

В.А. Балалаев, В.А. Слаев, А.И. Синяков

**ТЕОРИЯ СИСТЕМ
ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦ
И ПЕРЕДАЧИ ИХ РАЗМЕРОВ**

Под редакцией доктора технических наук,
заслуженного метролога РФ
профессора В.А. Слаева

Санкт-Петербург
«Профессионал»
2004

УДК 389:53.081
ББК 30.10

В.А. Балалаев, В.А. Слаев, А.И. Сияков

Б 20 Теория систем воспроизведения единиц и передачи их размеров: Науч. издание — Учеб. пособие / Под ред. В.А. Слаева. — СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. — 160 с.: ил.

Монография состоит из двух частей.

Часть I посвящена разработке классификации систем воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров (ВЕПР).

Проведены межвидовая (безотносительно к виду измерений) и видовая классификации действующих систем ВЕПР. При этом выявлены характерные типы систем и показана нестрогость построения ряда поверочных схем.

Рассмотрены некоторые вопросы технико-экономической эффективности систем ВЕПР различного типа.

Часть II посвящена разработке физико-метрологических основ построения систем ВЕПР.

На основе анализа опубликованных работ по вопросам, связанным с построением систем ВЕПР, определены основные направления по созданию теории этих систем. Предложено формализованное описание метрологических систем, связанных с системами ВЕПР; сформулированы основные исходные понятия и положения теории обеспечения единства измерений.

В рамках предложенной формализации сформулированы основные принципы и описан алгоритм построения систем ВЕПР.

Исходя из анализа основных показателей качества измерений и эффективности функционирования метрологических систем, осуществлена постановка типовых оптимизационных задач теории систем ВЕПР. Отдельно рассмотрены теоретические вопросы построения систем воспроизведения единиц, и в качестве примера — соответствующая система в области измерений параметров ионизирующих излучений.

Разработаны теоретические основы теории обеспечения единства измерений и построения систем ВЕПР.

Для научных работников и специалистов, работающих в области метрологии, метрологического обеспечения и прецизионного приборостроения. Может быть полезна студентам и аспирантам технических вузов.

Рекомендовано Советом СПФ АСМС
в качестве учебного пособия

© СПФ АСМС, 2004

ISBN 5-98371-019-2

© В.А. Балалаев, В.А. Слаев, А.И. Сияков, 2004

Список использованных сокращений

ВЕПР — воспроизведение единиц физических величин и передача их размеров

ГПС — Государственная поверочная схема

ГПЭ — Государственный первичный эталон

ГСИ — Государственная система обеспечения единства измерений

ГСМО — Государственная система метрологического обеспечения

ГСССД — Государственная система стандартных справочных данных

ГСЭ — Государственный специальный эталон

ГЭ — Государственный эталон

ДЦ — полная децентрализация

ИИ — ионизирующие излучения

ИПИИ — измерения параметров ионизирующих излучений

КЦ — кратная централизация

ЛЦ — локальная централизация

МВИ — методика выполнения измерений

МП — методы передачи размера единиц физических величин

МСИ — метрологические средства измерений

НД — нормативные документы

НСИ — национальная система измерений

ОЕИ — обеспечение единства измерений

ОКГ — оптический квантовый генератор

ОСИ — образцовые средства измерений

ПС — поверочная система, поверочная схема

ПУ — поверочная установка

ПУВТ — поверочная установка высшей точности

ПЦ — полная централизация

РРЭ — рабочий разрядный эталон

РСИ — рабочие средства измерений

РЭ — рабочий эталон

СВЕПР — система воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров

СЕ — система единиц физических величин

- СИ — средства измерений
СКО — среднее квадратическое отклонение
СМО — система метрологического обеспечения
СО — стандартный образец
СОЕИ — система обеспечения единства измерений
СОКИ — система обеспечения качества измерений
СССД — система стандартных справочных данных
СФВ — система физических величин
ТКЛР — температурный коэффициент линейного расширения
УВТ — установка высшей точности
ФВ — физическая величина
ФФК — фундаментальные физические константы
ЭДС — электродвижущая сила
ЭК — эталон-копия
Эср — эталон-сравнения

*Памяти Владимира Алексеевича Балалаева,
Виктора Викторовича Скотникова
и Владимира Ивановича Фоменко —
друзей, коллег, талантливых
и многогранных ученых, посвящается*

Часть I

РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПЕРЕДАЧИ ИХ РАЗМЕРОВ

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Цель, предмет и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка обобщенного типажа систем, предназначенных для воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров (далее — системы ВЕПР) в различных видах измерений.

Системы ВЕПР, графическим отображением которых служат так называемые «поверочные схемы», являются материально-технической основой обеспечения единства измерений в стране. Число государственных поверочных схем, построенных и реализуемых в настоящее время, соответствует числу утвержденных и действующих государственных эталонов.

Однако, несмотря на обилие практически реализованных систем воспроизведения единиц конкретных физических величин и передачи их размеров, до сих пор нет обобщающей теории построения таких систем. Сравнительно немногочисленные теоретические работы, наиболее важные идеи которых были положены в основу ГОСТ 8.061–80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение» [22] и методики МИ 83–76 «ГСИ. Методика опреде-

ления параметров поверочных схем» [46], посвящены только отдельным вопросам *передачи размеров единиц*, главным образом точностным соотношениям в системе передачи. При этом всюду явно или неявно предполагался только один способ построения таких систем — точностная иерархия эталонных и образцовых средств измерений с верхним звеном в виде государственного эталона.

Вместе с тем, тот факт, что число измеряемых в настоящее время на практике величин и параметров по разным литературным источникам составляет от 250 [49] до 700 [83] (при этом имеется несомненная тенденция к его увеличению), тогда как созданные поверочные схемы обеспечивают единство измерений только для немногим более чем 30 величин (см. п. 5.1), говорит о том, что существуют иные пути обеспечения единства измерений и, соответственно, другие типы систем ВЕПР.

С другой стороны, число созданных поверочных схем значительно превосходит число величин, для обеспечения единства измерений которых они предназначены, и это расхождение также имеет тенденцию к увеличению, что связано с недостаточной четкостью критериев необходимости и достаточности создания таких систем. Если обе тенденции будут сохраняться и в дальнейшем (без осознанного вмешательства метрологов), это может привести к неограниченному возрастанию числа поверочных схем, соответствующих эталонов, материальных, трудовых и финансовых затрат. Таким образом, уже сегодня назревает необходимость *оптимизации всей системы ВЕПР* (для всей совокупности измеряемых величин и параметров).

Для этого, естественно, нужен надежный инструмент — научная проработка вопроса оптимизации систем ВЕПР. Поэтому очевидна актуальность обобщающих (систематизирующих) теоретических проработок вопросов воспроизведения единиц ФВ и передачи их размеров, оптимизации системы обеспечения единства измерений, а в конечном итоге — создания *теории построения систем* такого типа.

Первый этап на пути создания такой обобщающей теории — разработка классификационных вопросов, ибо классификация служит основой систематизации и является важным моментом в развитии любой области знания: по словам М. Планка, «правильная классификация — это уже высокий вид познания».

Накопление к настоящему времени большого количества фактов построения систем ВЕПР в различных видах измерений служит объективной предпосылкой постановки задачи классификации этих систем.

Следует, однако, заметить, что классификацию не надо рассматривать как окончательное строгое разделение: она лишь подчеркивает (углубляет, уточняет) различия классификационных групп, но отнюдь не исключает возможности существования систем (групп), принадлежащих одновременно к нескольким классам. Это особенно справедливо для систем сложного типа, к которым можно отнести и рассматриваемые системы ВЕПР.

1.2. Метод и структура исследования

Классификация, являясь «логической операцией», суть которой состоит в разделении всего изучаемого множества объектов по обнаруженным сходствам и различиям на отдельные группы (классы, подчиненные множества) [9], сама по себе представляет метод исследования.

Известно, что классифицировать какое-либо множество объектов на отдельные группы можно двумя способами: или путем перечисления всех входящих в данную группу объектов, или путем указания признака (признаков), присущего каждому члену группы, но отсутствующего (отсутствующих по совокупности) у объектов, не являющихся членами данной группы. Наиболее эффективным является второй способ, составляющий метод *логической классификации*, принятый и в данном исследовании.

Если признаки классификации достаточно четкие, то сама классификация как разделение множества уже не представляет особых затруднений (сказанное, правда, справедливо лишь для множеств, элементы которых обладают достаточно ярко выраженными признаками. В реальных ситуациях это бывает далеко не всегда).

Поэтому основная трудность классификации заключается именно в установлении достаточно четких *классификационных признаков*, что, в свою очередь, определяется тем, насколько четко они проявляются у разных элементов изучаемого множества. В то же время критерием эффективности разработанной классификации является возможность дальнейшего углубленного изучения выделенных классов (установление их внутренних *закономерных* свойств и взаимосвязей между классами) и построения из элемен-

тов изучаемого множества цельной, взаимосвязанной и непротиворечивой системы.

Отсюда видно, что ценность любой классификации определяется тем, насколько выбранные признаки (основания классификации) являются *существенными* для изучаемого множества. Важна при этом не только существенность признака, но и его первичность: выбранные признаки, по-возможности, должны быть *первичными* (определяющими) по отношению к другим возможным существенным признакам.

В связи с этим при разработке классификации систем ВЕПР основная задача неизбежно состояла в подробном анализе этого множества как целого и как состоящего из частей, в выявлении сущности этого множества путем изучения его места и роли среди других множеств и систем, связанных с ним и более общих. Это определило структуру исследования.

Разработка классификации систем ВЕПР проводилась в двух аспектах: *межвидовая* классификация (т. е. независимая от вида измерений или измеряемой физической величины) и *видовая* классификация (т. е. по измеряемым физическим величинам). В соответствии с этим были использованы две группы признаков (см. пп. 4 и 5).

Однако в связи с тем, что проблемы и результаты видовой классификации систем ВЕПР во многом совпадают с проблемами и результатами классификации измерений, выполненной ранее, здесь рассмотрены только некоторые проблемы видовой классификации, не получившие отражения в [32].

Поскольку при дальнейшей разработке теории систем ВЕПР (а может быть, и других метрологических систем), которая состоит в возможно более полной формализации выявленных сущностей и взаимосвязей, предполагается использовать аппарат математической теории систем (главным образом аппарат теории множеств), в данной работе (там, где это возможно на этапе классификации) использовался указанный формализм.

2. АНАЛИЗ СУЩНОСТИ СИСТЕМЫ ВЕПР

Чтобы правильно проводить анализ действующих систем воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров и более обоснованно подойти к выбору признаков классификации

этих систем и к самой классификации, необходимо четко уяснить, что понимается под термином «система ВЕПР», для чего следует, в свою очередь, выявить существенные признаки этих систем, как внешние (по отношению к другим системам), так и внутренние (существенные именно по отношению к самим системам ВЕПР).

2.1. Понятие метрологической системы

В современной литературе понятие «система» является очень распространенным и применяется к самым разнообразным объектам изучения, хотя и остается до сих пор в известной мере интуитивным. Это и неудивительно, т. к. данное понятие является одним из наиболее обобщенных (метапонятие, подобное философским категориям «материя», «общее» и «частное», «сходство» и «различие» и т. п.), а определять такие метапонятия весьма трудно, т. к. для этого требуются другие, достаточно четкие и не менее общие метапонятия.

Анализ различных подходов к определению понятия «система», проведенный в ряде работ [43, 66], позволяет определить систему как «комплекс (совокупность) взаимосвязанных элементов, образующих определенную целостность» [43]. При этом находят отражение два важнейших свойства любой системы: ее целостность и членимость. С этой точки зрения можно было бы предложить еще одно, на наш взгляд более общее определение: «Система — это непустое множество выделенных (т. е. различимых) сущностей (элементов, объектов), объединенных некой более общей сущностью, относительно устойчивой во времени» [54].

В метрологической литературе термин «система» также получил широкое распространение, например в таких словосочетаниях, как «система единиц», «система эталонов», «система передачи размеров единиц», «система обеспечения единства измерений», «система метрологического обеспечения» и т. п. В большинстве случаев, к сожалению, эти термины (словосочетания) вводились без соответствующих определений, что не позволяет дать им достаточно однозначное толкование и (что самое главное) провести между ними четкое разграничение. Вместе с тем, использование достижений общей теории систем позволяет это сделать при условии глубокого анализа и четкого выявления объектов метрологического изучения. С этой точки зрения представляется полезным ввести обобщенное понятие «метрологическая систе-

ма» как система (определенной) категории объектов, изучаемых в метрологии.

Объекты изучения в метрологии весьма разнообразны и могут быть как материальными (средства измерений, эталоны, инженерно-технические сооружения, ученые — хранители эталонов и т. д.), так и нематериальными (термины и определения, обозначения единиц измерений и их определения, содержание нормативных документов (НД), действия специалистов, порядок работы метрологических учреждений и т. д.), а также смешанного типа (методы и средства поверки, определения единиц и их воспроизведение эталонами, метрологическое учреждение в целом и т. д.). В соответствии с этим метрологические системы можно подразделять (как это делают с системами в других областях знаний) на формальные (элементы или объекты которых суть понятия, символы, описания), неформальные (включающие в себя материальные элементы) и смешанные (в том числе все социально-экономические системы).

2.2. «Элементарные» метрологические системы

Главным (конечным) объектом изучения в метрологии, как известно, являются *измерения*. Поэтому объектами метрологических систем могут быть любые объекты, существенные для измерений, в частности все объекты, являющиеся *компонентами* (элементами) *измерений* [53, 92]: измеряемая физическая величина (ФВ), единица измерений данной физической величины, средство измерений (СИ), метод измерений, условия измерений и наблюдатель (т. е. человек, производящий измерения и обладающий необходимыми для этого знаниями). Совокупность таких объектов в различных сочетаниях образует различные метрологические системы.

Для удобства (и большей четкости) дальнейших рассуждений введем следующие обозначения для «элементарных» метрологических систем:

$\Phi \equiv \{\varphi_i\}$ — множество всех измеряемых физических величин,
 $\varphi_i \in \Phi$;

$[\Phi] \equiv \{[\varphi_i]\}$ — множество всех единиц измерений ФВ,
 $[\varphi_i] \in [\Phi]$;

$\Psi \equiv \{\psi_i\}$ — множество всех возможных условий измерений [под «условиями измерений» в обобщенном виде будем подразумевать как внешние влияющие факторы, так и особенности объекта — носителя данной ФВ, а также особенности ее реализации (в том числе диапазон измерений)], $\psi_i \in \Psi$;

$S \equiv \{s_i\}$ — множество всех имеющихся средств измерений, $s_i \in S$;

$M \equiv \{m_i\}$ — множество всех методов измерений, $m_i \in M$;

$K \equiv \{k_i\}$ — множество всех наблюдателей (кадров измерительной), $k_i \in K$.

При этом множества Φ , $[\Phi]$ и M являются формальными (состоящими только из наименований и описаний), а множества Ψ , S и K — неформальными системами. Считаем также, что все множества упорядочены, т. е. являются векторами. По мере усложнения метрологических систем формальные системы, как будет видно в дальнейшем, могут «переходить» (отображаться) в неформальные реализации.

Каждое из этих элементарных множеств и их различные комбинации могут служить объектом изучения в метрологии, результатом которого будет установление их свойств и зависимостей между свойствами соответствующих метрологических систем. Некоторые из этих свойств очевидны.

Так, мощность $||[\Phi]||$ множества единиц измерений $[\Phi]$ в общем виде равна мощности $|\Phi|$ множества измеряемых ФВ: $||[\Phi]|| \geq |\Phi|$, причем каждый элемент множества $[\Phi]$ подобен соответствующему элементу множества Φ . Множество S всех имеющихся средств измерений является объединением $n \equiv |\Phi|$ подмножеств СИ для различных ФВ (если исключить из рассмотрения универсальные СИ), т. е.:

$$S = S(\varphi_1) \cup S(\varphi_2) \cup \dots \cup S(\varphi_{|\Phi|}) \equiv \bigcup_{i=1}^{n=|\Phi|} S(\varphi_i).$$

При этом номенклатура типов СИ для каждого подмножества $S(\varphi_i)$ будет определяться подмножеством $\Psi(\varphi_i)$ всех условий измерений данной ФВ.

Множество M определяется пересечением n подмножеств $M(\varphi_i)$:

$$M = (\varphi_1) \cap M(\varphi_2) \cap \dots \cap M(\varphi_{|\Phi|}) \equiv \bigcap_{i=1}^{n=|\Phi|} M(\varphi_i).$$

Аналогичным образом можно было бы определить множество Ψ , однако Ψ является сложным несчетным множеством, и здесь мы его формализовать не будем.

Очевидно, что множество K является некоей функцией от множеств Φ , S и M ; в свою очередь, множество K определяет систему подготовки кадров-измерителей.

Также очевидно, что совокупность (в общем виде, как векторное произведение) всех указанных «элементарных множеств» определяет все множество измерений (*систему измерений*).

Здесь опять же важно подчеркнуть, что с точки зрения свойства целостности в принятом определении понятия «система» всякое из указанных множеств и их совокупностей образует соответствующую систему: для этого необходимо указать «связующее начало» (объединяющую сущность). В частности, чтобы *система измерений*, соответствующая множеству всех измерений, была действительно системой, необходимо указать конкретное общественное образование, на которое она распространяется. Так, можно говорить о системе измерений международной, государственной системе измерений, отраслевой системе измерений и т. п.

Следует также отметить, что «элементарность» указанных выше множеств относительна, т. к. их разделение относительно: свойства практически каждого из них зависят от свойств других множеств, что было видно хотя бы на примере множества K . Вопрос об «элементарности» («первичности») метрологических множеств здесь только обозначен и подлежит самостоятельной углубленной проработке (по нашему мнению, только на пути выделения определяющих, т. е. первичных, свойств систем можно строить их научную классификацию и в целом теорию их построения).

2.3. Измерение как простейшая метрологическая система

Рассмотрим некоторые формальные свойства элементов элементарных метрологических множеств, исходя из их сущности. Не вдаваясь в подробности и исходя из способа образования этих множеств, с достаточной для практики степенью общности можно положить (элемент φ — ФВ как абстракция, определяющая формальное множество Φ , не зависит от (t, p) , но как конкретная реализация должен быть локализован при конкретном измерении. Аналогичное замечание можно сделать относительно $[\varphi]$):

$$[\varphi_i] = f(\varphi_i); \Psi_i = \Psi(\varphi_i, t, p); S_i = S(\varphi_i, \Psi_i); m_i = m(\varphi_i, \Psi_i, s_i);$$

$$K_i = K(t_i, p_i, S_i, m_i, \Psi_i); \varphi_i = \varphi(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_j, \dots, \varphi_{|\Phi|-1}), \quad (1.1)$$

где $\varphi \in \Phi$, $[\varphi] \in [\Phi]$, $\psi \in \Psi$, $s \in S$, $k \in K$, причем их индексы одинаковы в пределах каждой зависимости, но, вообще говоря, разные для разных зависимостей; t и p — соответственно временная и пространственная координаты метрологической системы, в которую включены соответствующие элементы множеств; $p = \{x, y, z\}$.

Пространственно-временная локализация элементов важна в любой изучаемой системе, ибо, как видно из (1.1), их свойства зависят от места и времени нахождения в данной системе, которая, в свою очередь (как это уже подчеркивалось для системы измерений), должна быть определена в пространственно-временном континууме, т. е. заданы границы (T_c, P_c) системы. При этом $t \in T_c$ и $p \in P_c$. Это, в частности, особенно очевидно для Ψ (конкретных условий измерений) и k (конкретного кадра-измерителя). В то же время мы предполагаем, что имеем дело с метрологическими системами (в том числе системами измерений как наиболее общими), в которых масштабы T и P должны быть таковы, чтобы в их пределах не менялись сами множества Φ , $[\Phi]$, Ψ , S , M и K , а также их элементы φ_i , $[\varphi_i]$, S_i и m_i ; без этого предположения относительно стабильности номенклатуры (определений ФВ, их единиц, СИ и методов измерений) изучение системы было бы невозможно.

Тогда любое измерение (здесь измерение понимается только как совокупность его неизбежных компонентов) в рассматриваемой системе $t \in T$ и $p \in P$ можно представить как множество (вектор) $\{t_i, p_i, \varphi_i, [\varphi_i], \Psi_i, S_i, m_i, K_i\}$, в котором все индексы i фиксированы и одинаковы (локализованы).

Сразу заметим, что абсолютная (точечная) локализация всех элементов измерения при наличии несчетных множеств Ψ , T и P невозможна практически, точнее, не может дать результата измерения: погрешность измерения (точнее, погрешность полученного значения ФВ) будет строго равна нулю (т. к. в этом случае возможно только единственное, однократное, мгновенное и прямое измерение, из которого никаких оценок погрешности получить нельзя), да и само значение ФВ практически едва ли может быть найдено, т. к. любое измерение требует конечного интервала времени ($\tau_{изм} = t_f - t_i$) и конечного пространственного интервала $\Delta p_{изм} = \{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i\}$.

В этом отношении важным представляется введение условия корректности измерения, сформулированного в [5], при фиксированных p_i , $[\varphi_i]$, S_i , m_i и K_i , но при учете наиболее существенных временных изменений φ_i и Ψ_i , а также параметров S_i за время измерения $\tau_{изм}$. Согласно [5] погрешность измерения из-за временных изменений в измерительной системе $\{\varphi_i, [\varphi_i], S_i, m_i, \Psi_i$ и $K_i\}$ обусловлена тремя составляющими:

$$\Delta(\tau_{изм}) = \Delta\varphi + \Delta s + \Delta\Psi,$$

где в первом приближении:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \int_t^{t+\tau_{изм}} \frac{\partial\varphi}{\partial t} dt, \quad \Delta s = \sum_i \int_t^{t+\tau_{изм}} \frac{\partial\varphi}{\partial p_{s_i}} \cdot \frac{\partial p_{s_i}}{\partial t} dt, \\ \Delta\Psi &= \sum_j \int_t^{t+\tau_{изм}} \frac{\partial\varphi}{\partial \Psi_j} \cdot \frac{\partial \Psi_j}{\partial t} dt. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Здесь $P_{s_i} \in P_s$ — параметры (характеристики) СИ в статическом режиме, которые дают нормированную погрешность СИ Δ_n (например, класс точности).

Тогда достижение цели измерения (т. е. получения значения ФВ в пределах заданной погрешности $\Delta_{зад}$) возможно только при условии

$$\int_t^{t+\tau_{изм}} \left\{ \frac{\partial\varphi}{\partial t} + \sum_i \frac{\partial\varphi}{\partial p_{s_i}} \cdot \frac{\partial p_{s_i}}{\partial t} + \sum_j \frac{\partial\varphi}{\partial \Psi_j} \cdot \frac{\partial \Psi_j}{\partial t} \right\} dt \leq \Delta_{зад} - \Delta_n \quad (1.3)$$

Это условие корректности может быть обобщено с учетом погрешностей от пространственных изменений в пределах измерительной процедуры.

2.4. Собственно метрологические системы

Введенные выше элементарные метрологические системы (как и некоторые более или менее сложные их комбинации) являются первичными (внешними) по отношению к метрологии в том смысле, что они, в принципе, могут существовать и независимо от мет-

рологической деятельности, хотя при ее наличии неизбежно становятся объектом изучения в метрологии. Однако метрологическая деятельность состоит не только в *изучении* внешних по отношению к ней систем (объектов), но и в *создании собственно метрологических систем* (как результата продуктивной деятельности). Специфика «метрологической продукции» (и соответствующих собственно метрологических систем) определяется спецификой (сущностью) практических задач метрологии.

На наш взгляд, сегодня можно выделить три относительно самостоятельные главные задачи практической метрологии, которые и определяют содержание и объем понятия «метрологическое обеспечение» как совокупности всех видов метрологической деятельности и их результатов (в ГОСТ 1.25–76 термин «метрологическое обеспечение» определен несколько уже: как установление и применение различных (перечисленных там) основ, необходимых для решения двух задач — достижения единства и требуемой точности измерений. Как можно увидеть далее, это соответствует только системе обеспечения качества измерений; кроме того, перечисление основ, определяющих виды метрологической деятельности, тоже сужает понятие, причем искусственно, т. к. не позволяет решать главные задачи каким-либо другим путем):

- 1) задача обеспечения единства измерений;
- 2) задача технического совершенствования средств и методов измерений;
- 3) задача обеспечения эффективности измерений.

