j} P^j}{\sum_{j=0}^{S-1} n_{i-j} P^j}$$

Учитывая (4), получим

$$a^{(i)} = a^j \frac{1-a}{1-a^S}, \quad (11)$$

где  $a = \frac{P}{r}$ . Видно, что  $a_j^{(i)}$  не зависит от  $i$ .

в) Средний возраст совокупности СИ остается постоянным.  $B_i = \sum_{j=1}^{S-1} j a_j$  — средний возраст совокупности СИ в  $i$ -й год эксплуатации. Подставляя (11) и суммируя, получим

$$B_i = a \frac{1 - Sa^{S-1} + (S-1)a^S}{(1-a)(1-a^S)}. \quad (12)$$

При этом  $B_i$  не зависит от  $i$ .

г) Распределения показателей стабильности и надежности совокупности СИ остаются постоянными во времени.

Если принять, что качество изготовления, интенсивность и условия эксплуатации одной модели СИ с течением времени не изменяются, то можно сделать вывод, что распределения показателей стабильности и надежности в группе СИ одного возраста из года в год остаются постоянными.

Пусть, например,  $g_{i,j}^{(1)}(x)$  — плотность распределения приращения систематической погрешности СИ за время  $t$  в  $i$ -м году в группе СИ  $j$ -го возраста

не зависит от  $i$ . Тогда плотность распределения соответствующего приращения  $x(t)$  во всей совокупности СИ будет равна

$$g_i^{(i)}(x) = \sum_{j=0}^{s-1} a_j \bar{g}_{i,j}(x) \quad (13)$$

и также не будет зависеть от  $i$ .

Аналогично можно доказать постоянство во времени распределений других показателей стабильности и надежности.

д) Распределение наблюдаемых при проверке погрешностей СИ остается постоянным во времени.

При выполнении условия (4) на проверку будут поступать СИ, распределение которых по возрасту в среднем определяется (11). Так как погрешность СИ в момент  $t$  полностью определяется его стабильностью, надежностью и условиями эксплуатации, очевидно, что ее распределение для СИ одинакового возраста с течением времени не изменяется. Следовательно, по аналогии с (13), распределение наблюдаемых при проверке погрешностей всей совокупности СИ также не изменяется.

Таким образом, при постоянном относительном увеличении объема годовых поставок СИ процесс эксплуатации устанавливается к концу срока службы СИ первого года выпуска.

#### Уравнение связи

Рассмотрим установившийся процесс эксплуатации совокупности СИ.

Введем следующие обозначения:  $f(\xi)$  — наблюдаемая при проверке плотность распределения систематической погрешности СИ;  $f_0(\xi)$  — плотность распределения систематической погрешности после юстировки вновь изготовленного или отремонтированного СИ;  $g_T(x)$  — плотность распределения приращения  $x$  систематической погрешности за время  $T$ ;  $P_1(T)$  — вероятность безотказной работы СИ по отказам функционирования в течение времени  $T$ ;  $T$  — межпроверочный интервал.

Согласно п. г, д, величины  $P_1(T)$ ,  $f(\xi)$ ,  $f_0(\xi)$ ,  $g_T(x)$  не зависят от рассматриваемого момента времени.

Возьмем две выборки СИ равного объема  $M$ , поступившие на проверку через промежуток времени  $T$ . При проверке бракуются и отправляются в ремонт СИ, точность которых ниже допустимой, а остальные снова отправляются потребителю\*. Поэтому после проверки число годных СИ будет равно  $KM$ , а плотность распределения их систематической погрешности составит

$$\frac{f(\xi)}{K}, \quad \Delta_1 \leq \xi \leq \Delta_2,$$

где доля исправных СИ, или коэффициент годности, равна

$$K = \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} f(\xi) d\xi. \quad (14)$$

Из этой группы на следующую проверку поступит  $P_1(T)KM$  единиц СИ. Следовательно, во второй выборке  $M[1 - P_1(T)K]$  единиц — вновь изготовленные или отремонтированные СИ.

\* Случай установления поправок к показаниям СИ не рассматривается, так как он приводит к тривиальному уравнению  $g_T(x) = f(x)$ .

Плотность распределения погрешности суммарного потока СИ равна

$$f_1(\xi) = [1 - P_1(T)K] f_0(\xi) + P_1(T) f(\xi),$$

а при следующей проверке

$$\int_{\Delta_1}^{\Delta_2} f_1(\xi) g_T(x - \xi) d\xi.$$

В соответствии с п. д последнее выражение примет вид

$$f(x) = [1 - P_1(T)K] \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} f_0(\xi) g_T(x - \xi) d\xi + P_1(T) \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} f(\xi) g_T(x - \xi) d\xi \quad (15)$$

Выражение (15) является искомой зависимостью между показателями точности, стабильности и надежности СИ. Оно легко может быть обобщено для случая векторных функций  $f_0(\xi)$ ,  $f(\xi)$ ,  $g_T(x)$ .

С учетом (14) выражение (15) преобразуется к виду

$$\varphi(x) - P_1(T) \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} f(\xi) \psi(x, \xi) d\xi = f(x), \quad (16)$$

где

$$\psi(x, \xi) = \varphi(x) - g_T(x - \xi);$$

$$\varphi(x) = \int_{\Delta_1}^{\Delta_2} f_0(\xi) g_T(x - \xi) d\xi.$$

Формула (16) является интегральным уравнением Фредгольма второго рода, численные методы решения которого широко известны [4]. Во ВНИИМ составлена программа для решения на ЭВМ М-222 уравнения (16) при произвольных  $f_0(\xi)$  и  $g_T(x)$ . Она предусматривает определение плотности распределения  $f(\xi)$ ; коэффициента годности  $K$ ; математического ожидания и дисперсии распределения: а)  $f(\xi)$ ,  $-\infty < \xi < \infty$ ; б) усеченного  $\frac{f(\xi)}{K}$ ,  $\Delta_1 < \xi \leq \Delta_2$ ; в) правого и левого «хвостов»; вычисление коэффициента асимметрии и эксцесса первых двух распределений; построение графиков функций  $f_0(\xi)$ ,  $g_T(x)$ ,  $f(\xi)$ . По этой программе произведены вычисления при

$$\Delta_1 = -\Delta, \quad \Delta_2 = \Delta; \quad f_0(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta}, & -\Delta \leq \xi \leq \Delta; \\ 0, & \xi < -\Delta \text{ и } \xi > \Delta. \end{cases}$$

$$g_T(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty,$$

и составлены таблицы параметров распределения  $f(\xi)$  для широкого диапазона значений  $m$ ,  $\sigma$  и  $P_1(T)$ .

Результаты этих расчетов показали следующее.

а) Распределение систематической погрешности  $f(\xi)$  не обязательно является нормальным, даже если ее приращение распределено по нормальному закону (рис. 2). Это, в частности, объясняет кажущееся противоречие между реальными распределениями погрешностей СИ [6] и известными представлениями о гауссовском характере физико-химических процессов старения и износа его элементов [5].



Распределение  $f(\xi)$  наиболее близко к нормальному при  $\sigma=0,7\Delta$ .

б) При изменении  $m$  и  $\sigma$  от  $0,1\Delta$  до  $\Delta$ ,  $P(T)$  — от  $0,5$  до  $1,0$  параметры распределения  $f(\xi)$  изменяются в диапазонах:

Коэффициент годности $K$ . . . . .	0,99—0,36
Математическое ожидание $m_1$ . . . . .	0—1,2 $\Delta$
Математическое ожидание после проверки $m_2$ . . . . .	0—0,5 $\Delta$
Дисперсия $D_1$ . . . . .	$0,26\Delta^2$ — $1,25\Delta^2$
Коэффициент асимметрии $A_1$ . . . . .	0—0,4
Экспесс $\Xi_1$ . . . . .	0,1—0,9

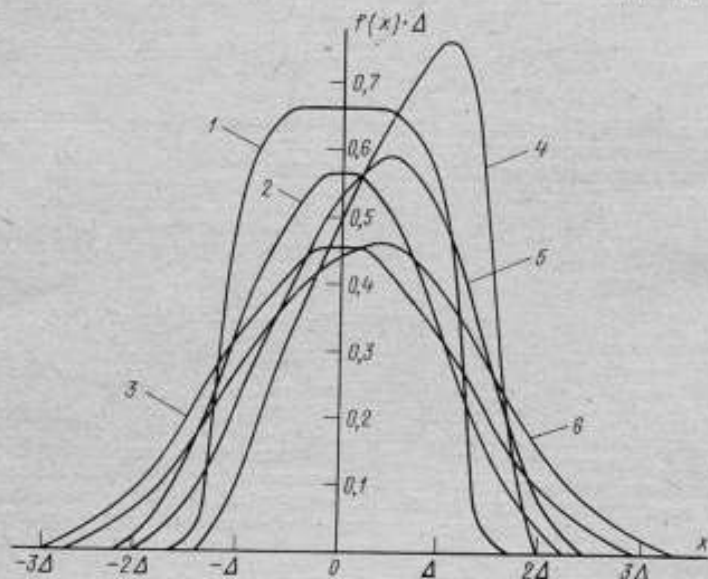


Рис. 2. Плотность распределения  $f(x)$  систематической погрешности СИ в момент проверки для различных значений показателя стабильности СИ  $m$  и  $\sigma$ .

1 —  $m=0$ ,  $\sigma=0,1\Delta$ ; 2 —  $m=0,8\Delta$ ,  $\sigma=0,1\Delta$ ; 3 —  $m=0$ ,  $\sigma=0,4\Delta$ ; 4 —  $m=0,2\Delta$ ,  $\sigma=0,4\Delta$ ; 5 —  $m=0$ ,  $\sigma=0,7\Delta$ ; 6 —  $m=0,2\Delta$ ,  $\sigma=0,7\Delta$ .

в) Вероятность безотказной работы по отказам функционирования  $P_1(T)$  практически не оказывает влияния на распределение  $f(\xi)$ .

г) Сходимость решения уравнения (16) хорошая. При погрешности определения  $f(\xi)$  в каждой точке, равной  $0,01$ , как правило, достаточно проведения 2—3 итераций.

Соотношение (15) может быть использовано при разработке и проведении метрологической экспертизы технического задания, на этапе разработки технического предложения — для согласования между собой требований технического задания в части точности и надежности; при разработке СИ для обоснования норм надежности составных частей СИ, априорной оценки погрешности, обоснования класса точности, межповерочного интервала и других параметров метрологического и профилактического обслуживания; при проведении государственных испытаний — для оценки соответствия норм надежности назначенно СИ и параметрам его метрологического обслуживания.

Необходимые для расчетов исходные данные о стабильности СИ — среднее значение  $m$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  приращения система-

тической погрешности за время  $T$  могут быть получены: на этапах составления технического задания и разработки технического предложения — путем изучения сведений о конструктивных аналогах; на этапах проектирования — расчетным путем по известным статистическим данным о дрейфе основных параметров элементов СИ; при проведении испытаний — периодическим измерением метрологических параметров СИ; во время эксплуатации — путем сбора и анализа данных о результатах поверок.

Важным преимуществом предлагаемого метода по сравнению с альтернативными методами оценки метрологической надежности является то, что параметры  $m$  и  $\sigma$  вычисляются без использования дополнительных допущений.

Пример. Щитовые вольтметры и амперметры типа М 366 класса 1,0.

Изготовитель подтвердил контрольными испытаниями вероятность безотказной работы в течение 5000 ч по отказам функционирования  $P_1(5000) = 0,95$  и по метрологическим отказам  $P_2(5000) = 0,92$ . Оценим погрешность приборов при регламентных поверках через 5000 ч.

Приборы этого типа характеризуются всерным симметричным относительно номинальных значений процессом дрейфа основных параметров, поэтому

$$m_t = 0, \quad \sigma_t \approx \sigma_{t_0} \sqrt{\frac{t_1}{t_2}},$$

$$P_2(t) = \int_{-\Delta}^{\Delta} g_t(x) dx = 2F_0\left(\frac{\Delta}{\sigma_t}\right) - 1,$$

где  $F_0(x)$  — функция Лапласа.

Из условия  $P_2(5000) = 0,92$  находим  $\sigma_{5000} = 0,6\Delta$  и в результате расчета получаем коэффициент годности  $K = 0,77$  и следующие параметры распределения относительной систематической погрешности приборов (см. таблицу):

Параметры распределения	Перед поверкой	После поверки
Математическое ожидание	0	0
Дисперсия	0,64 $\Delta^2$	0,27 $\Delta^2$
Коэффициент асимметрии	0,03	0,006
Эксцесс	-0,15	-0,95

Методика позволяет обосновать мероприятия по повышению метрологической надежности СИ. Например, пусть требуется повысить коэффициент годности до 0,9. Для этого в соответствии с (16) необходимо обеспечить соотношение  $\sigma = 0,3\Delta$ . Этого можно достичь: улучшением конструкции и качества изготовления приборов с целью уменьшения в два раза значения  $\sigma_1$ ; уменьшением в четыре раза межповерочного периода (до 1250 часов); присвоением приборам класса 2,0.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. При построении теоретических моделей эксплуатации необходимо оценивать работоспособность СИ не по альтернативному признаку, а по действительному уровню основной погрешности.

2. Закономерные связи надежности, стабильности и точности проявляются в установившемся процессе эксплуатации совокупности СИ. Условием существования установившегося процесса эксплуатации совокупности СИ является постоянство относительного увеличения годового объема поставок СИ.

3. Полученная зависимость между показателями надежности, стабильности и точности совокупности СИ в установившемся процессе эксплуатации может быть использована для решения задач разработки и метрологического обеспечения СИ. Необходимые исходные данные могут быть собраны в процессе разработки и испытаний СИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленцов Б. П. О специфике надежности средств измерений.— «Измерительная техника», 1971, № 2, с. 92—94.
2. Зеленцов Б. П. Матричный анализ сложных систем, Новосибирск, «Наука», 1972, 145 с.
3. Зеленцов Б. П., Серeda Л. А. Универсальная модель анализа и регулирования единообразия средств измерений.— «Измерительная техника», 1974, № 8, с. 83—86.
4. Краснов М. Л., Киселев А. И., Макаренко Г. И. Интегральные уравнения, М., «Наука», 1968, 192 с.
5. Медамедов И. М. Физические основы надежности, М.—Л., «Энергия», 1970, 152 с. с ил.
6. Резник К. А. О реальных распределениях погрешностей измерительных приборов.— «Метрология», 1970, № 3, с. 43—52.

*Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.*

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 621.317.799.089.6—52

А. С. Кустарев

ВНИИМ

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОВЕРОЧНЫХ РАБОТ

Резкое увеличение выпуска средств измерений (СИ) высокой точности, обусловленное научно-техническим прогрессом в различных отраслях народного хозяйства, вызывает значительный рост объема поверочных работ. Увеличение трудоемкости поверочных работ обуславливается не только количественным ростом поверяемых СИ, но и нарастающей технической сложностью создаваемой аппаратуры и повышением требований к ее эксплуатационным характеристикам. Задача обеспечения необходимого роста объемов поверочных работ может быть решена лишь на базе комплексной автоматизации операций поверки СИ. В связи с тем, что соответствующее перевооружение служб государственного надзора и ведомственных метрологических служб в масштабе страны требует больших затрат, большое значение приобретают экономически целесообразные пути конструирования средств комплексной автоматизации поверочных работ.

В настоящее время основными направлениями [1—3] в конструировании средств комплексной автоматизации поверочных работ является создание специализированных автоматов поверки (САП), агрегатных средств поверки (АСП) и универсальной поверочной аппаратуры (УПА).

САП представляет собой совокупность средств поверки, выполненных в виде функционально связанных узлов и блоков, обеспечивающих полную или частичную автоматизацию операций поверки узкой номенклатуры СИ, и объединенных в единый конструктивный комплекс. САП отличается высокой производительностью, большой степенью автоматизации операций поверки, не требует высокой квалификации обслуживающего персонала при ремонте.

Стоимость САП относительно велика. Автоматы эффективны лишь при массовой поверке СИ.

АСП представляет собой совокупность средств поверки, выполненных в виде автономных составных агрегатов-модулей, обеспечивающих автоматизацию соответствующей группы операций поверки при сопряжении в комплексе или использовании самостоятельно. За счет создания унифицированных рядов составных модулей АСП позволяет производить широкую перестройку при поверке различных СИ.

На основе анализа содержания и трудоемкости операций технологического процесса поверки различных СИ, выполненного по данным лабораторий госнадзора г. Ленинграда и области, была определена обобщенная блок-схема АСП (рис. 1). Как видно из таблицы, в которой представлены некоторые данные анализа относительных трудозатрат на операции поверки, модули АСП, изображенные на блок-схеме, охватывают при автоматизации 95—98% общих трудозатрат на поверку, причем максимальные трудозатраты на выполнение операций, включенных в автоматизируемые группы для отдельных модулей, могут достигать 50—85% от общих трудозатрат на поверку. Комплекс АСП в общем случае состоит из модулей Р, В, У и измерительной

установки. В эксплуатируемых комплексах АСП отдельные модули могут отсутствовать, это обуславливается как технологической необходимостью выполнения соответствующих операций поверки, так и экономической эффективностью их автоматизации в данном виде поверки. Модуль Р представляет собой устройство, обеспечивающее при автономном использовании или в комплексе АСП автоматизацию операций регистрации результатов поверки с выдачей документов установленной формы и, при необходимости, клеймения СИ. Модуль В представляет устройство, обеспечивающее при автономном использовании или в комплексе АСП автоматизацию операций накопления, обработки информации поверки СИ и передачи результатов обработки на модуль Р. Модуль У представляет программное устройство, обеспечивающее в комплексе АСП автоматизацию операций управления работой модулей измерительной установки и поверяемого СИ.

Измерительная установка представляет устройство, укомплектованное образцовыми средствами измерений и аппаратурой, обеспечивающее незавома-

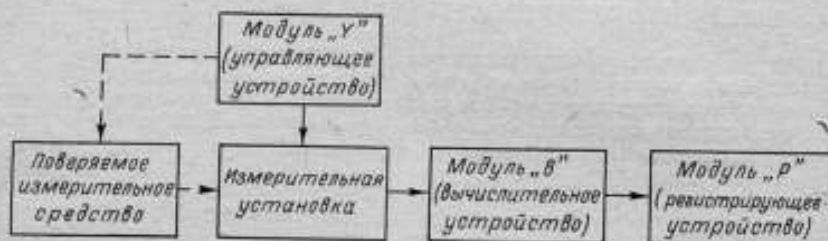


Рис. 1. Блок-схема агрегатных средств поверки (АСП)

тизированной поверки СИ при автономном использовании, снабженное механизмами, позволяющими автоматизировать цикл работы установки и съем информации поверки. Модули АСП выполняются в виде набора устройств

Наименование поверяемого прибора	Удельные затраты на выполнение операций, %		
	Подготовка систем «поверяемый прибор—средства поверки» к измерению*	Снятие показаний, расчеты	Оформление результатов поверки (протоколы, свидетельства, клеймения)
Катушки индуктивности типа Р-547, Р-532, КН-1 ÷ 5, класс 0,05 ÷ 0,1 . . . . .	41	33	18
Амперметры и вольтметры, класс 1,0—4,0 . . . . .	10,5	63	21
Индикаторы часового типа	5	85	5
Гири миллиграммовые, класс 4 . . . . .	12	25	50
Температурные лампы, образцовые 2-го разряда . . . . .	32	48	19
Меры вместимости свыше 5 л классов 1 и 2 . . . . .	76	9	14

\* не входят операции внешнего осмотра, промывки и смазки.



различных модификаций и типоразмеров. Модификации обуславливаются наличием аналогичных по содержанию операций поверки СИ, но разнообразных по конструктивному исполнению. Так, например, результаты поверки СИ могут оформляться путем заполнения свидетельства и протоколов (катушки индуктивности, плоско-параллельные концевые меры и др.) или клейменем СИ (весы, гири и др.), поэтому в модуле *P* предусматриваются обе модификации. Модуль *B*, согласно схеме ВНИИМС [3], должен содержать следующие модификации: клавишные вычислительные машины, счетно-перфорационные машины, электронные вычислительные машины, системы сбора, представления и обработки информации о поверке СИ. В зависимости от объема выполняемых операций модификации модулей могут отличаться типоразмерами. Рациональные ряды типоразмеров определяются оптимальным соотношением максимального количества операций поверки, объединенных в одном типоразмере модуля, и частотой повторения применения объединенных групп операций в практике поверки СИ.

Агрегатный принцип построения средств поверки, при котором поверочный комплекс образуется путем сочетания унифицированных функциональных модулей, позволяет получить ряд модификаций всего поверочного комплекса, соответствующих заданным масштабам поверки, степени его автоматизации, а также создает условия для конструктивного и технологического усовершенствования модулей как в процессе эксплуатации средств, так и при их изготовлении. Это позволяет начать внедрение АСП в поверочных службах с наиболее простой модификацией, по мере накопления опыта наращивать объем проверок СИ и степень их автоматизации добавлением новых модулей. Стоимость АСП из-за большой унификации и применяемости функциональных модулей невысока.

УПА является совокупностью средств поверки, выполненных в виде функционально связанных узлов и блоков, обеспечивающих полную или частичную автоматизацию операций поверки широкой номенклатуры СИ и объединенных в единый конструктивный комплекс. Аппаратура требует высокой квалификации обслуживающего персонала как при эксплуатации, так и при ремонте, имеет относительно низкую производительность. В связи с наличием большого числа средств для поверки широкой номенклатуры СИ стоимость УПА самая высокая из всех рассмотренных средств автоматизации.

Учет экономических факторов оказывает определяющее влияние на выбор направлений конструирования средств автоматизации поверочных работ. Экономическая эффективность автоматизации операций поверки СИ зависит от того, насколько увеличение одновременных затрат, обусловленное более высокой стоимостью автоматизированных средств поверки по отношению к средствам поверки, применяемым до автоматизации, окупается снижением текущих затрат на поверочные работы, определяемых квалификацией операторов, трудоемкостью операций поверки, стоимостью обслуживания и ремонта средств поверки и другими факторами. Чем ниже стоимость средств автоматизации, меньше трудоемкость проведения поверки после автоматизации и выше количество поверяемых СИ, тем выше экономический эффект от автоматизации такой операции. Экономическая эффективность определяется по широко известной формуле расчета срока окупаемости единовременных затрат и капитальных вложений на новую технику. В практике при создании средств автоматизации стремятся обеспечить оптимальную степень автоматизации, оправданную экономически и охватывающую максимальный объем операций поверки.

Основное условие выбора оптимальных средств (например, типа *A*) автоматизации процесса поверки с учетом формулы определения экономической эффективности внедрения новой техники может быть представлено в виде

$$Z_{\text{авт}}^B = Z_{\text{авт}}^A + Z_{\text{руч}}, \quad (1)$$

где  $Z_{\text{авт}}^B$ ,  $Z_{\text{авт}}^A$  — суммарные затраты на приобретение и эксплуатацию автоматических средств вида *A* и *B*, отнесенные к одному поверенному СИ;

$Z_{ручн}$  — суммарные затраты на приобретение и эксплуатацию средств ручной проверки, отнесенные к одному поверенному СИ.

Выбор считается оптимальным, если при выполнении условия (1) средства проверки обеспечивают максимальный охват операций при автоматизации какого-либо процесса проверки. В общем случае можно считать, что

$$Z_{авт} = Z_{обор} E_n + Z_{обсл}, \quad (2)$$

где  $Z_{обор}$  — единовременные затраты, связанные с приобретением и установкой автоматических средств проверки, отнесенные к одному поверенному СИ;  $Z_{обсл}$  — текущие затраты, связанные с обслуживанием средств автоматической проверки, отнесенные к одному поверенному СИ;  $E_n$  — нормативный коэффициент экономической эффективности.

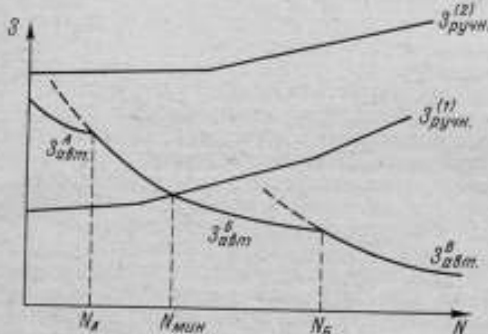


Рис. 2. График изменения суммарных затрат  $Z$  на приобретение и эксплуатацию автоматических средств проверки в зависимости от количества  $N$  поверяемых средств измерения

Для обеспечения выполнения условия (1) стремится выбрать такое направление в конструировании средств автоматизации поверочных работ, которое позволило бы максимально снизить затраты  $Z_{обор}$  и  $Z_{обсл}$ . В зависимости от конструктивного исполнения средств автоматизации и характеристик условий проверки как суммарная величина, так и величина отдельных членов в правой части уравнения (2) может изменяться. На величину затрат  $Z_{обор}$  большое влияние оказывает остаточная стоимость средств автоматизации. В связи со значительной модернизацией или обновлением парка поверяемых СИ в относительно небольшие

сроки (3—5 лет) возникает необходимость перестройки автоматических средств для проверки новых СИ, при этом часть средств проверки требует замены. Неамортизированная часть неизменных средств проверки в стоимостном выражении называется остаточной стоимостью. При перестройке САП остаточная стоимость средств проверки, как правило, очень мала (5—7%). При перестройке АСП и УПА из-за унификации функциональных модулей и универсальности аппаратуры остаточная стоимость для первой группы составляет 85—90%, а для второй — практически равна ее первоначальной стоимости. Таким образом, в условиях проверки быстромеющихся приборов величина  $Z_{обор}$  при использовании САП непрерывно растет, что не позволяет обеспечить выполнение условия (1).

Одним из существенных факторов, влияющим на величину  $Z_{обор}$ , является включение в комплекс автоматизируемого процесса проверки малозффективных операций с малой трудоемкостью. Как показывает анализ данных, представленных в таблице, затраты на выполнение аналогичных операций проверки сильно отличаются друг от друга (от 5—9% до 50—85%). Это свидетельствует, что включение таких операций с малой трудоемкостью, затраты на выполнение которых колеблются в пределах 5—10%, увеличивает  $Z_{обор}$ , что может привести к невыполнению условия (1). Практика проектирования показывает, что в зависимости от выбранного направления конструирования автоматических средств проверки при включении одинаковых операций проверки с малой трудоемкостью в комплекс автоматизации границы невыполнения условия (1) изменяются.

При конструировании средств поверки на базе САП, несмотря на то, что включение операций с малой трудоемкостью повышает  $Z_{обор}$ , из-за высокой производительности автоматов в большинстве случаев условие (1) выполняется. Конструирование же автоматических средств на базе УПА требует введения средств автоматизации операции поверки с малой трудоемкостью в общий комплекс аппаратуры. Невысокая производительность этого вида аппаратуры, а также узкая область применения ее для поверок других СИ обусловила для введенных средств автоматизации значительно больший срок окупаемости, чем для средств автоматизации других операций. Это значительно повышает  $Z_{обор}$  и может привести к невыполнению условия (1). Таким образом, включение нетрудоёмких операций поверки в этом случае должно быть экономически обосновано.

Использование АСП обеспечивает максимальное снижение величины  $Z_{обор}$ . Унифицированные составные функциональные модули АСП позволяют в зависимости от экономической целесообразности включать или исключать операции с малой трудоемкостью в автоматический комплекс поверочной аппаратуры. При этом составные функциональные модули, не использованные при поверке одних СИ, при необходимости могут быть включены в комплекс средств поверки других СИ, что обеспечивает быструю окупаемость средств, затраченных на приобретение модулей АСП.