Решение первых двух задач приводит к формированию *системы обеспечения качества измерений* в рамках заданной системы измерений, а решение третьей задачи — к формированию *системы обеспечения эффективности измерений* этой системы.

Рассматривая в качестве системы измерений национальную систему измерений, можно определить наиболее общую собственно метрологическую систему — «*систему метрологического обеспечения хозяйства страны*» (ГСМО) как совокупность всех собственно метрологических систем, появившихся в результате решения указанных выше главных задач практической метрологии. На рис. 1.1 сделана попытка систематизировать сформировавшиеся (в явном или неявном виде) на сегодняшний день собственно метрологические системы (без их детализации). Некоторые обоснования указанных на рис. 1.1 взаимосвязей будут даны далее.

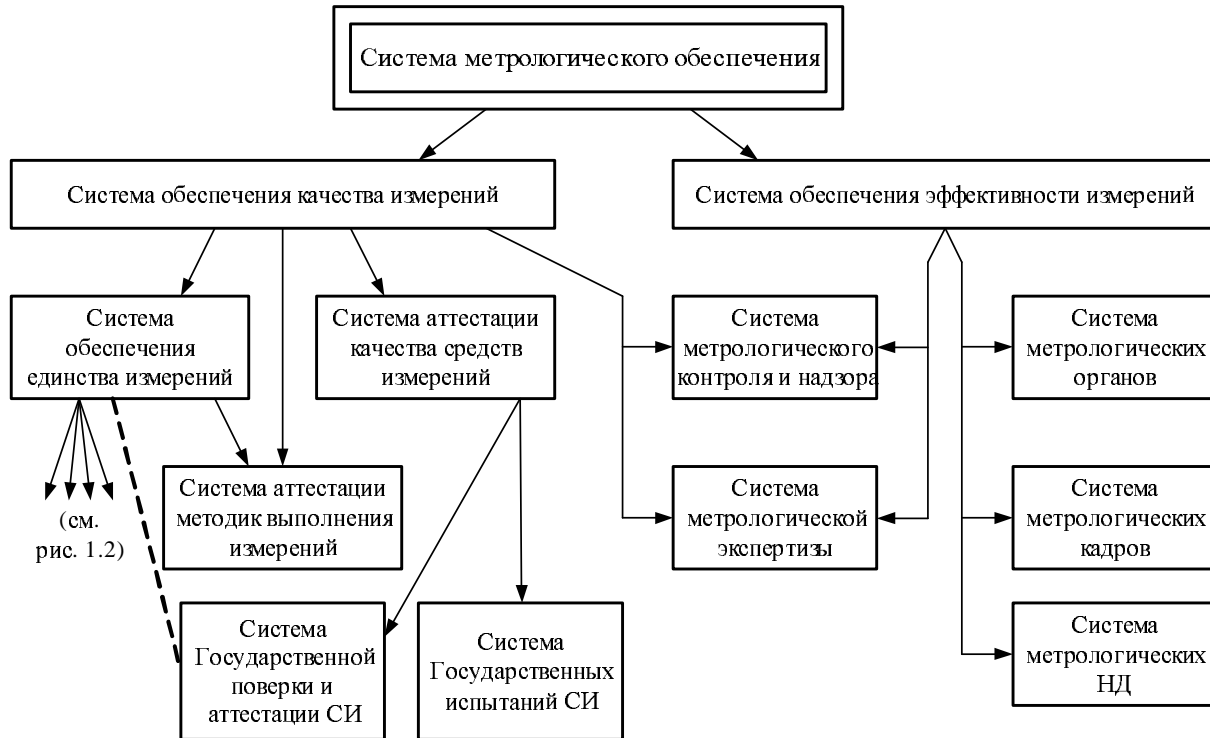


Рис. 1.1. Взаимосвязь «собственно метрологических систем» на верхних уровнях системы метрологического обеспечения

2.5. Иерархия метрологических систем

Свойство иерархичности структуры присуще всем существующим системам, в особенности сложным [66]. Это видно уже из возможности различного уровня описания (абстрагирования) любой системы, различных признаков для объединения элементов системы в группы и др.

Особенно наглядно свойство иерархичности проявляется в системах типа «система обеспечения единства (чего-либо)». По-видимому, именно для систем такого типа (целевых систем) наиболее приемлема разработанная в [45] формализованная теория иерархических многоуровневых систем.

Само понятие «система обеспечения единства...» предполагает, что такая система должна быть соотнесена с другой, более общей системой (которая может быть внешней по отношению к рассматриваемой). Очевидно, что *система обеспечения единства измерений* должна соотноситься с вполне определенной системой измерений, а с учетом отмеченного в п. 2.4 — и с соответствующей системой метрологического обеспечения (СМО). Рассмотрим взаимоотношения систем в той части собственно метрологических систем, которая имеет непосредственное отношение к интересующему нас классу систем ВЕПР в рамках выбранной выше государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ), исходя из общеметрологических соображений.

Как видно из (1.3), условие корректности измерений требует наличия большого объема *априорной информации* об измерительной системе, на что справедливо обращалось внимание в [53. С. 79] (правда, там это требование сузилось до необходимости априорной информации только об объекте исследования).

Даже если предположить, что пространственно-временные изменения в процессе измерения и не происходят и что возможны точечные однократные прямые измерения (очевидно, представляющие наибольший интерес с точки зрения массовых измерений в ГСИ), то и тогда необходимо наличие априорной информации, удовлетворяющей более простому условию корректности измерений:

$$\Delta_n \leq \Delta_{\text{зад}}. \quad (1.4)$$

Эта информация заложена в неявном виде в Δ_n , т. к. $\Delta_n = (\Delta\varphi')_n$, где $(\Delta\varphi')_n$ — реально измеренное значение ФВ (конкретного раз-

мера), т. е. $\varphi' = \varphi'(s_i, m_i, \psi_i, k_i)$, причем некоторые из параметров этой зависимости связаны отношениями (1.1) за исключением тех, в которые входят t и p , зафиксированные в данном случае.

Это обстоятельство (неизбежная необходимость наличия априорной измерительной информации и различная степень этой необходимости, точнее — различный объем этой информации в данных условиях), по нашему мнению, весьма существенно для понимания специфики метрологической деятельности и, следовательно, может быть использовано для анализа метрологических систем; в этой связи следует отметить использование этого обстоятельства при классификации измерений по точности (по методу оценивания погрешности) в [32. С. 25].

Можно сформулировать следующие *постулаты*:

- 1) любое измерение требует определенной априорной измерительной информации;
- 2) объем априорной измерительной информации тем больше, чем выше требуемая точность измерений;
- 3) при заданной точности измерений объем требуемой апостериорной измерительной информации тем больше, чем меньше объем априорной измерительной информации.

По-видимому, эти постулаты могут быть полезны для дальнейшего развития информационно-теоретической теории измерений, однако в данном случае они позволили объединить некоторые виды метрологической деятельности (и соответствующие метрологические системы) в *систему обеспечения качества измерений* как составную часть СМО (см. рис. 1.1). Поскольку именно наличие определенной априорной информации в значительной степени определяет качество измерений (т. е. верность решения измерительных задач — см. условия корректности измерений), обеспечение этой априорной информацией всех необходимых для хозяйства измерительных задач и составляет главную суть *системы обеспечения качества измерений* в стране как метрологической системы. А поскольку, согласно третьему постулату, при малом объеме известной априорной информации возрастает объем необходимой апостериорной информации (т. е. трудоемкость собственно измерений), задачей метрологии должно быть, по-возможности, *максимальное* обеспечение всей ГСИ априорной измерительной информацией. Отсюда видна необходимость в СМО наличия подсистемы обеспечения эффективности измерений и ее взаимосвязь с системой обеспечения качества измерений.

В чем отличие терминов «обеспечение качества измерений» и «обеспечение единства измерений»? Согласно ГОСТ 16263–70 «Метрология. Термины и определения» под *единством измерений* понимается «такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью» (последнюю часть фразы, по-видимому, следует понимать просто как наличие в результатах не только оценки значения ФВ, но и *оценки его погрешности*). В большинстве случаев это состояние измерений трактуется как возможность сопоставления (*сопоставимости*) результатов измерений одной и той же ФВ, выполненных в разных местах, в разное время, с использованием различных методов и средств измерений и разными наблюдателями (см., например, [92. С. 73]; [10. С. 6]).

Формально это можно записать следующим образом (*условие сопоставимости*): существует такое Δ , что при любом $j \neq i$ имеет место

$$\varphi_j - \varphi_i \leq \Delta \quad \text{при } \varphi_{ju} = \varphi_{iu} \text{ и } \psi_j = \psi_i, \quad (1.5)$$

где $\varphi_j = \varphi(t_j, P_j, s_j, m_j, k_j, [\varphi_j])$ и $\varphi_i = \varphi(t_i, P_i, s_i, m_i, k_i, [\varphi_i])$ — реально измеренные значения ФВ φ , а φ_{ju} и φ_{iu} — ее истинные значения. Заметим, что здесь индексы « i » и « j » означают, что мы имеем дело не с разными ФВ (как у множества Φ), а с различными результатами измерений одной и той же ФВ.

Очевидно, что сопоставимость (единство) измерений может быть достигнута и при неудовлетворительной для данной ГСИ точности измерений. Поскольку условие корректности измерения (1.3) или (1.4) связывалось с достижением получения значения ФВ в пределах заданной точности, характеризуемой $\Delta_{\text{зад}}$, его можно рассматривать как условие достижения требуемой точности измерений. Для наиболее простого (и интересного с точки зрения ГСИ) случая, выражаемого неравенством (1.4), с учетом комментариев к нему, *условие достижения требуемой точности* можно сформулировать следующим образом: существует такое i (на множествах S, M, \dots в данной ГСИ), что при любом i (в данной ГСИ) имеет место

$$\Delta\varphi \leq \Delta_{\text{зад}}, \quad (1.6)$$

где $\varphi = \varphi(s_i, m_i, \psi_i, k_i)$ при учете (1.1).

Теперь можно формально определить *систему обеспечения качества измерений* как метрологическую систему, обеспечивающую выполнение условий (1.5) и (1.6), т. е. условий сопоставимости и корректности измерений, тогда как *систему обеспечения единства измерений* (СОЕИ) — как систему, обеспечивающую выполнение условия сопоставимости измерений (1.5). Попытка использовать для формализации системы обеспечения качества измерений показатели качества измерений (точность, правильность, сходимость, воспроизводимость), определенных в ГОСТ 16263–70, не дала хороших результатов, т. к. эти понятия в значительной степени перекрываются; они могут оказаться полезными при дальнейшей детализации систем при условии их уточнения.

С неформальной точки зрения условие сопоставимости результатов измерений означает возможность «говорить на одном языке», т. е. *унификацию* измерительной информации, причем прежде всего априорной информации, т. к. она определяет унификацию апостериорной информации (если, например, используются одни и те же единицы, то и результаты будут выражены в одинаковых единицах). С другой стороны, обеспечение сопоставимости результатов — это наиболее эффективный путь выявления *систематических погрешностей* измерений (ср. [10. С. 249]). Именно в этом состоит главная задача системы обеспечения единства измерений (и метрологии в целом).

2.6. Система ВЕПР как подсистема

В п. 2.3 дано формальное определение измерения как системы (т. е. с точки зрения его структуры). При этом структуру любого измерения можно представить как вектор $U_i = \{\varphi_i, [\varphi_i], \psi_i, S_i, m_i, k_i\}$ состояния i -й рассматриваемой системы измерений $\{\Phi, [\Phi], \Psi, S, M, K\}$.

Рассмотрим теперь *измерение* как *процесс* нахождения значения ФВ (опытным путем с помощью... — см. ГОСТ 16263–70).

Значение ФВ обычно записывают в виде равенства:

$$\varphi = \{\varphi\}[\varphi], \quad (1.7)$$

где $\{\varphi\}$ — числовое значение ФВ, а $[\varphi]$ — ее единица. При этом под φ в левой части уравнения понимают саму ФВ: и как конкретную реализацию, и как величину вообще [92. С. 16]. В рамках

принятого формализма это нестрого: $\varphi' \in \Phi$ есть обозначение ФВ (символ, наименование, определение, безотносительно к ее числовому значению), то же самое относится и к $[\varphi]$ — ее единице. Поэтому значение ФВ не совпадает по смыслу с самой ФВ (см. более позднюю работу [90] К.П. Широкова); для их отличия введем обозначение $\varphi^{(3H)}$ для значения φ . Тогда

$$\varphi^{(3H)} = \{\varphi\}[\varphi] \quad (1.7a)$$

можно рассматривать как элемент формального множества $\Phi^{(3H)} = [\Phi] \times R$, где R — множество, в общем случае, всех вещественных чисел, а $[\Phi]$ — множество единиц ФВ, введенное ранее.

Уравнение (1.7) со времен М.Ф. Маликова ([44. С. 19]) рассматривается так же, как основное уравнение измерений (см. также [53. С. 10]), при этом для простейшего случая — прямых измерений — уравнение измерений записывают в виде $\varphi = X$, где φ — *искомое* значение измеряемой ФВ, а X — значение, непосредственно *получаемое* опытным путем. Здесь тоже видна явная нестрогость.

Рассмотрим самый простой, но самый важный случай измерений — *прямое однократное измерение*, ведь любое более сложное измерение в конечном итоге сводится к прямым однократным измерениям (именно в этом случае значение ФВ получается непосредственно *опытным* путем), причем переход к результату более сложных измерений осуществляется на основе аналитических методов обработки результатов измерений — наиболее разработанного вопроса в метрологии. Значение ФВ как формальный результат измерений, совпадающий с выражением (1.7a), в случае таких измерений должно соответствовать вполне определенному *показанию* СИ (как неформальному состоянию СИ), которое условно можно назвать *неформальным значением* измеряемой ФВ:

$$\varphi^{(3H)} = N_s \varphi'_0, \quad (1.8)$$

где N_s — отсчет по какой-либо числовой шкале данного СИ, а φ'_0 — *постоянная* СИ для этой шкалы. Так как по определению $\varphi'_0 = N_0[\varphi']$, где $[\varphi]$ — по-прежнему единица ФВ как символ, а $[\varphi']$ — единица ФВ как ее определенный размер (конкретная реализация, которую «запомнило» данное СИ), то $\varphi^{(3H)'} = N_s \cdot N_0[\varphi'] = N\{[\varphi']\}[\varphi] = N[\varphi']$.

(Элементы неформального множества (системы), соответствующие неформальному множеству (системе), будем для отличия сопровождать значком ('). Заметим, что множества R и $\{\Phi\} \equiv \{\{\varphi\}\}$ являются формальными, т. к. их элементы — числа.)

Отсюда видно, что всегда можно выбрать такую шкалу отсчета у данного СИ, что его постоянная φ_0 будет совпадать с неформальной (присущей данному конкретному СИ) единицей измерений, т. е. $\varphi'_0 = [\varphi']$. Поэтому, учитывая, что формальный результат измерения в виде значения ФВ берется по показанию СИ, *уравнение прямого однократного измерения* (к которому сводятся все другие типы измерений), всегда можно представить в виде:

$$\varphi^{(\text{зн})} = N [\varphi']. \quad (1.8a)$$

Однако при этом следует помнить, что $\varphi'_0 = [\varphi']$ (как *приведенная* постоянная СИ) не только символ единицы — это *априорная* (заложенная в свойства данного СИ) *информация о размере ФВ, выбранной за единицу*, т. е.

$$\varphi'_0 = [\varphi'] = \{[\varphi]\} \cdot [\varphi]. \quad (1.9)$$

В этом состоит существенное отличие (1.8a) от (1.7a), схожих по своему внешнему виду.

С этой точки зрения интересно классифицировать основные типы СИ — *меры*, измерительные *приборы* и измерительные *преобразователи*.

Меры можно представить как СИ, для которых и N_s , и $\varphi'_0 = [\varphi']$ являются априорной измерительной информацией.

Приборы можно рассматривать, как СИ, для которых $\varphi'_0 = [\varphi']$ является априорной информацией, а N_s — апостериорной.

Для *преобразователей* уравнение измерений можно записать следующим образом:

$$\varphi_j^{(\text{зн})'} = K_{\text{пр}} \varphi_i^{(\text{зн})'}, \quad (A)$$

где φ_i и φ_j — разные ФВ, а $K_{\text{пр}}$ — коэффициент преобразования (в общем случае нелинейный оператор).

Для СИ, описываемых таким уравнением, априорной информацией с учетом (1.7а) и (1.8а) будет:

$$K_{\text{пр}} = \frac{\varphi_j^{(\text{зн})'}}{\varphi_i^{(\text{зн})'}} = \frac{N_j \{[\varphi_j']\}}{N_i \{[\varphi_i']\}} \cdot \frac{[\varphi_j]}{[\varphi_i]} = N_k \frac{[\varphi_j']}{[\varphi_i']}, \quad (\text{В})$$

т. е. отношение размеров единиц разных ФВ (входной и выходной).

Вернемся к условию сопоставимости (1.5), заметив, что, по сути дела, в (1.5) должны входить не просто φ_i и φ_j , а их значения $\varphi_i^{(\text{зн})}$ и $\varphi_j^{(\text{зн})}$. Тогда с учетом изложенного

$$\begin{aligned} \varphi_j^{(\text{зн})'} - \varphi_i^{(\text{зн})'} &= N_j \{[\varphi_j]\} [\varphi_j] - N_i \{[\varphi_i]\} [\varphi_i] = \\ &= N_j \{[\varphi_j]\} [\varphi_j] \left(1 - \frac{N_i \{[\varphi_i]\}}{N_j \{[\varphi_j]\}} \cdot \frac{[\varphi_i]}{[\varphi_j]} \right). \end{aligned} \quad (1.10)$$

Отсюда видно, что если $[\varphi_i] \neq [\varphi_j]$, т. е. «символы» единиц при измерениях i и j не совпадают, то условие (1.5) не удастся выполнить ни при каких Δ , т. к. в круглых скобках в (1.10) должно получаться конечное число (безразмерное), а отношение $\frac{[\varphi_i]}{[\varphi_j]}$ — бес-

смыслица, не имеющая количественной определенности.

Таким образом, для обеспечения единства измерений (сопоставимости их результатов) прежде всего необходимо, чтобы $[\varphi_j] = [\varphi_i]$, т. е. единица каждой ФВ имела бы *только одно обозначение* (символ, определение или название, что формально одно и то же). Следовательно, система обеспечения единства измерений должна включать как подсистему *систему единиц* ФВ (как множество их обозначений, символов, определений). Выше (в п. 2.2) была введена эта система вне рамок собственно метрологических систем. Как таковой она неизбежно становится при возрастании общественной необходимости обеспечения единства измерений.

Условие сопоставимости, согласно (1.10), требует также сравнения размеров единиц ФВ, реализованных в разных измерительных опытах [см. отношение численных значений единиц в (1.10) в круглых скобках]. Отсюда вытекает, что СОЕИ должна также

включать систему, позволяющую сравнивать размеры единиц, реализованные в каждом конкретном СИ в виде априорной измерительной информации. Эту систему в общем виде и следует называть *системой ВЕПР*.

До сих пор мы ограничивались только случаем прямых измерений. Перейдя к косвенным измерениям, мы неизбежно приходим к необходимости обеспечения единства значений различных физических постоянных (констант), входящих в уравнения косвенных измерений. Вернемся к этому в п. 5.3. Здесь же существенно то, что эта задача еще одной собственно метрологической подсистемы — *системы стандартных справочных данных* (СССД).

Возможно, что этими подсистемами не исчерпывается структура системы обеспечения единства измерений. В частности, в СОЕИ, по-видимому, должна входить (хотя бы частично) *система аттестации методик выполнения измерений* — одного из сравнительно новых направлений метрологической деятельности.

На рис. 1.2 схематически изображена взаимосвязь различных подсистем СОЕИ с учетом упомянутого выше, а также с учетом п. 2.8.

2.7. Анализ понятий «воспроизведение единицы» и «передача размера единицы» физической величины

Понятие «система ВЕПР» обычно определяется своим полным наименованием, т. е. перечислением основных функций и их объектов. В этой связи важно проанализировать, что вкладывается в понятия «воспроизведение единицы» и «передача размера единицы» ФВ. К сожалению, необходимой четкости в этом вопросе нет, особенно в трактовке понятия «воспроизведение единицы» (ср. [19]; [21]; [44. С. 316]; [53. С. 173]; [92. С. 12]).

В справочном приложении к ГОСТ 8.057–80 [21] воспроизведение единицы ФВ определено как «совокупность метрологических операций, имеющих целью определить значение ФВ, воспроизводимой *государственным эталоном* с точностью, находящейся на уровне современных достижений метрологии». Таким образом, здесь воспроизведение единицы связывается с наивысшим по точности СИ в данной системе измерений. Однако «воспроизведение единицы» определено через «воспроизведение ФВ» и не раскрывает сущности понятия (заметим, что единица — одна из реализаций той же ФВ).

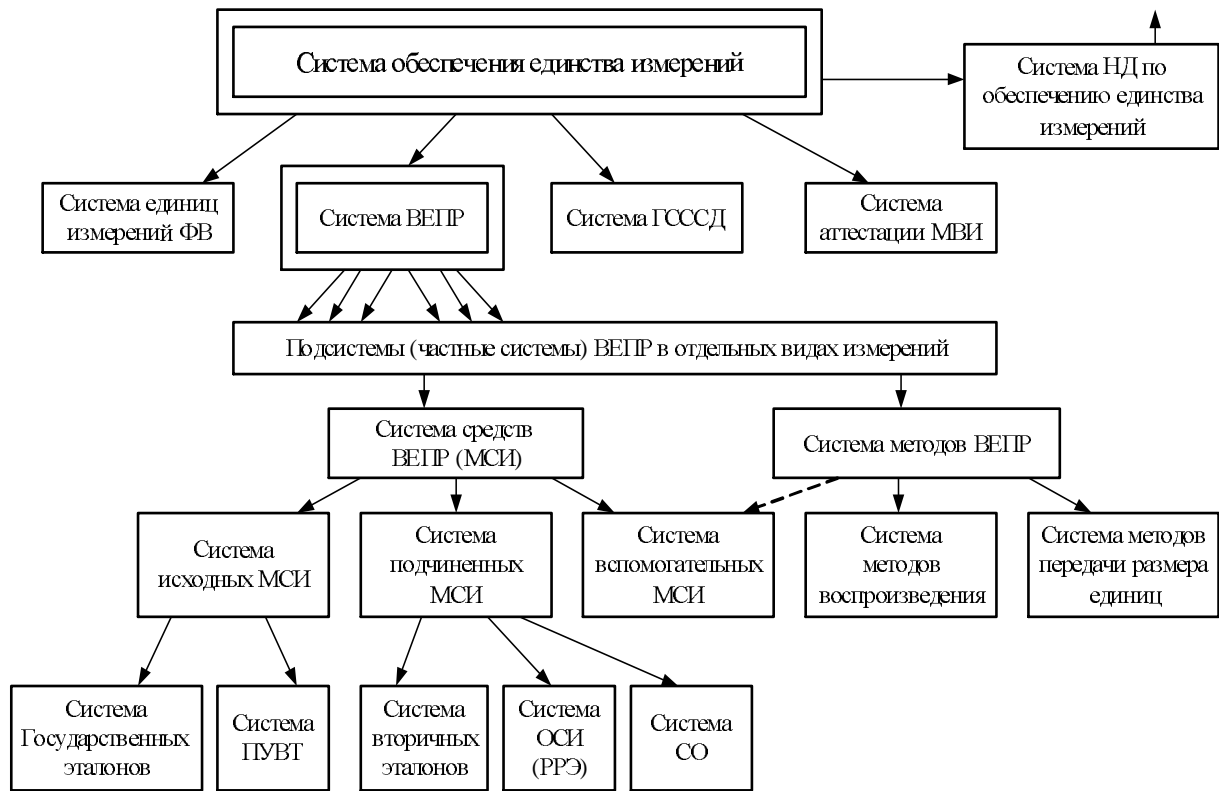


Рис. 1.2. Взаимосвязь подсистем обеспечения единства измерений

Такая (официальная) точка зрения противоречит, однако, другому официальному документу — ГОСТ 16263–70, согласно которому *любая мера*, по определению, воспроизводит ФВ заданных размеров (в том числе размера единицы). Заметим в этой связи, что большинство эталонов (государственных тоже) воспроизводят не строго единицу, а зачастую размеры ФВ, весьма далекие от единицы (например, ГСЭ единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения по МИ 2171–91 — в диапазоне примерно $6 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц). В этом заключается одна из трудностей трактовки термина «воспроизведение единицы».