Неравномерность загрузки автоматических средств поверки снижает эффективности их использования и повышает значение  $Z_{зат}$ . Неравномерность загрузки особенно сказывается при использовании САП: вынужденные простои вызывают большие непроизводительные затраты и увеличение затрат как  $Z_{обор}$ , так и  $Z_{обсл}$ . Как правило, условие (1) здесь нарушается. При использовании АСП и УПА этот фактор сказывается незначительно: при использовании первых средств составные функциональные модули могут быть переданы для составления комплексов поверки других СИ, при использовании вторых имеется возможность перехода на поверку других номенклатур СИ. Одним из факторов, влияющих на величину  $Z_{обсл}$ , является изменение транспортных расходов при автоматизации на перевозку СИ к пункту поверки. При использовании САП за счет увеличения количества поверяемых СИ расширяется район обслуживания, что приводит к увеличению транспортных расходов и, соответственно,  $Z_{обсл}$ . В ряде случаев [4] рост транспортных расходов может повлечь нарушение условия (1).

На рис. 2 представлен график зависимости затрат  $Z$  от количества  $N$  поверяемых СИ. Кривые  $Z_{авт}^A$ ,  $Z_{авт}^B$  и  $Z_{авт}^B$  представляют зависимость изменения затрат на автоматизацию процесса поверки от количества поверяемых СИ. Индекс  $A$ ,  $B$  и  $B$  характеризует тип используемых средств автоматизации, например, УПА, АСП и САП. Точки пересечения кривых  $Z_{авт}^A$  с  $Z_{авт}^B$ ,  $Z_{авт}^B$  с  $Z_{авт}^B$  определяют области, в которых затраты на автоматизацию процесса поверки одного типа средств ( $A$  или  $B$ ) всегда будут меньше, чем затраты с использованием других средств ( $B$  или  $B$ ). Точка  $N_A$  характеризует количество СИ в партии, меньше которого экономически целесообразно применять средства поверки типа  $A$ , точка  $N_B$  — количество, меньше которого экономически целесообразно применять средства поверки типа  $B$ . Кривые  $Z_{ручн}^1$  и  $Z_{ручн}^2$  представляют зависимость изменения затрат при ручной поверке от количества поверяемых СИ для двух процессов. Точка пересечения кривых  $Z_{авт}^B$  с  $Z_{ручн}^1$  разделяет две области: правее точки пересечения выполняется условие (1), левее — нет. В условиях представленной экономической ситуации и  $Z_{ручн}^1$  целесообразно использовать средства поверки типа  $B$  при обеспечении партии СИ в размере больше  $N_{мин}$ , но не более  $N_B$ ; при размере партии СИ больше  $N_B$  экономически целесообразно использовать средства поверки  $B$ . При необходимости автоматизировать процесс поверки, представленный кривой изменения затрат  $Z_{ручн}^2$  в зависимости от ожидаемого раз-

мера партии целесообразно использовать следующие средства поверки: до  $N_A$  — типа А, свыше  $N_A$  до  $N_B$  — типа Б и свыше  $N_B$  — типа В. Анализ по вышеприведенной методике фактических затрат на проведение ручной поверки и расчетных затрат при автоматической поверке на базе САП, АСП и УПА для различных СИ показывает, что при относительно малых количествах поверяемых СИ экономически выгодно автоматизировать процессы поверки на базе УПА, при массовых поверках — на базе САП. При этом, согласно усредненным данным, количество автоматизируемых процессов поверки на базе САП составляет 8–10%, на базе УПА — 15–20% от общего количества подлежащих автоматизации процессов поверки. Автоматизацию остальных процессов поверки СИ при существующей организации труда и расширение объема поверки экономически целесообразно проводить на базе АСП. Таким образом, рациональный выбор направлений конструирования средств автоматизации процессов поверки позволит оснастить лаборатории государственного надзора не только высокопроизводительным, но и экономически эффективным автоматическим поверочным оборудованием.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безикович А. Я., Зорин Д. И., Шестопалов Ю. Н., Эскин С. П. Принципы создания автоматизированных средств метрологических исследований. — «Измерительная техника», 1970, № 4, с. 25–28.
2. Каверкин И. Я., Певзнер Г. С., Цветков Э. И. Агрегатирование в электронизмерительной технике. — «Приборы и системы управления», 1974, № 1, с. 28–30.
3. Закс Л. М., Пинский Р. С., Гершкович В. С. Основные направления автоматизации обработки результатов поверки измерительных приборов. — «Измерительная техника», 1974, № 1, с. 49–51.
4. Лансков А. В., Бабенко Л. В. Методика расчета экономической эффективности метрологических НИР и ОКР и техника экономического обоснования эталонов. — «Метрология», 1973, № 7, с. 69–100.

Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.

УДК 53.082.54 : 681.325.6

А. Я. Безикович, В. И. Прицкер, В. Д. Свердличенко

ВНИИМ

#### СИСТЕМА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Одним из свойств интерференционных методов измерений является их универсальность, т. е. возможность измерения различных физических величин. Под порядком интерференции (ПИ) понимают оптическую разность хода  $x$ , выраженную в длинах волн  $\lambda$  применяемого монохроматического излучения. В свою очередь, оптическая разность хода в общем случае определяется геометрической длиной пути светового луча  $L$  и показателем преломления  $n$ . Таким образом, при известных  $\lambda$  и  $n$  интерференционные методы позволяют измерять длину и ряд связанных с ней величин — по высоте столба ртути или другой жидкости, параметры движения — по смещению инерционного тела, углы и т. д.). Зная  $L$  и  $\lambda$ , можно интерференционным методом измерять показатель преломления среды и другие, влияющие на него величины: давление, химический состав жидкостей и газов, температуру и т. п.

И, наконец, опираясь на известные  $L$  и  $n$ , можно использовать интерференционные методы для измерений длин волн источников монохроматиче-



ского излучения и спектральных характеристик полихроматических источников.

Важными свойствами интерференционных методов являются также высокая точность и разрешающая способность. Это определяется высокой стабильностью и воспроизводимостью длины волны источников монохроматического излучения ( $10^{-6}$ — $10^{-11}$ ) и возможностью измерений как целой, так и дробной частей ПИ с дискретностью до  $\lambda/100$  и менее.

Указанные выше свойства обусловили интенсивное развитие интерференционных методов. Устойчивой тенденцией этого развития за последнее десятилетие является автоматизация основных измерительных операций, что не только повышает точность и производительность измерений, но в ряде случаев (при измерениях больших ПИ) определяет принципиальную возможность применения интерференционных методов.

Одновременно интерференционные измерительные системы развиваются в направлении унификации схемных решений. Поскольку характер распределения светового потока по полю интерференции одинаков при измерениях различных физических величин, возникает возможность унификации схемных решений, вплоть до создания системы унифицированных функциональных блоков (ФБ).

Разработка такой системы сокращает сроки проектирования и внедрения автоматических интерференционных устройств и повышает эффективность метрологических исследований. Ниже оценивается современное состояние разработки автоматических интерференционных устройств и рассматриваются перспективы создания системы ФБ.

### Структурная схема интерференционной измерительной системы

На рис. 1 представлена типовая структурная схема интерференционной измерительной системы. Здесь изменение измеряемой физической величины  $I$  с помощью интерферометра 2 преобразуется в изменение порядка интерференции. Измерение сводится к решению двух задач: фиксации границ изменения величины и определению изменения ПИ между этими границами. Это достигается соответственно с помощью устройства фиксации границ (УФГ) и измерителя порядка интерференции (ИПИ).

Известно, что для двухлучевой интерференции, получившей наибольшее распространение, закон изменения освещенности в поле зрения интерферометра [1]

$$E = E_0 + E_m \sin \frac{2\pi x}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $E_0$  — постоянная составляющая,  $E_m$  — амплитуда переменной составляющей светового потока.

Как показано в работах [2, 3], для измерения ПИ световой сигнал должен быть преобразован в два электрических сигнала

$$\begin{aligned} u_1 &= U_m \sin \frac{2\pi x}{\lambda}; \\ u_2 &= U_m \cos \frac{2\pi x}{\lambda}. \end{aligned} \quad (2)$$

Это преобразование осуществляется фотоэлектрическим преобразователем (ФЭП) 3. Определение дробной части ПИ и формирование сигналов прохождения целых ПИ (сигналов переноса) производится аналого-дискретным преобразователем (АДП) 4. В качестве регистрирующего устройства, как правило, используется реверсивный счетчик импульсов (РСИ) 7 и цифропечатающее устройство (ЦПУ) 11.



Границы измеряемых интервалов в большинстве случаев задаются в виде штриховых отметок или нулевой разности хода (положения опорной поверхности). В этих случаях УФГ представляет собой совокупность перичного фотоэлектрического преобразователя 6 и командного устройства (КУ) 9. Первый из них служит для формирования сигнала рассогласования, пропорционального отклонению границы от положения точного наведения, а второе — для формирования импульсного сигнала в момент точного наведения.

Границы интервала могут фиксироваться в статическом и динамическом режимах, т. е. при неизменном или непрерывно изменяющемся ПИ. В последнем случае в состав ИПИ должно быть включено быстродействующее промежуточное запоминающее устройство (ПЗУ) 10, управляемое сигналом КУ и передающее на цифроречитательное устройство результат измерения порядка в момент наведения на границу интервала.

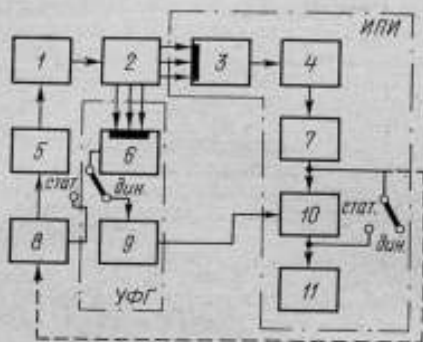


Рис. 1. Структурная схема интерференционной измерительной системы

метрия), давления (рефрактометрия), давления (рефрактометрия), химическим составом среды (анализ состава веществ) и т. д. При этом УФГ не используется, а фиксация границ осуществляется с помощью устройств, специфических для соответствующей области измерений и здесь не рассматриваемых.

Необходимость в УФГ отпадает также и тогда, когда измерительная система используется как однозначная или многозначная мера. Сигнал регулирования, управляющий изменением ФВ, подается в этом случае на вход ПУ с выхода РСИ (на рис. 1 отмечено пунктиром).

#### Состав системы ФБ, параметры и принцип действия блоков

**Фотоэлектрические преобразователи.** Как указывалось ранее, ФЭП, предназначенные для измерения ПИ, служат для преобразования светового потока (1) в два электрических сигнала (2). Для получения этих сигналов при одновременном исключении постоянной составляющей светового потока  $E_0$  принципиально возможны два пути (см. рис. 2, а—в). Первый предполагает непосредственное преобразование светового потока с помощью двух (ФЭП-1, на рис. 2, а) или трех (ФЭП-2, на рис. 2, б) фотоприемников ( $\Phi$ ), а второй — интерференционную модуляцию светового потока с демодуляцией выходного электрического сигнала (ФЭП-3, на рис. 2, в). Для обеспечения фазового сдвига сигналов в ФЭП-1 шелевые диафрагмы  $D$ , ограничивающие поле зрения  $\Phi$ , смещены на четверть периода ПИ. Компенсация постоянной составляющей выходного сигнала  $\Phi$  достигается включением источника постоянного регулируемого напряжения  $U_n$ , а необходимое усиление выходного сигнала — усилителем постоянного тока (УПТ).

Недостаток ФЭП-1 — неполное исключение постоянной составляющей из-за ее нестабильности и обусловленная этим погрешность преобразования. Перспективнее преобразователь типа ФЭП-2, в котором три Ф подключены попарно ко входам двух дифференциальных УПТ. Щели фотоприемников по-прежнему смещены друг относительно друга на  $1/4$  периода ПИ. Это позволяет получить на выходе УПТ сигналы вида

$$u_1' = U_m \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{\pi}{4}\right) \text{ и } u_2' = U_m \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{\pi}{4}\right).$$

Постоянный фазовый сдвиг этих сигналов на угол  $\pi/4$  относительно сигналов (2) не влияет на результат измерения ПИ.

Интерференционная модуляция, использованная в фотопреобразователе ФЭП-3 (см. рис. 2, а), осуществляется модулятором (М) путем периодического изменения оптической разности хода в интерферометре или перемещения щели фотоприемника по полю интерференции. В работе [4] показано, что при гармоническом законе модуляции  $x = a \sin \omega t$ , первая и вторая гармоники переменной составляющей светового потока пропорциональны соответственно  $U_{m1} \sin \frac{2\pi x}{\lambda}$

и  $U_{m2} \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$ , в амплитуды  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$  одинаковы при  $a = 0,21 \lambda$ . Таким образом, для получения сигналов вида (2) достаточно использовать два избирательных усилителя (ИУ), настроенных на частоты  $\omega$  и  $2\omega$ , и синхронные демодуляторы (СД), управляемые опорными сигналами соответствующих частот. Для получения опорной частоты  $2\omega$  в схеме рис. 2, в служит умножитель частоты (УЧ).

ФЭП-3 исключает полностью влияние постоянной составляющей светового потока. При этом фазовый сдвиг и отношение амплитуд выходных напряжений практически не зависят от наклона и ширины интерференционных полос.

В ФЭП, фиксирующих границы измеряемых интервалов, также целесообразно использовать метод модуляции светового потока, так как при относительной простоте он обеспечивает наивысшую точность фиксации. Как известно [4], совмещению центра сканирующей щели с осью симметрии штриха соответствует отсутствие в выходном сигнале ФП первой гармоники частоты модуляции. Функциональная схема ФЭП-4, предназначенного для фиксации штриховой границы, показана на рис. 2, г.

При задании границы интервала нулевой разностью хода задача фиксации границы сводится к наведению на центральную ахроматическую полосу интерференционной картины в белом свете. Момент наведения может быть определен по одновременному равенству нулю первой и третьей гармоник час-

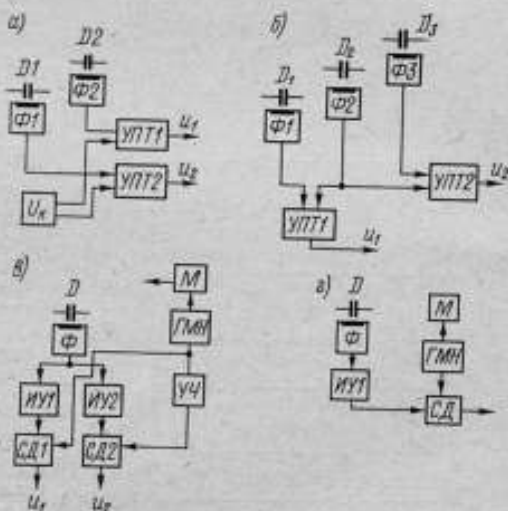


Рис. 2. Функциональные схемы фотозлектрических преобразователей интерференционной картины

тоты модуляции в выходном сигнале ФЭП. Это позволяет построить для этой цели ФЭП-5 по схеме, аналогичной рис. 2, а, при условии умножения частоты модуляции на три и настройки ИУ на частоту  $3\omega$ . Сказанное ранее позволяет сделать важный вывод: преобразователи ФЭП-3—ФЭП-5 имеют практически одинаковый функциональный состав и могут быть построены по одной унифицированной схеме (см., например, рис. 2, в). Для этого необходимо снабдить такую схему органами, обеспечивающими перестройку одного из избирательных усилителей и умножителя с частоты  $2\omega$  на частоту  $3\omega$ .

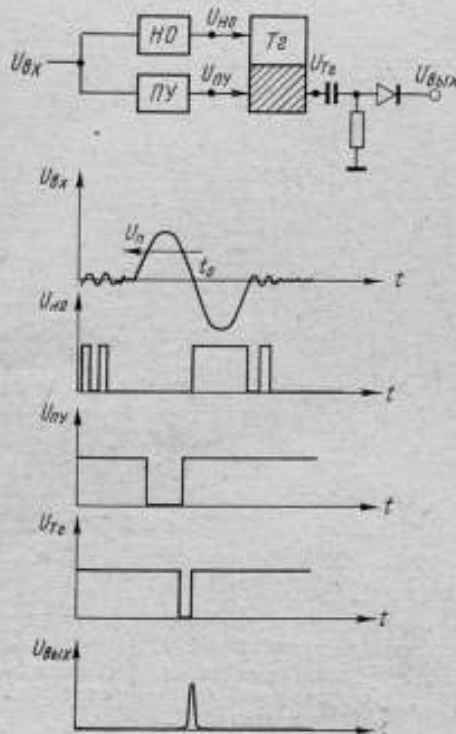


Рис. 3. Функциональная схема командного устройства, временные диаграммы, поясняющие его работу

нуль, используется схема защиты от ложных срабатываний, состоящая из порогового устройства (ПУ) и триггера (Тг). Так как формирование выходного импульса возможно только после предварительного срабатывания ПУ и подготовки триггера, то схема оказывается нечувствительной к ложным срабатываниям НО, обусловленным шумами ФЭП при отсутствии полезного сигнала (см. временные диаграммы рис. 3, б).

В случае фиксации центральной ахроматической полосы целесообразно использовать второй аналогичный канал, а для формирования выходного сигнала КУ применить схему совпадения положительных импульсов. Таким образом, все задачи фиксации границ интервалов могут быть решены с помощью одной типовой схемы.

Аналого-дискретные преобразователи порядка интерференции. Из большого числа известных методов аналого-дискретного преобразования сигналов вида (2) наибольшее распространение в прак-

тичных усилителей и умножителя с частоты  $2\omega$  на частоту  $3\omega$ .

В процессе разработки отдельных интерференционных измерительных систем в лаборатории автоматизации метрологических исследований ВНИИМ были созданы четыре из пяти рассмотренных типов ФЭП. В табл. 1 представлены важнейшие параметры этих преобразователей и указаны требования к унифицированному ФЭП.

Как видно, параметры разработанных ФЭП с модуляцией светового потока уступают требуемым только по полосе частоты, что обусловлено низкой рабочей частотой модуляторов, используемых в интерферометрах.

Таким образом, важнейшей задачей унификации ФЭП является разработка принципов построения и создание модуляторов с частотой модуляции до 100 кГц и выше.

Командное устройство вне зависимости от вида границы интервала должно фиксировать момент перехода выходного сигнала ФЭП через нулевой уровень. В основу такого устройства может быть положен принцип, рассмотренный в работе [5] и реализуемый функциональной схемой рис. 3, а. В этой схеме одновременно с нуль-органом (НО), срабатывающим при переходе входного напряжения через

Таблица 1

Параметр	ФЭП-1	ФЭП-3	ФЭП-4	ФЭП-5	Требуемое значение
Порог чувствительности к световому потоку, лм	$5 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$10^{-10}$
Амплитуда выходного сигнала $U_m$ , В	4	2	2	3	2-3
Полоса частот, кГц	0-10	0-0,01	0,001	0,003	0-10
Отношение сигнал-шум на выходе (не менее)	10-100	$2 \cdot 10^3$	$10^3$	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
Дрейф нуля на выходе не более, В	$10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$

тике измерения порядка интерференции нашли метод дифференцирующего и тригонометрического преобразования. Первый из них [2] принципиально может быть использован только при достаточно большой дискретности преобразования  $\Delta = \lambda$ ;  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$ , а второй — при любой дискретности вплоть до  $\lambda/100$  и менее. Функциональная схема тригонометрического АДП для случая

$$\Delta = \frac{\lambda}{2n}$$

изображена на рис. 4. Входная цепь АДП образована резистивным фазовращателем, представляющим собой последовательное соединение  $n$  резисторов  $r_j$ .

Если на крайние точки фазовращателя подать напряжения  $u_1$  и  $-u_1$ , а на среднюю — напряжение  $u_2$ , то дробная часть ПИ  $j$  однозначно определяется по номерам резисторов  $j$  и  $j+1$ , в точке соединения которых напряжение равно нулю. Для определения номера  $j$  служат ИО, фазорасщепители (ФР) и логические схемы «И», формирующие сигналы индикации десятых и сотых ПИ. Сигнал целого ПИ формируется схемой переноса, вырабатывающей импульсы на выходе «+» при переходе от дробной 0,99 к дробной 0,00 или на выходе «-» при обратном переходе.

В табл. 2 представлены параметры разработанных во ВНИИМ АДП дифференцирующего (АДП-1, АДП-2) и тригонометрического АДП-3 преобразования, а также основные требования к ним, сформулированные на основании общих требований к системе унифицированных функциональных блоков.

Таблица 2

Параметр	АДП-1	АДП-2	АДП-3	Требуемое значение
Минимальная амплитуда входного сигнала, В	1	3	2	2
Дискретность $\Delta/\lambda$	1	1/4	1/100	1; 1/5; 1/10; 1/100; 1/300
Максимальная частота преобразования, Гц	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$10^4$

Из данных табл. 2 и сказанного выше следует, что для удовлетворения требований, предъявляемых к дискретности  $\Delta = (1 - 1/300)\lambda$  в основу унифицированного АДП должен быть положен принцип тригонометрического преобразования. Это утверждение справедливо, так как при большей дискрет-

ности ( $\Delta \geq \lambda/10$ ) тригонометрический преобразователь будет не сложнее и надежнее дифференцирующего.

Параметры АДП-3 несколько уступают требуемым по частоте преобразования и не обеспечивают предельного значения дискретности  $\Delta = \lambda/300$ . Частота может быть повышена сравнительно просто, путем увеличения быстродействия нуль-органов, в то время как уменьшение дискретности приводит к резкому усложнению схемы АДП и повышению требований к параметрам

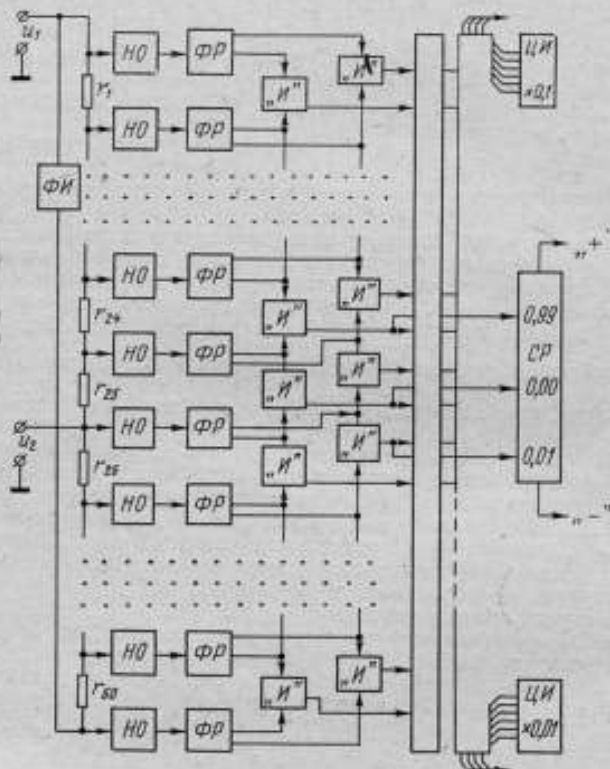


Рис. 4. Функциональная схема тригонометрического АДП

рам нуль-органов. В связи с этим одной из основных задач является упрощение функционального состава тригонометрического преобразователя.

Устройства для регистрации ПИ. Условия интерференционных измерений предъявляют к реверсивным счетчикам специфическое требование высокой скорости реверса. Во ВНИИМ разработан РСИ с параллельным переносом, обеспечивающий одинаковые скорости счета и реверса, равные 500 кГц. Этого быстродействия достаточно для реализации всех интерференционных систем. При выполнении отдельных декад в виде конструктивно законченных элементов объема счета можно легко варьировать в зависимости от потребностей решаемой измерительной задачи.

Основные требования, предъявляемые к ПЗУ — необходимость кратковременного (на время срабатывания ЦПУ) запоминания кода РСИ и неизменность времени запоминания. Это позволяет использовать в качестве запоми-



нающего элемента ждущий мультивибратор (ЖМ). Функциональная схема такого ПЗУ, соответствующая одной декаде РСИ, представлена на рис. 5. В схеме использовано параллельное считывание кода РСИ, что обеспечивает высокое быстродействие ПЗУ. Импульс считывания, поступающий от КУ на входы всех схем «И», проходит только через те схемы, на которые от РСИ подан сигнал «1». Это приводит к запуску соответствующих ЖМ и запоминанию кода на время  $t_0$ , равное длительности выходного импульса мультивибратора. Код стирается автоматически при возвращении ЖМ в исходное состояние.

В разработанном варианте ПЗУ время запоминания составляет 0,1 с, что достаточно для срабатывания большинства ЦПУ; амплитуда импульса считывания и уровни управляющего сигнала согласованы с соответствующими параметрами КУ и РСИ.

### Выводы

1. Широкое распространение интерференционных методов и единообразие выходного сигнала интерферометра при измерении различных физических величин позволяет создать систему унифицированных ФБ, предназначенную для автоматизации интерференционных измерений.

2. Предложенные в работе принципы построения ФБ обеспечивают высокую степень унификации, при которой каждая измерительная операция (фотоэлектрическое, аналого-дискретное преобразование, регистрация ПИ и т. д.) может быть выполнена одним блоком, предназначенным для этой цели.

3. Ближайшая задача создания полного комплекса ФБ состоит в совершенствовании ФЭП и АДП с целью повышения их быстродействия и разрешающей способности.

4. Разработка унифицированных ФБ, согласованных по конструктивным и метрологическим параметрам, позволит резко повысить технико-экономическую эффективность использования интерференционных измерительных устройств и расширить область их применения.

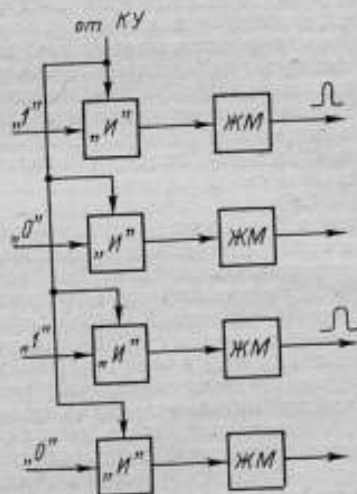


Рис. 5. Функциональная схема ПЗУ

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захарьевский А. И. Интерферометры. М. Гос. издательство оборонной промышленности, 1952, 359 с. с ил.
2. Branin F. H. A Bidirectional Electronic Counter for Use in Optical Interferometry — Journal of the Optical Society of America, 1953, v. 43, N 6, pp. 113—117.
3. Шестопалов Ю. Н. Электронная аппаратура для измерения длины интерференционным методом. Сб. рефератов институтов Госкомитета, № 5, Стандартгиз, 1965.
4. Мироненко А. В. Фотоэлектрические измерительные системы, «Энергия», 1967, 179 с. с ил.
5. Эскин С. П., Прицкер В. И. Фотоэлектрический индикатор для автоматического определения середины штрихов в динамическом режиме — «Измерительная техника», 1968, № 7, с. 35—38.

Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.

### ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СРАВНЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ВЕЛИЧИН С ПОСТОЯННЫМИ

Высокая точность при измерениях может быть достигнута прежде всего при использовании метода сравнения измеряемой величины с мерой одноименной величины. Такой подход справедлив, когда величина не изменяется в течение времени измерения, т. е. когда динамический характер исследуемого процесса не оказывает влияния на результат. Для периодически изменяющейся величины требуется определять ее мгновенное значение либо какой-нибудь из параметров процесса (амплитуда, действующая или средняя величина). Следует заметить, что при определении интегральных параметров процесса (действующей или средней величины) метод сравнения с неизменной во времени мерой неприменим. Предварительное преобразование этих параметров в постоянную и одноименную с мерой величину сопряжено с появлением дополнительной погрешности.

Высокая точность метода сравнения при измерении действующих и средних величин достигается при использовании таких элементов сравнения, которые по принципу действия одинаково реагируют как на измеряемый интегральный параметр, так и на величину, воспроизводимую мерой.

Практически сравнение интегрального параметра периодического процесса с постоянной мерой осуществляется с некоторой погрешностью (погрешность перехода), ограничивающей достижимую точность измерений этих величин. Это ограничение может быть в значительной степени устранено путем создания мер параметров периодического процесса и использования их при измерениях методом сравнения.

Изложенное выше в полной мере относится, в частности, к области точных измерений действующих переменных токов и напряжений, где в качестве элемента сравнения с постоянным током используется обычно термопреобразователь, выходная величина которого изменяется пропорционально тепловому действию протекающего тока. В этой области уже имеются попытки создания мер параметров периодического процесса. Поэтому анализ погрешностей таких мер, носящий достаточно общий характер, будет приведен для случая измерения напряжения переменного тока.

В качестве меры параметров периодического процесса в работах [1, 4] предложено использовать источники опорного напряжения переменного тока (ИОН) с выходным сигналом прямоугольной симметричной формы. В них, в отличие от известных ИОН с предварительным преобразованием выходного напряжения переменного тока в постоянное [2], оказывается возможным непосредственное сравнение с исходной мерой постоянного тока. Кроме того, ИОН с выходным сигналом прямоугольной формы без какой-либо перестройки воспроизводит одновременно равные друг другу среднее и действующее напряжения.

В основу создания ИОН с выходным напряжением прямоугольной формы могут быть положены принципы: поддержания на заданном уровне постоянной составляющей пульсирующего от нуля напряжения и поддержания на заданном уровне амплитуды прямоугольного напряжения в каждый его полупериод.

Очевидно, что в первом случае должен быть задан нуль выходного напряжения ИОН. Это может быть выполнено либо параметрически, либо с помощью специальной следящей системы. Тогда при равенстве длительностей импульса и паузы постоянная составляющая выходного напряжения ИОН будет равна амплитудам его переменной составляющей. Следовательно, поддерживая эту постоянную составляющую, можно однозначно задать параметры переменной составляющей выходного напряжения ИОН.

Во втором случае прямоугольное напряжение ИОН может быть однополярным и разнополярным; амплитуды полуволи поддерживаются путем их раздельного сравнения с опорным напряжением постоянного тока при помощи двух автономных систем автоматического регулирования.

Рассмотрим структуры ИОН с напряжением прямоугольной формы, основанные на указанных принципах. Для удобства изложения источники первой и второй групп обозначим соответственно через ИОН-I и ИОН-II.

ИОН-I, основанный на поддержании постоянной составляющей пульсирующего напряжения и параметрическом задании нуля [3], аналогичен по структуре компенсационному стабилизатору напряжения постоянного тока. Вместо усилителя в нем используется интегратор, а в качестве регулирующего элемента — ограничитель с эмиттерным повторителем в режиме отсечки или Г-образный модулятор. Подобная структура регулирующего элемента позволяет параметрически задать нуль выходного напряжения ИОН. Преимущество источника — простота, поскольку в нем имеется только один контур регулирования. Но при этом он имеет довольно высокое выходное сопротивление. Этот недостаток отсутствует в ИОН-I с поддержанием нуля выходного напряжения с помощью отдельной следящей системы, подключаемой только в момент паузы между импульсами.

Как будет показано ниже, заметное влияние в ИОН-I оказывает асимметрия скважности импульсов.

ИОН-II, основанный на автономном поддержании амплитуд полуволи выходного напряжения, состоит из двух систем автоматического регулирования, каждая из которых поочередно воздействует на выходное напряжение. Входной сигнал такой системы в нерабочий для нее полупериод является паразитным, что приводит к ее перегрузке и неправильному функционированию в рабочий полупериод. Во избежание этого в нерабочий полупериод либо отключают вход системы регулирования, либо компенсируют паразитный сигнал через дополнительно коммутируемые цепи. В таком ИОН выходное сопротивление может быть менее 0,01 Ом, а погрешность от асимметрии скважности, как это показано ниже, является величиной второго порядка малости.

В известном ИОН-II фирмы «Hewlett—Packard» с компенсацией паразитного сигнала [4] выходное напряжение является двуполярным, не имеющим постоянной составляющей. Метрологические показатели этого источника весьма высоки. Неустойчивость его выходного напряжения не превышает  $\pm 0,001\%$  в течение суток и  $\pm 0,005\%$  — за 6 месяцев. Частота следования импульсов составляет 500 Гц. К недостаткам данного источника следует отнести необходимость двух источников опорного напряжения постоянного тока, сильную зависимость погрешности перехода от реактивностей резисторов в выврателе рассогласования и от инерционности звеньев в цепях коммутации и управления. Заметим, что для этого источника при выходном напряжении в виде двуполярных импульсов контроль выходного напряжения осуществляется возможным лишь в нерабочем состоянии на постоянном токе отдельно для каждой амплитуды. В источнике с пульсирующим от нуля выходным напряжением такой контроль (по постоянной составляющей) становится возможным и в процессе работы. Это обстоятельство, а также необходимость только одного источника опорного напряжения постоянного тока является преимуществом ИОН данного типа перед ИОН с двуполярным выходным напряжением.

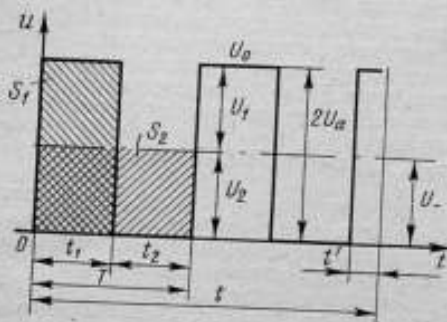
Однополярную форму выходного напряжения имеют, в частности, предложенные во ВНИИМ ИОН-II с коммутацией входов систем раздельного регулирования амплитуд [5] и ИОН-I с регулированием постоянной составляющей и параметрическим заданием нуля выходного напряжения [3]. Учитывая преимущества источников с однополярным выходным напряжением дальнейший анализ погрешностей будет проведен применительно к ним.

Инструментальная погрешность однополярных ИОН, так же как и других, зависит от технологии изготовления, качества элементов и тщательности настройки. Эта погрешность приблизительно одинакова для обоих рассматриваемых однополярных ИОН и не превышает  $\pm 2 \cdot 10^{-3}\%$  [1]. Поэтому

наибольший интерес в таких источниках представляет погрешность перехода от постоянного тока к переменному, составляющие которой рассмотрены ниже.

Средняя  $U_{0\text{cp}}$  и действующая  $U_0$  переменная составляющая однополярного выходного напряжения источника (рис. 1) будут равны его постоянной составляющей  $U_-$  лишь в случае, когда длительность импульса равна длительности паузы, т. е. коэффициент заполнения  $g = \frac{1}{2}$ . В противном случае возникает погрешность  $\gamma_{\Delta}$ .

Согласно рис. 1, обозначим коэффициент заполнения  $g = \frac{t_1}{T}$ . При этом



$1 - g = \frac{t_2}{T}$ . Для ИОН-1, в котором поддерживается постоянная составляющая  $U_-$ , амплитуда переменной составляющей  $U_0$  будет  $U_2 = U_-$ . При этом площади  $S_1 = S_2$ , т. е.  $U_2 T = (U_1 + U_2) t_1$ . Отсюда

$$U_1 = U_2 \frac{1-g}{g}. \quad (1)$$

Рис. 1. Эюра выходного напряжения

Действующая переменная составляющая напряжения с учетом (1)

$$\bar{U}_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \left[ \int_0^{t_1} U_1^2 dt + \int_{t_1}^T U_2^2 dt \right]} = U_- \sqrt{\frac{1-g}{g}}. \quad (2)$$

Обозначим отклонение коэффициента заполнения от  $g = \frac{1}{2}$  через  $\Delta g$ .

Тогда  $g = \frac{1}{2} + \Delta g$  и (2) преобразуется к виду

$$\bar{U}_0 = U_- \sqrt{\frac{1/2 - \Delta g}{1/2 + \Delta g}} \approx U_- (1 - 2\Delta g). \quad (3)$$

где  $2\Delta g = \gamma_{\Delta}$  — погрешность действующего напряжения переменной составляющей  $U_0$  вследствие неравенства длительностей импульса и паузы.

Средняя переменная составляющая напряжения с учетом (1)

$$U_{0\text{cp}} = \frac{1}{T} (U_1 t_1 + U_2 t_2) = 2U_- (1-g) = U_- (1 - 2\Delta g). \quad (4)$$

Отсюда погрешность среднего напряжения ИОН от неравенства длительностей импульса и паузы  $\gamma_{\Delta\text{cp}} = \gamma_{\Delta} = 2\Delta g$ .

В ИОН-II выходное напряжение поддерживается в каждый полупериод, т. е.  $U_1 + U_2 = 2U_a = \text{const}$ . Постоянная составляющая здесь также определится из равенства  $S_1 = S_2$ , т. е.  $2U_a t_1 = U_2 T$ . Отсюда  $U_2 = 2U_a g$  и  $U_1 = 2U_a (1-g)$ . Тогда, записав выражение для действующего напряжения и произведя необходимые преобразования, получим  $\gamma_{\Delta} = 2\Delta g^2$ .

По аналогии с выводом выражения (4), можно получить погрешность средней переменной составляющей напряжения ИОН-II  $\gamma_{\Delta\text{cp}} = 4\Delta g^2$ .

Несоответствие между постоянной и переменной составляющими выходного напряжения возникает также, когда длительность фронта импульса не

равна нулю. Причины, вызывающие увеличение длительности фронта выходных импульсов — недостаточное быстродействие импульсных и коммутационных узлов источника и ограниченность сверху полосы частот, пропускаемых нагрузкой.

В общем случае фронт импульса характеризуется кривой выше первого порядка. Однако для импульса, не имеющего выброса, с достаточной точностью процесс можно представить с помощью одной эквивалентной постоянной времени. Следовательно, погрешность, вызываемая искажениями фронта импульса, может быть определена в предположении воздействия последовательности прямоугольных импульсов на контур с одной постоянной времени  $\tau$ . Для определения установившегося напряжения воспользуемся методом наложения импульсов с бесконечной длительностью и знакопеременной амплитудой ( $E, -E$ ), следующих с интервалом  $T/2$ .

При воздействии на контур одиночного импульса с амплитудой  $E$  напряжением на его инерционном элементе (например, на конденсаторе) будет изменяться по закону  $U = E \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$ . Для некоторого момента времени  $t$  (см. рис. 1) для  $n$ -го импульса получим напряжение как сумму от воздействия  $n$  положительных и  $n-1$  отрицательных импульсов. Тогда в момент  $n$ -го импульса

$$U_n = E \left[ \left( 1 - \exp\left\{-\frac{t}{\tau}\right\} \right) - \left( 1 - \exp\left\{-\frac{1}{\tau}\left(t - \frac{T}{2}\right)\right\} \right) \right] + \\ + \left( 1 - \exp\left\{-\frac{1}{\tau}(t-T)\right\} \right) - \left( 1 - \exp\left\{-\frac{1}{\tau}\left(t - \frac{3}{2}T\right)\right\} \right) + \\ + \left( 1 - \exp\left\{-\frac{1}{\tau}\left[t - (n-2)T - \frac{T}{2}\right]\right\} \right) + \\ + \left( 1 - \exp\left\{-\frac{1}{\tau}\left[t - (n-1)T\right]\right\} \right). \quad (5)$$

Подставив в (5)  $t = (n-1)T + t'$  (где  $t'$  — интервал времени от начала  $n$ -го импульса) и сделав необходимые преобразования, получим при  $n \rightarrow \infty$  (установившийся режим)

$$U_n = E \left[ 1 - \frac{\exp\left(-\frac{t'}{\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)} \right]. \quad (6)$$

Аналогичным образом может быть получено выражение для напряжения в момент паузы

$$U_0 = E \frac{\exp\left(-\frac{t'}{\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}. \quad (7)$$

где  $t'$  — интервал времени от начала паузы.

Из (6) и (7) находим для ИОН-1 переменную составляющую при  $E = 2U_0$ , т. е.

$$U_0 = \pm U_0 \left[ 1 - \frac{2 \exp\left(-\frac{t'}{\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)} \right]. \quad (8)$$



Отсюда действующее напряжение ИОН-1

$$\bar{U}_0 = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_0^2 dt} = U_- \sqrt{1 - \frac{4\tau}{T} \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}}.$$

Или, поскольку  $T \gg \tau$ ,

$$\bar{U}_0 \approx U_- \left[ 1 - \frac{2\tau}{T} \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)} \right]. \quad (9)$$

Таким образом, из (9) находим погрешность воспроизведения действующего напряжения при наличии у выходных импульсов ИОН-1 фронта с постоянной времени  $\tau$

$$\gamma_{\text{га}} = \frac{2\tau}{T} \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)} \approx \frac{2\tau}{T}. \quad (10)$$

Погрешность  $\gamma_{\Delta f}$ , возникающая при прохождении выходного напряжения ИОН через присоединенные к нему узлы с ограниченной сверху полосой пропускаемых частот, также может быть вычислена в предположении, что амплитудно-частотная характеристика этих узлов определяется одной эквивалентной постоянной времени  $\tau$ . Подставив  $\tau = \frac{1}{2\pi f_{0.7}}$  в (10) (где  $f_{0.7}$  — частота, соответствующая снижению амплитудно-частотной характеристики на 30% по сравнению с номинальной), для случая воспроизведения действующего напряжения получим

$$\gamma_{\Delta f} = \frac{1}{\pi T f_{0.7}}. \quad (11)$$

Для определения среднего напряжения переменной составляющей ИОН-1 найдем моменты  $t'_0$  перехода ее через нуль. Тогда из (8) при  $U_0 = 0$  будем иметь

$$t'_0 = -\tau \ln \frac{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}{2}. \quad (12)$$

Отсюда находим среднее напряжение

$$U_{0\text{ср}} = \frac{2}{T} \left[ \int_0^{\frac{T}{2}} U_n dt' + \int_0^{t'_0} U_n dt' \right] = U_- \left[ 1 + \frac{4\tau}{T} \ln \frac{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}{2} \right]. \quad (13)$$

Или, поскольку  $\frac{T}{2} \gg \tau$  и, следовательно,  $1 \gg \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)$ , то

$$U_{0\text{ср}} \approx U_0 \left(1 - \frac{2,8\tau}{T}\right). \quad (14)$$

Таким образом, из (14) погрешность воспроизведения среднего напряжения при наличии фронта импульсов с постоянной времени  $\tau$  будет равна

$\gamma_{\tau\text{ср}} = \frac{2,8\tau}{T}$ , а погрешность передачи среднего напряжения через звено с верхней граничной частотой  $f_{0,7}$

$$\gamma_{\Delta f\text{ср}} = \frac{1,4}{\pi T f_{0,7}}$$

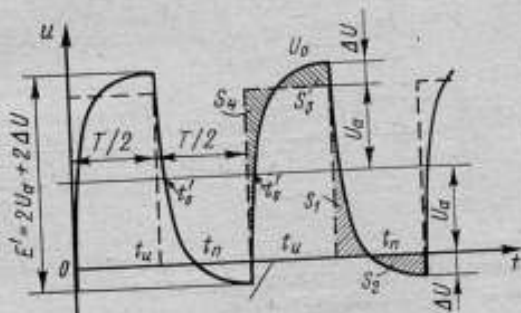


Рис. 2. Эюра выходного напряжения с учетом влияния шунтирующей емкости

Причем погрешности  $\gamma_{\Delta f}$  и  $\gamma_{\Delta f\text{ср}}$  одинаковые для обоих типов ИОН, зависят от их общих свойств и от свойств нагрузки.

Рассмотрим влияние длительности фронта импульсов в ИОН-II. В этом случае выходное напряжение поддерживается как среднее за время действия импульса  $t_n$  или паузы  $t_u$ . Как показано на рис. 2, амплитуды импульса и паузы при конечной длительности фронта будут смещены на некоторую величину  $\Delta U$ , при которой  $S_1 = S_2$  (для паузы) и  $S_2 = S_1$  (для импульса). С учетом (7) можно определить выходное напряжение ИОН-II во время паузы  $U_{\text{он}}$ , принимая во внимание, что  $E = E' = 2U_n + 2\Delta U$ .

Таким образом,

$$U_{\text{он}} = (2U_n + 2\Delta U) \frac{\exp\left(-\frac{t'}{\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)} - \Delta U. \quad (15)$$

Величину  $\Delta U$  в выражении (15) определяем из условия  $S_1 = S_2$ , которое можно записать в таком виде

$$\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} T_{\text{он}} dt = 0. \quad (16)$$

Подставляя (15) в (16) и произведя соответствующие преобразования, получим

$$\Delta U = \frac{U}{\frac{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)} \frac{\tau}{4\tau} - 1} \quad (17)$$

Подставив (17) в (15), будем иметь

$$U_{\text{оп}} = \frac{2U_a}{1 - \frac{4\tau}{T} \frac{1 - \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}} \times \left[ \frac{\exp\left(-\frac{t'}{\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)} - \frac{2\tau}{T} \frac{1 - \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)} \right] \quad (18)$$

Очевидно, что переменная составляющая выходного напряжения ИОН-II в моменты паузы и импульса будет одинакова и равна  $U_0 = \pm (U_a - U_{\text{оп}})$ . Подставив (18) в последнее выражение, имеем

$$U_0 = \pm \frac{U_a}{1 - \frac{4\tau}{T} \frac{1 - \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)}} \left[ 1 - \frac{2 \exp\left(-\frac{t'}{\tau}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2\tau}\right)} \right] \quad (19)$$

Путем сопоставления выражений (19) и (8) можно показать, что для ИОН-II

$$\tau_{\text{ид}} = -\frac{2\tau}{T} \text{ и } \tau_{\text{тер}} = -\frac{1,2\tau}{T}$$

Для выделения переменной составляющей из выходного напряжения источника между его выходом и нагрузкой ставится разделительный конденсатор. Падение части переменной составляющей выходного напряжения на этом конденсаторе также является одной из причин возникновения погрешности ИОН.

Напряжение на активной нагрузке  $R$ , присоединенной к выходу ИОН через разделительный конденсатор  $C$ ,

$$U_R = \pm \frac{2U_a \exp\left(-\frac{t'}{RC}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2RC}\right)} \quad (20)$$

Эюра напряжения  $U_R$  представлена на рис. 3. С учетом (20) действующее напряжение на нагрузке имеет вид

$$\bar{U}_0 = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_R^2 dt} = U_- \sqrt{\frac{4RC}{T} \frac{1 - \exp\left(-\frac{T}{2RC}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2RC}\right)}} \quad (21)$$

Выражение  $\exp\left(-\frac{T}{2RC}\right)$  может быть разложено в ряд Тэйлора по степеням  $\frac{T}{2RC}$ . Тогда

$$\exp\left(-\frac{T}{2RC}\right) = 1 - \frac{T}{2RC} + \frac{T^2}{8R^2C^2} - \frac{T^3}{48R^3C^3} + \dots \quad (22)$$

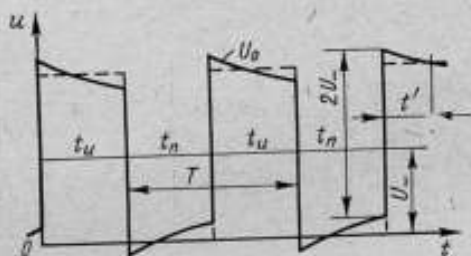


Рис. 3. Эюра выходного напряжения после переходной емкости

Подставим (22) в (21) и произведем необходимые преобразования с учетом того, что  $\frac{T}{2RC} \ll 1$ . Оставив в конечном выражении под радикалом один член (кроме единицы) получим

$$\bar{U}_0 = U_- \sqrt{1 - \frac{1}{48} \frac{T^2}{R^2C^2}} \approx U_- \left(1 - \frac{T^2}{96R^2C^2}\right) \quad (23)$$

Отсюда погрешность действующего напряжения, вызванная искажением выходных импульсов ИОН при прохождении через разделительный конденсатор  $\gamma_{\text{вд}} = \frac{T^2}{96R^2C^2}$ .

Среднее напряжение на нагрузке может быть получено подстановкой (20) в (23), т. е.

$$U_{0\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_R dt = U_- \frac{4RC}{T} \frac{1 - \exp\left(-\frac{T}{2RC}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T}{2RC}\right)} \quad (24)$$

После преобразований, аналогичных проведенным ранее, получим  $\gamma_{\text{в.ср}} = \frac{T^2}{48R^2C^2}$ . Отметим, что погрешности  $\gamma_{\text{вд}}$  и  $\gamma_{\text{в.ср}}$  будут одинаковыми для обоих типов ИОН.

Полученные выражения для составляющих погрешности перехода разработанных ИОН-I и ИОН-II приведены в таблице. Кроме того, в таблице приведены значения суммарной погрешности перехода с учетом условий работы в автоматическом цифровом вольтметре переменного тока, т. е. при  $T=5 \cdot 10^{-3}$  с,  $\Delta g=2 \cdot 10^{-6}$ ,  $\tau=3 \cdot 10^{-8}$  с,  $I_{0,7}=4,5$  МГц,  $RC=1$  с.

Источник погрешностей	ИОН-I		ИОН-II	
	Воспроизводимый параметр			
	действующий	средний	действующий	средний
Неравенство длительности импульса и паузы	$\gamma_{gd} = 2\Delta g$	$\gamma_{gcp} = 2\Delta g$	$\gamma_{gd} = 2\Delta g^2$	$\gamma_{gcp} = 4\Delta g^2$
Длительность фронта выходных импульсов	$\gamma_{\tau d} = \frac{2\tau}{T}$	$\gamma_{\tau cp} = \frac{2,8\tau}{T}$	$\gamma_{\tau d} = \frac{2\tau}{T}$	$\gamma_{\tau cp} = \frac{1,2\tau}{T}$
Ограниченность верхней частоты нагрузки	$\gamma_{\Delta f d} = \frac{1}{\pi T f_{0,7}}$	$\gamma_{\Delta f cp} = \frac{1,4}{\pi T f_{0,7}}$	$\gamma_{\Delta f d} = \frac{1}{\pi T f_{0,7}}$	$\gamma_{\Delta f cp} = \frac{1,4}{\pi T f_{0,7}}$
Падение напряжения на разделительном конденсаторе	$\gamma_{\Delta d} = \frac{T^2}{96R^2C^2}$	$\gamma_{\Delta cp} = \frac{T^2}{48R^2C^2}$	$\gamma_{\Delta d} = \frac{T^2}{96R^2C^2}$	$\gamma_{\Delta cp} = \frac{T^2}{48R^2C^2}$
Значение суммарной погрешности, $\gamma \cdot 10^4$ , %	30,3	41,0	2,3	13,3

Из сравнения данных таблицы видно некоторое преимущество ИОН-II. Однако следует заметить, что в ИОН-I не входит погрешность, обусловленная реактивностями резисторов в цепи сравнения с опорным напряжением постоянного тока.

Указанные суммарные погрешности перехода не являются предельными и могут быть снижены по мере совершенствования элементной базы и схемотехники.

При экспериментальном исследовании ИОН определялась кратковременная (за 8 ч) и долговременная (за 1 месяц и более) нестабильность. Чтобы исключить влияние температуры, в ИОН применен термокомпенсированный стабилитрон, который может изменять свой температурный коэффициент при изменении рабочего тока. Благодаря этому оказывается возможной термокомпенсация ИОН в целом. Температурный коэффициент разработанных источников не превышал  $10^{-4}\%$  / °С.

Нестабильность ИОН определялась по постоянной составляющей выходного напряжения, выделяемой с помощью LC-фильтра низкой частоты. Исследования проводились непрерывно в течение 1,5 месяцев и далее отдельными выборками в течение года. За весь этот срок отклонение воспроизводимого напряжения не превысило  $3 \cdot 10^{-3}\%$ .

Разработанные меры позволили существенно повысить точность автоматического измерения напряжения переменного тока. На основании метода сравнения и при использовании таких мер во ВНИИМ был создан цифровой вольтметр действующих напряжений с погрешностью менее 0,02% в диапазоне частот 40 Гц–20 кГц и менее 0,03% в диапазоне 20 Гц–200 кГц.

Как показывает анализ и результаты экспериментального исследования ИОН, рассмотренные принципы могут быть использованы при создании специальных эталонов параметров переменного тока и напряжения.



Очевидно, что создание аналогичных мер параметров периодического процесса при измерениях других переменных величины (давлений, акустических, магнитных величин и др.) позволит реализовать высокую точность, свойственную методу сравнения, и автоматизировать процесс измерения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таубе Б. С. Разработка и исследование методов и средств высокой точности для автоматического измерения действующего и среднего значения переменного напряжения. Автореф. дисс., ВНИИМ, Л., 1973.
2. Илюкович А. М., Шульман Б. Р. Стабилизаторы и стабилизированные источники питания переменного тока. М.—Л., «Энергия», 1965, 114 с. с ил.
3. Таубе Б. С., Колкер О. Н. Источник опорного переменного напряжения, Авт. свид. СССР, № 426225, «Бюлл. изобретений», 1974, № 16.
4. Hanson F. L. High Accuracy A. C. Voltage Calibration.— "Hewlett—Packard Journal", 1968, v. 19, N 10, June, pp. 2—8.
5. Таубе Б. С. Источник опорного переменного напряжения. Авт. свид. СССР № 426224, «Бюлл. изобретений», 1974, № 16.

Поступила в редакцию 5/IX—1975 г.

УДК 621.314.222.8.087.92.088.3

*Е. З. Шапиро, С. П. Эскин*

ВНИИМ

### ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) высокой точности являются одним из важнейших элементов современных автоматизированных измерительных и метрологических систем. Поэтому вопросы оптимизации структур построения таких ЦАП, определения наиболее рационального ряда их метрологических и эксплуатационных показателей, а также унификации их основных элементов и преобразователей в целом представляют значительный интерес. В настоящей статье анализируются результаты разработки и исследования одного из вариантов 14-разрядного ЦАП постоянного напряжения кл. 0,002, работающего в двоичном коде.

Выбор метрологических и эксплуатационных показателей ЦАП определяется прежде всего возможными областями их применения, к числу которых относятся следующие:

- 1) использование ЦАП как элемента автоматических измерительных систем в качестве управляемого преобразователя код — постоянное напряжение, многозначной меры постоянного напряжения, промежуточного или выходного преобразователя код — напряжение с унифицированным выходом;
- 2) автоматизированная поверка аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, работающих в соответствующем коде и являющихся как самостоятельными изделиями (например, в интегральном или модульном исполнении), так и элементами измерительных приборов и систем;
- 3) автоматизированная поверка цифровых вольтметров постоянного тока;
- 4) автоматизированная поверка точных схемных элементов сопротивления (дискретных делителей), выполненных из резисторов с определенным соотношением их значений.

Требования, предъявляемые к точным ЦАП в указанных областях можно свести к следующим:

- 1) наличие как ручного, так и автоматического управления работой ЦАП, в том числе управление от ЭВМ унифицированными сигналами, т. е. возможность программного управления преобразователем;

- 2) высокая точность преобразования; погрешность ЦАП не должна превышать 0,01—0,001% при дискретности преобразования, соответствующей 12—16-битным разрядам;
- 3) быстродействие ЦАП определяется конкретными условиями их применения и для указанных точностей лежит в пределах 1—100 мс;
- 4) требуемый диапазон выходных напряжений в большинстве случаев 0—10 В, в некоторых случаях 100 или 1000 В, при токе нагрузки, изменяющемся от 0 до 1—10 мА;
- 5) условия эксплуатации — лабораторные или цеховые при окружающей температуре от 10—35°С и относительной влажности 60±20%.