Отсюда очевидна необходимость углубленного изучения сущности этого понятия — одного из основополагающих понятий практической метрологии, в частности проблемы обеспечения единства измерений. Единственная работа, посвященная специально этому вопросу — это работа С.В. Горбачевича [19], в которой автор анализирует сущность понятия «воспроизведение единицы» и дает более или менее удачное его определение: «воспроизведение единицы — создание такого объекта (тела или устройства), свойства или параметры которого выражаются величиной в единицах, соответствующих их определению». Также глубокое понимание просматривается (к сожалению, без однозначной формулировки) в монографии М.Ф. Маликова ([44. С. 315–325]). Автор работы [44] также связывает «воспроизведение единицы» с практическим осуществлением ее теоретического определения, однако, в отличие от [19], распространяет «воспроизведение единицы» не только на все эталоны (в том числе вторичные), но и на все образцовые СИ (хотя на с. 285 приписывает это свойство только мерам).

Однако есть одно *общее*, что объединяет различные точки зрения на понятие «воспроизведение единицы» — это связь единицы с конкретным СИ, *ее материализация* (осуществление, овеществление).

Выше было показано (п. 2.6), что определенная реализация единицы ФВ в конкретном СИ (реальное содержание в СИ измерительной информации о размере единицы), с помощью которого производится измерение, согласно выражению (1.8а), является необходимым условием любого измерения. Иначе: *любое СИ должно каким-либо образом реализовать* (осуществлять, материализовать) *в себе размер единицы*.

Наличие числового множителя, переводящего размер единицы в кратную или дольную его часть, не играет здесь принципиальной роли.

Отсюда следует, что применять понятие «воспроизведение единицы» в смысле ее овеществления (реализации) только к эталонам (или к образцовым СИ) *бесмысленно*: для рабочих СИ оно также применимо в этом смысле. Заметим, однако, что информация о размере единицы, содержащаяся реально в каждом конкретном СИ, является *априорной измерительной информацией* (при любом измерении с помощью данного СИ), полученной *ранее опытным путем* (как апостериорная измерительная информация при измерении другим СИ). Единственным *исключением*, очевидно, является *самое высокоточное СИ* в данной системе измерений, для которого априорной *измерительной* информации о размере ФВ не существует; единственной априорной информацией о единице данной ФВ для такого СИ является *формальная информация, содержащаяся в определении единицы*.

Таким образом, *единственно возможным* вариантом отделения понятия «воспроизведение единицы» от просто ее «овеществления» может быть соотнесение первого понятия только с самым высокоточным СИ в данной системе измерений.

Итак, *воспроизведение единицы — это такое овеществление (реализация) единицы, при котором единственной априорной информацией о ней является ее теоретическое определение*.

Такое определение, помимо своей логической строгости, впервые позволило подойти к **классификации систем ВЕПР**, а также к **унификации их типовых структур**.

Формализацию понятия «воспроизведение» необходимо сделать в дальнейших исследованиях. Если взять простейший случай одного СИ, используемого для воспроизведения, соответствующий уравнению измерений (1.8), то с учетом (1.9), полагая, по определению, для этого СИ $\{[\varphi]\} = 1$, получаем *уравнение воспроизведения единицы*:

$$\varphi_{\text{эт}}^{(\text{зн})'} = N_{\text{эт}}[\varphi]. \quad (\text{С})$$

«Средство воспроизведения», безусловно, также является *средством измерений*, только измерений *без экспериментальной априорной информации о единице*.

Менее спорным является понятие «передача размера единицы», т. к. содержит в своем наименовании (термине) достаточно полную информацию о своей сущности.

В ГОСТ 8.057–80 [21] рекомендовано следующее определение: «передача размера единицы — совокупность метрологических операций, имеющих целью определить на основании сличения или проверки значение ФВ, которое должно быть приписано вторичному эталону или подчиненному образцовому СИ — при их метрологической аттестации или РСИ — при его поверке».

В работе [53. С. 173] «передача размеров ФВ» (под которой можно понимать и передачу размера единицы как частный случай реализации ФВ) определена как «нахождение (подтверждение, приписание) метрологических характеристик поверяемого или аттестуемого СИ при помощи более точного СИ».

В остальных случаях (без определений) «передача размера единицы» понимается просто как совокупность *иерархического* (в пределах данной поверочной схемы) *сравнения размеров единиц*, «заложенных» в соподчиненных СИ, путем их поверки или градуировки (см., например, [92. С. 83]). Последняя детализация, по видимому, излишняя (как и в предыдущем случае), т. к. не отградуированное (или не аттестованное) СИ, строго говоря, не является СИ (им ничего нельзя измерять). Кроме того, использованные в приведенных определениях (толкованиях) понятия «поверка», «аттестация», «сличение», «градуировка» отражают разновидности метрологических операций *по передаче* размеров единиц и являются, таким образом, *вторичными* по отношению к рассматриваемому понятию «передача размера единицы».

Отсюда видно, что основное содержание понятия «передача размера единицы» составляет *сравнение размеров единиц*, «замороженных» (заложенных в виде априорной измерительной информации) в различных по точности (соподчиненных) СИ.

Для формализации этого понятия воспользуемся тем же уравнением (1.8). Поскольку при передаче (сравнении) добиваются, чтобы $\varphi_2^{(зн)'} = \varphi_1^{(зн)'}$, где $\varphi_1^{(зн)'}$ — значение ФВ по более точному СИ, а $\varphi_2^{(зн)'}$ — значение той же ФВ по подчиненному СИ, то имеем: $N_2[\varphi_2'] = N_1[\varphi_1']$, откуда получаем *уравнение передачи размера единицы*:

$$[\varphi_2'] = \frac{N_1}{N_2}[\varphi_1']. \quad (Д)$$

Этот случай охватывает все основные методы передачи; методы косвенных измерений, которые часто включают в разновидности методов передачи, строго говоря, нельзя относить к методам передачи (см. п. 3.4).

Анализ основных понятий системы ВЕПР будет неполным, если не затронуть понятие «*хранение единицы физической величины*», которое обязательно входит в узаконенное определение понятия «эталон» (см. ГОСТ 16263–70 или ГОСТ 8.057–80).

Для понятия «хранение единицы» имеется только одно пояснение — в справочном приложении к ГОСТ 8.057–80: «хранение единицы — совокупность метрологических операций, имеющих целью поддержать неизменной во времени ФВ, значение которой приписано эталону или образцовому СИ при их метрологической аттестации». По-видимому, в остальной литературе довольствуются именно таким толкованием.

Однако такое определение, скорее, должно относиться к понятию «хранение эталона» (ср. [44. С. 326 и 331]). Разумеется, при надлежащем хранении эталона (которое является обязательным по ГОСТ 8.057–80) будет, соответственно, сохраняться и размер воспроизводимой им единицы. Вообще же *хранит* единицу *любое* СИ, поскольку оно ее овеществляет (материализует и «запоминает»).

Поэтому *хранение единицы* — не что иное, как *осуществление ее данным СИ во времени*. В частности, под хранением единицы *эталон* следует понимать ее *воспроизведение во времени*: сколько он ее воспроизводит, столько и хранит (разумеется — чем дольше, тем лучше).

В этой связи следует отметить, что воспроизведение единицы эталоном (государственным, как самым точным в ГСИ) во времени может осуществляться двумя способами:

1) *дискретным* — когда единица воспроизводится лишь в отдельные моменты (промежутки) времени (при «включенной» эталонной установке); в остальное время эталон только *потенциально* является ее «воспроизводителем»;

2) *непрерывным* — когда эталон воспроизводит единицу в любой момент времени, пока он существует как эталон.

Из этого, между прочим, вытекает важное *требование к номенклатуре метрологических характеристик* государственных эталонов, связанных с хранением ими соответствующих единиц: если при непрерывном способе воспроизведения погрешность

хранения единицы эталоном достаточно характеризовать *нестабильностью* (показателем стабильности), то при дискретном способе воспроизведения (как будет видно из п. 4.2, этот способ является наиболее распространенным среди действующих государственных эталонов) наряду с показателем стабильности (за время одного дискретного воспроизведения единицы) необходимо указывать и *воспроизводимость* эталона (как погрешность эталона от разных его «включений»).

2.8. Структура системы ВЕПР

Прежде всего, следует заметить, что понятие «система ВЕПР» часто употребляется применительно к отдельному виду измерений (т. е. к одной ФВ, единицу которой данная система воспроизводит и передает). Вместе с тем, не менее важным является представление о *полной системе ВЕПР* как системе, охватывающей все измеряемые физические величины. Поскольку в аббревиатуре, которая удобна для сокращения объема монографии, невозможно отличить множественное число от единственного («единиц» или «единицы»), то целесообразно ввести отдельно название «*частная система ВЕПР*» для системы ВЕПР, относящейся к отдельной ФВ.

С точки зрения структуры в *полной системе ВЕПР* можно выделить две подсистемы: *полную систему воспроизведения единиц ФВ* и *полную систему передачи размеров единиц*. Целесообразность введения первой подсистемы в настоящее время не вызывает сомнений: ей соответствует, по крайней мере, система всех государственных эталонов — важнейшая часть эталонной базы страны.

Самостоятельность и важность проблемы взаимоувязки воспроизведения единиц различных величин ярко проявились при разработке системы государственных эталонов важнейших единиц электрических величин [82].

Вторая подсистема введена пока, скорее, как дополнение к первой; в настоящее время категория «системы передачи размера единицы» более важна для частных систем ВЕПР.

С точки зрения классификации систем ВЕПР как их множества более интересным представляется, однако, *структура частной системы ВЕПР*. Для этого введем *обобщенные элементы* частной системы ВЕПР, которыми, в общем виде, могут быть как элементы простейших метрологических множеств (п. 2.2), так и элементы

более сложных метрологических систем. Выберем в качестве элементов частной системы ВЕПР только элементы двух систем: *средств* воспроизведения единиц и передачи их размеров и *методов* воспроизведения единиц и передачи их размеров.

Только для этих множеств имеется необходимый фактический материал, по крайней мере, в виде поверочных схем. Кроме того, эти множества являются наиболее существенными для систем ВЕПР: системы НД, метрологических кадров, метрологических органов и т. д., а также в значительной степени общими для всех собственно метрологических систем и в структуре ГСМО (рис. 1.1) выделены в самостоятельные системы.

Заметим, что средства воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров являются единственными *сузубо метрологическими* техническими средствами: их отличие от технических средств, предназначенных для измерений вне метрологической практики, — рабочих средств измерения (РСИ), вытекает из предыдущего пункта и состоит в том, что ни одно РСИ не воспроизводит единицы и не передает ее размер (в определениях п. 2.6). В то же время любое средство воспроизведения единицы или передачи ее размера является одновременно несомненным *средством измерений*.

Учитывая оба эти обстоятельства, целесообразно обобщенный элемент частной системы ВЕПР, являющийся средством воспроизведения единицы и (или) передачи ее размера, называть метрологическим средством измерений: *«метрологическое средство измерений — средство измерений, предназначенное и (или) применяемое в определенной системе измерений (например, в ГСИ) для воспроизведения единицы и (или) передачи ее размера»*.

Были и другие попытки ввести обобщенное понятие для СИ, используемых в метрологической практике, отличающее их от категории РСИ. Так, в работе [53. С. 172] все СИ делятся на рабочие и образцовые (аналогично у М.Ф. Маликова [44. С. 285]. Однако это не очень удачная терминология, т. к. потом образцовые СИ приходится делить на эталоны и образцовые же СИ.

Из сущности понятий «воспроизведение единицы» и «передача размера единиц», установленной в предыдущем пункте, неизбежно вытекает *иерархичность* структуры системы МСИ для данной частной системы ВЕПР (рис. 1.2). С точки зрения соподчиненности различных МСИ в пределах одной частной системы ВЕПР

можно выделить *три самостоятельных класса МСИ*, справедливых для любой разновидности системы ВЕПР:

исходное МСИ системы: МСИ (или комплекс МСИ), позволяющее воспроизводить и передавать единицу ФВ данной частной системы ВЕПР;

подчиненное МСИ системы: МСИ, позволяющее передавать (но не воспроизводить) размер единицы данной частной системы ВЕПР;

вспомогательное МСИ системы: МСИ, обеспечивающее необходимое функционирование исходного и (или) подчиненных МСИ данной частной системы ВЕПР (другой вариант: ...обеспечивающее нормальное функционирование иерархической системы исходного и подчиненных МСИ).

Введение класса «вспомогательных МСИ системы», вообще говоря, не вытекает из логики предыдущих построений; оно продиктовано практикой применения исходных и подчиненных МСИ (см. п. 3.3).

3. РАЗНОВИДНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЧАСТНОЙ СИСТЕМЫ ВЕПР

Проанализируем действующие в метрологической практике категории (разновидности) метрологических средств измерений, которые можно отнести к тому или иному классу (п. 2.8) с учетом сделанных уточнений понятий «воспроизведение единицы», «передача размера единицы» и «хранение единицы» ФВ.

3.1. Исходные МСИ

В рамках рассматриваемой системы измерений — ГСИ — к исходным МСИ для какой-либо частной системы ВЕПР можно отнести следующие категории:

– государственные эталоны (ГЭ), определенные в ГОСТ 16263–70; среди них различаются (см. также ГОСТ 8.057–80) государственные первичные эталоны (ГПЭ) и государственные специальные эталоны (ГСЭ);

– поверочные установки для воспроизведения единиц методом косвенных измерений, на практике получившие название «поверочные установки высшей точности» (ПУВТ);

– комплекс образцовых средств измерений, заимствованных из других поверочных схем (допускается ГОСТ 8.057–80).

Однако определения (признаки) каждой категории настолько нечетки, что не позволяют однозначно относить данное МСИ к какой-либо одной из них (особенно наглядно это видно из двух статей в журнале «Измерительная техника», 1981 г., № 2, описывающих ГСЭ для единицы относительной диэлектрической проницаемости (С. 29) и ПУВТ для воспроизведения единицы длины (в области больших длин) (С. 31).

Действительно, все единицы ФВ (кроме основных) могут воспроизводиться только методом косвенных измерений (через прямые измерения других ФВ, единицы которых известны). Поэтому, если под ПУВТ понимать необходимый для косвенных измерений комплекс зафиксированных СИ, то не будет никакого принципиального отличия их от ГЭ.

С другой стороны, если и в третьей категории (заимствованных образцовых средств измерения — ОСИ) предположить, что все входящие в комплекс ОСИ фиксированы в рамках одной установки, то она ничем не будет отличаться от двух первых категорий (т. к. несомненно, что СИ других ФВ могут воспроизводить данную ФВ только косвенным методом).

Поскольку сделанные предположения ничем не регламентированы, то видна затруднительность отнесения МСИ к какой-либо категории.

Очевидно, что номенклатура разновидностей исходных МСИ должна вытекать из различия типов систем ВЕПР по различным существенным признакам их воспроизведения, т. е. основываться на классификации систем ВЕПР, которая рассматривается в п. 4.

Здесь только отметим, что вопрос этот требует самостоятельной терминологической проработки с учетом изложенного в этом пункте, а также в п. 4.

3.2. Подчиненные МСИ

К разряду подчиненных СИ метрологического назначения относят:

- эталоны копии (ЭК),
- рабочие эталоны (РЭ): разновидности вторичных эталонов;
- образцовые средства измерений (ОСИ): разрядные и безразрядные;
- поверочные установки (ПУ).

Все эти категории (разновидности) определены в ГОСТ 16263–70 и предусмотрены в ГОСТ 8.057–80. Здесь трактовка этих разновидностей также требует уточнения.

Так, образцовое СИ почему-то определяется не через СИ вообще (что было бы логичнее, приписав ему, естественно, соответствующие метрологические функции), а через три конкретные разновидности СИ (меры, приборы, преобразователи), в результате чего искусственно приходится вводить понятие ПУ.

Не видно никаких различий (в том числе метрологического плана) между категориями вторичных эталонов, предназначенных для передачи размера единицы: ЭК, РЭ и ОСИ. В соответствии с п. 2.8 (и определениями в ГОСТ 16263–70) все они могут служить только для передачи размера единицы. Можно было бы использовать искусственный (но, по существу, оправданный) прием: допускать введение РЭ только при наличии достаточно большого числа разрядов ОСИ в ПС (хотя бы более двух); однако этого условия нет, и в ряде ПС (как показывает анализ) РЭ вводятся даже при одноразрядных ОСИ. Еще менее убедительным выглядит введение ЭК как еще одного звена передачи с *новым* названием, но с теми же функциями, что и РЭ, и ОСИ.

Кроме того, само название ЭК неудачно: напрашивается, чтобы этим термином называлось МСИ, действительно выполняющее функции *копии* (как запасного варианта — см. п. 3.3). Из-за этого, между прочим, ряд реальных ПС и ЭК введены с различными функциями.

По нашему мнению, с метрологической точки зрения для подчиненных МСИ вполне достаточно категории *образцовых средств измерений* (ОСИ) как разрядных, так и безразрядных. В крайнем случае, с оговорками, сделанными выше, можно было бы оставить категорию *рабочих эталонов* (РЭ), как бы несущих эталонный «привкус» («запах», «оттенок») от ГЭ при наличии большого числа разрядных ОСИ.

3.3. Вспомогательные МСИ

Этот класс МСИ, как уже говорилось, сложился исторически, исходя из практики применения исходных и подчиненных МСИ. Такая практика показала, что в ряде случаев целесообразно и необходимо наряду с исходными и подчиненными МСИ иметь ряд МСИ вспомогательного назначения, которые выполняют одну из

следующих *функций*, являющихся результатом *метрологического* применения исходных и подчиненных МСИ:

– осуществление *сравнения* (сличений) исходных и подчиненных МСИ данной частной системы ВЕПР либо соответствующих основных (как правило, исходных) МСИ систем ВЕПР той же ФВ, но для разных систем измерений (национальных, международных);

– проверка *сохранности* (неизменности) метрологических характеристик исходного МСИ;

– *замена исходного* МСИ в случае его выхода из строя.

Для выполнения *первой* функции используются следующие разновидности СИ: *эталоны сравнения* (по ГОСТ 16263–70 и 8.057–80) и *компараторы* (нигде не регламентированы, но предусмотрены в ГОСТ 8.061–80). Для *второй* и *третьей* функции предусмотрена только одна категория — *эталон-свидетель* (по ГОСТ 16263–70).

По ГОСТ 8.057–80 средства измерений, которые контролируют неизменность воспроизводимого ГЭ размера единицы, предусмотрено включать в состав ГЭ, т. е. для выполнения второй функции не оставлено самостоятельной категория МСИ; получается, что эталон-свидетель теперь служит только для замены ГЭ.

С учетом этого можно сказать, что название эталон-свидетель для функции замены ГЭ нельзя назвать удачным, для этого больше подходит эталон-копия.

Нельзя также признать удовлетворительным то, что до сих пор не регламентирована важная категория *компараторов*: любая передача размера единицы идет через *сравнение* (см. п. 2.7), и если для этого необходимо использование дополнительных СИ, которые, безусловно, влияют на точность и метод передачи размера единицы, то они заслуживают такого же внимания, как и другие МСИ.

Наиболее ярко этот «нонсенс» виден в случае ПС для СИ массы (гири и весов): МСИ являются только гири, тогда как весы, хотя и имеют разряды, ППС не регламентированы, т. е. рассматриваются как РСИ.

3.4. Методы передачи размера единицы

Согласно ГОСТ 8.061–80, предусмотрены четыре категории методов передачи размеров единиц (в стандарте они называются методами поверки, что, на наш взгляд, не совсем правильно):

1) непосредственное сличение (без средств сравнения, т. е., в нашей терминологии, без использования вспомогательных МСИ);

2) сличение при помощи компаратора или других средств сравнения;

3) метод прямых измерений;

4) метод косвенных измерений.

Не затрагивая первых трех разновидностей, которые трактуются более или менее четко (см., например, [53. С. 179]), остановимся только на *методе косвенных измерений*.

При косвенных измерениях, как известно, значение *измеряемой* (искомой) ФВ определяется на основе прямых измерений *других* ФВ, т. е.

$$\varphi_i^{(зн)'} = f\left(\varphi_1^{(зн)'}, \varphi_2^{(зн)'}, \dots, \varphi_j^{(зн)'}, \dots, \varphi_l^{(зн)'}, C_k\right), \quad (1.11)$$

где $i \neq j$, а C_k — совокупность некоторых констант, появляющихся при определении единиц в какой-либо системе единиц.

Из (1.11) с учетом уравнения прямых измерений (1.8а) видно, что при таких измерениях априорная *измерительная информация* содержится только о единицах *других* ФВ. Следовательно (в свете сказанного в п. 2.7), уравнение (1.11) может быть только уравнением *воспроизведения* данной единицы.

Однако если значение $\varphi_i^{(зн)'}$ искомой величины известно из других, более точных измерений (возможно, также косвенным методом), то тогда передача размера единицы становится возможной:

$$\varphi_{i2}^{(зн)} = \varphi_{i1}^{(зн)} \text{ и } \{\varphi_{i2}\}[\varphi'_{i2}] = \{\varphi_{i1}\}[\varphi'_{i1}],$$

откуда

$$[\varphi'_{i2}] = \frac{\{\varphi_{i1}\}}{\{\varphi_{i2}\}}[\varphi'_{i1}].$$

Но такое сравнение возможно, когда: либо более точное СИ является мерой, либо оба СИ косвенным методом измеряют одну и ту же конкретную реализацию ФВ, т. е. являются транспарбельными.

4. МЕЖВИДОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЧАСТНЫХ СИСТЕМ ВЕПР

Объектом анализа при классификации частных систем ВЕПР служили введенные в действие государственные поверочные схемы. Кроме того, была использована информация из литературных источников и от специалистов по тем ФВ, для которых в настоящее время нет узаконенных ПС.

В п. 4 рассматривается межвидовая классификация (т. е. типовая для разных видов измерений); в п. 5 будут рассмотрены некоторые аспекты видовой классификации систем ВЕПР.

Выбор *классификационных признаков* произведен на основе проведенного в предыдущих пунктах анализа основных понятий и представлений, связанных с системой ВЕПР в целом. Поскольку данная классификация имеет конечной целью разработку теории построения систем ВЕПР (возможно, и других метрологических систем), то существенность признака определялась его значимостью с точки зрения *построения* таких систем.

Достаточно, например, сказать, что такой важный показатель систем ВЕПР, как *точность* воспроизведения единицы и передачи ее размера сама по себе, с этой точки зрения, менее существенен, т. к. зависит прежде всего от *конкретной* реализации элементов системы, хотя некоторые параметры системы в целом и являются производными от него.

Для межвидовой классификации в качестве основных классификационных признаков выбраны два:

- 1) степень централизации воспроизведения размера единицы данной частной системы ВЕПР в рамках ГСИ;
- 2) способ воспроизведения размера единицы исходным МСИ системы.

Кроме того, проведен дополнительный анализ систем ВЕПР по следующим признакам:

- соотношению точности элементов соседних уровней частной системы ВЕПР (в том числе по отношению к РСИ);
- числу ступеней передачи размера единицы;
- «заселенности» каждого уровня системы ВЕПР подчиненными и вспомогательными МСИ.