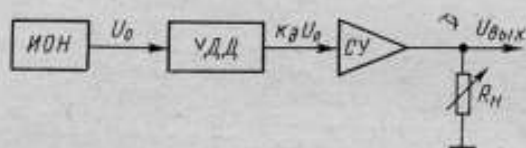


Рис. 1. Структурная схема ЦАП с последовательно включенным дискретным делителем

Структура точных ЦАП, удовлетворяющих указанным требованиям, определяется прежде всего необходимостью обеспечения высокой точности преобразования при работе ЦАП на переменную нагрузку  $R_H$ . Отсюда вытекает требование достаточно малого выходного сопротивления ЦАП (менее  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  Ом).

Построение ЦАП высокой точности с низким выходным сопротивлением может быть осуществлено на основе одной из двух структурных схем (рис. 1 и 2). В первой — напряжение  $U_0$ , получаемое от источника опорного

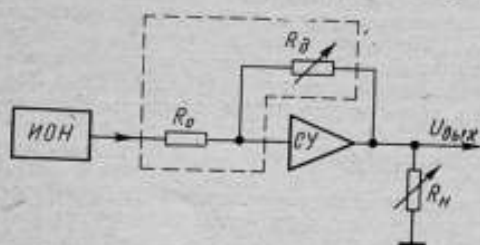


Рис. 2. Структурная схема ЦАП с дискретным делителем в цепи обратной связи согласующего усилителя

напряжения (ИОН), делится управляемым дискретным делителем УДД, коэффициент деления которого  $k_d$  устанавливается в соответствии с входным кодом. Напряжение с выхода делителя поступает на выход ЦАП через согласующий усилитель СУ с коэффициентом усиления  $k_y$ . Уравнение преобразования для такой структуры ЦАП имеет вид

$$U_{\text{вых}} = U_0 k_d k_y. \quad (1)$$

Во второй структурной схеме УДД является составной частью цепи обратной связи операционного согласующего усилителя, коэффициент усиления которого является функцией входного кода. Для такой структуры ЦАП

$$U_{\text{вых}} = U_0 k_y = U_0 \frac{R_d}{R_0}. \quad (2)$$

где  $R_0$  — сопротивление образцового резистора;  $R_d$  — переменное сопротивление управляемого дискретного делителя, определяемое входным кодом ЦАП.

В общем случае ни одна из этих схем не обладает решающими преимуществами. Погрешность преобразования для каждой из них определяется точностью и стабильностью опорного напряжения, погрешностями дискретного делителя и согласующего усилителя. Поэтому при выборе наиболее ра-

ционального варианта следует учитывать ряд конкретных дополнительных условий, в частности: вид входного кода и определяемый им тип дискретного делителя; практическую возможность изготовления и точной подгонки резисторов дискретного делителя; напряжение  $U_0$ ; предельное напряжение  $U_{\text{вых}}$ ; дрейф нулевого уровня согласующего усилителя.

Существенным при анализе структур построения ЦАП является вопрос о соотношении напряжений  $U_0$  и  $U_{\text{вых}}$ . При  $U_{\text{вых}} \leq U_0$  согласующий усилитель в первой схеме (см. рис. 1) может быть выполнен со 100%-й последовательной отрицательной обратной связью по напряжению, т. е. при  $k_y = 1$ , без применения резисторов в цепи обратной связи. В случае  $U_{\text{вых}} > U_0$  первая схема теряет это достоинство, так как при  $k_y > 1$  необходимо включение резисторов в цепь обратной связи (параллельную или последовательную), что вносит дополнительную нестабильность в структуру ЦАП. В этой же связи надо учитывать еще одно обстоятельство. Погрешность ЦАП, вызванная дрейфом нуля  $CV$  ( $\gamma_{\text{др}}$ ) будет: для первой схемы

$$\gamma_{\text{др}} = \frac{\Delta U_{\text{др}}}{U_0 k_d} 100\%, \quad (3)$$

для второй схемы

$$\gamma_{\text{др}} = \frac{\Delta U_{\text{др}}}{U_0} \frac{k_y + 1}{k_y} 100\%. \quad (4)$$

где  $\Delta U_{\text{др}}$  — приведенный ко входу дрейф нуля  $CV$ .

Как следует из (3) и (4), погрешность от дрейфа нуля  $CV$  для первой схемы при всех значениях  $k_y$  обратно пропорциональна коэффициенту деления  $k_d$ , а для второй схемы — при  $k_y > 1$  практически не зависит от значения  $k_y$ , т. е. от изменения входного кода. Однако при  $k_y < 1$  погрешность  $\gamma_{\text{др}}$  также возрастает с уменьшением  $k_y$  и в этой области несущественно отличается от погрешности  $\gamma_{\text{др}}$ .

Таким образом, для наиболее распространенного случая  $U_{\text{вых}} \leq U_0$  (для  $k_y \leq 1$ ) с точки зрения влияния дрейфа нуля и шумов  $CV$  обе структурные схемы практически одинаковы, а для случая  $U_{\text{вых}} > U_0$  (для  $k_y > 1$ ) вторая схема (см. рис. 2) предпочтительнее, так как вносит меньшую аддитивную погрешность в результате преобразования при изменении входного кода.

Для распространенного варианта ЦАП высокой точности, имеющих  $U_{\text{вых}} \leq U_0$ , решающим фактором при выборе их структурной схемы является возможность осуществления многоуровневого дискретного делителя высокой точности. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

На рис. 3 представлена схема ЦАП, выполненного по второй структурной схеме, с двоичным  $n$ -разрядным дискретным делителем в цепи параллельной обратной связи  $CV$ . Здесь делитель напряжения образован резистором  $R_0$  и магазином проводимостей  $g_1 - g_{n+1}$  ( $R_1 - R_{n+1}$ ), коммутируемым управляющими ключами  $K_1 - K_{n+1}$ . Соотношения проводимостей резисторов соответствуют разрядам управляющего (в данном случае — двоичного) кода.

Напряжение  $U_{\text{вых}}$  на выходе такого ЦАП обратно пропорционально сумме включенных проводимостей, т. е.

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_0}{R_0} \frac{1}{g_1 \sum_{i=1}^{i=n} b_i 2^{i-1}},$$

где  $b_i$  — коэффициент, принимающий значение 0 или 1 (значение 1 соответствует замкнутому контакту).

Если принять значение проводимости  $g_{n+1} = 0,01$  См (большая проводимость нежелательна из-за влияния сопротивления коммутирующих контактов), то сопротивления резисторов  $DD$  для 14-разрядного ЦАП будут соответствовать значениям, представленным в табл. 1.

Изготовление высокостабильных резисторов в таком широком диапазоне сопротивлений представляет собой весьма сложную технологическую задачу, требующую применения различных методов. Так, резисторы до 10 кОм могут быть изготовлены по печатной технологии, а свыше 10 кОм — путем намотки из манганинового микропровода. Относительная стабильность этих резисторов различна, причем более стабильными резисторами с меньшим температурным коэффициентом сопротивления являются резисторы первой группы [1, 2]. Не менее сложной является задача точной подгонки этих резисторов с погрешностью менее 0,001% в связи с тем, что резисторы имеют различные номинальные значения, не кратные мерам сопротивления.

На основании этих соображений, построение точных ЦАП на выходное напряжение  $U_{вых} \leq U_0$  по структурной схеме с использованием дискретного делителя в цепи параллельной обратной связи СУ следует признать нецелесообразным.

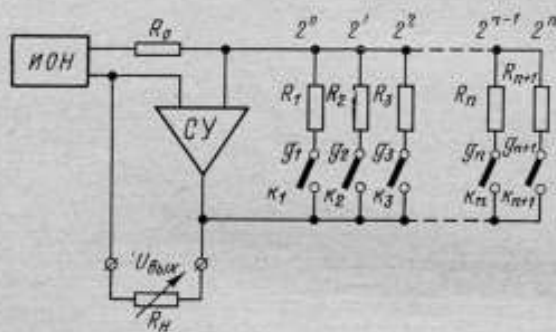


Рис. 3. Схема ЦАП с двоичным  $n$ -разрядным дискретным делителем в цепи параллельной обратной связи согласующего усилителя

Значительными преимуществами с точки зрения возможности изготовления точных резисторов и их подгонки обладает первая структурная схема построения ЦАП (см. рис. 1), в которой возможно применение в качестве УДД параллельного («звездообразного») делителя.

К преимуществам параллельных делителей напряжения при построении точных ЦАП относятся [3]: малое по сравнению с последовательными дели-

Таблица 1

Разряд	$R_i$ , Ом	Разряд	$R_i$ , Ом
2 <sup>0</sup>	$R_1 = 1,6 \cdot 10^4$	2 <sup>8</sup>	$R_9 = 6,4 \cdot 10^3$
2 <sup>1</sup>	$R_2 = 819,2 \cdot 10^3$	2 <sup>9</sup>	$R_{10} = 3,2 \cdot 10^3$
2 <sup>2</sup>	$R_3 = 409,6 \cdot 10^3$	2 <sup>10</sup>	$R_{11} = 1,6 \cdot 10^3$
2 <sup>3</sup>	$R_4 = 204,8 \cdot 10^3$	2 <sup>11</sup>	$R_{12} = 800,0$
2 <sup>4</sup>	$R_5 = 102,4 \cdot 10^3$	2 <sup>12</sup>	$R_{13} = 400,0$
2 <sup>5</sup>	$R_6 = 51,2 \cdot 10^3$	2 <sup>13</sup>	$R_{14} = 200,0$
2 <sup>6</sup>	$R_7 = 25,6 \cdot 10^3$	2 <sup>14</sup>	$R_{15} = 100,0$
2 <sup>7</sup>	$R_8 = 12,8 \cdot 10^3$		

телями влияние остаточных параметров коммутирующих ключей, т. е. переходного сопротивления и остаточной э.д.с. их контактов; постоянство выходного сопротивления делителя; возможность точного изготовления резисторов и удобство их подгонки для многоразрядного ЦАП вследствие того, что независимо от числа разрядов, сопротивления резисторов по разрядам одинаковы, близки и кратны по значениям. При этом их номинальные значения (в пределах 1—10 кОм) позволяют изготавливать такие резисторы по современной печатной технологии, обеспечивающей высокую временную и температурную стабильность и идентичность параметров для разных резисторов многоразрядного делителя.

Основываясь на результатах анализа, был разработан, изготовлен и исследован цифро-аналоговый преобразователь постоянного напряжения.

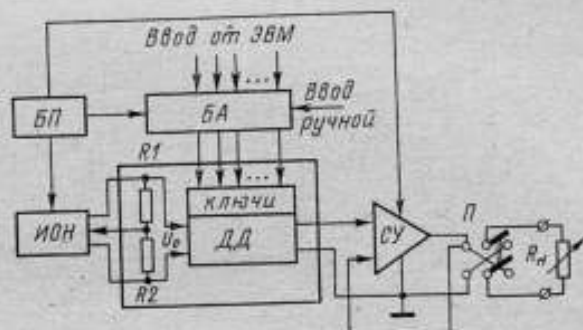


Рис. 4. Блок-схема программируемого ЦАП кл. 0,002 с последовательно включенным управляемым параллельным делителем напряжения

$R_1$ ,  $R_2$  — резисторы делителя обратной связи ИОН;  $DD$  — дискретный делитель;  $BA$  — блок автоматизации;  $BP$  — блок питания;  $P$  — переключатель полярности выходного напряжения

кл. 0,002, выполненный по первой структурной схеме (см. рис. 1) с ручным и автоматическим управлением; он отвечает всем поставленным выше требованиям и может быть использован как унифицированный элемент автоматических измерительных и поверочных систем, работающих в двоичном коде. Блок-схема преобразователя приведена на рис. 4.

Блок автоматизации ЦАП обеспечивает автоматическое (от ЭВМ) управление 14-разрядным двоичным делителем, коммутируемым электромеханическими реле РПВ-2/7 с золочеными контактами.

Ручное управление производится кнопками на передней панели ЦАП с индикацией введенного кода на цифровом табло блока автоматизации. Логические схемы  $BA$  выполнены на микромодулях серии 217.

Источник опорного напряжения представляет собой высокостабильный полупроводниковый компенсационный стабилизатор, рассчитанный на выходное постоянное напряжение  $U_0 = 10$  В [4]. В качестве элемента, формирующего опорное напряжение стабилизатора, использован термокомпенсированный кремниевый стабилитрон типа Д818Е. Усилитель ИОН выполнен на интегральных микромодулях типа 1УТ221Б. Для обеспечения высокой точности и стабильности выходного напряжения ИОН при изменении его нагрузки, определяемом изменением входного сопротивления дискретного делителя при коммутации разрядов, резисторы  $R_1$  и  $R_2$  делителя цепи обратной связи ИОН, выполненные по печатной технологии, расположены на соответствующей плате  $DD$ .



Нестабильность выходного напряжения ИОН за длительное время не превышает  $\pm 0,001\%$ , температурный коэффициент напряжения — менее  $2 \cdot 10^{-4} \% / ^\circ \text{C}$ . Малое выходное сопротивление ИОН (менее  $5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$ ) обеспечивает постоянство напряжения при коммутации разрядов ДД.

Дискретный делитель ДД выполнен на манганиновых резисторах, изготовленных методом печатной технологии, по схеме параллельного двоичного делителя  $R-2R$  с сопротивлениями резисторов разрядов 2 и 4 кОм. Особенность схемы ДД состоит в том, что выходная ступень его (старший разряд) выполнена несимметричной с соотношением резисторов  $R/2-1,5R$  (рис. 5, а). Достоинством такой схемы является удобство контроля точности и стабильности коэффициента передачи делителя. Это обуславливается тем, что в каждой узловой точке делителя от 1 до  $m-1$  сопротивление между данной

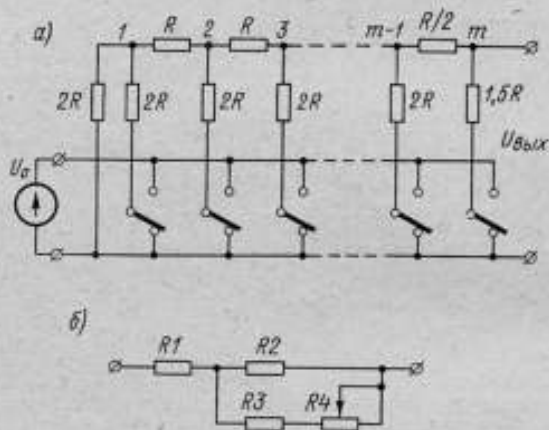


Рис. 5. Схема параллельного двоичного делителя  $R-2R$ : а — общая схема; б — схема выполнения каждого из резисторов делителя

точкой и общей шиной во всех трех направлениях равно  $2R$ , поэтому при включении любого разряда напряжение в любой узловой точке  $i=1, 2, \dots, m-1$  одинаково и равно

$$U_i = U_0 \frac{R}{2R + R} = \frac{1}{3} U_0.$$

Выходное напряжение такого делителя при нескольких включенных разрядах

$$U_{\text{вых}} N = \frac{U_0}{2^m} \sum_{i=1}^{i=m} a_i 2^{i-1} = \frac{U_0}{2^m} N,$$

где  $i$  — номер включенного разряда преобразуемого двоичного кода;  $a_i$  — вес двоичного кода разряда;  $N$  — числовое значение кода.

Входное и выходное сопротивления делителя равны соответственно:

$$R_{\text{вх}} = (3R + \infty); \quad R_{\text{вых}} = \frac{3}{4} R. \quad (5)$$

Каждый из резисторов ДД выполнен составным и имеет возможность индивидуальной подгонки переменным резистором (рис. 5, б).

Точность дискретного делителя определяется:

1) точностью подгонки, температурной и временной нестабильностью отдельных резисторов разрядов ДД;

2) влиянием остаточных сопротивлений контактов ключей;

3) влиянием остаточной э. д. с. контактов ключей.

Современная образцовая аппаратура постоянного тока (потенциометры и делители напряжения кл. 0,0005—0,001, нормальные элементы кл. 0,001—0,002) обеспечивает подгонку дискретных делителей по отношению с погрешностью менее  $\pm 0,001\%$ . Временная нестабильность [2] печатных резисторов дискретного делителя, как показывают исследования, не превышает  $1-2 \cdot 10^{-4}\%$  при температурном коэффициенте отношения сопротивления не более  $2-5 \cdot 10^{-4}\%/град$ . Вопрос об определении необходимой точности подгонки резисторов каждого из разрядов ДД для обеспечения заданной точности коэффициента деления делителя более сложен. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования и расчеты на ЭВМ [5, 6], для многоразрядного двоичного параллельного делителя эти требования сводятся к следующему:

$$\gamma_{R_I} = \gamma_{R_{II}} = \gamma_{R_{III}} \leq 1,7 \gamma_0,$$

$$\gamma_{R_{IV}} = \gamma_{R_V} = \gamma_{R_{VI}} \leq 3,4 \gamma_0,$$

$$\gamma_{R_{VII}} = \gamma_{R_{VIII}} = \gamma_{R_{IX}} \leq 6,8 \gamma_0 \text{ и т. д.}$$

где  $\gamma_0$  — допустимая погрешность коэффициента деления ДД при любом сочетании включенных разрядов;  $\gamma_{R_i}$  — допустимая погрешность подгонки (включая временную и температурную нестабильность) соответствующих резисторов разрядов ДД, где  $i=I, II, III, \dots$  — номер двоичного разряда ДД.

Таким образом, допуская для разработанного ЦАП кл. 0,002 погрешность подгонки резисторов и их нестабильность в пределах  $\gamma_0 \leq \pm 0,001\%$ , получим из условий (6) требование к необходимой точности подгонки и стабильности резисторов первых трех старших разрядов ДД:  $\gamma_{R_I + R_{III}} \geq 0,0017\%$ .

Это требование при применении печатных манганиновых резисторов и соответствующей образцовой аппаратуры постоянного тока может быть выполнено. Требования к каждому трем последующим разрядам снижаются соответственно в два раза.

С учетом (5) погрешности коэффициента деления двоичного делителя от влияния остаточных сопротивлений  $r_k$  и э. д. с.  $e_k$  контактов ключей будут равны соответственно [3]:

$$\gamma_{r_k} \leq \frac{1}{3} \frac{r_{k \max}}{R_{\max}} = \frac{4 r_{k \max}}{9R},$$

$$\gamma_{e_k} \leq \frac{e_{k \max}}{U_0}.$$

Значение  $R$  ограничено сверху технологическими возможностями изготовления точных печатных резисторов многоразрядного ЦАП и в разработанном преобразователе принято равным 2 кОм. Входное опорное напряжение ДД  $U_0 = 10$  В. Таким образом, принимая  $\gamma_{r_k} = \gamma_{e_k} \leq 5 \cdot 10^{-4}\%$ , из выражений (7), (8) для контактных ключей преобразователя будем иметь  $r_{k \max} \leq 0,03$  Ом,  $e_{k \max} \leq 50$  мкВ.

Электронные ключи не могут обеспечить эти условия относительно остаточного переходного сопротивления  $r_k$ . Поэтому в разработанном ЦАП для коммутации разрядов ДД применены электрохимические ключи на поляризованных реле с золочеными контактами типа РПВ-2/7, удовлетворяющие этим требованиям. Близкие к ним характеристики имеют реле с герметизированными контактами (герконы), например, типа РЭС-42, но они менее

надежны в работе и имеют меньшую стабильность переходного контактного сопротивления.

В качестве выходного согласующего усилителя СУ в разработанном ЦАП применен усилитель постоянного тока, выполненный по МДМ-структуре с преобразованием постоянного напряжения в переменное мостовым модулятором на полевых МДП-транзисторах типа КП301Б. Весь усилитель охвачен 100%-й последовательной отрицательной обратной связью по напряжению (коэффициент усиления  $k_T=1$ ). Выбор такой структуры СУ определяется прежде всего необходимостью получения малого временного и температурного дрейфа нулевого уровня его выходного напряжения и малых шумов в узкой полосе частот (0—10 Гц). Выбранный вид обратной связи позволяет исключить резистивный делитель в ее цепи и соответственно — его нестабильность, и при наличии достаточно большого коэффициента усиления разомкнутого усилителя ( $k_T > 10^5$ ) обеспечивает высокую точность и стабильность коэффициента передачи СУ.

Особенностью схемы согласующего усилителя является применение системы автоматически регулируемого смещения напряжения возбуждения модулятора в зависимости от изменения входного напряжения усилителя, что обеспечивает линейную передачу напряжения во всем диапазоне его значений  $\pm 10$  В.

Для снижения дрейфа нуля и шумов СУ приняты конструктивные меры к уменьшению влияния термо-э. д. с. входных цепей и выводов транзисторов модулятора. С этой целью модулятор помещен в тепловой медный экран, окруженный сваркой слоем теплоизоляционного материала, который сглаживает быстрые колебания внешней температуры и способствует уменьшению шумов усилителя. Внутренний медный экран обеспечивает равномерность температурного поля внутри модулятора, что уменьшает дрейф нуля усилителя.

#### Основные технические характеристики СУ

Коэффициент усиления без обратной связи	$k_y > 5 \cdot 10^5$
Диапазон входных (выходных) напряжений при 100%-й обратной связи, В	$\pm 10$
Погрешность передачи напряжений в указанном диапазоне при токах нагрузки до 10 мА не превышает, мкВ	$\pm 10 (\pm 1 \cdot 10^{-4} \%)$
Дрейф нулевого уровня, приведенный ко входу, не превышает за 8 ч непрерывной работы, мкВ	$\pm 2$
Температурный дрейф менее, мкВ/°С	0,5
Удвоенная амплитуда напряжения шумов в полосе частот 0—2 Гц не превышает, мкВ	0,05
Входной ток усилителя, А	$I_{вх} \leq 10^{-9}$
Входное сопротивление усилителя с обратной связью, Ом	$R_{вх} > 10^7$
Выходное сопротивление, Ом	$R_{вых} > 10^{-3}$

Экспериментальное исследование опытных образцов цифро-аналогового преобразователя позволило аттестовать их по классу 0,002, соответствующему суммарной предельной приведенной погрешности преобразователя для всех значений управляющего 14-разрядного двоичного кода в диапазоне выходных напряжений 0—10 В при токах нагрузки, изменяющихся от 0 до 10 мА. В табл. 2 для примера представлены результаты аттестации одного из образцов ЦАП (№ 004).

Особенность основных элементов ЦАП (ДД, ИОН и СУ) заключается в том, что они выполнены в виде отдельных блоков и могут использоваться как унифицированные узлы с высокими метрологическими характеристиками при создании точных цифровых измерительных устройств.

Таблица 2

Разряд	Номинальное выходное напряжение, В	Действительное выходное напряжение, В	Абсолютная погрешность, мкВ	Приведенная погрешность, $\times 10^{-3} \%$
2-1	5,000000	5,000000	0	0
2-2	2,500000	2,499980	-20	-0,20
2-3	1,250000	1,249946	-54	-0,54
2-4	0,625000	0,625000	0	0
2-5	0,312500	0,312536	+36	+0,36
2-6	0,156250	0,156176	-74	-0,74
2-7	0,078125	0,078136	+11	+0,11
2-8	0,039062	0,039086	+24	+0,24
2-9	0,019531	0,019546	+15	+0,15
2-10	0,009765	0,009776	+11	+0,11
2-11	0,004882	0,004895	+13	+0,13
2-12	0,002441	0,002404	-37	-0,37
2-13	0,001226	0,001144	-82	-0,82
2-14	0,000613	0,000624	+11	+0,11

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадигтер Е. Я., Зеликовский З. И., Кейсер Ж. В. О стабильности резисторов из литого марганцевого микропровода. В сб.: «Микропровод и приборы сопротивления», вып. 4, Кишинев, КНИИЭП 1967, с. 206—215.
2. Кобецкий В. А., Махин И. В. Печатные резисторы. Сб. «Прецизионные печатные и тонкопленочные резисторы». Кишинев, КНИИЭП, 1972, с. 35—38.
3. Нетребенко К. А. Цифровые делители напряжения. М., «Энергия», 1970. 224 с. с ил.
4. Таубе Б. С., Шапиро Е. З., Эскин С. П., Приккер В. И. Высокостабильный компенсационный источник опорного напряжения.—«Измерительная техника», 1969, № 6, с. 38—40.
5. Терехов В. М. Расчет погрешностей выходного сигнала делителя напряжения в зависимости от погрешностей резисторов.—«Электронная техника», сер. 9, «Радиокомпоненты», 1969, вып. 5, с. 10—19.
6. Смоллов В. Б., Смирнов Н. А. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи. Л., «Энергия», 1967, 312 с. с ил.

Поступила в редакцию 5/IX—1975 г.

УДК 621.317.71/72.029.4—52

О. Н. Гравин, В. А. Самарин  
ВНИИМ

### ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИНФРАЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Проверка и аттестация приборов и устройств, предназначенных для измерений различного рода параметров периодических процессов весьма низких частот, является одной из наиболее трудоемких и сложных метрологических работ. Существующая образцовая аппаратура для измерений электрических

величин в диапазоне инфразвуковых частот, основанная на методе замещения [1], не отвечает современным требованиям, касающимся производительности поверки, и поэтому решение этого вопроса невозможно без автоматизации процесса уравнивания измерительной цепи компаратора.

Ниже рассматривается функциональная схема компаратора разновременного сравнения для диапазона 0,001–50 Гц с автоматическим уравниванием измерительной цепи, а также вопросы разработки специализированных функциональных блоков применительно к измерениям действующих напряжений и токов.

Методы измерений параметров периодических процессов в диапазоне инфразвуковых частот (ИЗЧ) базируются, как правило, на преобразовании текущего измеряемого сигнала в код с последующей математической обработкой результатов первичных измерений относительно периода этого сигнала [2]. При этом наиболее широко используется преобразование измеряемой величины

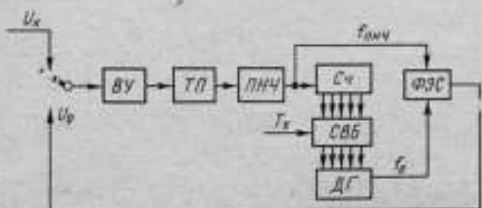


Рис. 1. Функциональная схема компаратора разновременного сравнения с интегрирующим устройством и автоматической цепью уравнивания

каких-либо других событий является идеальным интегратором с неограниченным временем интегрирования.

Кроме того, частотный сигнал обладает высокой помехоустойчивостью, простотой преобразования в цифровую форму, отсутствием потерь при передаче. Промежуточная обработка частотных сигналов, в основном, осуществляется электрическими методами. Обратные преобразователи частоты в какую-либо физическую величину также строятся с промежуточным преобразованием в ток или напряжение. Это позволяет широко использовать в разрабатываемой аппаратуре типовые приборы и узлы электронной и вычислительной техники, что обеспечивает высокую степень унификации применяемых функциональных элементов.

Однако в ряде случаев возникает необходимость в разработке специальных блоков (ФБ) промежуточной обработки сигналов с изменяющейся частотой. В частности, к таким ФБ относятся указатели равновесия и точные обратные преобразователи частоты в ток или напряжение в замкнутых цепях приборов уравнивания, обеспечивающих высокую точность измерений.

При методе замещения, положенном в основу рассматриваемого устройства, функциональному преобразованию подвергаются измеряемый сигнал переменного тока и замещающий сигнал регулируемого постоянного тока. О равенстве величин переменного и постоянного тока судят по равенству выходного сигнала измерительной цепи.

Разработанный во ВНИИМ термоэлектрический компаратор [1] разновременного сравнения с интегрирующим устройством не обеспечивает автоматического уравнивания измерительной цепи, что приводит к снижению качества измерений, значительной потере времени и требует высокой квалификации оператора. Применение этого компаратора в сложных метрологических экспериментах с большим объемом перерабатываемой информации весьма ограничено. На рис. 1 представлена функциональная схема компаратора раз-



новременного сравнения с интегрирующим устройством и автоматической целью уравнивания.

Вход измерительной цепи, состоящей из входного усилителя ВУ, термопреобразователя ТП и преобразователя напряжения в частоту следования импульсов ПИЧ, попеременно присоединяется к источнику измеряемого напряжения  $U_x$  и к выходу формирователя эквивалентного сигнала ФЭС.

Как показано в работе [1], о равенстве измеряемого  $U_x$  и замещающего  $U_z$  напряжений можно судить по равенству частот на выходе измерительной цепи. Причем при подаче на вход измерительной цепи  $U_x$  определяют среднее значение частоты за один или несколько полных его периодов путем деления числа импульсов, зафиксированных в счетчике Сч

$$f_{\text{ПЧ}} \sim \frac{N}{T_c} \quad (1)$$

где  $N$  — число импульсов;  $T_c$  — время счета.

Операция деления производится посредством вычислительного блока ВБ. Из этого блока результат параллельным кодом вводится в цепь управления декадного генератора ДГ, устанавливая частоту колебаний его выходного напряжения  $f_{\text{ог}} = f_{\text{ПЧ}}$ .

Декадный генератор является запоминающим устройством, фиксирующим информацию об измеряемом сигнале на время его замещения;  $f_{\text{ог}}$  поддерживается строго постоянной в процессе автоматического уравнивания измерительной цепи.

При подключении входа измерительной цепи к выходу ФЭС получаем следующую систему частотно-фазового типа, в которой регулированию подвергается  $f_{\text{ог}}$ , при этом опорным сигналом служит  $f_{\text{ог}}$ .

Назначение ФЭС — втягивание этой системы в синхронизм, т. е. обеспечение  $f_{\text{ог}} = f_{\text{ПЧ}}$ , и удержание в этом состоянии. При этом постоянное напряжение на входе измерительной цепи эквивалентно измеряемому напряжению переменного тока ИЗЧ и может быть измерено с высокой точностью известными методами.

Точность сформированного эквивалентного постоянного напряжения зависит от точности и стабильности опорного элемента и чувствительности нуля-органа. В рассматриваемом устройстве опорным элементом, фиксирующим информацию об измеряемом сигнале, служит декадный генератор, погрешность установки частоты которого определяется стабильностью его кварцевого генератора, и для серийных образцов не превышает  $10^{-4}$ — $10^{-5}\%$ .

Применяемая в ФЭС фазовая автоподстройка частоты, представляющая одну из разновидностей систем синхронизации, позволяет формировать замещающее напряжение практически без потери информации в ней. Это обеспечивается тем, что в стационарном режиме в системе фазовой автоподстройки частоты поддерживается остаточная разность фаз, а не частот.

На рис. 2 приведена функциональная схема разработанного ФЭС, включающая следующие узлы: триггерные делители частоты ДЧ1 и ДЧ2; импульсный фазовый детектор ИФД; фильтры нижних частот ФНЧ1 и ФНЧ2; операционные усилители ОУ1 и ОУ2; ждущий мультивибратор МВ; ключ К; формирователь импульсов ФИ; делитель напряжения ДН.

Поскольку выходная частота ДГ может изменяться в широких пределах от измерения к измерению, в ФЭС предусмотрена частотная подстройка выходного напряжения, осуществляющая грубую регулировку частоты на выходе измерительной цепи. Это вызвано тем, что из-за квадратичного харак-

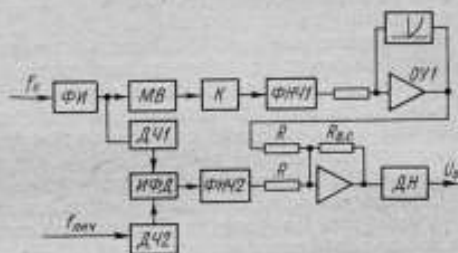


Рис. 2. Функциональная схема ФЭС

тера коэффициента передачи измерительной цепи существенно сужается полоса синхронизации системы фазовой автоподстройки частоты.

Гармонический сигнал с частотой  $f_{оп}$  поступает с выхода ДГ на формирователь импульсов, а затем на ждущий мультивибратор, который управляет ключом. Последний формирует импульсы постоянной длительности и амплитуды. После выделения фильтром нижних частот ФНЧ1 постоянной составляющей напряжения импульсной последовательности, сигнал поступает на вход ОУ1, в цепи обратной связи которого включен элемент с квадратичной вольтамперной характеристикой. Это обеспечивает получение на выходе ОУ1 напряжения  $U_{вых1} = K \sqrt{f_{оп}}$ , где  $K$  — коэффициент пропорциональности.

Включение в цепь частотной подстройки операционного усилителя с таким коэффициентом передачи в значительной мере позволяет линеаризовать следующую систему, так как именно здесь вырабатывается основная часть выходного напряжения ФЭС (до 85—90%). Часть выходного напряжения, с помощью которой система втягивается в синхронизм, генерируется импульсным фазовым детектором (ФД).

Условия работы ИФД отличаются от обычных, поскольку в измерительную цепь включен квадратичный детектор-термопреобразователь. Эффективная работа системы фазовой автоподстройки частоты с достаточными полосами захвата и удержания возможна только в узкой полосе частот, где фильтрующими свойствами термопреобразователя можно пренебречь. При постоянной времени  $\tau = 0,1 \div 0,2$  с у многоэлементных термопреобразователей типа ТЭМ, используемых в устройстве, эта полоса составляет 30—40 Гц. С целью расширения полосы захвата системы фазовой автоподстройки на оба входа фазового детектора включены триггерные делители частоты ДЧ1 и ДЧ2 с коэффициентами деления 128 — в цепи ПНЧ и 64 — в цепи ДГ.

Выходное напряжение ИФД фильтруется и суммируется с напряжением, вырабатываемым частотным детектором на операционном усилителе ОУ2.

В результате фазовая автоподстройка частоты обеспечивает при номинальном выходном напряжении ФЭС полосу захвата порядка 8% вверх и 5% вниз при полосе удержания 20% и 15% соответственно.

Недостатком такого способа формирования замещающего сигнала является трудность исключения погрешности разнополярности термопреобразователя. Однако использование в измерительной цепи термопреобразователей типа ТЭМ-4 и ТЭМ-6, имеющих разнополярность не более 0,01—0,005%, разрешает эту проблему. Кроме того, указанные термопреобразователи обладают вольт-амперной характеристикой с малой степенью отклонения от квадратичного закона. Это обеспечивает при периодических изменениях температуры горячего спая, возникающих при очень низких частотах измеряемого сигнала, малую погрешность перехода [1].

При выборе пределов измерений одновременно изменяется коэффициент усиления ВУ и коэффициент деления делителя напряжения ДН, включенного на выходе ФЭС. Погрешности коэффициентов деления ДН и усиления ВУ в сумме не должны превышать полосу захвата системы фазовой автоподстройки частоты, относительная величина которой при увеличении  $f_{оп}$  уменьшается. Выбор предела измерений по току производится с помощью включения в измеряемую цепь шунта и установки номинального предела по напряжению.

Важным элементом измерительной цепи компаратора является преобразователь напряжения в частоту следования импульсов ПНЧ. Он должен обладать высокой линейностью коэффициента преобразования и стабильностью за время измерения. В полной мере этими качествами обладает ПНЧ, использующий метод периодического интегрирования входного сигнала [5]. В этих преобразователях входное напряжение интегрируется с помощью аналогового интегратора, который каждый раз возвращается в исходное состояние, когда его выходное напряжение достигает некоторого опорного уровня. Стабильность и линейность коэффициента преобразования ПНЧ за-

всят, главным образом, от стабильности и равенства импульсов напряжения или тока, с помощью которых аналоговый интегратор приводится в исходное состояние.

#### Основные характеристики ПНЧ, применяемого в компараторе

Частота следования выходных импульсов при номинальном входном сигнале, кГц	20
Отклонение от линейности функции преобразования, %	0,01—0,02
Временной дрейф за 1 ч работы, %	0,01
Температурная погрешность, %/°С	0,01

Входной усилитель ВУ, обеспечивающий выбор предела измерения и согласование низкоомного входного сопротивления термопреобразователя с источником измеряемого сигнала, состоит из двух звеньев: усилителя постоянного тока, выполненного по системе модулятор-демодулятор, и широкополосного усилителя с непосредственными связями, включенных последовательно-параллельно (схема Гольдберга).

#### Основные технические характеристики входного усилителя

Динамический диапазон по входу, В	20
Коэффициент усиления без обратной связи на постоянном токе	$2 \cdot 10^6$
Входное сопротивление при стопроцентной обратной связи, Ом	$10^3$
Уход нулевого уровня за 8 ч, не более, мкВ	5

#### Технические характеристики термоэлектрического компаратора для измерения тока и напряжения

Диапазон измеряемых переменных напряжений, В	0,01—100
Диапазон измеряемых переменных токов, А	0,01—10
Диапазон частот, Гц	0,001—50
Погрешность измерения тока и напряжения не превышает, %	0,1—0,05

На основании вышесказанного можно прийти к следующим выводам:

- предложенная функциональная схема автоматического устройства для измерения действующих токов и напряжений в диапазоне инфразвуковых частот позволит повысить производительность труда при проведении метрологических работ;
- принцип построения устройства может быть использован и при измерении параметров периодических сигналов инфразвукового диапазона частот других физических величин;
- принципы построения автоматического устройства обеспечивают высокую степень унификации применяемых функциональных элементов и узлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гравин О. Н. Термоэлектрический метод поверки амперметров и вольтметров в диапазоне инфразвуковых частот.— Труды метрологических институтов СССР, вып. 98 (158), с. 29—41.
2. Орнатский П. П., Цывинский В. Г. Классификация методов измерений напряжений на инфранизких частотах.— «Измерительная техника», № 9, 1968, с. 53—57.
3. Фролов М. И. Точные измерительные преобразователи напряжения постоянного тока в частоту (обзор).— «Приборы и средства автоматизации», М., ОНТИПрибор, 1970, № 2, с. 21—28.

4. Тарасов В. Ф., Шахов Э. К. Полупроводниковые преобразователи напряжения — частота. «Приборы и системы управления», 1971, № 4, с. 9—14.  
 5. Судьин С. Л. Прецизионное устройство обратной связи преобразователя напряжения — частота. — «Автоматика», 1973, № 3, с. 71—76.

Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.

УДК 621.317.7.082.54.088/089:537.312.62

В. Я. Молочков

ВНИИМ

### МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ КВАНТОВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ТОКОВ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ

Устройства, использующие явления сверхпроводимости, применяются для создания сильных магнитных полей и получения больших токов сравнительно давно. Однако применение сверхпроводимости в измерительной технике стало возможным после предсказания Б. Д. Джозефсоном в 1962 г. проявлений туннельного эффекта в сверхпроводниках.

Многообразие проявлений туннельного эффекта в сверхпроводниках позволяет использовать его в различных областях измерительной техники. Перспективным проявлением туннельного эффекта для метрологических целей является квантовая интерференция токов в сверхпроводниках, позволяющая создать ряд измерительных, сравнивающих и стабилизирующих устройств, обладающих уникальными свойствами (чувствительность  $10^{-15}$  Т,  $10^{-17}$  В,  $10^{-12}$  А).

Можно выделить такие параметры сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКИ), имеющие метрологическое значение, как высокая чувствительность, малые шумы, малое внутреннее сопротивление, большое быстродействие, стабильность периода осцилляций СКИ.

Измерительные, сравнивающие и стабилизирующие устройства, основанные на квантовой интерференции токов в сверхпроводниках, используют периодический характер состояния контура СКИ от магнитного потока [1—3], при этом одним из основных факторов, определяющих стабильность и точность таких устройств, является неизменность периода осцилляций СКИ.

Период осцилляций СКИ по магнитному потоку равен кванту магнитного потока  $\Phi_0$  ( $\sim 2,06 \cdot 10^{-15}$  Вб), однако величина периода в функции напряженности магнитного поля зависит от кванта потока и величины площади квантования СКИ:

$$\Delta H = \frac{\Phi_0}{\mu_0 S_H}, \quad (1)$$

где  $\Delta H$  — период осцилляций СКИ по напряженности измеряемого поля;  $S_H$  — площадь квантования ( $S_H = S_{H1} + S_{H2}$ );  $S_{H1}$  — несверхпроводящая площадь, охватываемая контуром СКИ;  $S_{H2}$  — площадь, ограниченная глубиной проникновения поля в сверхпроводник;  $\mu_0$  — проницаемость вакуума.

Таким образом, неизменность площади квантования СКИ определяет точность измерительных и стабилизирующих устройств.

Одним из внешних факторов на стабильность размеров площади квантования СКИ. Постоянство площади квантования СКИ связано с постоянством линейных размеров контура СКИ и неизменностью глубины проникновения магнитного поля в сверхпроводник. В свою очередь, изменение линейных размеров контура СКИ связано с изменением температуры, а глубина проникновения зависит от температуры и магнитной индукции.

Температура кипения гелия зависит от давления газа, окружающего жидкий гелий (гидростатическим давлением жидкого гелия можно прене-

бречь из-за его ничтожно малой величины по сравнению с атмосферным давлением). При изменении атмосферного давления на  $\pm 20$  мм рт. ст. температура кипения жидкого гелия изменяется на  $\pm 0,021$  К. Кратковременная нестабильность температуры кипения жидкого гелия обычно составляет 0,01 К [4].

Коэффициенты линейного расширения материалов, применяемых для контуров СКИ, приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Коэффициенты линейного расширения некоторых сверхпроводников вблизи абсолютного нуля ( $\alpha \cdot 10^6$  К $^{-1}$ )

Температура, К	Nb	Sn		Pb	
		$\alpha_{\perp}$	$\alpha_{\parallel}$	нормальная	сверхпроводящая
4	—	-0,01	0,07	0,11	0,08
6	0,003	-0,04	0,28	0,48	0,44
8	0,016	-0,07	0,84	1,44	0,88
10	0,04	-0,10	1,65	3,02	—

Для ниобия коэффициент линейного расширения сверхпроводящей фазы имеет отрицательное значение при  $T=4$  К [5], т. е. при температуре кипения гелия 4,2 К, соответствующей нормальному давлению (760 мм рт. ст.), коэффициент линейного расширения меняет знак и его значение проходит через нуль.

Для сверхпроводящей фазы олова при температуре ниже 1,7 К составляющие коэффициента линейного расширения уменьшаются на порядок по отношению к 4,2 К и затем монотонно спадают до нуля при 0 К.

Для свинца при температуре ниже 4 К коэффициент линейного расширения нормальной  $\alpha^n$  и сверхпроводящей  $\alpha^c$  фаз описывается следующими выражениями [6]:

$$\alpha^n = (10 \pm 20) \cdot 10^{-10} T + (14 \pm 2) \cdot 10^{-10} T^3; \quad (2)$$

$$\alpha^c = (0 \pm 10) \cdot 10^{-10} T + (12 \pm 2) \cdot 10^{-10} T^3. \quad (3)$$

Первый член этих уравнений характеризует электронную составляющую теплового расширения, второй — решеточную.

Изложенное выше показывает, что изменение линейных размеров контура СКИ за счет коэффициента линейного расширения (без принятия мер по регулированию давления) составляет для Nb— $6 \cdot 10^{-11}$ , Sn— $1,4 \cdot 10^{-9}$ , Pb— $1,6 \cdot 10^{-9}$ .

Регулирование давления газов, окружающих жидкий гелий, с помощью маностата с точностью 1% позволяет получить степень нестабильности линейных размеров контура СКИ не более  $6 \cdot 10^{-13}$  — для Nb,  $1,4 \cdot 10^{-11}$  — для Sn,  $1,6 \cdot 10^{-11}$  — для Pb. Зависимость глубины проникновения магнитного поля в сверхпроводник от температуры имеет вид [7]:

$$\lambda(T) = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (T/T_c)^4}}, \quad (4)$$

где  $\lambda_0$  — глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник при 0 К,  $T$  — температура кипения гелия,  $T_c$  — критическая температура сверхпроводника.

Глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник  $\lambda_0$  для Nb —  $3,5 \cdot 10^{-8}$  м, для Pb —  $3,55 \cdot 10^{-8}$  м, для Sn —  $3,1 \cdot 10^{-8}$  м [8].



С учетом критических температур для Nb—9,2 К, для Sn—3,7 К, для Pb—7,2 К, стабильности температуры кипения гелия без маностата  $\pm 0,021$  К, а также принимая во внимание, что в обычно применяемых конструкциях площадь контура СКИ, ограниченная глубиной проникновения, составляет  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  от общей площади контура СКИ, относительное изменение площади СКИ для ниобия составляет  $10^{-8}$ , для свинца— $4 \cdot 10^{-8}$ . Применение маностата и в этом случае повышает стабильность площади квантования минимум на два порядка. Снижение температуры кипения гелия до температур, близких к 0 К, может сделать эту величину пренебрежимо малой (вплоть до  $10^{-14}$ ).

Для контура СКИ предпочтительнее ниобий, имеющий высокую критическую температуру и малый коэффициент линейного расширения при гелиевых температурах, что позволяет получить высокую стабильность размеров контура СКИ по  $\alpha(T)$  и  $\lambda(T)$  без применения маностата.

Изменение площади  $S_{к2}$  от изменения глубины проникновения, связанной с изменением индукции в площади квантования  $S_k$  по данным работы [9], имеет величину для ниобия не более  $10^{-9}$  в диапазоне индукций, соответствующих потоку в площади квантования равному  $10^7 \Phi_0$ . Кроме того,  $S_{к2} = (10^{-2} - 10^{-5}) S_k$ .

Суммарное относительное изменение размеров площади квантования определяется соотношением:

$$\varepsilon = \sum_{T=T_1}^{T=T_2} \alpha(T), \lambda(T) + \sum_{B=B_1}^{B=B_2} \lambda(B), \quad (5)$$

где  $\alpha(T)$  следует брать из табл. 1;  $\lambda(T)$  — из уравнения (4).

Относительное приращение площади квантования выражается как

$$\frac{\Delta S_k}{S_k} = 2 \frac{\Delta r}{r}. \quad (6)$$

Здесь  $r$  — радиус площади квантования СКИ (члены с квадратом  $\Delta r$  отброшены).

Расчет относительных изменений площади квантования для различных условий и материалов приведен в табл. 2.

Таблица 2

Относительное изменение площади квантования СКИ

Составляющая	$\Delta S_k / S_k$	
	Nb	Pb
$\alpha(T)$	$6 \cdot 10^{-11} \div 6 \cdot 10^{-13}$	$1,6 \cdot 10^{-9} \div 1,6 \cdot 10^{-11}$
$\lambda(T)$	$10^{-8} \div 10^{-14}$	$4 \cdot 10^{-8} \div 4 \cdot 10^{-10}$
$\lambda(B)$	$10^{-12} \div 10^{-14}$	$4 \cdot 10^{-8} \div 4 \cdot 10^{-14}$
$\Sigma \Delta S_k / S_k$	$10^{-8} \div 6 \cdot 10^{-13}$	$8,2 \cdot 10^{-8} - 4,6 \cdot 10^{-10}$

На основании данных этой таблицы приходим к выводу, что нестабильность размеров площади квантования СКИ, изготовленного из ниобия, лежит в диапазоне  $10^{-8}$ — $10^{-12}$  в зависимости от принятых мер по стабилизации температуры, при этом степень нестабильности  $10^{-8}$  достижима без принятия каких-либо мер по стабилизации температуры кипения жидкого гелия.

Рассмотрим шумовые ограничения СКИ. Шум СКИ складывается из теплового и дробового. Дробовой шум представляет собой сумму составляющих от одночастичного и джозефсоновского туннелирования:

$$\langle I^2(\omega) \rangle = \frac{1}{\pi} (eI_n + qI_c), \quad (7)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $q$  — заряд куперовской пары;  $I_n$  — одночастичный ток;  $I_c$  — ток куперовских пар [10].

Дробовой шум сверхпроводников на несколько порядков меньше, чем тепловой шум, и поэтому следует учитывать только тепловые флуктуации.

Тепловой шум СКИ можно рассматривать как:

а) тепловую шумовую э. д. с. на слабых связях в режиме  $R \neq 0$ ,  $n_s \gg 0$ , где  $R$  — сопротивление слабых связей,  $n_s$  — параметр, отражающий соотношение сконденсированных и нормальных электронов;

б) тепловые флуктуации потока в площади квантования.

Для СКИ с двумя слабыми связями, работающего в режиме  $R \neq 0$ , шумовая э. д. с. теплового характера может быть получена из уравнения Найквиста [11]:

$$E_{ш} = \sqrt{4kT\Delta/R}. \quad (8)$$

Так как сопротивление слабых связей СКИ составляет  $10^{-1}$  Ом, то при 4,2 К имеем  $E_{ш} = 0,4 \cdot 10^{-12} \sqrt{\Gamma}$  В. Обычно амплитуда осцилляций на слабых связях имеет величину  $10^{-4} - 10^{-3}$  В. Поэтому вполне реально разрешение  $10^{-3} \Phi_0$  вплоть до частот измеряемого поля  $10^3 - 10^6$  Гц при отношении сигнал—шум, равном 10.

Предельное разрешение доли периода для СКИ с двумя слабыми связями по флуктуациям магнитного потока определится следующим образом.

Средний квадрат флуктуаций шумового тока равен:

$$\langle I_{ш}^2 \rangle = \frac{4kT\Delta f}{2R}, \quad (9)$$

отсюда

$$\langle L^2 I_{ш}^2 \rangle = \frac{2L^2 kT\Delta f}{R}, \quad (10)$$

где  $\langle L^2 I_{ш}^2 \rangle$  — средний квадрат флуктуаций шумового потока.

Доля периода осцилляций, которую можно обнаружить, при условии, что отношение сигнал—шум равно единице, будет

$$\Delta\Phi_0 = \sqrt{\frac{2L^2 kT\Delta f}{\Phi_0^2 R}}. \quad (11)$$

При типовых значениях  $T = 4,2$  К,  $L = 10^{-11}$  Г;  $R = 10^{-1}$  Ом;  $\Delta\Phi_0 = 3,5 \cdot 10^{-6} \sqrt{\Gamma}$   $\Phi_0$ .

Учет чувствительности электронной аппаратуры, периода СКИ по измеряемой величине, амплитуды напряжения осцилляций на слабых связях, учет особенностей характеристик СКИ позволяет представить относительную погрешность сравнивающего устройства и нестабильность стабилизирующего устройства следующим образом:

$$M_{от} = \frac{\Delta U_p}{I \Delta U_n} + \epsilon \pm \frac{\Delta \varphi}{A \cdot 2\pi} \quad (12)$$

или

$$M_{от} = \frac{\Phi_0 U_p}{L_n I \Delta U_n} + \epsilon \pm \frac{\Delta \varphi}{A \cdot 2\pi},$$

где  $\Delta I$  — период по току;  $I$  — максимальная величина тока;  $\Delta\varphi$  — фазовый сдвиг напряжения на слабых связях при прямом и обратном ходе изменения потока в площади квантования СКИ ( $\Delta\varphi=0$  при использовании переменного транспортного тока);  $U_p$  — разрешение электронной аппаратуры при заданном отношении сигнал-шум, В;  $\Delta U_n$  — амплитуда напряжения на слабых связях СКИ, В;  $L_n$  — индуктивность, создающая поток в площади  $S_n$ ;  $A$  — количество используемых периодов.

Для характерной задачи  $I=1$  А,  $M_{nT}=10^{-7}$ , параметрах СКИ  $\Delta U_n=10^{-5}$  В,  $\Delta I=10^{-5}$  А, способе работы на переменном транспортном токе ( $\Delta\varphi=0$ ), в пренебрежении в для данной степени неустойчивости тока, необходима чувствительность электронной аппаратуры по напряжению  $10^{-7}$  В.

Эта чувствительность на уровне существующих вариаций термо-э. д. с. (0,1—0,5 мкВ К<sup>-1</sup> для лучших припоев и контактных материалов) достигнута только при использовании модуляционного метода и синхронного детектирования, что в значительной мере предопределяет выбор основных узлов измерительной аппаратуры, использующей СКИ.

Таким образом, использование в качестве опорной величины и промежуточной «меры» периода осцилляций критического тока СКИ позволяет создать стабилизирующие и сравнивающие устройства со степенью неустойчивости и погрешностью  $10^{-8}$ — $10^{-12}$ . Эти устройства могут найти применение в качестве источников питания в эталонах вебера и тесла, в качестве компаратора при переходе от 10 мВ к 1 В в эталоне вольты на основе эффекта Джозефсона, для точного сравнения постоянных и переменных токов, в измерителях отношений различных электрических величин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулик И. О., Янсон И. К. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах, М., «Наука», 1970. 156 с. с ил.
2. Буккель В. Сверхпроводимость, М., «Мир», 1975. 364 с. с ил.
3. Бондаренко С. И., Дмитренко И. М. Сверхпроводящий магнитометр в резистивном режиме. Физика конденсированного состояния, вып. III, Харьков, ХГУ, 1968, с. 79—94.
4. Уайт Г. К. Экспериментальная техника в физике низких температур, М., Физматгиз, 1961. 368 с. с ил.
5. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел, М., «Наука», 1974. 310 с. с ил.
6. White G. K. Properties of superconductive materials.—“Philos. mag.”, 1962, 7, N 74, pp. 269—273.
7. Роуз-Инс А., Родерик Е. Введение в физику сверхпроводимости, М., «Мир», 1972. 256 с. с ил.
8. Диденко А. Н. Сверхпроводящие волноводы и резонаторы, М., «Советское радио», 1973. 255 с. с ил.
9. Sullivan D. B. Electrical measurements at low temperature. Proceeding of the applied superconductivity conference, Annapolis, 1972, 12 p.
10. Солимар Л. Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение, М., «Мир», 1974. 428 с. с ил.
11. Ван Дер Зил А. Флуктуации в радиотехнике и физике, М.—Л., ГЭИ, 1958. 296 с. с ил.

Поступила в редакцию 5/IX—1975 г.

## ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ СРЕДСТВ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦ И ПЕРЕДАЧИ ИХ РАЗМЕРОВ

В различных областях народного хозяйства с каждым годом растет потребность в точных и высокопроизводительных средствах метрологического обеспечения. В связи с этим значительно увеличился объем производимых Госстандартом СССР работ по развитию эталонной базы и созданию новых автоматизированных средств поверки приборов. Задачи автоматизации средств поверки подробно рассмотрены в работе [1]. По-прежнему актуальным остается системный подход к разработке, проектированию и производству автоматизированных образцовых средств измерений (ОСИ). В связи с этим целесообразно использовать некоторые результаты, полученные при разработке Государственной системы приборов (ГСП), принципы построения которой [2, 3] и структура ее агрегатированных комплексов [4, 5] во многом могут быть использованы.

### О необходимой степени автоматизации ОСИ

При разработке новых образцовых средств измерений основным является вопрос о необходимой степени автоматизации операций, выполняемых при эталонных и поверочных работах. Целесообразность автоматизации ОСИ всех уровней точности очевидна, но в связи с тем, что это вызывает усложнение аппаратуры, повышение ее стоимости, а иногда и снижение надежности, требуется установить необходимую и достаточную степень автоматизации на основе результата анализа технико-экономической эффективности. Трудность такого анализа состоит в том, что критерии эффективности весьма различны в зависимости от вида ОСИ, его назначения, условий эксплуатации и т. д. Так, при автоматизации эталонов основным критерием эффективности служит повышение точности за счет автоматизации; при автоматизации же средств массовой поверки приборов на первое место выдвигается повышение быстродействия, производительности аппаратуры.

Можно предположить, что для ОСИ, относящихся к разным видам измерений, но равных рангов по точности и эксплуатируемых в одинаковых условиях, требования к уровню автоматизации будут близкими. В связи с этим предлагается разбить ОСИ, подлежащие автоматизации, на три группы:

- 1) первичные, специальные и рабочие эталоны единиц физических величин;
- 2) средства поверки приборов высших классов точности с представлением результатов поверки в виде поправок (таблиц поправок);
- 3) средства массовой поверки приборов невысокой точности, с представлением результата поверки в форме «годен—негоден».