4.1. Классификация по степени централизации воспроизведения размера единицы

Считая, по данному ранее определению, что каждая частная система ВЕПР распространяется на *одну* ФВ (само понятие ФВ не так уж тривиально, как и то, какие измеряемые параметры считать одной ФВ — см. далее в п. 5) и все они действуют в рамках одной системы измерений — ГСИ, классификация всех доступных для анализа систем ВЕПР выявила четыре категории (группы типов) частных систем ВЕПР по этому признаку.

Первая группа — системы ВЕПР с *полной централизацией* воспроизведения размера единицы (тип ПЦ). В каждой из таких систем существует только одно исходное МСИ для всей страны, т. е. система ВЕПР распространяется на *все* СИ данной ФВ в стране.

Хотя формальным признаком таких систем может служить наличие только *одной* ГПС для данной ФВ, фактическое выявление таких систем связано с определенными трудностями, прежде всего с точки зрения толкования физических величин (см. п. 5.1): как одинаковых по названию и единицам, но разных по физическому смыслу (угол плоский и угол сдвига фаз между электрическими напряжениями; масса и масса радия), так и (особенно) разных по названию, но одинаковых по смыслу и единицам (напряженность магнитного поля и намагниченность, мощность излучения и поток излучения, концентрация и рН, а также объемное влагосодержание и др.). Однако если даже исключить такие случаи (при этом получится перечень из 17 ФВ — см. табл. 1.1), то более глубокий анализ оставшихся 17 ГПС показывает, что в некоторых из них (для силы, скорости при колебательном движении, индуктивности и др.) присутствуют другие степени централизации воспроизведения единицы.

Учитывая, что в данной ГСИ (в стране) всегда реально существуют РСИ, не охваченные ГПС (в частности, СИ для научных исследований, использующие косвенные методы измерений), то практически «чистых» систем ВЕПР типа ПЦ не бывает. Наиболее близкие к ним — системы ВЕПР для массы, плотности, вязкости, времени, силы света и некоторых других величин;

Вторая группа — системы ВЕПР с *кратной централизацией* воспроизведения единицы (тип КЦ). В каждой из таких систем существует несколько *разных* исходных МСИ для страны, причем

каждое из них воспроизводит единицу в различных (не перекрывающихся) условиях измерения ($\Psi_i \neq \Psi_k$). Система ВЕПР в этом случае как бы подразделяется на ряд подсистем (в пределах одной ФВ), т. е. на *разделы* частной системы ВЕПР.

Этот тип систем ВЕПР соответствует в настоящее время наличию нескольких ГЭ единицы одной ФВ (и, соответственно, нескольких ГПС); он оправдан, естественно, только в том случае, если каждый государственный эталон (исходное МСИ) воспроизводит единицу в данных условиях выше точности *всех* других СИ данной ФВ в этих же условиях (в рамках ГСИ), в противном случае такое «исходное» МСИ должно перейти в ранг «подчиненного» МСИ.

Здесь следует отметить, что ГОСТ 8.061–80 и ГОСТ 8.057–80 в этом отношении противоречивы: в п. 1.2.1 первого говорится, что каждая ГПС распространяется *на все* СИ данной ФВ, применяемые в стране; в то же время каждая ГПС возглавляется одним ГЭ, а таких эталонов для одной ФВ второй ГОСТ допускает несколько.

Если ввести *степень кратности* воспроизведения единицы, соответствующую числу таких независимых исходных МСИ, то из анализа действующих ГПС получим следующую картину:

Степень кратности	2	3	4	5	6	7	8	≥ 9
Число систем ВЕПР с данной степенью кратности	8	4	3	2	-	-	1	-

Наибольшую степень кратности имеет система ВЕПР для давления — создано несколько ГЭ и ГПС, имеющих различные условия измерения, например:

- избыточное давление (до $6 \cdot 10^8$ Па) по ГОСТ 8.017–75;
- абсолютное давление (от 10^{-3} до 10^3 Па) по ГОСТ 8.107–74;
- абсолютное давление (от $3 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^5$ Па) по ГОСТ 8.223–76;
- давление в диапазоне от $2 \cdot 10^8$ до $1,5 \cdot 10^9$ Па по ГОСТ 8.094–73;
- давление звуковое в воздушной среде по ГОСТ 8.038–75;
- разность давлений (от 10^{-1} до $4 \cdot 10^4$ Па) по ГОСТ 8.187–76;
- давление звуковое в воздушной среде по ГОСТ 8.233–77;
- давление звуковое в водной среде по ГОСТ 8.124–74.

В 1981 г. появилась еще одна ГПС для давления — в области переменных давлений; тем самым система ВЕПР для давления

стала 9-кратной; однако при тщательном рассмотрении в ней обнаруживаются перекрытия.

Степень кратности, равную 8, имеет система ВЕПР для одной из основных величин — температуры; 5-кратные системы ВЕПР существуют для удельной теплоемкости, для длины и т. д.

Третья группа — системы ВЕПР с *местной (локальной) централизацией* воспроизведения единицы (тип ЛЦ). В каждой системе такого типа существует несколько *одинаковых* исходных МСИ, воспроизводящих единицу в одинаковых условиях ($\Psi_i = \Psi_k$).

На возможность такого типа систем ВЕПР указывал еще Е.Ф. Долинский (см. [28. С. 43]).

Наличие систем ВЕПР такого типа допускается косвенно ГОСТ 8.061–80 (пп. 2.6 и 2.7) путем введения категории заимствованных образцовых СИ для воспроизведения единицы методом косвенных измерений, а также ГОСТ, которым вводятся *поверочные установки для воспроизведения единицы* описанным только что способом. В первом случае исходного МСИ как такового не существует: комплекс СИ не зафиксирован индивидуальными экземплярами, и исходное МСИ является как бы потенциальным (виртуальным). В этом случае вместо исходного МСИ правильнее было бы говорить об *исходном методе воспроизведения*. Нечто подобное М.Ф. Маликов имел в виду под ранее использовавшимся понятием воспроизведения единицы *эталонным методом* (см. [44. С. 331]).

Таблица 1.1

Системы ВЕПР с полной централизацией воспроизведения единицы (выборочно)

№ п/п	Физическая величина	Единица ФВ	Номер НД соответствующей ГПС
1	Время	с	ПМГ 18–96
2	Масса	кг	ГОСТ 8.021–84
3	Сила	Н	ГОСТ 8.065–85
4	Скорость линейная (при колебательном движении твёрдого тела)	м/с	МИ 2070–90
5	Угловая скорость	рад/с	ГОСТ 8.288–78

Продолжение таблицы 1.1

№ п/п	Физическая величина	Единица ФВ	Номер НД соответствующей ГПС
6	Угловое ускорение	рад/с ²	ГОСТ 8.289–78
7	Сила света	кд	ГОСТ 8.023–90
8	Энергетическая яркость	Вт/(ср·м ²)	ГОСТ 8.106–01
9	Энергетическая освещенность (для непрерывного оптического излучения сплошного спектра)	Вт/м ²	ГОСТ 8.195–89
10	Индуктивность	Гн	ГОСТ 8.029–80
11	Дифференциальная резонансная парамагнитная восприимчивость	Тл	ГОСТ 8.182–76
12	Магнитный поток	Вб	ГОСТ 8.030–91
13	Магнитный момент	А·м ²	ГОСТ 8.231–84
14	Объемная активность	Бк/м ³	ГОСТ 8.090–79
15	Мощность экспозиционной дозы	А/кг	ГОСТ 8.034–82
16	Плотность жидкости	кг/м ³	ГОСТ 8.024–75
17	Вязкость кинематическая (жидкости)	м ² /с	ГОСТ 8.025–96

Примечания:

1. Заключение о принадлежности ФВ к системе ВЕПР первой группы (с полной централизацией воспроизведения размера единицы) сделано только на формальном основании — наличии одной-единственной ГПС для ФВ (с исключением однородных ФВ — разных по названию, но одинаковых по смыслу и единицам).

2. Энергетические величины разной природы физических явлений составлены в таблице.

Во втором случае этот комплекс СИ зафиксирован в рамках одной (официальной) установки, но таких комплексов может быть несколько (N_0), причем возможно, что $2 \leq N_0 \leq N$ (РСИ).

Официально таких систем ВЕПР не существует, но фактически они есть: объемная емкость (вместимость), линейное постоянное ускорение, скорость звука и др. — в явном виде, а для ряда вели-

чин (угол, сила, индуктивность) — как «примеси» (ветви) в ГПС, особенно отчетливо в ГПС для расхода.

Четвертая группа — системы ВЕПР с полной *децентрализацией* воспроизведения единиц (тип ДЦ). Никаких исходных МСИ в таких системах нет; во всех случаях измерения данной ФВ производят косвенным методом, т. е. ее единица воспроизводится в каждом конкретном измерении.

Примерами ФВ, принадлежащих к такому типу систем ВЕПР, являются площадь, моменты инерции, количество движения, импульс силы, механическая энергия, тепловая энергия в теплотехнике.

Как видно из анализа действующих систем, перечисленные типы систем ВЕПР в чистом виде встречаются на практике крайне редко: как правило, имеют место системы смешанного типа с различной степенью охвата СИ данной ФВ. Кроме того, имеет место совмещение систем ВЕПР для разных величин: достаточно наглядно это видно из табл. 1.1, где одной ГПС принадлежат иногда несколько ФВ (для ГОСТ 8.023–74 — четыре ФВ: сила света, освещенность, световой поток, яркость).

Однако при одном исходном МСИ такое совмещение систем ВЕПР, строго говоря, возможно только в одном случае: когда совмещаемые ФВ связаны чисто *математической* зависимостью (квадрат или другая степень, логарифм и т. п.); примером служит система ВЕПР для времени и частоты.

Чисто математическую зависимость ФВ, по определению, не следует путать с математической моделью измеряемой ФВ (на конкретном объекте). Например: то, что площадь квадрата равна квадрату его стороны, не означает, что, измерив точно сторону сиденья квадратной табуретки, мы получим столь же точное значение площади сиденья: для этого надо проверить адекватность модели объекту и вводить необходимые поправки в их зависимость.

4.2. Классификация систем ВЕПР по способу воспроизведения единицы

Среди множества возможных толкований термина «способ воспроизведения единицы» были выбраны два:

1) с точки зрения поведения *воспроизведения во времени* («хранения» единицы);

2) с точки зрения *зависимости воспроизведения от процесса передачи* размера единицы.

Первый аспект обсуждался в п. 2.7. Здесь можно только констатировать, что к *непрерывному* способу воспроизведения единицы (во времени) принадлежат в настоящее время только системы ВЕПР для массы, плотности, вязкости, плоского угла, ЭДС, электрической емкости, индуктивности и массы радия.

Во всех остальных случаях мы имеем дело с *дискретным* способом воспроизведения единицы. Отсюда следует актуальность введения дополнительной метрологической характеристики исходных МСИ (в частности, государственных эталонов) — воспроизводимости.

Из анализа систем ВЕПР с точки зрения отношения воспроизведения единицы к процессу передачи ее размера можно установить две ситуации:

1) когда исходное МСИ воспроизводит единицу независимо от того, осуществляется в данный момент ее передача или нет;

2) когда исходное МСИ воспроизводит единицу *только в момент* передачи.

Причиной различия этих ситуаций служит различие состава исходных МСИ: если в состав исходного МСИ входит «источник» самой ФВ, то, естественно, воспроизведение единицы можно осуществлять и без передачи; если же «источника» ФВ в его составе нет, но он есть в непосредственно подчиненном МСИ, то тогда воспроизвести единицу можно только в момент передачи.

Вторая ситуация имеет место, например, в действующих системах ВЕПР для температурного коэффициента линейного расширения (ГОСТ 8.018–82 и др.), удельной теплоемкости (ГОСТ 8.141–75 и др.), теплопроводности, количества теплоты, твердости по разным шкалам, относительного распределения плотности мощности в поперечном сечении пучка непрерывного излучения ОКГ и др.

По-видимому, такие исходные МСИ едва ли целесообразно называть государственными эталонами, скорее, это *поверочные установки высшей точности*, предназначенные, как правило, для аттестации стандартных образцов (СО).

4.3. Другие аспекты межвидовой классификации

Остальные классификационные признаки, по которым производился анализ систем ВЕПР, относились главным образом к систе-

ме передачи размера единиц. В значительной степени такой анализ содержится в [55] (в частности, по числу ступеней передачи размера единицы, соотношению точностей элементов соседних уровней и др.).

Наибольший интерес может представить классификация систем ВЕПР по соотношению диапазонов измерений исходного МСИ и самого низшего подчиненного (или замыкающихся на них РСИ). Поскольку такой анализ в настоящее время возможен только для ГПС с государственным эталоном во главе, дальше в виде исходного МСИ будут рассматриваться только государственные эталоны.

Для этого выбраны три категории системы ВЕПР:

1) $D_{ГЭ} \geq D_{РСИ}$; 2) $D_{ГЭ} = X_{ном} \ll D_{РСИ}$; 3) $D_{ГЭ} < D_{РСИ}$.

При таком анализе рассматривались, по сути дела, не системы ВЕПР в целом, а их подразделы (с учетом степени кратности систем). При этом к первой категории можно отнести 33 случая, ко второй — 18 случаев, а к третьей — 53.

Первый случай означает воспроизведение единицы и передачу ее размера во всем необходимом диапазоне измерений, т. е. воспроизведение и передачу *шкалы* ФВ; это достаточно естественно для тех величин, которые определены до отношений порядка и эквивалентности размеров или интервалов между ними (см. [10. С. 19]): твердость, температура, время и др.

Второй случай (который может рассматриваться как предельный для третьего, когда $D_{ГЭ} \rightarrow 0$) и третий случай могут быть реализованы только для аддитивных величин, для которых справедливы отношения арифметических операций сложения и др.

Очевидно, что в этих случаях встает вопрос о точности *масштабного преобразования* по передаче размера единицы от исходного МСИ к РСИ. Этот вопрос должен составить предмет самостоятельного исследования с позиций обобщающего теоретического рассмотрения.

Следует отметить, что в 2002 г. состоялось заседание Ученого совета ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, который принял следующее решение: считать классификацию, использующую *рабочие разрядные эталоны*, не получившей широкого внедрения за более чем 10-летнюю практику, особенно у приборостроителей, а также зачастую нарушающей былую строгость классификации, использующей *разрядные образцовые средства измерений*.

Для полноты картины в табл. 1.2 приведены данные о распределении МСИ по ГПС по данным на 1978 г.

Таблица 1.2

Распределение различных категорий МСИ по ГПС

№ п/п	Категория МСИ	Общее количество типов	Число ГПС для данной категории	Количество типов МСИ на 1 ГПС
1	Государственные эталоны:			
	первичные	43	43	1
	специальные	61	61	1
2	Эталон-копии	17	11	1,55
3	Эталон-свидетели	9	9	1
4	Эталон-сравнения	12	11	1,09
5	Рабочие эталоны	107	69	1,55
6	Образцовые средства измерений (ОСИ):			
	ОСИ-1	219	104	2,1
	ОСИ-2	172	70	2,46
	ОСИ-3	67	28	2,4
	ОСИ-4	14	5	2,8
	ОСИ-5	5	2	2,5
	ОСИ-6	1	1	1
ОСИ-7	1	1	1	
7	Заемствованные СИ	Неизвестно	22	Неизвестно

На основе результатов анализа, проведенного при классификации, с учетом изложенного в пп. 4 и 5 можно сделать следующие выводы по межвидовой классификации.

1. Общее число действующих в ГСИ частных систем ВЕПР (т. е. измеряемых ФВ) точно неизвестно. Если говорить о непересекающемся перечне ФВ, то, согласно оценке в п. 5 (см. графу 7 табл. 1.3), их число составляет 235; если допустить, что частные системы ВЕПР могут иметь разделы (по условиям измерений Ψ — см. также п. 6), то тогда число измеряемых ФВ и систем ВЕПР (с учетом их разделов) составит 304 (графа 6 табл. 1.3).

2. По полученным данным, число систем ВЕПР с полной централизацией воспроизведения единицы (типа ПЦ) составляет 27;

число систем ВЕПР с кратной централизацией воспроизведения (типа КЦ) — 31; общее число разделов у таких систем — 95.

Некоторые системы ВЕПР являются совмещенными, поэтому сумма систем ВЕПР типа ПЦ и разделов систем типа КЦ не совпадают с числом действующих ГПС.

3. Число систем ВЕПР типа ЛЦ и ДЦ можно оценить лишь ориентировочно: по ранее приведенным примерам число систем типа ЛЦ — около 10. Тогда все остальные системы (за вычетом ПЦ, КЦ и ЛЦ) будут системами с полной децентрализацией воспроизведения единиц, их число $235 - (27 + 31 + 10) \cong 167$.

4. Хотя все действующие ГПС считаются системами с полной централизацией воспроизведения единицы, согласно п. 2, они прежде всего подразделяются на системы типа ПЦ и КЦ.

Более того, при более глубоком рассмотрении оказывается, что некоторые ГПС не соответствуют даже разделу системы типа КЦ, т. е. не могут самостоятельно воспроизводить единицу, т. к. фактически «получают» ее из другой ГПС, и, таким образом, должны входить в последнюю. Примером могут служить ГПС для высоких давлений, ГПС температуры по инфракрасному и ультрафиолетовому излучению, ГПС переменного напряжения и др., т. е. в состав соответствующих государственных эталонов входят подчиненные МСИ из другой ГПС той же ФВ.

Кроме того, как уже отмечалось, во многих из них есть «примеси» систем типа ЛЦ и ДЦ.

5. Номенклатура разновидностей исходных МСИ, которой мы располагаем (п. 3.1) явно недостаточна для того, чтобы различать системы и их исходные МСИ как по степени централизации воспроизведения единицы, так и по способу воспроизведения. Этот вопрос требует самостоятельной терминологической проработки.

5. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВИДОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЧАСТНЫХ СИСТЕМ ВЕПР

В [32] рассмотрена классификация измерений по отношению к *физическим величинам* и различным условиям их реализации. Эта классификация, особенно в части деления *видов измерений* на подвиды и т. д., в значительной степени также основывалась на имеющейся информации, содержащейся в ГПС, а поэтому в некотором смысле отражает структуру системы ВЕПР и отдельных

(частных) ее подсистем. Например, наличие ряда ГПС для СИ данной ФВ в различных особых условиях измерений, связанных с особенностями реализации этой ФВ, диапазоном ее значений, поведением во времени и т. п., находит свое отражение и в наличии подвидов (разновидностей) измерений, и в наличии n -кратных частично централизованных систем ВЕПР (см. п. 4.1).

Разработанный в [32] классификатор измерений был использован при выработке предложений по уточнению специализации метрологических органов Госстандарта. Основная идея этих предложений состояла в придании иерархичности структуре специализации метрологических органов, соответствующей иерархической структуре системы обеспечения единства измерений и соответствующей полной системы ВЕПР, состоящей из подсистем и уровней. В связи с этим разработанные предложения в известной мере отражают классификатор частных систем ВЕПР по областям и видам (разновидностям) измерений.

Здесь рассмотрим только некоторые принципиальные аспекты видовой классификации систем ВЕПР, не получившие соответствующего отражения в [32].

5.1. О формальном и фактическом числе ФВ

Были проанализированы перечни физических величин, содержащиеся в литературе по метрологии [10, 14, 71]. Рассмотрим для начала количественные характеристики перечней. Если расположить все определяемые в этой литературе ФВ по разделам физики, как в [14], то получается следующая картина (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Сопоставление числа физических величин в различных разделах физики по разным литературным источникам

Раздел физики	Бурдун Г.Д. [10]	СТ СЭВ 1052–78 [14]	Сена Л.А. [71]	Результаты суммирования		
				А	Б	В
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7
Пространство и время (I)	10	10	15	15	13	13
Периодические явления (II)	2	7	4	9	9	8

Продолжение таблицы 1.3

Раздел физики	Бурдун Г.Д. [10]	СТ СЭВ 1052–78 [14]	Сена Л.А. [71]	Результаты суммирования		
				А	Б	В
<i>1</i>	2	3	4	5	6	7
Механика (III)	23	24	41	45	44	42
Теплота (IV)	18	22	15	24	21	19
Электричество и магнетизм (V)	38	45	38	54	52	38
Свет и оптика (VI)	16	38	15	42	42	38
Акустика (VII)	9	17	18	21	19	4
Физико-хими- ческие и моле- кулярные явле- ния (VIII)	1	37	6	39	40	26
Ионизирующие излучения (IX)	14	10	7	14	13	11
Атомная и ядер- ная физика (X)	0	54	17	60	51	36
ИТОГО	131	264	176	323	304	235

Оставляя в стороне вопрос о полноте системы ФВ по каждому источнику (несомненно, действительный список используемых в физике ФВ гораздо шире), мы сопоставили данные между собой, пытаясь составить *единый перечень ФВ*.

На первом этапе (обозначим его А — см. графу 5 табл. 1.3) в пределах каждого раздела физики были просуммированы величины, которые содержатся хотя бы в одной работе, т. е. произведена формальная операция объединения множеств:

$$A_i = \Pi_{1i} \cup \Pi_{2i} \cup \Pi_{3i},$$

где i — номер раздела физики, $\Pi_{1,2,3}$ — перечни ФВ по отдельным работам. Таким образом, список А представляет собой дополняющие друг друга списки из разных работ; при этом отличительным признаком служило только *наименование ФВ*.

На втором этапе (обозначение Б — см. графу 6 табл. 1.3) сопоставлялись перечни A_i из разных разделов физики и исключались те элементы, которые повторялись в разных разделах; формальным признаком служило опять же наименование ФВ, точнее существенная (коренная) его часть.

Так, например, из раздела I были исключены различные «моменты плоских фигур», т. к. они встречаются (в содержательном виде) в разделе III; из раздела II было убрано «волновое число», т. к. оно содержится в разделе VI; из всех разделов (кроме раздела III) была исключена «энергия», не взирая на различные прилагательные — звуковая, электромагнитная и т. п.; из раздела IV убраны «теплота химической реакции» и «молярная теплоемкость», которые имеются в разделе VIII, и т. д.

Одновременно в раздел VIII была переведена производная от «теплоты химической реакции» — «удельная теплота химической реакции».

Однако если встать не на формальную точку зрения, а попытаться разобраться по существу, то оказывается, что очень непросто составить единый непротиворечивый перечень ФВ.

Дело в том, что в каждом разделе физики наряду с величинами, специфическими только для этого раздела, вводились величины, близкие по природе (однородные) величинам других разделов физики, при этом получавшие несколько отличное название. Например: *поток энергии* — *поток излучения* — *мощность излучения*. Особенно наглядна такая ситуация в разделе VII («Акустика»): с прилагательным *звуковой* (-ая, -ое) там фигурируют такие величины, как *период* и *частота* (колебаний) (раздел II), *скорость*, *давление*, *энергия*, *мощность* и т. д. Если попытаться объединить все родственные величины в одном разделе, то в разделе «Акустика», например, почти ничего не останется (см. результат В в графе 7 табл. 1.3): в основном специфические величины, связанные с акустикой помещения (*акустическая проницаемость перегородки* и т. п.). По-видимому, если «копнуть» еще глубже, то весь раздел «Акустика» должен перейти в разделы 1–3 (главным образом как механика газообразных и жидких сред). Во всяком случае, число величин в результате такого анализа существенно уменьшается (результат В — см. графу 7 табл. 1.3).

5.2. Однородность ФВ и системы ВЕПР

Проведенный анализ «по существу» выявляет еще одно обстоятельство: существуют *однородные* величины, которые имеют не только *разные названия*, но и *разные определяющие уравнения*, даже в пределах одного раздела физики, например:

– давление, нормальное напряжение, модуль продольной упругости, модуль сдвига и т. п.;

– мощность (электрических цепей) активная и реактивная;

– электрическое напряжение, электрический потенциал, ЭДС и др.

Зачастую ФВ имеют разное смысловое содержание (как «поверхностная плотность потока излучения», «энергетическая светимость», «энергетическая освещенность» в оптике, которые, хотя формально и имеют одно и то же определяющее уравнение, но смысл их разный): первая ФВ относится собственно к излучению, вторая — к его источнику, третья — к объекту облучения.

Отчасти этот вопрос проработан в [32]. Однако остается много величин, для которых такая задача еще не решена. Это прежде всего касается таких общефизических величин, как энергия, мощность, длина, время. Достаточно сказать, что *длина* как общефизическая величина получает следующие специфические названия (и отчасти содержание) в различных разделах физики: *длина среднего пробега частиц*, *толщина слоя половинного ослабления*, *длина замедления* (нейтронов), *радиус элементарной частицы*, *длина волны колебаний* (звуковых, электромагнитных и др.), *длина диффузии*, *фокусное расстояние* (для линз) и т. д.

Очевидно, что с точки зрения обеспечения единства измерений (и систем ВЕПР), важно то, что однородные величины имеют *одни и те же единицы* и поэтому должны принадлежать *одной* системе ВЕПР. С точки зрения формального построения систем ВЕПР это обилие конкретных реализаций ФВ должно отражаться на множестве $\{\Psi_i\}$ условий измерений.

В то же время такие величины, как *энергия* и *мощность* на сегодняшний день едва ли можно объединить в рамках одной системы ВЕПР: слишком различна природа явлений, на которые они распространяются. Это обстоятельство учитывалось при анализе и классификации систем ВЕПР в п. 4.

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

1) система ФВ также обладает некой *иерархичностью* (есть более общие и менее общие величины);

2) система ФВ в настоящее время распадается на ряд *подсистем* (относящихся к различным по природе и уровню физическим явлениям), которые еще недостаточно основательно увязаны между собой с точки зрения терминологии ФВ;

3) необходимо дальнейшее *углубление понятия* «физическая величина» в метрологии и разработка оптимальной (с точки зрения современного уровня развития физики) *системы* ФВ.

5.3. Проблема «физических постоянных» в системах ВЕПР

Физические постоянные тоже являются ФВ и также должны измеряться. Естественно, возникает вопрос: в каком отношении они находятся с системами ВЕПР, а точнее, к какому типу систем ВЕПР они могут принадлежать.

Анализ действующих ГПС показывает, что уже существует около 15 систем ВЕПР и их подразделов для такого рода величин, являющихся, по сути, физическими константами (длины волн для оптического излучения, плотность и вязкость жидкостей, температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), удельная теплоемкость и теплопроводность твердых тел, теплоты разных фазовых переходов веществ, угол вращения плоскости поляризации оптического излучения в веществе, диэлектрическая проницаемость диэлектриков и т. д.).

Однако эти системы, построенные в виде систем типа ПЦ (с государственным эталоном во главе), создавались под влиянием (и по аналогии) с уже созданными системами ВЕПР для «не константных» ФВ без должного обоснования.

Отметим прежде всего, что свойство иерархичности ФВ, установленное в предыдущем пункте, особенно наглядно проявляется для физических констант. Существуют постоянные *фундаментального* характера (так называемые *универсальные постоянные* или *фундаментальные физические константы* — ФФК) и постоянные *менее универсальные* (локальные) — *константы конкретных веществ* (объектов).

Между прочим, никакой четкой границы между ними провести нельзя. Так, ускорение силы тяжести для Земли во многих исследованиях и расчетах принимается как универсальная постоянная, в других же (требующих большей точности) — как постоянная су-

губо *местного* значения (в данной точке Земли и при постоянных внешних условиях).

Другой важный момент — *постоянство констант* (даже универсальных) в абсолютном смысле является лишь *гипотетическим*: именно эксперимент (абсолютные измерения их значений) дает фактические сведения о том, насколько они постоянны (во времени, в пространстве, а также под влиянием каких-либо полей). В то же время ряд констант (более или менее универсальных) в настоящее время используется для воспроизведения единиц *других* ФВ, причем их значения считаются *фиксированными*. Это обусловлено прежде всего тем, что в тех пространственно-временных границах системы измерений, в которых эти константы используются для воспроизведения единиц, их постоянство действительно установлено с высокой точностью. Однако (априорная) фиксация значения какой-либо размерной константы означает введение новой основной единицы в систему единиц (см. [71. С. 31]). Поэтому, если константа C_k используется для воспроизведения единицы другой ФВ φ_i по уравнению косвенных измерений (1.11), то тем самым эта ФВ становится одной из основных. Таким образом, например, фиксируются значение постоянной $\frac{h}{2e}$ при воспроизведе-

нии единицы ЭДС (вольта), значение μ_0 при воспроизведении единицы силы электрического тока.

Однако физические константы часто используются и при воспроизведении ФВ той же природы, т. е. однородной с самой константой. Так происходит, например, в государственных эталонах единиц частоты и времени (где фиксируется частота перехода между определенными уровнями атома ^{137}Cs , вообще говоря, — сугубо «локальная» константа, но имеющая высокую стабильность), длины (где фиксируется длина волны определенного монохроматического электромагнитного излучения), температуры (где фиксируется температура одного из фазовых переходов определенного вещества), плотности и вязкости (где фиксируются значения соответствующих величин для воды в определенных условиях) и др.

Существенно то, что фиксация в этих случаях может быть разной. Если размер константы фиксируется *априорно* и *формально* (только через определение единицы), то в этом случае соответствующая единица становится одной из основных (случай с часто-

той, длиной, температурой). Ясно, что физические константы такого типа (приводящие к основным единицам) могут иметь только системы ВЕПР типа ПЦ, причем совпадающие с системой ВЕПР соответствующей *основной* ФВ (однородной с константой). Например, должны совпадать системы ВЕПР для длины (метра) и для длин волн в спектроскопии. Если же фиксируется *значение* константы (т. е. используется априорная *измерительная* информация о ее единице), то в этом случае, согласно сказанному, данная константа не может, строго говоря, быть использована для воспроизведения единицы данной ФВ: это уже не будет *воспроизведением* единицы. Однако воспроизведение единиц плотности и вязкости с помощью соответствующих ГЭ не противоречит упомянутому, поскольку ГЭ действуют в рамках одной системы измерений, а «стандартизуемые» значения плотности и вязкости воды получают из измерений в рамках другой системы измерений — международной (правда, недостаточно обоснован в этих случаях выбор системы ВЕПР именно типа ПЦ).

В этом состоит сущность работ по ГСССД, являющейся дополнительной системой по отношению к системе ВЕПР в рамках системы обеспечения единства измерений в стране (рис. 1.2).

В то же время, если значение C_k фиксировано в рамках ГСИ, то *уточнение* значения C_k , которое может быть осуществлено путем косвенных измерений других ФВ, может происходить только в рамках международной системы ВЕПР. В этом состоит *обратимость* эталонной установки: либо воспроизведение данной единицы (системой типа ПЦ или ЛЦ) на основе международного значения константы, либо уточнение константы на основе международного ее воспроизведения (системой типа ЛЦ).

Отсюда следует, что для физических постоянных, как и для других ФВ, возможен, в принципе, *любой тип систем* ВЕПР (ПЦ, КЦ, ЛЦ, ДЦ); выбор будет определяться только соображениями необходимости и возможности (кроме случая, приводящего к основным единицам ФВ). Однако если для физических постоянных, приводящих к основным ФВ, такими системами могут быть только системы типа ПЦ или КЦ, то для остальных случаев (плотность, вязкость, ТКЛР и т. п.) такой тип системы наименее вероятен. Это видно уже из того, что физические постоянные стабильны во времени, т. е. измерения редки и немногочисленны (малый парк РСИ). Далее, для них практически не создаются устройства для прямых измерений (исключением являются плотность, вязкость).

Системы типа КЦ могут возникать, если физическая постоянная должна измеряться в различных условиях (например, ТКЛР, удельная теплоемкость, теплопроводность твердых тел при различных температурах).

Наконец, самое важное — наличие «стандартизованного» международного значения физической постоянной позволяет использовать его для воспроизведения единицы в любой установке, пригодной для измерения данной ФВ косвенным методом (т. е. легко осуществима и экономически проста реализация системы ВЕПР типа ЛЦ и даже ДЦ).

5.4. О системах ВЕПР для безразмерных ФВ (коэффициентов)

По аналогии с обычными системами ВЕПР (в виде ГПС с государственным эталоном во главе) к настоящему времени построено значительное количество систем ВЕПР для безразмерных ФВ — различного рода коэффициентов (табл. 1.4).

Вместе с тем, любая безразмерная величина (коэффициент) — это отношение однородных размерных величин. Некоторые безразмерные величины получают (определяют) комбинацией некоторых величин, имеющей в результате нулевую размерность (например, постоянная тонкой структуры в электродинамике). Их измерения можно осуществлять в виде косвенного измерения, однако этот случай здесь не рассматривается, тем более что в табл. 1.4 реально измеряемые коэффициенты — именно отношения однородных величин.

Таблица 1.4

Безразмерные (относительные) величины в системе действующих ГПС (выборочно)

№ п/п	Наименование величины	Номер ГОСТ ГПС
1	Спектральный коэффициент пропускания и отражения (для видимого излучения)	8.557–91
2	Относительная диэлектрическая проницаемость	8.874–76
3	Магнитная восприимчивость	8.231–84
4	Объемное влагосодержание (в нефти и нефтепродуктах)	8.190–76

Поэтому, используя (1.8) и считая, что для соответствующих размерных величин системы ВЕПР реализованы (т. е. единицы согласованы для равных СИ и в пределах необходимого диапазона измерений), имеем:

$$X_k^{(3H)} = \frac{\varphi_2^{(3H)}}{\varphi_1^{(3H)}} = \frac{\{\varphi_2\}}{\{\varphi_1\}} \cdot \frac{[\varphi_2']}{[\varphi_1']} = \frac{\{\varphi_2\}}{\{\varphi_1\}} = \{X_k\} \cdot [1],$$

где X_k — безразмерная величина; φ_2 и φ_1 — две конкретные реализации одной ФВ (разных размеров); $[1]$ — безразмерная единица.

Отсюда видно, что проблема воспроизведения единицы и передачи ее размера как самостоятельная проблема для безразмерных величин (коэффициентов) не возникает: она сводится к проблеме ВЕПР для исходной ФВ φ независимо от того, есть ли необходимость устанавливать узаконенную единицу для φ (т. е. использовать единицу из принятой системы единиц) или брать ее произвольной (как в относительных измерениях), но одинаковой во всем необходимом диапазоне значений (размеров) φ .

В связи с этим существование систем ВЕПР для безразмерных величин (тем более типа ПЦ) выглядит мало обоснованным. Это, скорее, могут быть УВТ для проверки средств относительных измерений.

6. О ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ВЕПР

Вопросы эффективности систем ВЕПР с чисто экономической точки зрения, безусловно, должны являться предметом самостоятельного экономического исследования, причем они должны решаться в едином комплексе вопросов экономической эффективности не только собственно метрологических систем, но и системы измерений в целом. Об этом говорят иерархическая структура собственно метрологических систем (рис. 1.1 и 1.2) и то обстоятельство, что эти системы возникают как «надстройка» над реально функционирующей системой измерений в стране.

Именно поэтому влияние метрологии (и всех ее метрологических систем) на эффективность отраслей хозяйства проявляется

лишь косвенным (опосредованным) образом — путем повышения общего уровня качества измерений в стране.

В связи с этим рассмотрим только чисто метрологические аспекты технико-экономической *эффективности* систем ВЕПР, которую условно определим как

$$\varepsilon(C_r) = \frac{\mathcal{E}(C_r)}{\mathcal{Z}(C_r)}, \quad (1.12)$$

где $\mathcal{Z}(C_r)$ — приведенные затраты на создание и эксплуатацию системы C_r , а $\mathcal{E}(C_r)$ — обобщенный показатель метрологического эффекта от этой системы.

Метрологический эффект можно определить, исходя из степени достижения конечной цели системы ВЕПР, которая, согласно изложенному в п. 2.6, сводится к выполнению условия сопоставимости измерений (1.5), если считать, что в пределах ГСИ действует единая система единиц ФВ.

Степень выполнения условия (1.5) естественно определить как отношение множества всех $j \neq i; j \in \{j\}$, для которых условие (1.5) выполняется данной системой ВЕПР (C_r), к множеству всех $j \neq i; j \in \{j\}$, возможных в рамках данной системы измерений (ГСИ). Тогда

$$\varepsilon(C_r) = \frac{\{j\}_r}{\mathcal{Z}(C_r) \cdot \{j\}} = \frac{1}{\mathcal{Z}(C_r)} \cdot \frac{\{j\}_r}{\{j\}}, \quad (1.12a)$$

Для того чтобы *сопоставить* возможности различных типов систем ВЕПР, достаточно исследовать относительную эффективность систем ВЕПР (например, C_1 и C_2):

$$\varepsilon_{\text{отн}} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \equiv \frac{\varepsilon(C_1)}{\varepsilon(C_2)} = \frac{\mathcal{Z}(C_2)}{\mathcal{Z}(C_1)} \cdot \frac{\{j\}_{1r}}{\{j\}_{2r}}, \quad (1.13)$$

т. к. множество $\{j\}$ для них общее.

Рассмотрим сначала системы ВЕПР типа ПЦ, для которых, очевидно, имеет место $\{j\}_r = \{j\}$, и обсудим их относительную эффективность с точки зрения различия структур системы ВЕПР. Для таких систем эффективность будет определяться только затратами

на создание и эксплуатацию системы, которые, очевидно, складываются из затрат на создание и эксплуатацию МСИ и затрат на разработку и реализацию методов передачи (МП) размера единицы:

$$\varepsilon^{-1}(C_{\text{пц}}) = \sum_i Z_i(\text{МСИ}) + \sum_i Z_i(\text{МП}).$$

Следовательно, задача нахождения наиболее эффективной структуры системы ВЕПР типа ПЦ сводится к *минимизации общих затрат* на создание и эксплуатацию такой системы. С метрологической точки зрения очевидно, что усложнение структуры системы ВЕПР (увеличение числа ступеней передачи и в конечном итоге числа МСИ) в общем случае приводит к повышению общих затрат (снижение эффективности), т. к. увеличение числа МСИ влечет за собой увеличение числа методов передачи (числа связей элементов — МСИ), а также увеличение численности общего штаба кадров метрологов. С другой стороны, уменьшение числа МСИ в структуре системы ВЕПР связано с удорожанием каждого МСИ за счет обеспечения необходимой их производительности.

Действительно, производительность данного МСИ (т. е. максимальное числоверяемых на нем подчиненных СИ) определяется выражением:

$$P_0 = \frac{\bar{T}_1}{t_1},$$

где \bar{T}_1 — средний межповерочный интервал для СИ $\{S_i\}_0$, подчиненных данному МСИ (S_0), а t_1 — средняя продолжительность поверки подчиненных СИ.

Тогда «пропускная способность» системы ВЕПР при n ступенях поверки (n -уровней МСИ)

$$P(C_{\text{пц}}) = \frac{\bar{T}_1}{t_1} \cdot \frac{\bar{T}_2 - t'_1}{t_2} \dots \frac{\bar{T}_n - t'_{n-1}}{t_n} \cong \prod_{j=1}^n \frac{\bar{T}_j}{t_j}, \quad (1.14)$$

где \bar{t}'_j — среднее время «неиспользования» МСИ (S_j), складывающееся из времени его поверки и транспортировки (для поверки);

обычно $\bar{t}'_j \ll \bar{T}_j$, поэтому здесь сделан переход к приближенному равенству.

Заметим, что, как правило, $T_0 > T_1 > T_2 > \dots > T_n$ и $t_1 > t_2 > \dots > t_n$. Кроме того, обычно межповерочный интервал данного МСИ тем меньше, чем больше его производительность, т. е. в первом приближении:

$$T_j \approx \frac{1}{P} = \frac{\bar{t}_{j+1}}{\bar{T}_{j+1}} \quad \text{или} \quad \frac{\bar{T}_j \cdot \bar{T}_{j+1}}{t_{j+1}} \cong \text{const}.$$

Поэтому

$$P(C_{\text{ПЦ}}) \cong \prod_{j=1}^n \frac{\bar{T}_j}{t_j} = \begin{cases} \frac{(\text{const})^{\frac{n}{2}}}{t_1}, & \text{при } n \text{ четном} \\ \frac{(\text{const})^{\frac{n-1}{2}} \cdot \bar{T}_n}{t_2 \cdot t_n}, & \text{при } n \text{ нечетном.} \end{cases} \quad (1.15)$$

Максимальное значение производительности достигается при $T_0 = \text{const}$ (межаттестационный период исходного МСИ):

$$P_{\text{max}}(C_{\text{ПЦ}}) = \frac{(T_0)^{\frac{n}{2}}}{t_1}.$$

Сопоставляя систему C_1 с n -уровнями и систему C_2 с одним уровнем МСИ (идеальный, предельный случай ВЕПР), получаем, что одинаковая производительность $P(C_1) = P(C_2)$ (т. е. одинаковая степень выполнения условия (1.5) при условии, что время поверки РСИ в обоих случаях одинаково) может быть достигнута только при

$$(T_{01})^{\frac{n}{2}} = T_{02}.$$

Это значит, что исходное МСИ одноуровневой системы должно иметь в $n/2$ -кратной степени большую метрологическую надежность, чем в системе с n -уровнями. Известно, однако, что увеличе-

ние надежности системы в k раз приводит к увеличению ее стоимости в среднем в k^2 раз (т. е. в рассматриваемом случае — в 4 раза). Кроме того, существует предел — минимальное время поверки подчиненного СИ. Более точные оценки требуют специальных исследований и соответствующих исходных данных.

Можно показать, что при достаточной детализации условия сопоставимости измерений (1.5) системы ВЕПР типа КЦ можно свести к системам типа ПЦ (с точки зрения метрологического эффекта, т. е. степени выполнения этого условия), т. к. при k -кратной системе

$$\{j\} = \sum_{r=1}^k \{j\}_r.$$

Что касается систем ВЕПР типа ЛЦ и ДЦ, то их метрологический эффект, как правило, значительно меньше, чем систем типа ПЦ или КЦ, т. к. мощности множеств сильно различаются: $|\{j\}_r| \ll |\{j\}| = |\Psi|$.

Выполнение ими в полной мере функций системы ВЕПР, т. е. условия сопоставимости измерений (1.5), возможно, строго говоря, только при наличии «константных» физических величин, которые позволяют реализовать $\varphi_{2u} = \varphi_{1u}$ в (1.5) и, следовательно, дают возможность косвенного сравнения размеров единиц при множестве исходных МСИ. Однако затраты на создание и эксплуатацию систем ВЕПР типа ЛЦ и ДЦ гораздо меньше, чем систем типа ПЦ и КЦ, в связи с чем их технико-экономическая эффективность может быть сравнима, а создание систем типа ЛЦ и ДЦ — оправдано.

Использование других классификационных признаков для сравнения технико-экономической эффективности систем ВЕПР едва ли имеет смысл, т. к. последняя слабо зависит от них.

В заключение сформулируем необходимые и достаточные условия (признаки обоснования), являющиеся общими для создания *централизованных* систем ВЕПР того или иного типа (т. е. и для создания исходных МСИ).

Необходимые (т. е. в совокупности — обязательные) условия:

- наличие в ГСИ рабочих средств измерений данной ФВ для прямых измерений;
- техническая возможность осуществления сравнений различных типов СИ данной ФВ (т. е. наличие соответствующих методов

передачи размера единицы) в рамках выбранной степени централизации;

- наличие в ГСИ единой принятой системы единиц;
- наличие необходимого запаса точности между исходным МСИ и РСИ.

Достаточные условия (выполнение хотя бы одного из которых при выполнении необходимых условий дает основание для создания системы):

- принадлежность единицы данной ФВ к основным в принятой системе единиц (условие достаточности для систем типа ПЦ);
- зависимость точности воспроизведения производной единицы главным образом от свойств данного исходного МСИ (как измерительной установки), а не от точности прямых измерений других ФВ, определяющих данную;
- наличие первичного исходного МСИ, которое не может при этом обеспечить требуемой точности передачи размера единицы данной ФВ для рассматриваемых условий измерений (условие достаточности для системы типа КЦ);
- локализация (например, в пределах одной отрасли или в одном экономическом регионе страны) значительного парка РСИ данной ФВ в ГСИ (условие достаточности для систем типа ЛЦ);
- наибольшая экономическая эффективность данного типа системы ВЕПР для данной ФВ.

Часть II

РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПЕРЕДАЧИ ИХ РАЗМЕРОВ

ВВЕДЕНИЕ

Система обеспечения единства измерений в стране — важнейшая из систем метрологического обеспечения — призвана «обслуживать» необходимым качеством измерений крупнейший и особенно важный в условиях научно-технического прогресса хозяйственный комплекс — «национальную систему измерений» [56], которая «пронизывает» все отрасли хозяйства, и прежде всего отрасли, определяющие темпы его развития.

Чтобы осмысленно и целенаправленно осуществлять необходимую перестройку СОЕИ в целях повышения ее эффективности и качества, естественно, необходим соответствующий надежный инструмент, и в первую очередь развитый теоретический базис.

Следует отметить, что в настоящее время теория построения системы обеспечения единства измерений (в том числе и системы воспроизведения единиц ФВ и передачи их размеров) фактически отсутствует, на что неоднократно обращалось внимание, в частности в работе [84]. Имеются лишь отдельные, разрозненные теоретические работы, посвященные решению отдельных вопросов

обеспечения единства измерений (подробнее см. в п. 7.1). Достаточно сказать, что одна из важнейших проблем современности — *оптимизация* в соответствии с критериями интенсификации, экономичности, повышения качества продукции и услуг — проблема, которая должна была коснуться и системы обеспечения единства измерений, фактически не нашла отражения в НД, определяющих построение этой системы. Исходные концепции долгосрочного развития СОЕИ в стране были сформулированы в Прогнозе [56]. В дальнейшем при разработке долгосрочной Программы развития фундаментальных исследований по метрологии были предусмотрены работы по созданию фундаментального теоретического задела по построению различных метрологических систем, в том числе систем воспроизведения единиц ФВ и передачи их размеров — главной научно-технической основы СОЕИ.

В первой работе этого цикла [54] был произведен анализ сущности понятия «система ВЕПР», выявлена ее структура и взаимосвязь с другими метрологическими системами, проведена классификация систем ВЕПР и заложены основы формализованного описания различных метрологических систем.

Целью исследования в ч. II является разработка теоретических основ построения типовой системы ВЕПР в отдельном виде измерений, а также полной системы ВЕПР, т. е. создание основ теории, которая, по возможности, комплексно учитывала бы все вопросы, связанные с изучением, построением, оптимизацией и использованием таких систем, и прежде всего с позиций современных основных представлений метрологии, физики и математики.

7. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ВЫБОР ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ

7.1. Исходные позиции для анализа

Предмет исследования — системы воспроизведения единиц ФВ и передачи их размеров. Теория систем ввиду сложности и известной неопределенности этого объекта требует уточнения круга вопросов, по которым будет сделан краткий обзор опубликованных работ и произведен их анализ.

Будем исходить из представления о системе ВЕПР, сформулированного в п. 1 монографии ([54. С. 31] и рис. 1.2), как о сложной *реальной* системе средств и методов воспроизведения единиц ФВ и передачи их размеров, являющейся главной составной частью СОЕИ.

К сожалению, в литературе зачастую отождествляют реальную систему ВЕПР с так называемой «поверочной схемой», являющейся лишь ее графическим (схематическим) отображением, и говорят о «теории поверочных схем», что, по нашему мнению, неудачно. Еще проф. Л.В. Залуцкий, который впервые ввел в метрологию понятие «поверочная схема» в 30-е гг. прошлого века [85], трактовал это понятие как *документ*, устанавливающий порядок передачи размеров единиц «от одной меры к другой». Такая трактовка поверочной схемы закреплена и официальными документами — ГОСТ 16263–70 и ГОСТ 8.061–80.

С учетом этого, будет правильно вначале сделать обзор теоретических работ, рассматривающих вопросы построения реальных систем ВЕПР. В то же время, поскольку практическое построение реальных систем ВЕПР базируется на основополагающих нормативных документах (ГОСТ и др.), целесообразно дать краткий анализ и оценку этих документов.