В указанных группах ОСИ полностью или частично могут быть автоматизированы следующие операции:

- а) управление условиями проведения эксперимента:
  - стабилизация внешних условий;
  - стабилизация параметров средства измерений или управление ими по заданной программе;
  - управление средствами измерений, находящимися в условиях, недоступных оператору;
- б) подготовка ОСИ:
  - выбор пределов измерений;
  - выбор числа контролируемых точек, программы их чередования;
  - управление источниками входных величин;

- в) измерение или определение погрешности:
  - сравнение величин с мерами;
  - масштабное преобразование;
  - аналоговое преобразование в форму, удобную для кодирования;
  - аналого-цифровое преобразование;
- г) математическая обработка наблюдений:
  - преобразование кодов входных сигналов измерительных устройств в форму, пригодную для непосредственного ввода в универсальные и специализированные ЭВМ или встроенные вычислительные устройства;
  - вычисление результата по стандартным программам;
  - автоматическая регистрация результата измерения (поверки).

По-видимому, нет необходимости в каждом случае автоматизировать все перечисленные выше операции. В частности, для эталонов в первую очередь должны быть автоматизированы те операции, которые приводят к повышению точности. Например, для эталона единицы силы тока целесообразно автоматизировать процессы стабилизации тока внешней температуры, температуры меры сопротивления, а также процесс отсчитывания показаний по указателю равновесия и статистическую обработку результатов наблюдений. Трудоемкие, но редко выполняемые операции могут остаться неавтоматизированными.

В средствах поверки массовых измерительных приборов прежде всего должны быть автоматизированы операции, определяющие производительность. Следует заметить, что автоматические системы должны быть просты в эксплуатации, транспортабельны, надежны и пригодны для использования на местах применения приборов. Например, в аппаратуре для поверки показывающих электроизмерительных приборов должны быть автоматизированы операции отсчитывания показаний со шкал приборов, выбора пределов измерений, контролируемых точек и их очередности, управление источником входного сигнала, измерение и представление результата.

Применение ЭВМ в таких системах целесообразно только в случае, если она обслуживает ряд установок или если на установке производится одновременная поверка большого числа приборов, как это имеет место при поверке счетчиков электроэнергии. В последнем случае ЭВМ принимает на себя и все функции управления процессом поверки.

Средства поверки мер и приборов высокой точности занимают промежуточное положение между рассмотренными ранее видами ОСИ. Сочетание требований высокой точности и значительной производительности определяет, по-видимому, максимальную степень автоматизации для этого вида аппаратуры.

### О путях автоматизации метрологических работ

Работа в области автоматизации развивается по двум взаимодополняющим направлениям [6—8]:

- 1) разработка методов построения автоматизированных метрологических систем;
- 2) разработка комплекса унифицированных функциональных узлов, обеспечивающего путем их комбинирования быструю реализацию новых структур автоматических систем.

Многочисленными исследованиями установлено, что простая замена действий оператора автоматическим устройством при сохранении старой структуры средства измерений экономически не оправдана. Как правило, это сопровождается снижением точности или же сохранение точности достигается ценой чрезмерного усложнения аппаратуры и снижения ее надежности. Такой путь автоматизации допустим только в случае крайней необходимости, например, при автоматизации уже существующих дорогостоящих эталонов.

При разработке новых ОСИ вопросы, связанные с автоматизацией, должны учитываться уже на начальной стадии разработки. В соответствии с этим выбирается метод поверки и структура средства измерений, а все



узлы разрабатываемой аппаратуры должны рассматриваться как звенья единой системы автоматического управления. Наряду с точностными характеристиками функциональные узлы должны обладать заданным видом передаточной функции и обеспечивать согласование входных и выходных параметров с другими звеньями системы. При таком подходе становится возможным широкое применение известных методов коррекции систематических и случайных погрешностей элементов системы, что позволяет создавать точные средства измерений из достаточно грубых, но надежных узлов.

Практическая реализация новых разработок на стадии технического проекта и макетирования сопряжена с трудностями, состоящими в том, что современные средства автоматизации состоят из большого числа сложных и дорогостоящих узлов. В настоящее время на расчет, проектирование и наладку этих узлов приходится до 90% времени разработки. Кроме того, сложность таких узлов ограничивает возможность экспериментальной проверки различных путей решения задачи.

Значительная часть функциональных узлов, предназначенных для метрологической аппаратуры, имеет аналоги в приборостроении, вычислительной технике и в ряде других отраслей промышленности. Но в большинстве случаев использовать их практически невозможно из-за несовместимости по метрологическим, механическим, электрическим, конструктивным и другим параметрам. Затраты труда на переработку узлов сопоставимы с затратами на новую разработку. Поэтому в ближайшие годы наиболее важной задачей является создание комплекса унифицированных функциональных узлов для автоматических метрологических систем, что позволит значительно сократить сроки разработки и внедрения современных ОСИ.

#### **О составе комплекса функциональных узлов и основных требованиях к параметрам узлов**

В соответствии с составом агрегатных комплексов ГСП\*, узлы которых должны быть максимально использованы, комплекс функциональных узлов для автоматизации метрологических работ предположительно должен состоять из четырех групп узлов следующего назначения: получение измерительной информации; преобразование сигналов информации, передачи и хранения измерительной информации; обработка наблюдений и выработка команд управления; представление и регистрация измерительной информации.

Основные узлы первой группы — это меры физических величин, активные и пассивные масштабные преобразователи, первичные преобразователи электрических и различных электрических величин в унифицированный электрический сигнал — напряжение (ток) или частоту, устройства сравнения, компараторы.

К узлам второй группы относятся устройства, обеспечивающие дальнейшее преобразование унифицированного электрического сигнала, например, согласующие, операционные, интегрирующие и т. д. усилители, функциональные преобразователи, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, коммутирующие устройства, оперативные запоминающие устройства, аналоговые и цифровые.

В третью группу входят универсальные, специализированные и управляющие ЭВМ, вычислительные устройства, встраиваемые в аппаратуру, а также устройства преобразования сигналов для связи между АЦП и ЭВМ.

Четвертая группа узлов включает в себя устройства связи оператора с системой, устройства ввода информации в ЭВМ из внешней памяти, различные регистрирующие устройства: осциллографы, самопишущие приборы, графопостроители, цифрочечатающие устройства и т. д.

\* См. ГОСТ 12997—67 «Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Общие технические требования».

Функциональные узлы комплекса должны обладать информационной совместимостью, т. е. согласованием последовательно работающих функциональных узлов по видам носителей информации, что обеспечивается унификацией входных и выходных сигналов функциональных узлов; метрологической совместимостью, т. е. согласованием функциональных узлов первой и второй групп комплекса по точности; эксплуатационной совместимостью, т. е. согласованием функциональных узлов по климатическим, механическим и другим условиям эксплуатации; конструктивной совместимостью, т. е. согласованием основных конструктивных параметров функциональных узлов.

Совместимость по двум последним признакам между узлами, с одной стороны,— первой, второй и, с другой,— третьей, четвертой групп не обязательна в связи с тем, что они в разной степени подвержены влиянию условий эксплуатации и могут находиться в разных условиях.

При создании комплекса функциональных узлов для метрологических исследований в качестве узлов третьей и четвертой группы предполагается использовать узлы комплекса АСВТ (агрегатный комплекс средств вычислительной техники), а в качестве узлов второй группы — в значительной мере узлы комплекса АСЭТ (агрегатный комплекс средств электроизмерительной техники).

### Об опыте создания функциональных узлов широкого применения

Во ВНИИМ ведутся работы по созданию комплекса унифицированных функциональных узлов. Параллельно со сбором необходимой информации об узлах, подлежащих унификации, и выбором параметров узлов разрабатываются отдельные элементы комплекса. Так, созданная в лаборатории автоматизации встраиваемая мера постоянного напряжения с годовой нестабильностью 0,002% и температурным коэффициентом  $0,0001\%/^{\circ}\text{C}$  использована в автоматической установке для поверки приборов постоянного тока, в полуавтоматической установке для поверки приборов переменного тока, в цифровых вольтметрах действующего и среднего напряжения кл. 0,01 в устройстве для измерений импульсного тока, в образцовом программируемом цифро-аналоговом преобразователе с погрешностью 0,002% и в ряде калибраторов тока и напряжения различного назначения.

Широкое применение нашел также измерительный усилитель постоянного тока с МДМ-структурой, обладающий суточным дрейфом менее 1 мкВ, температурным дрейфом 0,2 мкВ/ $^{\circ}\text{C}$ , коэффициентом усиления в пределах  $1-10^2$  и входным сопротивлением в пределах  $10^6-10^9$  Ом.

Фотоэлектронные преобразователи, которые решают задачи отсчитывания показаний со шкал приборов, используются в устройствах для аттестации штриховых и концевых мер длины и в других устройствах для автоматизации интерференционных измерений.

Широкое применение в разработках последующих лет найдут такие узлы, согласованные по входным и выходным параметрам и условиям эксплуатации, как мера переменного тока с погрешностью менее 0,005%, преобразователи напряжения переменного тока и активной мощности для широкого диапазона частот с погрешностью сравнения 0,01—0,02%, преобразователь напряжения постоянного тока в частоту с коэффициентом преобразования 200 кГц/1 В, аналоговое запоминающее устройство с постоянной времени более  $10^4$  с.

Созданные в ходе разработок конкретных автоматизированных ОСИ узлы не полностью удовлетворяют перечисленным выше требованиям. Разработка полного комплекса функциональных узлов является сложной и трудоемкой задачей, решение которой может быть достигнуто только общими усилиями специалистов по различным видам измерений — электронике, автоматике и вычислительной технике. Однако высокая экономическая эффективность такого комплекса обуславливает необходимость широкого развертывания работ в этом направлении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безикович А. Я., Шестопапов Ю. Н., Эскин С. П. Состояние и уровень работ по автоматизации метрологических исследований.—Труды метрологических институтов СССР, вып. 130 (190), М.—Л., 1972, с. 135—149.
2. Кавалеров Г. И. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации.—«Приборы и системы управления», 1972, № 7, с. 1—7.
3. Сотсков Б. С. Тенденции и перспективы развития основ построения ГСП.—«Приборы и системы управления», 1972, № 8, с. 1—6.
4. Каверкин И. Я., Певзнер Г. С., Цветков Э. И. Агрегатирование в электронизмерительной технике.—«Приборы и системы управления», 1974, № 1, с. 28—30.
5. Гореликов Н. И., Цветков Э. И. Задачи развития агрегатирования и комплексирования в электронизмерительной технике.—«Приборы и системы управления», 1975, № 1, с. 28—35.
6. Арутюнов В. О., Безикович А. Я., Зедгинидзе Г. П. Основные задачи и перспективы работ по применению средств электроники, автоматики и вычислительной техники в метрологических исследованиях.—Труды метрологических институтов СССР, вып. 130 (190), 1972, с. 130—134.
7. Тавровский В. Л. Одно из основных направлений автоматизации поверочных работ.—«Измерительная техника», 1969, № 7, с. 13—16.
8. Зедгинидзе Г. П. Методы кибернетики и средства вычислительной техники в метрологии.—«Измерительная техника», 1969, № 9, с. 61—64.

*Поступила в редакцию 5/IX—1975 г.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА СТУПЕНЕЙ ПОВЕРОЧНЫХ СХЕМ

Обычно общесоюзные поверочные схемы составляют на основе сложившейся системы эталонов, образцовых и рабочих средств измерений (ИС) и предварительно разработанных методов поверки для ИС всех ступеней точности. Порядок построения поверочных схем при сложившейся системе ИС подробно изложен в ГОСТ 8.061—73 «ГСИ. Содержание и построение поверочных схем»; в нем даны общие требования к построению поверочной схемы и текстовой части стандарта.

Однако при построении поверочных схем для областей измерений, еще не полностью обеспеченных образцовыми ИС, необходимо предварительно оценить рациональное число ступеней точности передачи размера единицы. Возможны также случаи, когда существующие поверочные схемы построены нерационально и их структуру необходимо улучшить.

В статье приводятся методы определения максимального и минимального числа ступеней поверочной схемы.

### Максимально возможное число ступеней

Доверительная граница погрешности эталона или образцового ИС высшей точности  $\delta_0 = tS$ , где  $S$  — оценка среднего квадратического отклонения для погрешностей эталона или образцового ИС высшей точности;  $t$  — коэффициент доверительной вероятности. Обозначим предел допускаемой погрешности рабочих ИС,веряемых по образцовым ИС низшей точности  $\delta_m$ . Отношение

$$C_{\Sigma} = \delta_0 / \delta_m \quad (1)$$

назовем полным запасом точности поверочной схемы. Представим  $C_{\Sigma}$  как произведение отношений доверительных погрешностей или пределов допускаемых погрешностей ИС, составляющих соседние уровни точности

$$C_{\Sigma} = C_1 \cdot \dots \cdot C_i \cdot \dots \cdot C_{m-1}. \quad (2)$$

Для определения  $m$  из уравнения (2) должны быть известны все сомножители, которые следует пересчитать. Поэтому представим  $C_{\Sigma}$  как степень от среднего геометрического значения отношений, которое обозначим через  $\bar{C}$ , т. е.

$$C_{\Sigma} = (\bar{C})^{m-1}. \quad (3)$$

Решение (3) относительно  $m$  будет иметь такой вид:

$$m = \log_{(\bar{C})} C_{\Sigma} + 1. \quad (4)$$

Перейдя к десятичным логарифмам, получим

$$m_{\max} = \frac{\lg C_{\Sigma}}{\lg C} + 1. \quad (5)$$

Среднее значение соотношения точностей  $C$  может быть оценено по заданным вероятностям ошибок поверки 1- и 2-го рода\*.

#### Минимально необходимое число ступеней

Пусть  $T_{i+1}$  — межповерочный интервал для ИС  $(i+1)$ -й ступени точности,  $t_{i+1}$  — время, затрачиваемое на поверку одного ИС  $(i+1)$ -й ступени точности, и  $N_{0i}$  — число образцовых ИС  $i$ -й ступени точности, применяемых для поверки ИС  $(i+1)$ -й ступени. Тогда число  $N_{i+1}$  ИС  $(i+1)$ -й ступени, обеспечиваемых поверкой в течение межповерочного интервала будет

$$N_{i+1} = \frac{T_{i+1}}{t_{i+1}} N_{0i}. \quad (6)$$

Заметим, что из ИС  $i$ -й ступени только часть являются образцовыми, т. е.  $N_{0i} = D_i N_i$ , где  $D$  — коэффициент, меньший единицы. Кроме того, образцовые ИС  $i$ -й ступени не все время используются для поверок. Часть межповерочного интервала уходит на поверку и обслуживание самих образцовых ИС. Поэтому в формуле (6) вместо  $T_{i+1}$  следует написать  $T_n = \tau_i T_{i+1}$ , где  $T_n$  — чистое время, затрачиваемое на поверки, а  $\tau_i$  — коэффициент.

Учтем также, что в ряде случаев по одному образцовому ИС может вестись поверка  $l$  ИС. Тогда вместо выражения (6) получим

$$N_{i+1} = \frac{T_{i+1}}{t_{i+1}} l_{i+1} D_i \tau_i N_i. \quad (7)$$

В результате суммирования всех ИС  $m$  ступеней схемы имеем

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \frac{T_{i+1}}{t_{i+1}} l_{i+1} D_i \tau_i N_i. \quad (8)$$

Коэффициент  $D$  изменяется от нуля до единицы. Для эталонов при  $i=1$   $D_1=1$ , так как на высшей ступени поверочной схемы нет рабочих ИС. Для нижней ступени точности поверочной схемы  $i=m$  и  $D_m=0$ , так как на этой ступени нет образцовых ИС. Поэтому коэффициент  $D$  для любой ступени можно найти линейной интерполяцией между крайними точками диапазона его изменений

$$D_i = \left( 1 - \frac{i-1}{m-1} \right). \quad (9)$$

Коэффициент  $\tau$  может изменяться приблизительно от 0,4 до 0,8. Так как для обслуживания и исследований эталонов расходуется больше времени, чем на обслуживание образцовых ИС низшего разряда, то при  $i=1$   $\tau_1 \leq 0,4$ , а при  $i=m-1$   $\tau_{m-1} \geq 0,8$ . Линейно интерполируя между этими двумя значениями  $\tau$ , получим

$$\tau_i = 0,4 \left( 1 + \frac{i-1}{m-1} \right). \quad (10)$$

\* См. статью К. А. Резника «Соотношения между погрешностями образцового и поверяемого прибора». — «Метрология», 1971, № 4.



Оценим изменение времени, затрачиваемого на поверку ИС. Известно, что с повышением точности ИС, время поверки увеличивается. На поверку образцового ИС 1-го разряда или рабочего эталона затрачивается времени более, чем в 20 раз больше, чем на поверку рабочих ИС низкой точности. Представим эту зависимость прямой с уравнением

$$t_i = t_m \left[ 1 + (h-1) \frac{m-i}{m-1} \right]. \quad (11)$$

В этом уравнении коэффициент

$$h = \frac{t_1}{t_m} = 20.$$

Применение линейной интерполяции для определения  $D_i$ ,  $t_i$ ,  $\tau_i$  может изменить  $N_{\Sigma}$  относительно значений, определенных по формуле (8), не более, чем вдвое, а это, как будет показано ниже, несущественно для  $m_{\text{max}}$ .

Подставим выражения (9), (10) и (11) в формулу (8). Тогда

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m 0,4 \frac{T_{i+1}}{t_m} \frac{1 - \left( \frac{i-1}{m-1} \right)^2}{1 + (h-1) \frac{m-i}{m-1}} I_{i+1} N_i. \quad (12)$$

Часто межповерочный интервал для ИС всех ступеней точности принимают равным одному году (в году приблизительно 2000 раб. ч). Это определяется гарантийным сроком на вновь выпускаемые ИС (обычно в пределах 12—18 месяцев), а также производственными возможностями органов метрологической службы. Нормы трудозатрат на поверку одного рабочего ИС низкой ступени точности находится в пределах  $t \approx 0,3-0,6$  ч,  $t_m = 1$ . Подставим указанные выше оценки в формулу (12). Тогда при  $i_1 = 1$  и  $t_m = 0,5$  ч будем иметь

$$N_{\Sigma} = 1600 \sum_{i=1}^m \frac{1 - \left( \frac{i-1}{m-1} \right)^2}{1 + (h-1) \frac{m-i}{m-1}} N_i = 1600 \sum_{i=1}^m H_i N_i. \quad (13)$$

Минимальное число ступеней в существующих поверочных схемах равно трем — эталон, образцовые ИС и рабочие ИС. Для этого случая имеем

$$H_1 = h^{-1}; \quad H_2 = \frac{3}{4} \left[ 1 + (h-1) \frac{1}{2} \right]^{-1}; \quad H_3 = 0.$$

При этом  $N_2 = \frac{1600}{20} = 80$ ;  $N_3 = 1600 \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{10} = 9600$ .

Существующие поверочные схемы чаще имеют четыре ступени точности, которые можно представить двумя вариантами:

- 1) первичный эталон, вторичные эталоны, образцовые ИС, рабочие ИС;
- 2) первичный эталон, образцовые ИС 1- и 2-го разрядов, рабочие ИС.

Для четырех ступеней поверочной схемы:

$$H_1 = h^{-1}; \quad H_2 = \frac{8}{9} \left[ 1 + (h-1) \frac{2}{3} \right]^{-1}; \quad H_3 = \frac{5}{9} \left[ 1 + (h-1) \frac{1}{3} \right]^{-1};$$

$$H_4 = 0.$$

Отсюда  $N_2=80$ ;  $N_3=8127$ ;  $N_4=1\,048\,000$ .  
 Таким образом, при трех ступенях точности получим ряд  $N_4$ :

$$1+80+9600.$$

Соответственно при четырех ступенях

$$1+80+8130+1\,048\,000.$$

Эти ряды возрастают быстрее геометрической прогрессии со знаменателем  $q=80$ , представленной рядом

$$1+q+q^2+q^3+q^4+\dots$$

(Подставив  $q=80$ , получим  $1+80+6400+512\,000+407\,960\,000+\dots$ ), но медленнее усиленной геометрической прогрессии вида

$$1+q+kq^2+kq^3+k^2q^4+\dots, \quad (14)$$

в которой  $k=2$ . В этом случае прогрессия имеет такой вид:

$$1+80+12\,800+2\,048\,000+\dots$$

Поэтому ряд типа (14) при  $k=2$  можно принять в качестве предельного закона нарастания числа проверок и применять для оценивания минимального числа ступеней поверочной схемы  $m_{\min}$ . Так как  $q \gg 1$ , то вместо ряда (14) следует рассмотреть ряд

$$q+kq^2+k^2q^3+\dots+k^{m-1}q^m. \quad (15)$$

Сумма  $m-1$  членов такого ряда

$$\sum_{i=1}^{m-1} k^i q^{i+1} = q \frac{k^m q^m - 1}{kq - 1}.$$

Так как  $kq \gg 1$ , то опустим единицы в числителе и знаменателе. Тогда уравнение существенно упростится и примет вид:

$$k \sum_{i=1}^{m-1} k^i = (kq)^{m-1}.$$

Отсюда получим

$$m_{\min} = \frac{\lg k \sum_{i=1}^{m-1} k^i}{\lg kq} + 1. \quad (16)$$

Если  $l_m=1$ , то  $\Sigma=N_{\Sigma}$ . Если по одному образцовому ИС можно одновременно поверить  $l$  рабочих ИС нижней точности, то  $\sum_{i=1}^{m-1} = N_{\Sigma}/l$ , при этом необходимое число ступеней соответственно уменьшится.

Из уравнений (13) и (15), а также из приведенных выше числовых рядов видно, что показатель геометрической прогрессии  $q$  равен числу средств измерений высшей точности, которое может быть поверено непосредственно по первичному эталону  $N_0$ , т. е.  $q=N_2=N_3$ . Тогда при  $l=1$  и  $k=2$  получим выражение для определения минимального числа ступеней поверочной схемы в таком виде:

$$m_{\min} = \frac{\lg 2 N_{\Sigma}}{\lg 2 N_0} + 1. \quad (17)$$

Значение  $m_{\min}$ , вычисленное по формуле (16), следует округлять до ближайшего большего целого числа.

Рассмотрим пример вычисления числа ступеней поверочной схемы по формуле (16). Пусть  $N_{\Sigma} = 10^6$ ;  $l = 1$ ;  $N_0 = 80$ . При  $k = 2$

$$m_{\min} = \frac{\lg 2 \cdot 10^6}{\lg 2 \cdot 80} + 1 = 3,86 \approx 4;$$

При  $k = 5$

$$m_{\min} = \frac{\lg 5 \cdot 10^6}{\lg 5 \cdot 80} + 1 = 3,58 \approx 4;$$

При  $k = 10$

$$m_{\min} = \frac{\lg 10^7}{\lg 800} + 1 = 3,4 \approx 4.$$

Как видно, изменение  $k$  слабо влияет на  $m$ . То же следует сказать относительно  $N_{\Sigma}$ . Действительно, при  $k = 2$  и  $N_{\Sigma} = 10^5$

$$m_{\min} = \frac{\lg 2 \cdot 10^5}{\lg 2 \cdot 80} + 1 = 3,4 \approx 4.$$

Пусть теперь при  $k = 2$  и  $N_{\Sigma} = 10^7$

$$m_{\min} = \frac{\lg 2 \cdot 10^7}{\lg 2 \cdot 80} + 1 = 4,4 \approx 5.$$

Из примера следует, что изменение  $N_{\Sigma}$  на два порядка изменяет  $m_{\min}$  только на единицу. Это естественно, ибо увеличение системы передачи размера единицы какой-либо физической величины на одну ступень очень сильно увеличивает количество ИС, поверяемых при помощи данной системы. Все изложенное дает возможность при расчетах  $m_{\min}$  пользоваться ориентировочными данными о количестве ИС.

Число ИС, поверяемых непосредственно по эталону, можно оценить по формуле, полученной из (8). Приняв в (8),  $D_1 = 1$ ;  $l_1 = 1$ ;  $N_1 = 1$ ;  $m = 1$ , получим

$$N_2 = \frac{T_2}{t_2} \tau_2.$$

### Избыточность поверочной схемы

Оценим количество ИС, которое может быть поверено системой передачи размера единицы при  $m = 7$  и восьмидесяти рабочих эталонах\* по формуле (17). Тогда  $\lg 2N_{\Sigma} = (7 - 1)\lg 160 = 16,65$ ,  $N_{\Sigma} = 8,1 \cdot 10^{16}$ . Так как в настоящее время система передачи размера единицы плоского угла имеет 30 рабочих эталонов, то  $\lg 2N_{\Sigma} = (7 - 1)\lg 60 = 10,4$  и  $N_{\Sigma} = 1,25 \cdot 10^{10}$ .

В СССР имеется не более одного миллиона ИС плоского угла. В то же время система, построенная по общесоюзной поверочной схеме с семью ступенями точности при полной однородной загрузке образцовых ИС может обеспечить поверкой почти  $10^{17}$  ИС. Назовем отношение количества ИС, обеспечиваемых поверкой при максимально возможном числе ступеней, к количеству ИС в стране или в отрасли коэффициентом избыточности системы передачи размера единицы физической величины или в сокращенной форме — коэффициентом избыточности поверочной схемы. Очевидно, что коэффициент избыточности поверочной схемы характеризует неполное использование об-

\* Это предельное количество рабочих эталонов, которое может быть в системе передачи размера единицы плоского угла.

разровых ИС для поверочных целей. Суммарный коэффициент избыточности  $u_{\Sigma}$  связан с коэффициентом избыточности каждой ступени зависимостью

$$u_{\Sigma} = u_{m-1} u_{m-2}^2 u_{m-3}^3 \dots u_1^{m-1}. \quad (19)$$

где  $u_i$  — коэффициент избыточности  $i$ -й ступени.

Из формулы (19) следует, что суммарный коэффициент избыточности в большей степени зависит от коэффициента избыточности исходного образцового ИС (эталоны), чем от коэффициента избыточности образцовых ИС низших разрядов.

Назовем средним коэффициентом избыточности одной ступени поверочной схемы величину, определяемую уравнением

$$\bar{u} = (u_{\Sigma})^{\left(1 / \sum_{l=1}^{m-1} l\right)}. \quad (20)$$

Эта характеристика нагляднее, чем суммарный коэффициент избыточности. Она показывает, во сколько раз больше ИС может быть поверено образцовыми ИС одного разряда, чем поверяется в настоящее время. Например, пусть система передачи размера единицы физической величиной может обеспечить поверкой  $10^{10}$  ИС, а в наличии имеется только  $10^6$  ИС. Тогда суммарный коэффициент избыточности будет  $u_{\Sigma} = 10^{16}$ . Допустим, что в поверочной схеме семь ступеней, тогда средний коэффициент избыточности, вычисленный по формуле (20), составит  $\bar{u} = (10^{16})^{1/3} = 3$ . Это означает, что при полной нагрузке однородными поверками образцовые ИС любого разряда могут поверить втрое больше ИС, чем требуется. Уменьшим средний коэффициент избыточности. Для этого исключим один разряд образцовых средств. Тогда общее число ступеней уменьшится до шести, а количество поверяемых ИС — до  $N_{\Sigma} = 10^{11}$ .

Суммарный коэффициент избыточности также уменьшится до  $u_{\Sigma} = 10^5$  и средняя избыточность будет  $\bar{u} = 2,15$ . В этом случае при полной нагрузке с помощью образцовых ИС каждого разряда можно поверить вдвое больше ИС, чем требуется.