Еще один круг работ, подлежащих рассмотрению, касается вопросов теории построения систем ФВ и их единиц: во-первых, потому что система единиц измеряемых величин наиболее тесно примыкает к системе ВЕПР (см. рис. 1.2) и, во-вторых, потому что выбор системы единиц (особенно основных) определяет структуру и свойства системы ВЕПР. Анализ и обращение к литературным источникам по этому вопросу см. в п. 10.1.

Наконец, коль скоро речь идет о построении основ теории, то целесообразно рассмотреть имеющиеся в литературе представления о том, что такое теория вообще и каковы ее атрибуты.

7.2. Краткий обзор работ по теории построения систем ВЕПР

Первая попытка теоретического рассмотрения проблемы построения системы ВЕПР была предпринята проф. М.Ф. Маликовым в 40-е гг. прошлого века и изложена в классической монографии [44], где он попытался связать число разрядов образцовых средств измерений между эталоном и рабочими средствами изме-

рений с соотношением точностей поверяемого и поверяющего средств измерений, исходя из условия «невлияния» погрешности поверяющего на точность поверяемого средства измерений, т. е. на основе так называемого «критерия ничтожной погрешности». Там же был рассмотрен вопрос накопления погрешностей при передаче размера единицы от эталона. Из других требований к построению систем ВЕПР указываются лишь требования, что они должны стоять «на уровне современной техники измерений», чтобы они «были целесообразны, т. е. не усложняли без нужды поверочного дела, и чтобы входящие в них меры и измерительные приборы действительно обеспечивали при поверке рабочих приборов требуемую последними точность». Отмечается также, что построение поверочных схем осуществляется сверху вниз, т. е. от первичного эталона. Вопросу анализа соотношения погрешностей образцового и поверяемого средств измерений были посвящены также первые зарубежные работы [100, 105] по поверочным системам.

Интересный подход к рассмотрению систем ВЕПР (авторы называют их «метрологическими цепями») изложен в работе В.Н. Сретенского и др. [79] Он основан на исследовании влияния метрологических цепей на внешние системы (измерительная техника, наука, производство, сфера эксплуатации) и связывает обобщенные параметры этих внешних систем с параметрами метрологических цепей через общие уравнения эффективности функционирования внешней системы. К сожалению, в дальнейшем эта работа осталась без должного внимания и предложенный подход не был развит.

Другой подход к обоснованию и выбору запаса точности между уровнями поверочной схемы был впервые предложен Н.А. Бородачевым [8], который исходил из рассмотрения брака поверки, т. е. рассматривал поверку как один из видов технического контроля параметров изделий (соответствия их параметров предъявляемым к ним требованиям).

В период 1958–1974 гг. детальному рассмотрению этого подхода было посвящено значительное число теоретических работ [27, 29, 36, 57, 59]. Эти работы рассматривали только один вид поверки — контроль метрологической исправности средства измерений (годен — не годен) и, строго говоря, не относились явно к проблеме передачи размера единицы, однако они стимулировали решение вопросов построения поверочных систем. В практическом

плане это направление исследований соответствовало решению задачи выбора образцовых средств измерений при поверке РСИ. Первый обзор по работам этого направления вышел в 1975 г. [39]. В дальнейшем это направление трансформировалось в проблему «качества поверки» [15], многочисленные работы по которой в период 1977–1984 гг. были обобщены в обзоре 1985 г. [37].

Первые попытки введения в рассмотрение «коллективных» параметров поверочных систем с целью оптимизации этих систем были предприняты в работах [64, 97]. Задача оптимизации структуры поверочной системы решалась по критерию минимума ее стоимости методом неопределенных множителей Лагранжа. В качестве исходных параметров расчета в [64] выбирались: количество РСИ, подлежащих поверке; время поверки РСИ и ОСИ; межповерочный интервал; погрешность ОСИ низшего разряда; стоимость осуществления и поддержания поверочной системы.

Искомые результатами решения задачи служили: общее число разрядов, число ОСИ в каждом разряде и соотношение погрешностей ОСИ между разрядами. Расчеты показали, однако, что функция стоимости поверочной системы оказывается слабо чувствительной к соотношениям погрешностей средств измерений между разрядами (уровнями) поверочной системы и закону накопления погрешностей (арифметической или квадратичной), т. е. минимум функции стоимости оказался довольно «тупым». Кроме того, отмечалось отсутствие достаточно достоверных исходных данных, особенно экономического характера. Аналогичные задачи решались и в зарубежных работах [103, 104].

В работе С.А. Кравченко [38] осуществлен расчет конкретной поверочной системы в области фазовых измерений, где автор попытался оптимизировать и число уровней поверочной схемы, и соотношение точностей ОСИ между отдельными уровнями; при этом использовались данные о стоимости разработки и изготовления фазометрических установок различной точности.

Дальнейшее развитие исследований по оптимальному построению систем передачи размеров единиц шло по пути детализации отдельных аспектов структуры системы и процесса ее функционирования либо по пути использования новых методов решения задачи.

В работах К.А. Резника [57, 58] подытожены результаты его многолетних исследований по определению числа ступеней пове-

рочных систем на основе производительности и межповерочных интервалов средств измерений на каждом уровне, а также общего парка РСИ (минимально необходимое число ступеней) и соотношения точностей между уровнями (максимально возможное число ступеней) с детальным исследованием влияния вида распределений соответствующих погрешностей. Результаты этих работ были положены в основу методики определения параметров поверочных схем [46].

В работе А.М. Шилова [89] рассмотрено накопление в поверочной системе погрешностей, изменяющихся во времени, а также вопросы соотношения погрешностей образцовой и поверяемой (рабочей) меры, исходя из представления о работоспособном состоянии меры и основанном на этом показателе единообразия как вероятности безотказной работы соответствующих СИ в произвольный момент времени между очередными поверками (в пределах межповерочного интервала). Утверждается, что предложенный подход требует значительно меньшей априорной информации, чем подход, основанный на вероятности брака поверки.

В работе В.П. Петрова и Ю.В. Рясного [51] рассмотрен метод построения оптимальных поверочных систем, аналогичный работам [64, 97, 104], — по критерию минимума экономических затрат, однако с учетом вероятностей брака поверки. В качестве исходных параметров задачи дополнительно к [64, 97, 104] вводятся зависимости стоимости эксплуатации годных и негодных СИ от их погрешности, а также потери от эксплуатации негодных СИ.

В цикле работ новосибирских метрологов [11–13, 86–88] большое внимание уделено исследованию роли и установлению значений межповерочных интервалов рабочих и образцовых СИ, влиянию брака поверки на метрологическую надежность СИ, расчету параметров и моделированию системы передачи размера единицы, а также вопросам системного подхода к обеспечению единства измерений.

В работах [13, 39] предлагается использовать межповерочные интервалы как варьируемые параметры, с помощью которых можно управлять единством измерений (точнее, единообразием средств измерений). Предлагается также систему обеспечения единства измерений (которую авторы, по сути, отождествляют с системой передачи размеров единиц) представлять в виде двух взаимосвязанных подсистем: подсистемы оснащения органов мет-

рологической службы поверочным оборудованием и подсистемы обеспечения единства эксплуатируемых СИ. Определяются факторы, влияющие на структуру и функционирование СОЕИ:

1) погрешности средств и методов поверки на всех уровнях поверочной системы;

2) нормированные метрологические характеристики СИ;

3) наличие стандартизованных методик выполнения измерений и поверки;

4) качество поверок (по распределению погрешностей и вероятностям брака поверки);

5) число ступеней поверочной системы;

6) номенклатура и парк ОСИ и РСИ по ступеням ПС;

7) метрологическое состояние эталонов, ОСИ и РСИ;

8) коэффициенты их использования;

9) производительность эталонов и ОСИ;

10) распределение СИ по территории и необходимость транспортировок на поверку;

11) потребность в поверках на местах;

12) укомплектованность метрологических органов поверочным оборудованием;

13) периодичность поверок СИ;

14) стоимость эталонов, ОСИ, поверок, эксплуатационные расходы;

15) убытки из-за нарушения единства измерений;

16) убытки из-за изъятия ОСИ и РСИ для поверки и ремонта;

17) ограничение ресурсов на метрологическое обеспечение.

В этих работах сделана попытка дать определения понятиям «обеспечение единства измерений» и «единообразие средств измерения», а также указано на некоторые свойства СОЕИ как сложной кибернетической системы.

Работа Л.А. Семенова и Н.П. Ушакова [70] посвящена вопросу сокращения затрат, связанных с организацией и функционированием сети поверочных органов за счет их рационального размещения. В общем виде рассмотрена экономико-математическая модель задачи целочисленного линейного программирования для заданных множеств типов РСИ и их парка, пунктов дислокации РСИ и ОСИ, межповерочных интервалов, а также с учетом приведенных затрат на поверку и транспортировку СИ.

Краткий обзор использования методов теории массового обслуживания при определении потребности в средствах поверки (в

том числе в задачах оптимального размещения поверочного оборудования) приведен в работе [7], авторы которой участвовали в разработке раздела «Методики расчета оптимального числа поверочных установок», входящего в МИ 15–74 «*Методические указания по организации, расчету состава оборудования и помещений поверочных подразделений ведомственных метрологических служб*».

В работе Я.А. Кримштейна [41] решается задача синтеза оптимальной (по критерию минимума суммарных затрат) структуры метрологической сети для передачи размера единицы парку РСИ одной группы. В отличие от [70] здесь выбираются не только варианты размещения ОСИ, осуществляющих поверку РСИ, но и структура всей поверочной сети. Оптимальные параметры задачи определяются также методами целочисленного программирования.

В цикле работ сотрудников Томского политехнического института, обобщенных в [35, 60], предлагается задачу синтеза оптимальных структур поверочных систем решать путем формализованного их описания с использованием аппарата теории графов. При этом множество ОСИ и РСИ представляются в виде вершин, а связи между ними, описывающие методы поверки, — в виде ребер графа. Из-за отсутствия связей между элементами одного уровня в рассматриваемой многоуровневой иерархической системе ее оптимизацию можно производить последовательно, поднимаясь от нижних уровней к верхним и имея алгоритм оптимизации в пределах смежных уровней.

В работе [31] обращается внимание на сложность реальной системы передачи размеров единиц и необходимость решения задач, относящихся не только к структуре методов и средств передачи размеров единиц, но и к обеспечивающим компонентам (включая организационные, кадровые, финансовые, информационные и правовые).

В работе Л.А. Семенова [55] впервые высказана идея нового подхода к оптимизации системы передачи размеров единиц — необходимость при этом рассматривать взаимосвязь трех систем: системы воспроизведения единиц (по всей совокупности измеряемых величин), собственно систем передачи размеров единиц (для отдельных величин) и системы потребления измерительной информации (все отрасли хозяйства страны). Первая и третья систе-

мы накладывают ограничения «сверху» и «снизу» на рассматриваемую (вторую).

С учетом этого оптимизацию системы передачи размеров единиц предлагается проводить в два этапа: на первом этапе — определение числа ступеней и характеристик системы передачи размеров единиц (построение поверочной схемы), на втором — оптимизация размещения ОСИ (структуры системы) на основе экономических критериев. Рассмотрены также некоторые вопросы нарастания погрешностей при передаче размера единицы от эталона к РСИ, особенно при нахождении новых градуировочных характеристик поверяемого СИ.

В работе Т.Н. Сирой [72] рассмотрены погрешности передачи размера единицы от группового эталона, а также погрешности воспроизведения и хранения единицы групповым эталоном.

Еще один подход к проблеме оптимизации системы передачи размеров единиц измеряемых величин по экономическому критерию изложен в работе В.С. Свинцова [69], также являющейся итогом его предыдущих исследований. Он основан на том, что периодичность поверки (межповерочный интервал) влияет одновременно и на качество поверки, и на величину потерь от использования неисправных РСИ (со скрытым метрологическим отказом), т. е. варьируемым параметром является межповерочный интервал. Тем самым здесь частично реализована указанная выше идея работы [55].

Автор, однако, признает, что практическое использование предложенного подхода затруднительно, т. к. требуется большой объем исходных данных технико-экономического характера. В последующей работе того же автора [68] разработана модель процесса эксплуатации, которая позволяет, в принципе, проводить «оптимизацию метрологического обслуживания средств измерений не только по периодичности поверки, но одновременно и по продолжительности их предшествующей безотказной работы».

Представляют также интерес работы В.А. Долгова и др. [26] и А.А. Авакяна [1], хотя они и не имеют непосредственного отношения к построению системы ВЕПР, но относятся к проблеме оптимизации парка и номенклатуры РСИ и методов измерений, что, безусловно, влияет на входные параметры рассматриваемой системы.

Оригинальный подход для анализа и синтеза поверочных систем был предложен В.А. Ивановым [30] — на основе использова-

ния теоретико-групповых методов. Правда, практическое применение этого подхода пока не очень ясно.

Наконец, в работе О.А. Кудрявцева и др. [42] сделана попытка классифицировать основные задачи построения СОЕИ, поддающиеся математическому моделированию (в том числе задачи, касающиеся системы ВЕПР). Однако из-за нечеткости выбранных признаков приведенную классификацию нельзя признать удачной. Недостаточно полной, четкой и обоснованной выглядит также и классификация показателей эффективности отдельных элементов системы. Более интересной представляется попытка разработки общей модели системы на основе синтеза имеющихся о ней представлений. Правда, выдвигаемые в работе требования к модели также недостаточно обоснованы, а сама формализация задачи в общем виде (через минимум критерия эффективности, который оказывается пропорциональным числу РСИ), просто неверна.

Таким образом, даже краткий обзор опубликованных работ (мы стремились выделить из них наиболее «узловые») показывает, что к настоящему времени накопился достаточно большой объем теоретических исследований по различным вопросам, связанным с построением систем ВЕПР в отдельных видах измерений [84]. К сожалению, среди них практически отсутствуют работы по построению системы воспроизведения единиц (т. е. межвидовое построение общей системы ВЕПР). На редкие работы, касающиеся этой проблемы, даны ссылки в соответствующих пунктах монографии.

7.3. Нормативные документы, действующие в области систем ВЕПР

До 1981 г. в стране действовали следующие основополагающие нормативные документы (НД), регламентирующие общие вопросы воспроизведения единиц, передачи их размеров и построения соответствующих систем:

1) ГОСТ 16263–70 «*ГСИ. Метрология. Термины и определения*», где определены термины, относящиеся к рассматриваемым вопросам, — *эталон, образцовые средства измерений* и их разновидности, *единство измерений* и *единообразие средств измерений, поверка* и *аттестация, поверочные схемы* и др. К сожалению, в этом стандарте не определены термины «воспроизведение единицы физической величины» и «передача размера единицы».

2) ГОСТ 8.061–80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение», где дана классификация поверочных схем (государственные и локальные), сформулированы общие требования к содержанию ПС, определены элементы ПС, указаны возможные методы поверки, приведены требования к изложению текста и графическому изображению ПС в НД, а также некоторые метрологические требования. Предусмотрено, что государственные ПС «возглавляются» либо государственным эталоном, либо образцовыми средствами измерений, заимствованными из других ПС.

3) ГОСТ 8.057–80 «ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения», где даны представления о централизованном и децентрализованном воспроизведении единицы, сформулированы основания для централизации воспроизведения, приведена классификация эталонов (по составу и назначению), сформулированы общие требования к порядку аттестации, хранения и применения эталонов. Предусмотрена возможность существования поверочных установок высшей точности (УВТ), которые «возглавляют» ПС при децентрализованном способе воспроизведения единицы и заменяют эталоны, но почему-то приравниваются (в юридическом плане) к статусу рабочих эталонов. В Приложении к стандарту впервые даны определения терминов «воспроизведение единицы» и «передача размера единицы».

4) МИ 83–76 «Методика определения параметров поверочных схем», которая развивает положения ГОСТ 8.061 и устанавливает методы определения основных параметров системы ВЕПР: соотношение нормируемых погрешностей образцового и поверяемого по нему средств измерений и оценку числа ступеней точности (минимальное и максимальное). Для более точного определения числа ступеней рекомендуется учитывать: необходимость резерва ОСИ на случай отказа основных; наличие малораспространенных РСИ, для которых создается заведомо недогружаемое ОСИ; географическую «распыленность» РСИ; особенности вида измерений и применяемых средств.

Остальные основополагающие НД (ГОСТ 8.009, 8.010, 8.011, 8.042 и др.) касаются рассматриваемого вопроса лишь косвенно.

Все указанные выше НД по системе ВЕПР базируются на теоретических исследованиях, выполненных до 1973–1975 гг., причем преимущественно на работах ВНИИМ (К.П. Широков [91, 92] и К.А. Резник [57–59]). К сожалению, они слабо синтезируют ос-

тальные многочисленные исследования. Опыт применения этих НД показал, что наряду с безусловно организующим воздействием зачастую возникали определенные трудности, связанные с недостаточной четкостью приведенных в них положений и некоторыми внутренними противоречиями. В частности, в [50] указано на трудности, связанные с нечеткостью определения статуса первичных и специальных государственных эталонов, неопределенностью их состава и др. О некоторых недостатках указанных НД мы уже говорили выше.

С 1981 г. взамен ГОСТ 8.057–73 и 8.061–73 действует новый комплекс основополагающих стандартов — ГОСТ 8.057–80 [21], 8.061–80 [22], 8.372–80 [23] и 8.525–85 [24]. В них была сделана попытка учесть некоторые недостатки прежних стандартов, в частности в ГОСТ 8.057–80 оговаривается состав государственных и вторичных эталонов, а ГОСТ 8.525–85 детализирует вопросы, касающиеся юридического статуса установок высшей точности.

Однако новый комплекс приобрел и новые недостатки:

1. Расчленение двух ГОСТов на несколько стандартов, авторами которых являются разные коллективы, во-первых, усложнило работу с НД (хотя по сумме сведений они равнозначны двум прежним) и, во-вторых, привело к ряду внутренних противоречий в этом комплексе. Так, ГОСТ 8.061–80 утверждает, что поверочные схемы возглавляются государственным эталоном, а ГОСТ 8.525–85 предусматривает возможность воспроизведения единицы «установкой высшей точности».

2. Сам статус и обоснование создания УВТ остались очень расплывчатыми: в ГОСТ 8.525–85 они предполагаются к использованию и для децентрализованного воспроизведения единицы, и для безразмерных величин, и для величин, имеющих «узкоспецифичный диапазон или область применения», причем остается неясным, чем отличаются УВТ от государственных эталонов по существу, тем более что передача размеров от УВТ должна осуществляться также в соответствии с государственной ПС.

3. Необоснованно выглядит введение в ГОСТ 8.061–80 еще одной категории ПС — ведомственных, наряду с уже существовавшей категорией локальных ПС (которые могут быть любого уровня общности, кроме государственного).

4. По-прежнему не определены роль, место и общие (метрологические) требования к компараторам.

5. В ГОСТ 8.057–80 определения терминов «воспроизведение единицы» и «передача размера единицы» не приведены, т. е. в настоящее время они остались вообще нигде не регламентированными.

Следует заметить, что за длительное время, прошедшее с момента разработки основополагающих ГОСТ 8.057–80 и 8.061–80, появилось значительное количество работ по теоретическим вопросам построения систем ВЕПР (см. п. 7.2), но в новом комплексе стандартов результаты этих работ практически не учитывались и идеология построения систем ВЕПР, регламентированная стандартами [21–24], фактически осталась прежней (как в ГОСТ 8.057–73 и 8.061–73).

Сказанное, однако, может свидетельствовать не только о невнимании авторов стандартов к теоретическим работам, но и о том, что результаты этих теоретических исследований мало пригодны или трудны для перевода на достаточно простой язык практического их использования. Во всяком случае, методика МИ 83–76 [46] не пересматривалась, хотя ГОСТ 8.061–80 установил обязательность количественных обоснований оптимальности государственных поверочных схем.

7.4. Выбор основных направлений исследования

В общем виде под научной теорией понимают всю совокупность научных (теоретических) знаний об исследуемом объекте (см., например, [17, 95, 96]). Научные теории могут быть весьма разнообразными как по форме, так и по внутренней структуре. В настоящее время нет четких представлений о том, какие теории следует рассматривать в качестве наиболее совершенных форм выражения знаний. Очевидно, это зависит от уровня развития соответствующей области знаний, специфики рассматриваемых объектов и степени абстрагирования, которая определяется, по существу, целями теоретического исследования.

Оценочными характеристиками теории могут служить такие признаки, как точность, достоверность, полнота, замкнутость, глубина, непротиворечивость, простота. Поскольку указанные признаки не всегда коррелируют между собой (например, достоверность — с полнотой, полнота — с непротиворечивостью и т. п.), то построение теории, в известном смысле, можно рассматривать как задачу многокритериальной оптимизации. С учетом того, что наша

исходная информация и понимание цели ограничены, эта задача является нечеткой по своей постановке.

По-видимому, наиболее общей характеристикой качества научной теории может служить *степень упорядоченности* всех знаний, входящих в теорию. «Наука — это система, т. е. приведенная в порядок на основании известных принципов совокупность знаний» — таково мнение И. Канта.

Оценка качества метрологической теории, видимо, должна базироваться на установлении взаимосвязи гносеологической и метрической точности при выбранной совокупности оценочных параметров.

Особую роль при построении любой теории играет выбор оптимальных исходных (основных, невыводимых) понятий.

Таким образом, поскольку теория вообще, сама по себе, — система, а в рассматриваемом случае речь идет о «теории системы...», то целесообразно остановиться на некоторых основных представлениях об общей теории систем [16, 45, 48, 65, 67]. Понятие «система» отчасти проанализировано в [54].

Признаки — это свойства (характеристики) системы в целом, ее частей или отдельных элементов. Признаками, в частности, могут служить некоторые оценочные характеристики теории (точность, достоверность, полнота, замкнутость и др.), о которых упоминалось выше. Они могут быть количественными (объективными) и качественными (субъективными).

Состояние системы характеризуется набором значений признаков системы в определенный момент времени.

Поведение системы — изменение ее состояния во времени.

Структура системы определяется совокупностью отношений (связей) между ее элементами и зависит от числа и типа взаимосвязей между ними. Сложным системам присуща иерархическая структура, т. е. определенное упорядочение уровней ее подсистем и элементов.

Окружающая среда — внешние (по отношению к данной системе) системы и элементы, не входящие в нее.

Функция системы — функция, определяющая ее взаимоотношения с окружающей средой (другими системами).

Элементы, поступающие в систему, называются *входными*, а элементы, выходящие из нее, — *выходными*; последние являются *результатами* процессов преобразования в системе или выходами.

Для управляемых (организационных) систем важными являются понятия *цели и задачи системы*, которые определяют ее назначение.

Функционирование системы — осуществление ею поставленных целей и задач. Мера эффективности или качества функционирования показывает, в какой степени достигаются эти цели и задачи.

При использовании системного подхода для анализа или синтеза изучаемой системы обычно выделяются следующие проблемы:

- определение границ системы в целом и границ окружающей ее среды (взаимодействующих систем);
- установление функции системы, ее целей и задач;
- определение структуры и выявление признаков системы и ее частей;
- построение матрицы программ преобразования входных элементов в выходные;
- описание управления системой.

Итак, описание и оптимальное построение системы сводятся в конечном итоге к составлению уравнения, позволяющего рассчитывать результаты (выходы) и оценивать их эффективность на основе сравнительно небольшого числа контролируемых параметров, т. е. дающего возможность управлять системой.

С учетом этого подытожим основные результаты анализа работ по вопросам теории систем ВЕПР, проведенного в п. 7.2. Наименее проработанными (либо не исследованными вовсе) вопросами являются:

- определение системы основных исходных понятий теории, ее границ и атрибутов (особенностей);
- формулировка основных исходных концепций теории с уточнением ее объекта, выбор рационального языка теории для описания объекта;
- выбор наиболее существенных признаков системы ВЕПР и ее составных частей (подсистем и элементов);
- определение окружающей среды и изучение взаимосвязей с внешними системами;
- определение цели и назначения системы ВЕПР в целом, особенно исходя из взаимосвязей с внешними системами;
- определение входов и выходов системы ВЕПР, ее ресурсов;
- изучение (самостоятельное) системы воспроизведения единиц как существенной подсистемы системы ВЕПР;

- варианты достижения цели (в частности, децентрализованный способ воспроизведения размеров единиц) и установление меры эффективности для оценки степени достижения цели;
- изучение структуры элементов системы ВЕПР;
- моделирование структуры и процесса функционирования системы ВЕПР в целом;
- формулировка критериев качества (функционирования) системы ВЕПР и выбор оптимизационных моделей.