Некоторая избыточность на ступенях поверочной схемы необходима по следующим причинам:

- 1) необходим резерв образцовых средств на случай отказа;
- 2) поверитель может поверять средства измерений нескольких физических величин, затрачивая на каждое из них часть рабочего времени;
- 3) экономически выгоднее использование своего образцового средства, на применение которого затрачивается лишь часть рабочего времени, чем сдавать ИС на госповерку;
- 4) имеются малораспространенные рабочие средства измерений, для поверки которых необходимо специальное средство измерений, несмотря на то, что оно будет заведомо недогружено;
- 5) особенности системы передачи размера единицы данной физической величины требуют дополнительных разрядов образцовых средств. Например, непосредственная передача размера единицы от стационарной поверочной установки высшего разряда к стационарным установкам нижестоящего разряда невозможна. В таком случае применяют образцовую меру, образующую дополнительный разряд;
- 6) исторически сложилась определенная система передачи единиц физических величин, для изменения которой в направлении рационального построения требуется время и замена оборудования.

Однако следует помнить, что наличие парка образцовых средств, значительно превышающего необходимое количество, экономически невыгодно. Поэтому следует допускать среднюю избыточность для разрядов образцовых средств не более двух. Можно получить формулы для более точного расчета числа ступеней поверочной схемы. Однако это в большинстве случаев не имеет смысла. В зависимости от обстоятельств могут играть важную роль одни факторы и не действовать другие, а часто менять установлен-

ную поверочную схему невозможно, так как это потребует огромных затрат на замену оборудования и переаттестацию образцовых ИС. Поэтому следует ограничиться оценками минимального и максимального числа ступеней и оценкой избыточности.

Изложенная в статье методика была применена для анализа общесоюзной поверочной схемы для средств измерений плоского угла по ГОСТ 8.016-75, имеющей семь ступеней точности. Установлено, что минимальное число ступеней равно четырем, а максимальное — семи. Средний коэффициент избыточности равен трем; исключение 4-го разряда образцовых ИС уменьшит его до 2,15, что экономически выгодно и не наносит ущерба системе передачи размера единицы плоского угла.

### Выводы

При теоретических расчетах поверочной схемы следует оценивать минимально необходимое и максимально возможное число ступеней.

Минимальное число ступеней определяется общим количеством проверок, которое необходимо провести за межповерочный интервал; максимальное число ступеней — суммарным запасом точности и средним соотношением точности между ступенями.

Поверочная схема должна обладать средней избыточностью не более двух.

*Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.*

УДК 53.089.68:006.44

*М. С. Педая, М. Н. Селиванов*

ВНИИМ

### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГОСТ 8.057—73 ПРИ СОЗДАНИИ И РАЗВИТИИ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ СТРАНЫ

Начало стандартизации образцовых мер и образцовых измерительных приборов относят к 1933 г., когда был утвержден общесоюзный стандарт ОСТ ВКС 6101 «Образцовые меры и образцовые измерительные приборы», разработанный проф. М. Ф. Маликовым. В 1942 г. этот стандарт был заменен ГОСТ 1453—42, который в 1954 г. заменен «Положением об эталонах, разрядных мерах и образцовых измерительных приборах», утвержденным Главной палатой мер и измерительных приборов СССР.

Разработанный во ВНИИМ ГОСТ 16263-70 устанавливает терминологию в области метрологии. В частности, в нем определены термины «эталон», «первичный эталон», «вторичный эталон», «специальный эталон», «государственный эталон», «рабочий эталон» и ряд других. Единообразие терминов необходимо метрологам при создании эталонной базы. Классификация эталонов, принятая в ГОСТ 16263-70, была узаконена в ГОСТ 8.057-73, устанавливающим порядок утверждения, хранения и применения эталонов и образцовых средств измерений. Этот важнейший нормативно-технический документ, разработанный ВНИИМ и ВНИИФТРИ, был положен в основу при разработке плана создания и совершенствования эталонной базы СССР.

Стандартом предусматриваются централизованное и децентрализованное воспроизведение единиц физических величин. В первом случае необходимы государственные первичные и специальные эталоны, во втором — поверочные установки высшей точности или образцовые средства измерений, которые могут применяться в различных органах метрологической службы. Предусмотрено создание вторичных эталонов, как промежуточного звена в цепи передачи размера единицы от государственных эталонов образцовым средствам измерений. Стандартом допускается возможность хранения и приме-



ния рабочих эталонов в ведомственных органах метрологической службы, установлен единый порядок утверждения этих эталонов, что также имеет немаловажное значение при создании эталонной базы.

Этот стандарт, а также разработанная на его основе инструкция позволяют метрологическим институтам осуществлять подготовку государственных эталонов к утверждению по единым правилам.

Перед утверждением эталона его должна обследовать и детально с ним ознакомиться междуведомственная комиссия. Кроме того, должно быть определено соответствие уровня точности эталона мировому уровню, а также соответствие условий хранения и применения эталона установленным правилам. Только при положительном заключении этой комиссии эталон может быть утвержден.

Практика создания и утверждения государственных эталонов СССР показывает, что установленные ГОСТ 8.057-73 правила и положения успешно реализуются. Вначале были созданы и утверждены государственные первичные эталоны основных единиц — метра, килограмма, секунды, ампера, кельвина и кандела, а также дополнительной единицы — радиана. Вопрос о централизации производных единиц и создания для этой цели государственных первичных и специальных эталонов решается в каждом конкретном случае.

Необходимость создания первичных и специальных эталонов обусловлена бурным ростом числа применяемых в стране средств измерений. В настоящее время измерения на производстве и в научных исследованиях составляют не менее десяти доли общественного труда, а в ряде отраслей, например в космической технике, на их долю приходится более половины всех затрат. Значительно возрастают требования к повышению точности измерений, расширению их диапазонов. Измерения необходимы в области высоких, сверхвысоких и низких температур, высоких и малых давлений (высокого вакуума), при воздействии вибраций, ударных ускорений, при высоких и сверхвысоких частотах и т. п.

Парк измерительных приборов непрерывно возрастает, общее число находящихся в обращении средств измерений достигает полумиллиарда. Наряду с ростом числа серийно выпускаемых приборов увеличивается число новых разработок, в том числе приборов специального назначения и измерительных установок. Все большее распространение получают измерительные системы. В этих условиях передача размера единицы от одного первичного эталона широко разветвленной сети средств измерений стала практически неосуществимой. Необходимы эталоны, обеспечивающие воспроизведение единицы и передачу ее размера средствам измерений, предназначенным для особых условий.

В качестве примера рассмотрим измерения давления. Государственный первичный эталон единицы давления — паскаля — обеспечивает воспроизведение единицы в диапазоне  $(6 \div 60) \cdot 10^5$  Па со средним квадратическим отклонением результата измерений  $6 \cdot 10^{-6}$ . Согласно поверочной схеме (ГОСТ 8.017-75), первичный эталон обеспечивает передачу размера единицы давления вакуумметрам, мановакуумметрам и манометрам избыточного давления с пределами измерений до  $6000 \cdot 10^5$  Па. Однако эта поверочная схема охватывает лишь часть приборов для измерений давления.

Для обеспечения единства измерений в области высоких избыточных давлений и низких абсолютных давлений созданы и утверждены следующие специальные эталоны: специальный эталон единицы давления в диапазоне  $(2500 \div 15000) \cdot 10^5$  Па (ГОСТ 8.094-73), обеспечивающий воспроизведение единицы со средним квадратическим отклонением результата измерений  $4 \cdot 10^{-5}$ ; специальный эталон единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне  $10^{-3} - 10^3$  Па (ГОСТ 8.107-74) со средним квадратическим отклонением результата  $(2 \div 1) \cdot 10^{-2}$ . Дополнительно к перечисленным в настоящее время подготовливаются к утверждению специальные эталоны единицы давления для абсолютных давлений и для разности давлений. Кроме того, ведутся работы по созданию специальных эталонов для области переменных давлений.

В области измерений акустических величин утверждены государственные эталоны единицы звукового давления в воздушной и водной средах (ГОСТ 8.038-75 и ГОСТ 8.124-75).

В области измерений температуры, наряду с первичным эталоном, имеется ряд специальных эталонов для воспроизведения единицы температуры в разных диапазонах (ГОСТ 8.078-73, ГОСТ 8.084-73, ГОСТ 8.079-73, ГОСТ 8.080-73). Комплексы эталонов имеются также и в других областях измерений.

Каждый государственный эталон утверждается Госстандартом СССР, причем одновременно утверждается стандарт, придающий эталону законную силу и определяющий его роль в народном хозяйстве. Стандарт устанавливает, что в основу всех измерений в стране должна быть положена единица, воспроизводимая данным государственным эталоном. Стандарт устанавливает общесоюзную поверочную схему, регламентирующую порядок передачи размера единицы рабочим средствам измерений, основные методы и точность проверки. Разработка этого вида документов ведется в соответствии с базовым ГОСТ 8.061-73 и способствует упорядочению внедрения эталонов в практику.

Право утверждения вторичных эталонов (эталон-копий, эталонов-свидетелей, эталонов сравнения и рабочих эталонов) предоставлено институтам, в которых хранятся государственные эталоны той же единицы. Количество вторичных эталонов определяется потребностями народного хозяйства страны (в основном рабочие эталоны), необходимостью обеспечивать возможность сравнения эталонов друг с другом и с эталонами других стран (эталон сравнения), необходимостью уменьшить до минимума износ государственного эталона и вероятность его повреждения (эталон-копия), а также необходимостью контроля неизменности единицы, воспроизводимой государственным эталоном (эталон-свидетель). Рабочие эталоны целесообразно создавать в тех случаях, когда имеется широко разветвленная сеть образцовых средств измерений I-го разряда.

Если имеется комплекс государственных эталонов, воспроизводящих единицу данной физической величины в разных условиях (например, при различных частотах), то в качестве первичного утверждаются эталон, обеспечивающий наивысшую точность, остальные получают статус специальных. Однако в ГОСТ 8.057-73 не дано четких указаний на случай, когда создаются эталоны единиц физических величин, разных по природе, но одинаковой размерности. При этом иногда возникают трудности с выбором первичного эталона.

В практике применяется одна и та же единица — градус для плоского угла, угла вращения плоскости поляризации линейно поляризованной световой волны, а также угла сдвига фаз между двумя электрическими напряжениями; для единицы первой физической величины утвержден первичный эталон, для второй и третьей — специальные. Однако не ясно, обосновано ли отнесение этих эталонов к одному комплексу, поскольку различны природа соответствующих физических величин и методы и средства их измерений.

Из-за отсутствия сформулированных критериев, которые давали бы возможность однозначно решать вопрос о составе эталонов в период подготовки эталонов к утверждению, в ряде случаев возникают серьезные трудности. Если воспроизведение и хранение единиц осуществляется мерой, совокупностью однотипных мер или набором мер, то при формировании состава эталона вопросы не возникают. В этих случаях в состав эталона включаются указанные меры и средства передачи размера единицы от государственного эталона вторичным эталонам или образцовым средствам измерений. Например, в состав эталона единицы массы включена гиря — платиновый прототип № 12 и эталонные веса; в состав эталона единицы электродвижущей силы включена группа из 20 насыщенных нормальных элементов и компаратор. Когда же воспроизведение единиц осуществляется с помощью комплекса измерительных приборов и специального оборудования или комплекса приборов и мер, имеется два варианта состава эталонов. В первом

варианте эталоны обеспечивают воспроизведение единицы только в процессе передачи ее размера; в их состав входят только измерительные приборы. Во втором — эталоны обеспечивают воспроизведение единицы как в процессе передачи, так и независимо от передачи. В состав этих эталонов включены измерительные приборы и средства воспроизведения физической величины.

Примером эталонов, представленных по первому варианту, является первичный эталон единицы температурного коэффициента линейного расширения (ГОСТ 8.018-72) (в состав эталона входят два dilatометра), специальные эталоны единиц твердости по шкалам Бринелля, Виккерса, Роквелла и Сундер-Роквелла (ГОСТ 8.062-73, ГОСТ 8.063-73, ГОСТ 8.064-73), первичный эталон единицы активности нуклидов (ГОСТ 8.033-74).

Из эталонов, сформированных по второму варианту, можно назвать первичный эталон единицы плоского угла (ГОСТ 8.016-72), в состав которого включены угломерная автоколлимационная установка и 36-гранная кварцевая призма; первичные эталоны единиц удельной теплоемкости (ГОСТ 8.141-75) и теплопроводности (ГОСТ 8.140-75), в состав которых входят калориметры, измерительная аппаратура и специальные меры теплоемкости и теплопроводности; специальный эталон единицы угла вращения плоскости поляризации линейно-поляризованной волны (ГОСТ 8.108-74), в составе которого имеется поляриметр, источник излучения и кварцевая пластинка, задающая угол вращения плоскости поляризации; специальный эталон единицы длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела (ГОСТ 8.138-75), включающий вибраторы, создающие колебания и средства измерений.

В соответствии с ГОСТ 8.057-73 (п. 2.1.) государственные эталоны должны представлять собой «комплексы средств измерений и вспомогательных устройств, обеспечивающие возможность воспроизведения единицы, и, в необходимых случаях, ее хранения, а также передачи размера единицы вторичным эталонам». Из этого следует, что эталон должен обеспечивать воспроизведение единицы независимо от передачи. Поэтому формирование состава эталона по второму варианту представляется более обоснованным.

В стандартах на эталоны еще не достигнуто единообразие по форме представления состава эталонов. В некоторых стандартах сведения о составе эталонов содержат слишком общие данные о средствах измерений. Например, указывается вакуумный блок с комплектом из трех счетчиков внутреннего наполнения, блок управления, пересчетные блоки, блок усилителя и дискриминатор, блок таймера, блок осциллографа, блок питания (ГОСТ 8.039-72) или система создания расхода газа, аппаратура для измерений расхода газа, аппаратура для измерений давления и температуры, испытательный участок, пульт управления (ГОСТ 8.143-75). Перечисленные выше средства ни в какой мере не характеризуют эталон. Кроме того, пульт управления, блоки питания, испытательный участок не являются средствами измерений. При перечислении входящих в состав эталона средств измерений необходимо указывать их метрологические параметры, а для специальных и уникальных средств измерений — также наиболее характерные особенности этих средств, раскрывающие их специфику.

Следует остановиться на средствах передачи размера единиц. Так, в стандартах на государственные эталоны и общесоюзные поверочные схемы в состав государственных эталонов включены средства передачи размера единиц нижестоящим по поверочной схеме вторичным эталонам или образцовым средствам измерений. Вторичные эталоны в этих стандартах представлены без средств передачи размера единицы. Принимая во внимание, что в ряде случаев одно и то же средство передачи применяется для передачи размера единицы не от одного, а от двух и более вторичных эталонов, такое положение можно считать приемлемым. Однако обязательно выполнение условия, чтобы в правилах хранения и применения вторичных эталонов были указаны средства передачи, или в крайнем случае, четко сформулированы требования к метрологическим параметрам этих средств.

Следует дополнить инструкцию по применению ГОСТ 8.057-73 и указать следующие критерии определения состава эталона. В состав государственного

эталона включают: средства измерений, применяемые для определения значения физической величины, воспроизводимой государственным эталоном; средства измерений, предназначенные для передачи размера единицы от государственного эталона нижестоящим вторичным эталонам или образцовым средствам измерений (средства передачи); средства воспроизведения физической величины.

В состав вторичного эталона включают средства измерений, обеспечивающие хранение единицы, полученной от государственного эталона.

Вопрос о согласовании размеров единиц, воспроизводимых первичным и специальными эталонами, имеет существенное значение с точки зрения единства измерений. Особенно это важно в случаях, когда диапазоны измерений измерительных средств, включенных в поверочные схемы, возглавляемые первичными и специальными эталонами, близки или совпадают друг с другом. Поэтому было бы целесообразно в п. 2. 4. ГОСТ 8.057-73 внести дополнение о том, что размер единицы, воспроизводимой специальным эталоном, должен быть согласован с размером единицы, воспроизводимой соответствующим первичным эталоном.

На 1 января 1975 г. в соответствии с этим стандартом уже утверждено 65 государственных эталонов. Таким образом, ГОСТ 8.057-73 является важным базовым стандартом, на основании положений которого создается и развивается эталонная база страны.

*Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.*

УДК 006.063:681.2:001.4

*М. Н. Селиванов*

ВНИИМ

### **О СОДЕРЖАНИИ ПОНЯТИЯ «МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ»**

На практике нередко возникают вопросы, касающиеся содержания метрологической аттестации, как например, о различиях между метрологической аттестацией и поверкой, о средствах измерений, подлежащих метрологической аттестации, о виде, содержании и форме выдаваемого документа. Кроме того, широко распространено неверное выражение «метрологическая аттестация и утверждение», относящееся к одному и тому же средству измерений (например, к эталону). Это свидетельствует о том, что хотя чисто метрологический аспект этой операции достаточно хорошо освещен в литературе [1-5], а также в отечественных и международных нормативно-технических документах в области метрологии, все же правовой аспект ее остается не выясненным\*.

С метрологической точки зрения, метрологическая аттестация есть всестороннее исследование органом метрологической службы вновь изготовленного конкретного средства измерений с целью выявления его действительных метрологических параметров (например, погрешности, диапазона измерений или действительного значения). Важное значение имеет исследование неизменности метрологических параметров во времени, изучение действия влияющих величин, определение условий применения средства измерений.

С правовой точки зрения, метрологическая аттестация есть один из способов первичного признания законным конкретного средства измерений, например, признание законным средства измерений в качестве рабочего или образцового, измерительной установки в качестве поверочной.

\* См. ГОСТ 16263—70 «ГСИ. Метрология. Термины и определения»; ГОСТ 8.057—73 «ГСИ. Порядок утверждения, хранения и применения эталонов и образцовых средств измерений»; МС 14—71 СЭВ «Метрология. Термины и определения».



С целью метрологического обеспечения аттестованного средства измерений целесообразно на основании исследований, выполняемых при метрологической аттестации, как и при государственных приемочных испытаниях, устанавливать минимум тех операций, которые необходимо выполнять в дальнейшем при периодической поверке этого средства измерений, а также рекомендовать межповерочный интервал. Если же организация, проводившая метрологическую аттестацию, утвердит и методику поверки, то это решит задачу дальнейшего метрологического обеспечения этого средства, что важно с точки зрения единства измерений.

Факт признания средства измерений законным должен быть подтвержден документально, поэтому на средство измерений, прошедшее метрологическую аттестацию, следует выдать документ, разрешающий владельцу пользоваться средством измерений в том качестве, которое указано в этом документе. Таким документом должно быть свидетельство о метрологической аттестации. Оно должно содержать указание о том, что средство измерений прошло метрологическую аттестацию и признается годным к применению в качестве уникального рабочего или образцового средства измерений (или поверочной установки) с указанием рекомендуемого межповерочного интервала, а также значения метрологических параметров и примененных методов исследования с перечислением образцовых средств измерений.

Метрологический аспект как первичной, так и периодической поверки заключается в контроле метрологических параметров конкретного средства измерений на соответствие ранее установленным и указанным в нормативно-технических документах. С метрологической точки зрения, поверка есть тоже исследование средства измерений, но менее подробное, чем при метрологической аттестации или государственных испытаниях, однако достаточное для того, чтобы установить его пригодность для применения в том качестве, которое было установлено ранее. Иногда при первичной поверке выполняются более подробные исследования, чем при периодической, однако в обоих случаях основой поверки является ее контрольная функция. С правовой точки зрения, поверка — вид метрологического надзора за средствами измерений, ранее признанными законными, при котором устанавливается, находится ли данное средство измерений в том ранге, который ему был присвоен при государственных испытаниях или метрологической аттестации.

Таким образом, между поверкой и метрологической аттестацией имеется существенное различие как с метрологической, так и с правовой точек зрения. Во-первых, при метрологической аттестации на основании тщательных исследований выявляются метрологические свойства нового средства измерений (или в новом качестве), тогда как при первичной или периодической поверках выполняются по существу только контрольные функции: контролируются те параметры, которые были установлены ранее (при госиспытаниях или метрологической аттестации). Во-вторых, на основании метрологической аттестации средству измерений присваивается определенный ранг (например, образцовое или рабочее) и его владельцу дается право применять это средство в этом качестве. Путем же периодической поверки подтверждается соответствие средства измерений установленному ранее рангу.

Какие средства измерений должны подвергаться метрологической аттестации? В соответствии с правилами, установленными государственными стандартами, аттестации должны подвергаться средства измерений, изготовленные или импортируемые малыми партиями для применения их внутри ведомства, уникальные рабочие средства измерений, средства измерений, предназначенные для применения в качестве образцовых\*. Очевидно, что к ним относятся и те вновь изготовленные средства измерений, которые не подлежат государственным испытаниям или утверждению, а применение их необходимо.

\* См. ГОСТ 8.001—71 «ГСИ. Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений»; ГОСТ 8.002—71 «ГСИ. Организация и порядок проведения поверки, ревизии и экспертизы средств измерений».



В зависимости от метрологической роли средств измерений, их аттестация должна производиться либо органами государственной, либо ведомственных метрологических служб, имеющих необходимые средства (образцовые средства измерений требуемой точности или эталоны), которым дано на это право. При этом метрологическая аттестация средств измерений в качестве образцовых, указанных в п.3.1.2. ГОСТ 8.002-71, должна производиться только органами государственной метрологической службы.

Поскольку утверждение эталонов и метрологическая аттестация представляют собой самостоятельные способы признания законными средств измерений, становится очевидной неправомерность выражения «метрологическая аттестация и утверждение эталона». Во-первых, потому, что в результате как метрологической аттестации, так и утверждения выдается документ, на основании которого это средство измерений признается законным в стране, но выдавать два документа на одно и то же средство измерений бессмысленно. Во-вторых, потому, что эталоны в соответствии с установленными правилами подвергаются исследованию и утверждению, а не метрологической аттестации.

С учетом правового аспекта целесообразно дать новое определение термина при пересмотре ГОСТ 16263-70 «Метрология. Термины и определения».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Маликов М. Ф.** Основы метрологии. М., Изд. Комитета по делам мер и измерительных приборов при СМ, 1949, 479 с.
2. **Маликов С. Ф., Тюрин Н. И.** Введение в метрологию, М., Изд. стандартов, 1966, 240 с. с ил.
3. **Широков К. П.** Общие вопросы метрологии, М., «Машиностроение», 1967, 94 с. с ил.
4. **Тюрин Н. И.** Введение в метрологию, М., Изд. стандартов, 1973, 279 с. с ил.
5. **Бурдун Г. Д., Марков Б. Н.** Основы метрологии, М., Изд. стандартов, 1972, 318 с. с ил.

*Получила в редакцию 5/IX — 1975 г.*

УДК 681.2.089.6.006.44

**С. Б. Рабинов**

ВНИИМ

#### ИЗ ОПЫТА РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ ПО ПОВЕРКЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ \*

Разработка проектов стандартов и методик поверки средств измерений опирается на основополагающие нормативные документы, которые регламентируют как планирование, порядок разработки и внедрения разрабатываемых нормативно-технических документов, так и требования к собственно нормативному документу по поверке. Так, к основным документам, устанавливающим порядок планирования, разработки и внедрения, относятся ГОСТ 1.0-68 «ГСС. Общие положения»; ГОСТ 1.2-68 «ГСС. Порядок разработки и утверждения государственных и отраслевых стандартов»; ГОСТ 1.20-69 «ГСС. Порядок внедрения государственных стандартов». Вопросы формы и порядка изложения материала регламентируются ГОСТ 1.5-68 «ГСС. Построение, со-

\* Статья отражает опыт редактирования проектов государственных стандартов (далее называемых стандартами) и методик метрологических институтов Госстандарта СССР (далее называемых методиками) поверки средств измерений, разрабатываемых во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, а также опыт анализа аналогичных документов, поступающих на отзыв.

держанию и изложению стандартов». Требования к построению, содержанию и изложению стандартов методов и средств поверки мер и измерительных приборов изложены в ГОСТ 8.042-72 «ГСИ. Требования к построению, содержанию и изложению стандартов методов и средств поверки мер и измерительных приборов». Там же изложен ряд важных общих положений, касающихся этих стандартов. При составлении нормативных документов должны соблюдаться также два документа общего характера — проект государственного стандарта «Единицы физических величин» и ГОСТ 16263-70 «ГСИ. Метрология. Термины и определения»\*.

В настоящей статье сделана попытка дать некоторые дополнительные разъяснения и рекомендации по разработке стандартов и методик поверки средств измерений.

В упомянутых ранее основополагающих документах не отражен (или недостаточно четко отражен) ряд вопросов, требующих решения, а именно: целесообразность и срок начала разработки того или иного нормативного документа;

вопросы общего характера;

выбор средств поверки и указание требований к ним;

выводы по результатам поверки;

формулирование необходимых технических требований к объекту поверки.

Нередко возникает вопрос о целесообразности разработки (пересмотра) нормативного документа или о выборе вида документа (стандарт, методика). Если средство измерений изготовлено в одном-трех экземплярах и находится только у разработчика (либо в одной-двух организациях), а дальнейшее изготовление его в ближайшее время не предвидится, то, при необходимости, следует разработать инструкцию или ведомственную методику для использования внутри организации, но не документ общесоюзного значения.

Если же средство измерений уже не выпускается или должно быть снято с производства, то имеющиеся стандарт, инструкцию или методические указания по поверке этих средств можно оставить в действии. Если же таких документов нет, то вопрос о необходимости разработки нового нормативного документа на поверку решается в зависимости от числа находящихся в эксплуатации средств измерений и степени их морального устарения.

До включения в план разработки нормативного документа по поверке следует выяснить, имеются ли условия для разработки проекта стандарта или же следует разработать методику. При этом область распространения стандарта и средства, применяемые при поверке по стандарту, должны удовлетворять требованиям ГОСТ 8.042-72. Надо также принимать во внимание срок, в течение которого может быть реализован план мероприятий по введению стандарта.

Методики следует разрабатывать в тех случаях, когда отсутствует ряд условий для утверждения стандарта и внедрения его, но требуется ознакомить поверочные органы с полученными в данной области результатами.

Нормативный документ предпочтительнее составлять на группу однотипных средств измерений и нежелательно — на отдельные разновидности приборов, установок и т. п.; в последнем случае также рекомендуется разрабатывать методики.

\* Кроме вышеперечисленных стандартов, рекомендуется пользоваться следующими нормативными документами: ГОСТ 8.002-71 «ГСИ. Организация и порядок проведения поверки, ревизии и экспертизы средств измерений»; ГОСТ 8.061-73 «ГСИ. Содержание и построение поверочных схем»; ГОСТ 8.057-73 «ГСИ. Порядок утверждения, хранения и применения эталонов и образцовых средств измерений»; ГОСТ 13600-68 «ГСИ. Средства измерений. Классы точности. Общие требования»; ГОСТ 14263-69 «ГСИ. Общие требования к стандартным образцам веществ и материалов»; МУ 2-73. «Методические указания о порядке разработки и согласования требований безопасности в стандартах и технических условиях». М., Изд. стандартов, 1973.

После того как вопрос о необходимости нормативного документа решен положительно, следует наметить срок начала его разработки. Начало разработки нормативного документа может быть включено в план на ближайšie один-два года, если уже разработана методика поверки и имеется стандарт технических требований (ТТ) или технических условий (ТУ) к поверяемым средствам измерений.

Если стандарт ТТ(ТУ) еще разрабатывается или пересматривается или его разработка (или пересмотр) намечена на ближайшее время, то разработку нормативного документа на поверку планируют таким образом, чтобы в его первой редакции могли быть учтены требования проекта стандарта ТТ(ТУ), а окончательная редакция могла разрабатываться после утверждения стандарта ТТ(ТУ). Откладывать же начало разработки первой редакции до утверждения стандарта ТТ(ТУ) нецелесообразно, так как нормативный документ по поверке по срокам неоправданно «отстанет» (в среднем на полгода-год). В тех случаях, когда проект стандарта ТТ(ТУ) разрабатывается в той же организации, что и проект нормативного документа на поверку, возможна их параллельная разработка с одновременным утверждением обоих проектов.

Если же сама методика поверки еще не разработана, то начало разработки первой редакции нормативного документа должно быть намечено с учетом времени, затрачиваемого на теоретическую разработку и экспериментальное опробование методики поверки.

Планированию надо уделять должное внимание. Неудачное, необоснованное планирование приводит к тому, что уже в процессе работы над нормативно-техническим документом приходится прибегать к корректировке планов, которая возможна лишь в определенные сроки относительно конца планируемого этапа работы.

Остановимся подробнее на некоторых общих замечаниях по составлению нормативного документа.

Нормативный документ по поверке должен представлять собой руководство к действиям поверителя, изложенное настолько полно и ясно, чтобы не возникало вопросов; в то же время его текст должен быть кратким и не содержать излишних подробностей и теоретических выводов, не нужных непосредственно для работы. Излишними, например, являются описания каких-либо действий поверителя, условий поверки и др., не влияющих на результаты поверки. Не следует также включать описания действий, процессов, способов обработки результатов наблюдений и пр., хотя и влияющих на результаты поверки, но широко известных из технической документации или литературы, отсутствие которых при известной квалификации поверителя не может вызвать разногласий в истолковании документа. Исключение составляют описания, содержащие назначение и принцип действия поверяемых и образцовых средств измерений и вспомогательных устройств, которые в целях большей доступности материала рекомендуется помещать в приложениях к методикам, когда эти сведения трудно получить из других источников, особенно для новых разработок.

Одним из уязвимых мест нормативного документа являются ссылки на другие документы. Необходимо тщательно проверять материал, на который даются ссылки, чтобы исключить неверные ссылки, а также для контроля полноты сведений.

При ссылках на стандарты, по которым выпускаются поверяемые средства измерений, нужно приводить стандарты на выпуск именно этих средств, но не стандарты общих ТТ(ТУ). В последнем случае надо писать, например, не «... приборы по ГОСТ 1845-59...», а «... приборы, на которые распространяется ГОСТ 1845-59...», если в таком упоминании вообще есть необходимость.

Как известно, в эксплуатации, кроме средств измерений, удовлетворяющих в качестве объекта поверки требованиям ГОСТ 8.042-72, находится много аналогичных приборов, не удовлетворяющих этим требованиям. Поэтому в проекты стандартов в необходимых случаях следует вводить примечание о возможности применять методику данного стандарта для поверки средств измерений с метрологическими параметрами, которые аналогичны

параметрам средств измерений, на которые распространяется стандарт. Это позволит распространить эту методику на приборы старых выпусков, иностранные и др.

Нередко при составлении нормативного документа на средства измерений со встроенными измерительными приборами, мерами при описании отдельных операций неправильно употребляют термин «поверка» по отношению к этим встроенным приборам, мерам. В таких случаях нужно писать, например, об определении погрешности встроенного прибора или об определении погрешности поверяемого средства измерений при таком-то значении встроенной меры. Понятие же «поверка» относится, во-первых, только к поверяемому средству в целом, а, во-вторых, включает в себя все операции, проводимые с целью установления пригодности его к применению.

Особое внимание следует обращать на применение единиц физических величин. В настоящее время подготавливается к утверждению проект государственного стандарта на единицы физических величин, в основу которого положены единицы Международной системы (СИ); Госстандарт СССР рекомендовал руководствоваться этим проектом. Однако заметим, что некоторые средства измерений еще градуируются в прежних единицах и будут эксплуатироваться до истечения срока применения этих единиц. В технической литературе и документации до последнего времени также употреблялись только прежние единицы. Поэтому в тех случаях, когда для измерений данной величины вводится новая единица, в нормативно-техническом документе значение этой величины следует указывать и в новых, и в прежних единицах; одно из значений (в прежних единицах) указывается в скобках. Если же в нормативный документ вносятся только отдельные изменения, то пользуются единицами, уже примененными в данном документе.

Серьезное внимание должно уделяться структуре документа, т. е. соподчиненности подразделов, пунктов и подпунктов. В подпункты или пункты выделяются равнозначимые, но различные по содержанию части текста, которые объединяются по смыслу, соответственно, в пункты или подразделы и т. д. Только правильно установленная соподчиненность дает логически стройное описание последовательности проведения операций и обработки результатов поверки.

Одной из главных задач разработчика является выбор средств поверки и указание тех требований, которым эти средства должны удовлетворять. Если для соответствующего вида измерений разработана поверочная схема, образцовые средства измерений, необходимые для проведения поверки (и метод поверки), должны выбираться в соответствии с этой поверочной схемой.

Часто возникают трудности при указании в проекте стандарта (при составлении методик этот вопрос не возникает) образцовых средств измерений и вспомогательных средств поверки (вспомогательных средств измерений, вспомогательных устройств и приспособлений). Это относится к случаям, когда имеется возможность широкого выбора средств поверки, пригодных для выполнения данной операции, из числа уже применяемых в стране средств поверки, возможность приобретения импортных, а также вероятность появления вновь разработанных средств.

В соответствии с ГОСТ 8.042-72 в стандарте должны приводиться конкретные виды средств поверки и, соответственно, их конкретные характеристики. Правда, данный стандарт допускает вводить примечание к таблице или перечню средств поверки, разрешающее применение других средств поверки, удовлетворяющих необходимым условиям и, в частности, точностным требованиям разрабатываемого стандарта. Однако, если поверитель будет исходить из точностных параметров конкретно указанных средств поверки, не располагая другими указаниями, то такие требования могут оказаться более жесткими, чем это необходимо (например, в соответствии с требованиями ГОСТ 8.042-72 в стандарте может быть приведено образцовое средство измерений с пятикратным запасом по точности по отношению к поверяемому, в то время как в принципе вполне достаточно трехкратного запаса). Требования же к точности средств поверки с учетом норм, которым должны удовлетворять поверяемые средства измерений, должен определять



разработчик стандарта, но не поверитель. Поэтому в целях возможности использования других средств поверки в стандарте рекомендуется указывать предельные, соответствующие наибольшей допускаемой в данном случае погрешности измерений, параметры средств поверки. Это можно осуществить в двух вариантах:

1) после перечня (таблицы), где указаны конкретные средства поверки, дается примечание такого содержания: «Допускается применение других средств поверки, удовлетворяющих по точности требованиям настоящего стандарта. Предельные значения параметров таких средств приведены в приложении (номер приложения)». К стандарту вводится приложение «Предельные значения параметров средства поверки, удовлетворяющих требованиям настоящего стандарта».

2) в основном перечне (таблице) приводятся средства поверки в общем виде (наименование и предельные параметры), а ниже — ссылка на приложение с названием «Средства поверки, применяемые согласно настоящему стандарту», в котором указываются конкретные средства поверки с их характеристиками.

Отметим, что указание широко распространенных средств поверки (например, вольтметра, термометров) только в общем виде возражений не вызывает.

При составлении методик, после указания средств поверки в общем виде, конкретные средства могут быть приведены здесь же в тексте (в качестве примера).

Далее следует ввести пункт такого содержания: «Все средства поверки должны иметь действующий документ о их поверке или метрологической аттестации».

Не менее важны выводы, которые должен сделать поверитель по результатам поверки. Как следует из ГОСТ 8.042-72, если в ходе поверки будет обнаружено, что поверяемое средство измерений не соответствует какому-либо из установленных требований, оно должно быть забраковано. Однако на практике встречаются более сложные случаи. Так, при оформлении результатов поверки многопредельных или комбинированных средств измерений или средств измерений, имеющих более одного входа или выхода (например, импульсный и релейный), когда неисправность средства обнаружена, например, только на одном диапазоне, при измерениях одной физической величины или при использовании только одного из входов или выходов, в целях хотя бы частичного использования данного средства измерений (так же, как и в случае намеренно ограниченного применения по условиям эксплуатации, оговоренном в ГОСТ 8.002-71) оно может быть допущено к применению с соответствующим ограничением области применения.

Если по результатам поверки окажется, что средство измерений не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к тому разряду (классу), который ему был присвоен ранее, то, несмотря на просьбы организаций, понижать разряд (или класс) не разрешается. Помимо формальных оснований, это объясняется еще и тем, что выявленная нестабильность параметров этого средства снижает вероятность сохранения его исправного состояния при дальнейшей эксплуатации.

Полученные в результате поверки значения тех или иных параметров поверяемых средств измерений сравниваются с нормами, установленными в технических требованиях (технических условиях). Однако не всегда имеются соответствующие стандарты ТТ (ТУ). Чаще всего это относится к образцовым средствам измерений. И поэтому иногда бывает целесообразно к проекту нормативного документа ввести приложение «Основные технические требования к (наименование средств измерений)» и привести в нем требования, которые необходимо знать при поверке. Целесообразность в данном случае определяется количеством требований, а также тем, что иногда такое приложение может быть вообще первой упорядоченной публикацией этих требований.

*Поступила в редакцию 5/IX — 1975 г.*



## СОДЕРЖАНИЕ

### Основные понятия

<i>К. П. Широков.</i> Интерпретация уравнений связи между физическими величинами	3
<i>К. П. Широков.</i> Теоретические вопросы образования производных единиц	12

### Погрешности измерений и средств измерений

<i>Т. Н. Сирая.</i> Методы проверки статистической однородности групп наблюдений	20
<i>С. Г. Рабинович.</i> Общие методы нормирования и экспериментального определения погрешностей средств измерений	30
<i>Т. Л. Яковлева.</i> Стабильность распределений погрешностей измерительных приборов	34
<i>Е. А. Троицкий.</i> Выбор нормируемых характеристик флуктуаций выходного сигнала высокочувствительных приборов	37
<i>В. А. Грановский, С. Г. Рабинович.</i> Особенности средств для статических и динамических измерений	43
<i>В. А. Грановский.</i> Соотношение между динамическими погрешностями средств измерений при скачкообразном и молотонном входных сигналах	48
<i>А. Э. Фридман.</i> Связь между показателями надежности и точности совокупности средств измерений	51

### Автоматизация и повышение точности измерений

<i>А. С. Кустарев.</i> Основные направления конструирования средств комплексной автоматизации поверочных работ	61
<i>А. Я. Безикович, В. И. Прицкер, В. Д. Свердличенко.</i> Система функциональных блоков для автоматизации интерференционных измерений	66
<i>Б. С. Таубе.</i> Пути повышения точности сравнения периодически изменяющихся величин с постоянными	74
<i>Е. Э. Шапиро, С. П. Эскин.</i> Цифро-аналоговые преобразователи постоянного напряжения высокой точности	83
<i>О. Н. Гравин, В. А. Самарин.</i> Об автоматизации измерительного устройства для инфразвукового диапазона частот	91
<i>В. Я. Молочков.</i> Метрологические характеристики измерительных и стабилизирующих устройств на основе квантовой интерференции токов в сверхпроводниках	96
<i>А. Я. Безикович, Е. Э. Шапиро.</i> Об автоматизации средств воспроизведения единиц и передачи их размеров	101

### Стандартизация в метрологии

<i>К. А. Резник.</i> Определение числа ступеней поверочных схем	106
<i>М. С. Педан, М. Н. Селиванов.</i> Опыт применения ГОСТ 8.057—73 при создании и развитии эталонной базы страны	112
<i>М. Н. Селиванов.</i> О содержании понятия «метрологическая аттестация средств измерений»	116
<i>С. Б. Рабинов.</i> Из опыта разработки нормативно-технических документов по поверке средств измерений	118

## РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 53.081.4:51

**Интерпретация уравнений связи между физическими величинами.** Широков К. П.—«Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 3.

Физические уравнения трактуются как математические описания связей между величинами, существующих в физических объектах или явлениях. С помощью уравнений описываются те или иные модели объектов, причем для головных моделей, коэффициент в уравнении принято приравнивать единице. Определяющее уравнение описывает связь между производной величиной и так называемыми характеристическими элементами модели. В физических уравнениях буквенные символы означают величины, действия над символами выражают количественные связи между величинами в моделях реальных объектов или явлений. Обосновано, что при переходе от одной головной модели к другой и связанном с этим изменении формы уравнений (их рационализации) величины остаются инвариантными, изменяется лишь размер когерентной единицы определяемой величины. Библ. 14.

УДК 53.081.4

**Теоретические вопросы образования производных единиц.** Широков К. П.—«Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 12.

Рассматривая физические уравнения в тесной связи с описываемыми ими моделями объектов или явлений, автор выводит соотношения между производной единицей и величиной, воспроизводящей моделью, как для общего случая уравнения с производным коэффициентом, так и для важнейших частных случаев.

УДК 519.262

**Методы проверки статистической однородности групп наблюдений.** Сирая Т. Н.—«Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 20.

Рассматриваются методы проверки статистической однородности групп наблюдений. Дается обзор непараметрических критериев однородности, которые не предполагают нормальности распределений групп наблюдений, и их сравнительная характеристика. Приводятся рекомендации по применению наиболее распространенных непараметрических критериев однородности. Табл. 2. Библ. 9.

УДК 681.2.088:005.7

**Общие методы нормирования и экспериментального определения погрешностей средств измерений.** Рабинович С. Г.—«Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 30.

Формулируются цели и общие правила нормирования погрешностей средств измерений. Освещается практика нормирования погрешностей, отраженная в ГОСТ 13600-68 и других отечественных стандартах, а также в ряде международных документов. Рассматриваются методы определения соответствия средств измерений установленным нормам и возможность оценить инструментальную погрешность измерения по нормам погрешности средств измерений. Ил. 1. Библ. 3.

УДК 681.2.088 : 519.271

**Стабильность распределений погрешностей измерительных приборов.** Яковлева Т. Л. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 34.

Приведены результаты экспериментальной проверки стабильности параметров и вида функций распределений погрешностей приборов электронативной системы типа Э50 и измерителей мощности с. в. ч. типа МЗ-1. Для количественной характеристики использованы коэффициенты асимметрии и эксцесса. Показано, что с течением времени происходит существенное изменение параметров и вида функций распределений погрешностей. Табл. 4. Библи. 3.

УДК 621.391.822.3.088.7 : 066.7

**Выбор нормируемых характеристик флуктуаций выходного сигнала высококачественных приборов.** Троицкий Е. А. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 37.

Рассматриваются характеристики флуктуаций выходного сигнала высококачественных приборов, обусловленные шумами их элементов. Как показал анализ этих характеристик, в качестве нормируемой целесообразно использовать средний размах флуктуаций выходного сигнала с указанием длительности их реализации. В качестве примера рассматривается нормирование погрешности микровольметра МФК. Ил. 2. Библи. 7.

УДК 621.317.725.089.52—501.22 : 066.7

**Особенности средств для статических и динамических измерений** Грановский В. А., Рубиневич С. Г. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 43.

Рассматривается принцип разделения средств измерений (СИ) на средства, предназначенные для статических и динамических измерений. Формулируется задача оценивания динамических погрешностей для СИ каждой группы. Показано различие в оценивании динамических погрешностей СИ этих групп, обусловленное, в частности, различиями объемом априорной информации. Анализируются способы нормирования динамических свойств СИ, предназначенных для статических и динамических погрешностей, выработанные практикой. В качестве примера рассмотрено нормирование свойства вольтметра типа В4-II. Библи. 5.

УДК 621.391.832.2.501.22 : 519.281

**Соотношение между динамическими погрешностями средств измерений при скачкообразном и монотонном входных сигналах.** Грановский В. А. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 48.

Проведены сравнительные исследования динамических погрешностей средств измерений при скачкообразном и монотонном входных сигналах. Доказано неравенство А. А. Харкевича относительно квадратичной нормы динамической погрешности скачкообразного сигнала и ограниченных сигналов с монотонностью любого вида. Установлены ограничения области применения неравенства. Аналогичное неравенство доказано для максимального модуля погрешности. Библи. 2.

УДК 681.2.08 - 519.251

**Связь между показателями надежности и точности совокупности средств измерений.** Фридман А. Э. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 51.

Проведен анализ взаимосвязи стабильности, надежности и точности средств измерений (СИ). Дано определение установившегося процесса эксплуатации совокупности СИ одной модели, сформулированы условия существования свойства такого процесса. Выведено уравнение связи между показателями стабильности, надежности и точности совокупности СИ и даны результаты решения этого уравнения. Табл. 1. Ил. 2. Библи. 6.

УДК 621.317.799.089.6—52

**Основные направления конструирования средств комплексной автоматизации поверочных работ.** Кустарев А. С. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 51.

Рассмотрены основные направления конструирования средств комплексной автоматизации операций поверки измерительных приборов. Описаны преимущества и недостатки трех типов средств, применяемых для автоматизации поверочных работ. Приведено условие выбора оптимального типа средств автоматизации. Определены области эффективного использования автоматических средств поверки. Табл. 1. Ил. 2. Библи. 4.

**Система функциональных блоков для автоматизации интерференционных измерений.** Безикович А. Я., Привикер В. И., Свердловченко В. Д. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 66.

Рассмотрена возможность применения интерференции света для измерений различных физических величин в очерке круг задач, возникающих при автоматизации интерференционных измерений. Приведено обоснование номенклатуры функциональных блоков (ФБ), необходимых для решения указанных задач. Изложены принципы построения фотоэлектрических и аналого-дискретных преобразователей, а также исполнительных и регистрирующих устройств, образующих систему ФБ. Приводятся результаты разработки и экспериментального исследования ряда ФБ и намечены перспективы дальнейшей работы в этой области. Ил. 5. Табл. 2. Библ. 5.

**Пути повышения точности сравнения периодически изменяющихся величин с постоянными.** Таубе Б. С. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 74.

Повышение точности сравнения периодически изменяющихся величин с постоянными может быть достигнуто путем создания мер параметров периодического процесса. Преимущество такого подхода рассматриваются на примере источников опорного напряжения переменного тока с прямоугольной формой кривой (ИОН), воспроизводящих одновременно действующий и средний параметры сигнала переменного тока и позволяющих произвести непосредственное сравнение выходного сигнала с напряжением постоянного тока. Приведены важнейшие особенности таких ИОН. Подробно рассмотрены погрешности перехода от постоянного тока к переменному и способы их снижения.

Оценены итоги многолетней эксплуатации ИОН, созданных во ВНИИМ и обладающих высокой стабильностью воспроизведения напряжения переменного тока. Табл. 1. Ил. 3. Библ. 5.

**Цифро-аналоговые преобразователи постоянного напряжения высокой точности.** Шапиро Е. З., Эсхин С. П. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 83.

Приведен анализ метрологических и эксплуатационных показателей, предъявляемых к цифро-аналоговым преобразователям постоянного напряжения высокой точности. Рассмотрены вопросы оптимизации структур построения таких преобразователей при работе на переменную нагрузку.

Оцениваются основные составляющие погрешности структурным схем преобразователей и обосновывается выбор схемы точного цифро-аналогового преобразователя, состоящего из высокостабильного компенсационного источника опорного напряжения, параллельного дискретного делителя с управляющими ключами и выходного согласующего усилителя со 100%-й отрицательной обратной связью.

Приведены результаты разработки и экспериментального исследования выполненного по такой структурной схеме 14-разрядного цифро-аналогового преобразователя кл. 0,002, работающего в двоичном коде. Диапазон выходного напряжения преобразователя 0—10 В, допускаемый ток нагрузки 10 мА, способ задания выходного кода — ручной или автоматический с цифровой индикацией включенных разрядов и управлением от ЭВМ. Табл. 2. Ил. 5. Библ. 6.

**Об автоматизации измерительного устройства для инфразвукового диапазона частот.** Гравин О. И., Самарин В. А. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 91.

Рассмотрена функциональная схема автоматического устройства для измерения действующих токов и напряжений в диапазоне инфразвуковых частот, основанного на методе замещения, и приведены требования к элементам его измерительной цепи.

Изложены принципы построения указателя равновесия и обратного преобразователя частота-напряжение (унифицированных функциональных узлов) для замкнутой цепи уравновешивания на основе частотно-фазового преобразования для рассматриваемого автоматического устройства.

Приведены результаты разработки и экспериментальных исследований устройства для измерения тока и напряжения в диапазоне 0,001—50 Гц с погрешностью не более 0,05—0,1%. Библ. 5. Ил. 2.

Метрологические характеристики измерительных и стабилизирующих устройств на основе квантовой интерференции токов в сверхпроводниках. Молочков В. Я. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 96.

Рассматриваются вопросы точности и стабильности устройств, использующих квантовую интерференцию токов в сверхпроводниках.

Проводится анализ стабильности периода осцилляций критического тока сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКИ).

Рассматриваются шумовые характеристики СКИ с двумя слабыми связями.

Оценивается влияние периода осцилляций СКИ по напряженности магнитного поля стабилизируемого и сравниваемого тока, характеристик СКИ, чувствительности электронной аппаратуры на стабильность и точность устройств, использующих СКИ. Табл. 2. Библ. 11.

УДК 621.317.799.089.6—52

Об автоматизации средств воспроизведения единиц и передачи их размеров. Беликович А. Я., Шапиро Е. З. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 101.

Работа посвящена задачам, возникающим при автоматизации средств измерений высшей точности и массового поверочного оборудования.

Указывается на необходимость параллельного развития двух направлений: создание новых структур автоматических средств измерений и создание комплекса функциональных узлов, позволяющего быстро реализовать эти структуры и ускорить исследование в области создания новых средств измерений.

Приводятся примеры созданных узлов разрабатываемого комплекса. Библ. 8.

УДК 389.14 : 519.2

Определение числа ступеней поверочных схем. Резник К. А. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 106.

Получены уравнения для определения минимального и максимального числа ступеней поверочной схемы. Введено понятие избыточности поверочной схемы и показана его целесообразность и граничное значение.

УДК 53.089.58 : 006.44

Опыт применения ГОСТ 8.057—73 при создании и развитии эталонной базы страны. Педан М. С., Селиванов М. Н. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 112.

Илагается опыт применения ГОСТ 8.057—73 в части утверждения первичных, специальных и вторичных эталонов, а также некоторые соображения по дальнейшей унификации документации на эталоны.

УДК 006.063 : 681.2 : 001.4

О содержании понятия «метрологическая аттестация средств измерений». Селиванов М. Н. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 116.

Рассматривается метрологическая аттестация средств измерений как с метрологической, так и с правовой точек зрения. Показывается ее роль как одного из способов, средств измерений законопослушными. Раскрывается ее содержание, указывается отличие от поверки, определяется содержание и форма выдаваемого документа, упорядочивается применение терминов «метрологическая аттестация» и «утверждение (эталона)». Библ. 5.

УДК 681.2.089.5 : 006.44

Из опыта разработки нормативно-технических документов по поверке средств измерений. Рабинов С. Б. — «Общие вопросы метрологии». Труды метрологических институтов СССР, вып. 200(260), 1977, с. 118.

Рассматривается ряд вопросов, касающихся разработки проектов государственных стандартов и методик поверки средств измерений (или отраженных (или недостаточно полно отраженных) в существующих основополагающих нормативных документах. Рассматриваются критерии целесообразности разработки, даются рекомендации по планированию разработки и составлению упомянутых нормативных документов.



## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

Труды метрологических институтов СССР

Выпуск 200(260)

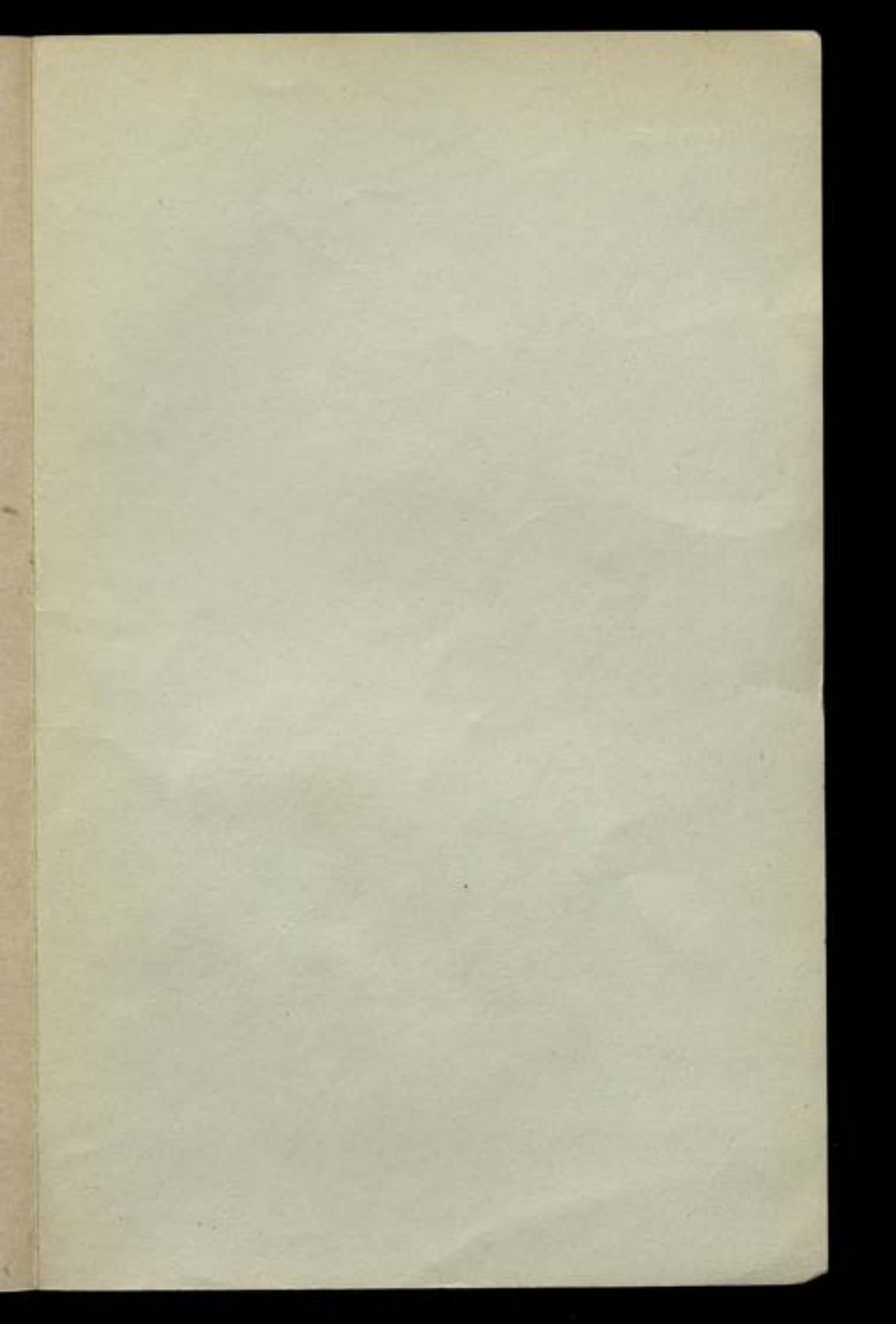
Редакторы *Л. Ф. Садовская, Н. А. Шайкина*  
Редактор издательства *Р. М. Хору*  
Технический редактор *Э. Г. Маморова*  
Корректор *И. Л. Перескокова*

ИБ № 1132

Слапо в набор 3/III 1977 г. Подписано к печати 3/VI 1977 г.  
М-21556. Формат 66X90<sup>1/2</sup>. Бумага типографская № 2. Печ.  
л. 8. Уч.-изд. л. 10,28. Тираж 1000 экз. Заказ № 595.  
Цена 1 р.

Ленинградское отделение издательства «Энергия»  
192041, Ленинград, Марсово поле, 1

Ленинградская типография № 4 Союзполиграфпрома при Го-  
сударственном комитете Совета Министров СССР по делам  
издательства, полиграфии и книжной торговли, 195126, Ле-  
нинград, Ф-128, Социалистическая ул., 14.



Цена 1 р.