Очевидно, что указанные проблемы, отражающие белые пятна в сегодняшнем состоянии теории построения систем ВЕПР, могут служить и основными направлениями исследований для дальнейшего развития этой теории (фактически — для ее построения). Однако указанные направления являются долгосрочной программой.

В настоящей работе ставилась задача заложить лишь *основы* такой теории, прежде всего исходя из рассмотрения системы ВЕПР в целом и ее взаимосвязей с основными внешними системами — системой обеспечения единства измерений и системой измеряемых физических величин.

Поскольку сами эти внешние системы в теоретическом плане являются также слабо изученными, сделана попытка изложить свою позицию относительно и этих систем. Указанные направления соответствуют актуальным задачам теоретической метрологии [81, 84].

8. ОСНОВЫ ОПИСАНИЯ СИСТЕМ ВЕПР

8.1. Исходные понятия

Приведем термины и их определения для тех исходных понятий метрологии, которые потребуются для последующего перехода к описанию систем ВЕПР. Большая часть терминов заимствована из ГОСТ 16263–70; для некоторых из них приведены новые определения, по нашему мнению, лучше отражающие содержание понятия, а главное, приводящие основополагающие термины метрологии в логически более стройную и непротиворечивую систему. Термины (и соответствующие понятия), введенные заново, отмечены звездочкой (*).

Физическая величина — свойство, общее в качественном отношении различным реальным объектам, но индивидуальное в коли-

качественном отношении для каждого из них (под объектами понимаются как тела, так и процессы, поля).

*Род физической величины** — характеристика качественной стороны свойства, отождествляемого с данной ФВ (см. [53. С. 9]).

Размер ФВ — количественное содержание в конкретном объекте свойства, соответствующего понятию данной ФВ.

Единица ФВ (единица измерений) — однородная с измеряемой физическая величина определенного размера, принятого по соглашению на каком-либо объекте для установления размеров данной ФВ на других объектах.

Значение ФВ — информация о размере ФВ, выраженная в виде именованного числа в принятых единицах.

*Измерительная задача** — задача нахождения значения какой-либо ФВ при определенных (заданных) условиях.

Измерение — процесс решения какой-либо определенной измерительной задачи.

Средство измерений — техническое средство, предназначенное для выполнения измерений определенной ФВ и хранящее информацию о единице этой ФВ.

Метрологические характеристики СИ — такие характеристики его свойств, которые оказывают влияние на результаты измерений.

Метод измерений — совокупность приемов использования в данном измерении принципов и средств измерений.

*Метрологическая система** — система объектов, используемых и изучаемых в метрологии.

Здесь не определялись некоторые необходимые понятия, очевидные по своему названию, такие как «измеряемая ФВ», «объект измерения» (носитель измеряемой ФВ), «результат измерения» (результат решения поставленной измерительной задачи). Основные понятия самой теории систем ВЕПР будут вводиться и далее.

8.2. Измерение как простейшая метрологическая система

Как показано в [54], весьма плодотворным подходом для изучения и описания различных метрологических систем является использование компонентов измерения как простейшей метрологической системы. Такой подход является достаточно «естественным», т. к. использует основной объект изучения метрологии — измерение, и достаточно эффективным для изучения различных

метрологических систем с единых позиций, что очень важно при системных исследованиях.

Рассмотрим для этого общее описание измерения как процесса решения измерительной задачи, изложенное в [53]. Поскольку измерение в самом общем виде понимается как одна из разновидностей познания, при котором всегда происходит преобразование информации, то исходное уравнение для описания измерения можно записать в виде:

$$\hat{J}: I_a \rightarrow I_p, \quad (2.1)$$

где \hat{J} — оператор преобразования; I_a — априорная информация; I_p — апостериорная информация.

Конкретизация этого довольно абстрактного выражения происходит при введении понятия «измерительная задача» (см. п. 8.1) — задача нахождения значения какой-либо ФВ при определенных условиях. Следует отметить, что это важный момент для проведения любого измерения: без формулировки конкретной измерительной задачи измерение становится бессмысленным. Для этого необходимо указать, какую ФВ, на каком объекте, в каких условиях, с какой погрешностью, когда, где, за какое время (и т. п.) требуется измерить, т. е. задать параметры (компоненты) конкретной измерительной задачи z_i :

$$z_i = (\varphi_i, o_i, \psi_i, \delta\varphi_i, g_i, t_i, \Delta t_i, p_i, \dots), \quad (2.2)$$

где φ_i — измеряемая величина как качество (по определению); o_i — объект изучения (носитель измеряемой ФВ); $\psi_i \equiv \psi_k$ — условия измерений (совокупность заданных влияющих факторов); $\delta\varphi_i$ — заданная погрешность измерения; g_i — заданная форма представления результата измерения; t_i — момент времени, в который осуществляется измерение; Δt_i — интервал времени, за который необходимо выполнить измерение; p_i — координаты места (пространства), в котором осуществляется измерение.

Этот набор компонентов образует *множество задаваемых* (т. е. неуправляемых в процессе данного измерения) параметров измерения как системы. Следует отметить, что указанный набор является достаточно общим (универсальным), применимым практически к любой измерительной задаче.

После того как измерительная задача сформулирована, естественно рассматривать измерение как *процесс решения измерительной задачи*, в котором можно выделить три этапа.

На первом этапе в соответствии с измерительной задачей (отражающей вопрос «что делать?») разрабатывается план измерительного эксперимента (отвечающий на вопрос «как делать?»). На этом этапе осуществляют выбор метода и необходимых средств измерений, определяют наблюдателя (оператора, способного выполнить измерительный эксперимент), уточняют методику (алгоритм) использования выбранных СИ, а также методику и средства обработки экспериментальных данных (и т. п.). Разработку этого плана осуществляют на основе априорной информации (накопленной до постановки данной измерительной задачи), исходя из содержания самой задачи.

Этот первый этап процесса измерения можно представить следующим уравнением преобразования:

$$\hat{J}_v(z) : (I_a, z_i) \rightarrow I_z, \quad (2.3)$$

где $\hat{J}_v(z)$ — соответствующий оператор преобразования, реализуемый оператором (субъектом) v , перерабатывающим исходную информацию (в общем случае он может не совпадать с наблюдателем), а I_z — информация, соответствующая полученному плану измерительного эксперимента (здесь для простоты опущены пространственно-временные параметры):

$$I_z = (\varphi_i, o_i, \psi_i, \delta\varphi_i, g_i, \dots \mid [\varphi_i], m_i, s_i, v_i, w_i, \dots), \quad (2.4)$$

где $[\varphi_i]$ — выбранная единица измеряемой ФВ; m_i — выбранный метод измерений; $s_i \equiv \{s_k\}$ — совокупность средств измерений, используемых для решения данной измерительной задачи; v_i — наблюдатель (оператор), реализующий план измерительного эксперимента; w_i — средства обработки результатов измерительного эксперимента.

Все эти параметры, стоящие справа от вертикальной черты в (2.4), являются *управляемыми компонентами измерения* (как системы), варьируемыми при составлении плана измерительного эксперимента. Схематически первый этап процесса измерения изображен на рис. 2.1а.

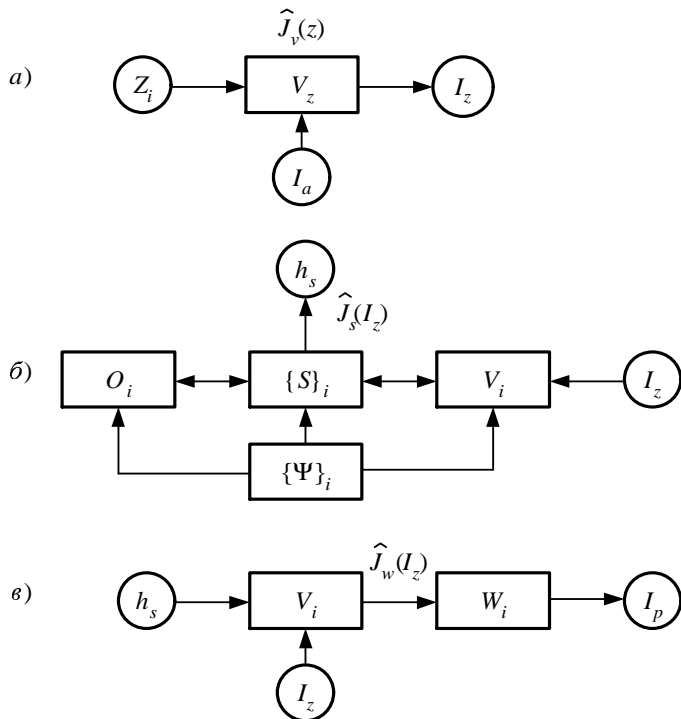


Рис. 2.1. Этапы измерения как процесса решения измерительной задачи

На втором этапе происходит процесс реальных (физических) преобразований, связанных с физическим взаимодействием выбранных средств измерений с объектом, внешними условиями и наблюдателем (рис. 2.1б). Обычно этот процесс и соотносят с понятием «измерение», однако такая трактовка оказывается недостаточной для выявления всех компонентов измерения как системы и как процесса решения измерительной задачи и вызывает большие затруднения при описании измерений, отличных от прямых однократных. В принятых здесь обозначениях этот этап в общем виде можно представить уравнением:

$$\hat{J}_s(I_z) : (o, \psi) \rightarrow h_{s_i}, \quad (2.5)$$

где h_{s_i} — показания средств измерения s_i , полученные в результате измерительного эксперимента.

На третьем этапе проводят обработку полученной измерительной информации h_{s_i} на основе плана измерительного эксперимента с использованием, в общем случае, вспомогательной вычислительной техники w_i (рис. 2.1в). Этот этап по аналогии с предыдущими можно описать уравнением:

$$\hat{J}_w(I_z) : (h_{s_i}, I_z) \rightarrow I_p. \quad (2.6)$$

Апостериорная информация I_p является *результатом измерения* Q в соответствии с заданной формой его представления. Эти формы оговорены в ГОСТ 8.011–72. Алгоритм перехода от h_s к $I_p = Q$ зависит не только от формы представления результата, но и от метода измерения. Так, для прямых однократных измерений результатом является просто значение измеряемой ФВ — $\varphi^{(3н)}$, соответственно показанию h_s СИ:

$$\varphi^{(3н)} = h \cdot \varphi_{os} = n_s[\varphi]_s, \quad (2.7)$$

где φ_{os} — постоянная данного СИ для выбранной числовой шкалы (цена деления шкалы); n_s и $[\varphi]_s$ — числовое значение ФВ и «истинное» (или приписанное) значение единицы, реализованной в данном СИ.

В более общем случае значение ФВ, полученное в результате конкретного измерения, должно быть представлено в виде:

$$\varphi^{(3н)}(z_i) = n_{\varphi_r}(I_{z_i}) \cdot [\varphi_r]_{I_{z_i}}. \quad (2.8)$$

Это означает, что и числовое значение, и единица измеряемой ФВ φ размера r определяются всей совокупностью параметров измерительной системы I_{z_i} , при помощи которой решается данная измерительная задача z_i . Иными словами, это означает, что для измерительной системы в целом существуют некие «метрологические характеристики» (аналогично тому, как они традиционно вводятся сейчас для СИ).

8.3. Априорная информация при измерениях

Важная роль априорной информации в измерениях все больше осознается в последние годы [3, 25, 93, 94]. Изложенный выше подход к общему описанию измерения подчеркивает эту роль: по

каждому компоненту измерения как системы (2.4) необходимо априори иметь ту или иную информацию. Это вытекает из свойств и взаимосвязей элементов простейшего метрологического множества. Так, достаточно очевидны зависимости, имеющие место в общем случае:

1) внешних влияющих величин от координат пространства и времени в рамках измерительной системы I_{z_i} :

$$\psi_{l_i} = \psi_l(t_i, p_i); \quad (2.9.1)$$

2) метрологических характеристик (q_s) СИ от внешних условий и тех же пространственно-временных координат (нестабильность q_{s_i} во времени, их зависимость от пространственной ориентации СИ и т. п.):

$$q_{s_i} = q_s(\psi_{l_i}, t_i, p_i); \quad (2.9.2)$$

3) истинного значения (размера) измеряемой ФВ на объекте от состояния последнего; от точки нахождения (координат) объекта; от времени (принципиальное непостоянство ФВ); от внешних условий:

$$\varphi_{0_i} = \varphi_0(t_i, p_i, \psi_i); \quad (2.9.3)$$

4) метода измерения от выбранных СИ, заданной формы представления результатов, погрешности измерений:

$$m_i = m(s_i, g_i, \delta\varphi_i); \quad (2.9.4)$$

5) единицы ФВ по определению от определения самой ФВ (наиболее тривиальная и однозначная связь):

$$[\varphi_i] = k \cdot \varphi_i; \quad (2.9.5)$$

6) типов СИ (и, следовательно, совокупности их метрологических характеристик) от измеряемой ФВ, заданной погрешности измерений и внешних условий:

$$s_i = s(\varphi_i, \delta\varphi_i, \psi_i); \quad (2.9.6)$$

7) способности оператора к выполнению своих функций от внешних условий, а также от места и времени измерения:

$$v = v(\psi_i, t_i, p_i). \quad (2.9.7)$$

Помимо этих зависимостей априорно необходимо знать: ориентировочное значение ФВ на объектах данного типа, существующие типы СИ и их характеристики, соответствующие константы и параметры зависимостей (2.9.1) – (2.9.3), действующие в области метрологии НД (как основополагающие, так и по данному виду измерений), способности операторов (наблюдателей) и т. п.

Только располагая таким необходимым объемом априорной информации (часть из которой — измерительная — из прежних экспериментов, часть — расчетная, а часть — и вовсе качественного, субъективного характера) — можно получить *правильный результат измерения* (если при этом еще квалифицированно составлен план измерительного эксперимента). В связи с этим представляется целесообразным обобщить *условие корректности измерений* (приведенное в [54] для случая временных изменений параметров измерительной системы) на случай всех возможных изменений в этой системе в рамках измерительного эксперимента:

$$\begin{aligned} \delta\varphi_i = & \int_{t_i}^{t_i+\Delta t_i} \left(\left(\frac{\partial\varphi(0)}{\partial t} \right)_i + \sum_k \frac{\partial\varphi}{\partial q_k} \cdot \frac{\partial q_k}{\partial t} + \sum_l \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\psi_l} \cdot \frac{\partial\psi_l}{\partial t} + \frac{\partial\varphi}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \right) \right) dt + \\ & + \int_{p_i-\Delta p_i}^{p_i+\Delta p_i} \left(\left(\frac{\partial\varphi(0)}{\partial p} \right)_i + \sum_k \frac{\partial\varphi}{\partial q_k} \cdot \frac{\partial q_k}{\partial p} + \sum_l \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\psi_l} \cdot \frac{\partial\psi_l}{\partial p} + \frac{\partial\varphi}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial p} \right) \right) dp + \\ & + \sum_l \int_{\psi_{i_l}-\Delta\psi_{i_l}}^{\psi_{i_l}+\Delta\psi_{i_l}} \left(\frac{\partial\varphi(0)}{\partial\psi} + \frac{\partial\varphi}{\partial v} \cdot \frac{\partial v}{\partial\psi_l} + \sum_k \frac{\partial\varphi}{\partial q_k} \cdot \frac{\partial q_k}{\partial\psi_l} \right) d\psi_l \leq (\delta\varphi_i)_{\text{зад}} - (\delta\varphi_i)_{\text{н}}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где $p_i \pm \Delta p_i$ — пространственные границы измерительной системы; $\pm\Delta\psi_{i_l}$ — погрешности задания (или возможный уход) значений внешних влияющих величин в пределах измерительного эксперимента; $(\delta\varphi_i)_{\text{зад}}$ — заданная погрешность измерения; $(\delta\varphi_i)_{\text{н}}$ — нормированная погрешность измерения, регламентированная в НД на

соответствующие средства и методы измерений в том случае, если заданные условия находятся в пределах рабочих условий их применения.

Отсюда следует, что, если влияние всех компонентов измерительной системы (2.4), кроме тех, которые предусмотрены в НД на метрологические характеристики СИ (2.9.6), либо учтено, либо пренебрежимо мало (что фактически одно и то же), то выражение (2.8) для значения измеренной ФВ примет вид:

$$\varphi^{\text{зи}}(z_i) = \varphi^{\text{зи}}(s_i) = n_{\varphi_r}(s_i)[\varphi_r]_s, \quad (2.8a)$$

где индекс r по-прежнему означает, что речь идет об определенном размере ФВ.

На основании сказанного можно следующим образом интерпретировать существующие разновидности (типы) СИ [54].

Меры (s_m) — это такие СИ, для которых и $n_{\varphi}(s)$, и $[\varphi]_s$ являются априорной измерительной информацией.

Приборы (s_n) — такие СИ, для которых $[\varphi]_s$ является априорной, а $n_{\varphi}(s)$ — апостериорной измерительной информацией.

Преобразователи (s_i) — такие СИ, для которых главной априорной информацией является коэффициент преобразования (K_i), т. е. отношение значений выходной и входной ФВ.

Итак, априорная информация является неотъемлемым условием выполнения любого измерения. При ее отсутствии измерение невозможно выполнить. С другой стороны, если об измеряемой ФВ известно все, т. е. априори известен и результат измерения, то само измерение не требуется.

В [54] сформулированы три постулата, устанавливающие качественную связь объема априорной и апостериорной информации при измерении с заданной (требуемой) точностью. Условие (2.10) подтверждает справедливость этих постулатов.

В этой связи целесообразно в дальнейших исследованиях рассмотреть *два крайних случая* измерений с разной требуемой точностью и разными ограничениями на другие составляющие измерительной системы (2.4):

1) класс исследовательских эталонных измерений — измерения высшей точности, выполняемые при исследовании эталонов и уточнении значений фундаментальных констант;

2) класс технических (рабочих) измерений — массовые измерения на производстве и в сфере эксплуатации, т. е. там, где измерения — не цель, а средство достижения своих (производственных) целей.

Следовательно, при определении стоимости измерений в задачах оптимизации метрологических систем необходимо учитывать не только стоимость СИ (в зависимости от точности), но и стоимость других компонентов простейшей метрологической системы — отдельного измерения — с учетом взаимосвязи этих компонентов.

8.4. Структура системы ВЕПР

Сущность системы ВЕПР, проанализированная в [54], достаточно полно отражена в ее названии (только при условии четкого определения входящих в это название понятий, подробный анализ которых также был выполнен). Введем следующие понятия, которые являются *основными* для системы ВЕПР.

Воспроизведение единицы — это такое ее овеществление (реализация), при котором единственной априорной информацией о размере этой единицы является ее определение.

Если справедливо, что определение единицы является «абсолютно точным» [18], т. е. идеальным, то с учетом (2.8а) можно записать следующее *уравнение воспроизведения единицы*:

$$\Phi^{\text{ЭИ}}(z_{\text{ЭТ}}) = n_{\Phi_r}(s_{\text{ЭТ}}) \cdot [\Phi_r]_{\text{ЭТ}} = n_{\Phi_r}(s_{\text{ЭТ}}) \cdot n[\Phi]_{\text{ЭТ}} \cdot s_{\text{ЭТ}} \cdot [\Phi_0], \quad (2.11)$$

где $[\Phi_0]$ — единица ФВ по ее определению, т. е. имеющая идеальный размер, принятый за единицу точно по определению; $[\Phi_r]_{\text{ЭТ}}$ — единица, реализованная в исходном эталоне в диапазоне значений ФВ, соответствующих ее размеру r , и из-за погрешности реализации отличающаяся от $[\Phi_0]$.

Передача размера единицы — это сравнение размеров единиц, реализованных во взаимоподчиненных по точности и рангу средствах измерений.

Согласно установившейся практике (которая оправдана экономической целесообразностью), операция передачи размера единицы осуществляется двумя способами:

1) *аттестацией* подчиненного СИ по вышестоящему (по точности и рангу), когда в результате сравнения их показаний вводят поправки в показания подчиненного СИ;

2) *поверкой* (контролем) подчиненного СИ по вышестоящему, когда сравнивается разность показаний поверяемого и поверяющего СИ с пределом допускаемой погрешности поверяемого СИ, на основании чего делается заключение о годности (негодности) последнего к применению.

Второй способ применяется преимущественно при проверке рабочих СИ, тогда как первый — для вышестоящих СИ.

Наконец, *хранение единицы* — это ее реализация (осуществление) в процессе эксплуатации данного СИ, т. е. в течение всего действительного срока его службы. Следует заметить, что хранит единицу любое СИ по определению, т. к. иначе оно не может быть использовано по своему прямому назначению — для измерений.

С учетом данных определений *элементами системы ВЕПР* являются методы и средства воспроизведения единиц и передачи их размеров и *полная система* задается выражением:

$$\begin{aligned} \sum_o \equiv \sum_{\text{ВЕПР}} = \{s_{i_b}, s_{i_n}, m_{i_b}, m_{i_n}\}, \\ s_{i_b} \in \sum_o, s_{i_n} \in \sum_o, m_{i_b} \in \sum_o, m_{i_n} \in \sum_o, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где обозначения очевидны из индексов и ранее принятых в п. 8.2 обозначений: $i_1 = (\overline{1, n_1})$, $i_2 = (\overline{1, n_2})$, $i_3 = (\overline{1, n_3})$, $i_4 = (\overline{1, n_4})$.

В этой *полной системе* можно выделять различные подсистемы (являющиеся ее «разрезами»):

Подсистема воспроизведения единиц:

$$\sum_{\text{ПВЕ}} = \{s_{i_b}, m_{i_b}\}, \sum_{\text{ПВЕ}} \subset \sum_o. \quad (2.12.1)$$

Подсистема передачи размеров единиц:

$$\sum_{\text{ПРЕ}} = \{s_{i_n}, m_{i_n}\}, \sum_{\text{ПРЕ}} \subset \sum_o. \quad (2.12.2)$$

Подсистема ВЕПР для заданной ФВ φ :

$$\begin{aligned} \sum_\varphi \equiv \sum_{\text{ВЕПР}}(\varphi) = \{s_{i_b}(\varphi), s_{i_n}(\varphi), m_{i_b}(\varphi), m_{i_n}(\varphi)\}, \\ \sum_{\text{ВЕПР}}(\varphi) \subset \sum_o. \end{aligned} \quad (2.12.3)$$

Подсистема средств воспроизведения единиц и передачи их размеров:

$$\sum_s = \{s_{i_b}, s_{i_n}\}, \sum_s \subset \sum_o. \quad (2.12.4)$$

Подсистема методов воспроизведения единиц и передачи их размеров:

$$\sum_m = \{m_{i_b}, m_{i_n}\}, \sum_m \subset \sum_o. \quad (2.12.5)$$

Подсистема средств воспроизведения единицы и передачи ее размера для заданной ФВ φ :

$$\sum_s(\varphi) = \{s_{i_b}(\varphi), s_{i_n}(\varphi)\}, \sum_s(\varphi) \subset \sum_\varphi. \quad (2.12.6)$$

Подсистема методов ВЕПР для заданной ФВ φ :

$$\sum_m(\varphi) = \{m_{i_b}(\varphi), m_{i_n}(\varphi)\} \subset \sum_\varphi. \quad (2.12.7)$$

Подсистема передачи размера единицы для заданной φ :

$$\sum_{s_n}(\varphi) = \{s_{i_n}(\varphi), m_{i_n}(\varphi)\} \subset \sum_s(\varphi). \quad (2.12.8)$$

Очевидны следующие соотношения:

$$\sum_o = \sum_{\text{ПВЕ}} \cup \sum_n = \sum_s \cup \sum_m = \bigcup_{i \in \{\varphi_i\}} \sum \varphi_i; \quad \sum_\varphi = \sum_s(\varphi) \cup \sum_m(\varphi);$$

$$\sum_m = \bigcap_{i \in \{\varphi_i\}} \sum \varphi_i = \bigcup_{i \in \{\varphi_i\}} \bigcap_{i, j} \sum_m(\varphi_i) \sum_m(\varphi_j); \quad \sum_s = \bigcup_{i \in \{\varphi_i\}} \sum_s(\varphi_i) \text{ и др.}$$

Обзор технической литературы в п. 7.2 показал, что теоретические исследования касались в основном систем вида (2.12.8). Под системой (2.12.1) обычно понимается эталонная база страны, а под системой (2.12.3) — поверочная система (жаргонный аналог — поверочная схема).

В [54] система \sum_o названа *полной* системой воспроизведения единиц и передачи их размеров, а подсистема \sum_φ — *частной* системой ВЕПР (для определенной ФВ).

Рассмотрим более подробно системы вида (2.12.3), (2.12.5) и (2.12.6).

Введем, как это сделано в [54], *обобщенный элемент* систем вида (2.12.4) и (2.12.6), который будем называть *метрологическим средством измерений* (средство измерений, предназначенное и применяемое для воспроизведения единицы и/или передачи ее размера). Это сугубо метрологическое назначение — принципиальное отличие МСИ от рабочих средств измерений, т. к. ни одно из последних не воспроизводит единицу и не передает ее размер, а лишь хранит его.

Элементы МСИ систем ВЕПР любого вида (их содержащих) располагаются иерархически в системе, как это следует из содержания понятий «воспроизведение» и «передача», т. е. задают иерархическую структуру частной системы ВЕПР Σ_{ϕ} . Возглавляют эту систему средства воспроизведения единицы — *исходные МСИ* системы Σ_{ϕ} , которые позволяют воспроизводить, хранить и передавать размер единицы *подчиненным МСИ* системы. Для необходимого (нормального) функционирования исходных и (или) подчиненных МСИ данной системы Σ_{ϕ} иногда вводятся *вспомогательные МСИ*. Подробнее классификация МСИ и их разновидности исследованы в [54].

Любое МСИ, несмотря на сугубо метрологическую роль, остается средством измерений (иногда их комплексом). Поэтому, как и любое СИ, МСИ могут быть реализованы в виде мер, приборов или преобразователей. На рис. 2.2 показаны взаимосвязи МСИ как соподчиненных элементов системы ВЕПР частного вида (для конкретной ФВ), в зависимости от принадлежности к тому или иному типу СИ.

Схема позволяет установить возможные *методы передачи* размеров единиц между соподчиненными МСИ:

t_1 — *метод сличения меры с мерой при помощи компаратора* (преобразователя); компаратором в данном случае может служить либо масштабный преобразователь типа мостовых схем (в случае мер разных номиналов), либо устройство типа нуль-индикатора. Применение метода непосредственного сличения мер, как его часто называют в литературе, по нашему мнению, невозможно из-за сущности самих мер;

t_2 — *метод прямого измерения* поверяемым прибором размера ФВ, воспроизводимой вышестоящей мерой;

t_2' — также *метод прямого измерения*, но вышестоящим прибором;

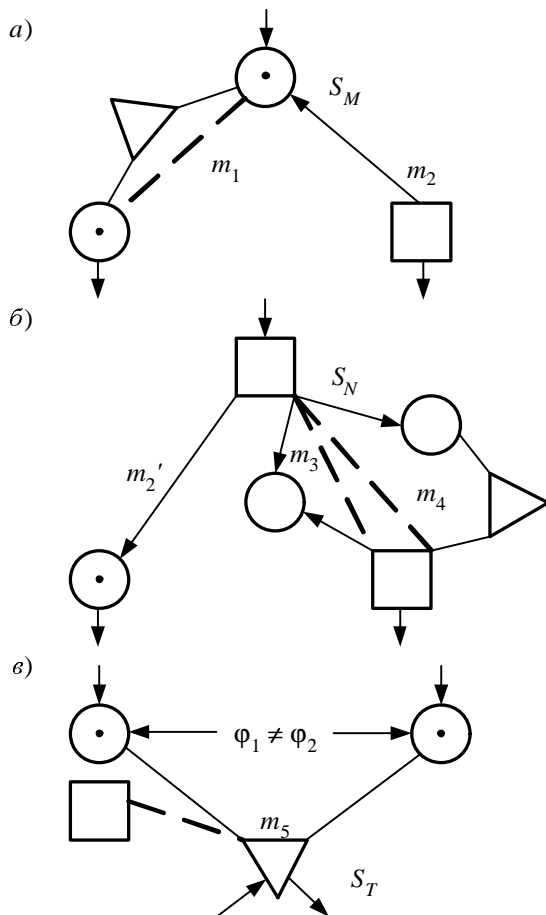


Рис. 2.2. Взаимосвязи (методы передачи)

между различными типами соподчиненных МСИ:

- — генератор ФВ; ⊙ — мера (аттестованный генератор);
- — измерительный прибор; △ — измерительный преобразователь;
- m_i — см. текст

m_3 — метод «непосредственного» сличения прибора с прибором; для реализации этого метода, однако, необходим генератор (источник) ФВ; это очевидно, поэтому слово «непосредственного» в названии метода взято в кавычки;

m_4 — метод сличения прибора с прибором при помощи компаратора. Метод применим, когда сличаются приборы на разных участках диапазона измеряемой ФВ; компаратором (вспомогательным МСИ) в этом случае служит масштабный преобразователь; необходимым элементом сличения и здесь является генератор ФВ;

m_5 — метод определения коэффициента преобразования измерительного преобразователя; при этом φ_1 и φ_2 могут быть как однородными (разных размеров), так и разнородными величинами (в первом случае имеем дело с масштабным преобразователем). Строго говоря, этот метод не относится к методам передачи размера единицы, но является методом аттестации преобразователей, которые могут служить вспомогательными МСИ в системах ВЕПР.

Метод косвенных измерений при воспроизведении единиц и передаче их размеров рассмотрен отдельно в п. 10.1.

Рассмотрим общее уравнение передачи размера единицы между двумя ступенями системы ВЕПР для основного способа, применяемого между МСИ, — способа аттестации.

Пусть s_2 — поверяемое МСИ, а s_1 — поверяющее МСИ.

При проведении сличений s_1 и s_2 любыми основными методами передачи (m_1 – m_3) в конечном счете сравниваются показания СИ s_1 и s_2 при одном и том же размере ФВ φ_r . Пусть c — установленная при сличениях разность показаний между s_1 и s_2 .

Согласно подходу, изложенному в п. 8.2, в этом случае имеем две измерительные задачи z_1 и z_2 , совпадающие практически по всем компонентам, кроме s_i . Поэтому с учетом сказанного и (2.8а) имеем:

$$\varphi^{\text{зн}}(z_1) = n_\varphi(s_1) \cdot [\varphi]_{s_1},$$

$$\varphi^{\text{зн}}(z_2) = n_\varphi(s_2) \cdot [\varphi]_{s_2},$$

$$c \equiv n_\varphi(s_1) - n_\varphi(s_2) \equiv \Delta n_\varphi(s_1 - s_2)$$

при условии

$$\varphi_2(z_1) = \varphi_2(z_2). \quad (2.13)$$

Сравнивая показания s_1 и s_2 и переходя к значениям измеряемой ФВ φ , считаем (так нам должно казаться), что размеры единиц, реализованных в s_1 и s_2 , одинаковы и равны единице в s_1 как более точном СИ:

$$\varphi_{\text{ком}}^{\text{зн}}(z_1) = n_{\varphi}(s_1) \cdot [\varphi]_{s_1},$$

$$\varphi_{\text{ком}}^{\text{зн}}(z_2) = n_{\varphi}(s_2) \cdot [\varphi]_{s_2}.$$

Поэтому при введении поправки c в показание s_2 получаем исправленное (действительное) значение φ в системе z_2 для единицы $[\varphi]_{s_2}$:

$$\varphi_{\text{д}}^{\text{зн}}(z_2) = [n_{\varphi}(s_2) + \Delta n_{\varphi}(s_1 - s_2)] \cdot [\varphi]_{s_1} = n_{\varphi\text{д}}(s_2) \cdot [\varphi]_{s_1}. \quad (2.14)$$

Посмотрим, какой при этом получился реальный размер единицы у s_2 . Используя (2.13) и (2.14), получаем:

$$[\varphi]_{s_2} = \left[\frac{n_{\varphi\text{д}}(s_1)}{n_{\varphi}(s_2)} \right] \cdot [\varphi]_{s_1} = \left[1 + \frac{c}{n_{\varphi}(s_2)} \right] \cdot [\varphi]_{s_1} \quad (2.15)$$

или

$$\Delta[\varphi]_{s_2} = [\varphi]_{s_1} - [\varphi]_{s_2} = \left[\frac{c}{n_{\varphi}(s_2)} \right] \cdot [\varphi]_{s_1}. \quad (2.15a)$$

Таким образом, введение поправки $c = \Delta n_{\varphi}(s_1 - s_2)$ в показание s_2 по результатам его сличения с более точным s_1 равносильно изменению размера единицы, реализованной в s_2 , на

$$\Delta[\varphi]_{s_2} = \left[\frac{c}{n_{\varphi}(s_2)} \right] \cdot [\varphi]_{s_1}. \quad (2.15б)$$

Вопросы о других признаках, характеризующих структуру системы ВЕПР и ее отдельных элементов, рассмотрены в следующем пункте.

8.5. Окружающая среда и границы системы ВЕПР

Как показано в [54] и как это ясно из существа дела, система ВЕПР является главной составной частью системы обеспечения единства измерений, которая, в свою очередь, входит главной составляющей в систему метрологического обеспечения и т. д. Однако для более четкого (формализованного) описания рассмотрим вопрос с другой точки зрения.

Введем понятие «*общая система измерений*» как множество всех выполняемых измерений на каком-то конечном участке времени (T) в пространстве (P), т. е. в пределах определенного пространственно-временного континуума (P, T). Вопрос о роли пространственно-временных соотношений при описании различных метрологических систем более подробно рассматривался в [54]. Используя представление отдельного измерения в виде измерительной системы (2.4), общую систему измерений можно представить в виде:

$$\sum_o(P, T) = \bigcup_k \{I_{z_i}(\varphi_k)\},$$

$$I_{z_i}(\varphi_k) = (\varphi_{k_i}, o_i, \psi_i, \delta_i, g_i, t_i, \Delta t_i, p_i \dots [\varphi_k]_i, m_i, s_i, v_i, w_i, \dots),$$

$$1 \leq i \leq | \{z_i(\varphi_k)\} |, \quad t_i \in T, \quad p_i \in P, \quad 1 \leq k \leq | \{(\varphi_k)\} |. \quad (2.16)$$

Локализуя пространственно-временной континуум (P, T), будем переходить к вполне определенным системам измерений. Так, ограничивая P рамками своей страны, имеем *национальную систему измерений* (НСИ), понятие о которой уже вошло в метрологическую практику [56, 84 и др.]:

$$\text{НСИ} = \sum_{\text{НСИ}}(T). \quad (2.16.1)$$

Попытаемся сформулировать условия, которые отражали бы роль метрологии по отношению к состоянию НСИ, т. е. влияние на нее собственно метрологических систем (см. [54] и п. 2.4). Очевидно, что набор измерительных задач

$$Z_i(\varphi_k) = Z(\varphi_{k_i}, o_i, \psi_i, \delta_i, g_i, t_i, \Delta t_i, p_i, \dots) \quad (2.17)$$

определяется потребностями всех сфер деятельности общества (науки, производства, эксплуатации и др.), и можно считать, что

он практически не зависит от параметров собственно метрологических систем, хотя, как увидим далее, проблема оптимизации набора измерительных задач (как для заданной ФВ, так и для их совокупности) является актуальной и может дать ощутимый экономический эффект (см., например, [26]).

В работе В.Н. Сретенского и др. [79] (где такие системы называются метрологическими цепями или сетями) рассмотрен общий характер влияния общей системы измерений и собственно метрологических систем на указанные сферы. Для сферы науки характерно наличие сильной положительной обратной связи, которая обуславливает ускорение ее развития в связи с тем, что «... наука движется вперед пропорционально массе знаний, унаследованных ею от предшествующего поколения...» (Ф. Энгельс). Со сферой производства метрологические системы имеют как положительные (компоненты развития), так и отрицательные (компоненты стабильности и качества) обратные связи. Поэтому здесь должно существовать оптимальное соотношение между затратами на метрологические системы и потерями производства от их неэффективности и некачественности. Связь метрологических систем со сферой эксплуатации имеет ярко выраженную отрицательную обратную связь (поглощение измерительной информации), т. к. решается проблема поддержания стабильности потребительских свойств (параметров) эксплуатируемых объектов. Здесь проблема оптимизации связана уже с параметрами собственно метрологических систем.

Таким образом, во всех случаях влияние собственно метрологических систем сводится к влиянию на качество и эффективность измерений, производимых в НСИ (и их результатов). Это естественно для метрологии как науки об измерениях и соответствующей практической деятельности ([54] и п. 2.4). При этом несомненно, что основная «ответственность» собственно метрологических систем лежит прежде всего на обеспечении качества измерений, т. к. на их эффективность в большой степени влияют другие сферы деятельности (в первую очередь производство самой измерительной техники). Поэтому в качестве главного показателя эффективности функционирования собственно метрологических систем выберем критерий качества измерений в НСИ.

Показателями качества измерений являются [93]: точность, достоверность, правильность, сходимость и воспроизводимость.

Точность измерений характеризует близость результата измерения к истинному значению измеряемой величины.

Правильность измерений определяется близостью к нулю систематической погрешности в результате измерения.

Достоверность измерения определяется степенью доверия к его результату и характеризуется вероятностью того, что истинное значение измеряемой ФВ лежит в окрестностях действительного значения с указанными границами.

Сходимость измерений отражает близость результатов измерений одной и той же величины (одинакового размера), выполненных в одинаковых условиях.

Воспроизводимость измерений отражает близость результатов измерений одной и той же величины, выполненных в различных условиях (по методу, используемым СИ, месту и времени, условиям и наблюдателю).

Первые два определения даны по ГОСТ 16263–70, третье — по [93], а последние два — по Международному словарю [101]. Заметим, что оценка достоверности измерения является чисто математическим приемом с использованием хорошо отработанной теории вероятностей и должна производиться всегда при оценке результатов измерений ввиду неизбежно вероятностного (случайного) характера измерения (его результатов и их погрешностей). Поэтому этот показатель нельзя отнести к числу управляемых «изнутри» метрологической системы, хотя он и важен с точки зрения потребителя измерительной информации.

Из остальных четырех показателей первые три (точность, правильность и сходимость) полностью определяются одним — точностью измерений как интегральным показателем, характеризующим близость к нулю и систематической, и случайной составляющих погрешности отдельного измерения (как при однократных, так и при многократных наблюдениях).

Гораздо более интересным с точки зрения рассматриваемой постановки вопроса является последний из перечисленных показателей качества измерений — воспроизводимость, т. к. он характеризует «коллективные свойства» общей системы измерений (в том числе НСИ). В [54] этот показатель был назван сопоставимостью измерений (точнее, сопоставимостью результатов измерений), что более удачно, на наш взгляд, чем «воспроизводимость измерений», т. к. последнее носит оттенок повторяемости измерительной задачи, что как раз противоречит содержанию понятия. В дальнейшем будем пользо-

ваться кратким термином «сопоставимость измерений» (в значении, которое определено выше для термина «воспроизводимость»).

С учетом сказанного в качестве основных показателей качества измерений как главного критерия эффективности влияния собственно метрологических систем на НСИ выбираем два: точность и сопоставимость измерений. Высокая степень сопоставимости измерений может быть достигнута и при значительной систематической погрешности Δ_c (отклонение результата измерений — действительного значения измеряемой ФВ — от истинного значения ФВ). При этом значение Δ_c может быть известно или неизвестно, но должно быть одинаковым при всех измерениях. Разумеется, сопоставимость измерений будет «автоматически» повышаться при повышении точности всех измерений, однако обе задачи актуальны на практике.

На рис. 2.3 сделана попытка проиллюстрировать соотношение различных показателей качества измерений между собой.

Будем считать НСИ (2.16.1) замкнутой системой (без входов и выходов). Это соответствует выбору сравнительно небольшого интервала времени T , когда набор измерительных задач z_i , а также компоненты, необходимые для их решения [справа от вертикальной черты в выражении для $(z$ в (2.16)], остаются неизменными (постоянными). Очевидно, что для первой стадии описания такой большой системы это допущение вполне оправданно.

Теперь можно перейти к формулировке условий обеспечения необходимого уровня качества измерений в НСИ для обоих выбранных показателей качества: точности и сопоставимости.

1) Так как сформулированное в п. 8.3 условие корректности отдельного измерения (2.10) означает условие максимально возможного приближения к заданной точности измерения путем учета всех компонентов измерения как системы, то условие (2.10) может быть использовано для формулировки условия достижения заданной (требуемой) точности измерения в рамках НСИ.

В заданной системе измерений НСИ — см. (2.16) и (2.16.1):

– для любой измерительной задачи $z_i(\varphi_k)$ [см. (2.17)] существует такой набор управляемых параметров системы:

$$U_i(\varphi_k) = \langle [\varphi_k]_i, m_i, s_i, v_i, w_i, \dots \rangle, \quad (2.18)$$

а также такой объем априорной информации I_a , что обеспечивает выполнение условия (2.10).

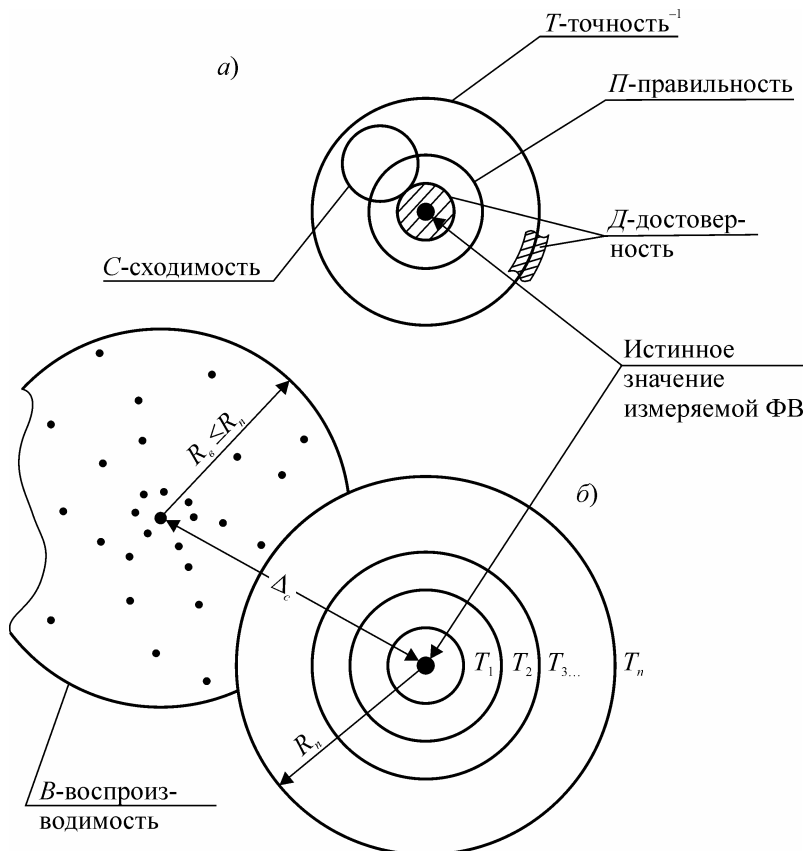


Рис. 2.3. Иллюстрация соотношений различных показателей качества измерений:

- а) точности, правильности, сходимости и достоверности результата решения одной измерительной задачи; б) воспроизводимости (сопоставимости) и точности результатов решения различных измерительных задач, выполненных с разной «видимой» точностью $T_1 > T_2 > T_3 > \dots > T_n$

На языке формальной логики это условие выглядит так:

$$\forall z_i(\varphi_k) \exists i \in U_i(\varphi_k) \& I_a \rightarrow (2.10). \quad (2.18a)$$

Очевидно, что априорная информация должна относиться прежде всего к знаниям о видах и параметрах зависимостей (2.9.1) –

(2.9.7), связывающих значения параметров данной измерительной системы.

2) *Условие сопоставимости измерений* в рамках НСИ формулируется следующим образом: на заданном множестве $\{z_i(\varphi_k)\}$ измерительных задач в данной системе измерений (НСИ) при любом $i \neq j$, но $\varphi_{kr}(o_i) = \varphi_{kr}(o_j)$, существует такой набор управляемых параметров системы:

$$\langle [\varphi_k]_i, [\varphi_k]_j, m_i, m_j, s_i, s_j, v_i, v_j, w_i, w_j, \dots \rangle, \quad (2.19)$$

что обеспечивается выполнение условия

$$\varphi_k^{3H}(z_j) - \varphi_k^{3H}(z_i) \leq \sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2}.$$

На языке формальной логики это условие выглядит так:

$$\begin{aligned} \exists_i \in z_i(\varphi_k) A_i^N \neq j \& [\varphi_{kr}(o_i) = \varphi_{kr}(o_j)] \rightarrow \\ \rightarrow \forall N [\varphi_k^{3H}(z_j) - \varphi_k^{3H}(z_i)] &\leq \sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2}. \end{aligned} \quad (2.19a)$$

Таким образом, одновременное выполнение условий (2.18) и (2.19) в рамках рассматриваемой общей системы измерений — НСИ — обеспечивает соответствующее качество измерений НСИ в целом. Это заставляет говорить о необходимости наличия в рамках НСИ подсистемы, которую можно назвать *системой обеспечения качества измерений* (СОКИ) и которая призвана управлять качеством измерений в НСИ, т. е. добиваться выполнения в ней условий (2.18) и (2.19). К сожалению, формализация этой системы (СОКИ) на данном этапе развития метрологии не удастся, да это и не входит в задачу настоящих исследований. В [54] сделана попытка определить (чисто интуитивно) те собственно метрологические системы (точнее, задачи), которые должны входить в СОКИ. Здесь, на основании условия (2.18), можно более определенно сказать, что СОКИ должна обеспечить решение следующих задач (общие требования к СОКИ):

– разработку и выпуск РСИ необходимой номенклатуры и точности, а также средств вычислительной техники (задача приборостроения на основе анализа белых пятен в (2.18) по компонентам s_i и w_i);

- подготовку кадров измерителей (операторов, наблюдателей) соответствующей квалификации (компонент v_i);
- разработку соответствующих методов измерений (m_i);
- введение необходимых единиц ФВ (компонент $[\varphi_k]_i$);
- проведение широкого круга исследовательских экспериментов по изучению зависимостей (2.9.1) – (2.9.7) для накопления необходимого объема априорной информации I_a .

Последние три задачи, несомненно, относятся прежде всего к собственно метрологическим системам (по-видимому, к системе метрологического обеспечения — СМО).

Как показано в [54], понятие «сопоставимость измерений» тесно коррелирует с понятием «единство измерений»; это подтверждает и анализ литературных данных, где понимание единства измерений отождествляется с таким состоянием системы, когда заданная точность обеспечивается в разных местах, в разное время, разных условиях, различными методами и СИ (см., например, [12]). Иными словами, можно дать следующее исходное определение.

Единство измерений — это состояние общей системы измерений, при котором любые два измерения ФВ одного и того же размера, выполненные в рамках этой системы, дают результаты, не выходящие за пределы оцененных погрешностей этих измерений. Поэтому естественно определить систему обеспечения единства измерений как систему, которая обеспечивает в системе (2.16.1) выполнение условия (2.19).

Относительно этой системы (СОЕИ) можно сказать несколько больше, чем о СОКИ.

Во-первых, условие сопоставимости измерений (2.19) реально относится не к любой измерительной задаче в НСИ: для этого нужна еще проблемная ситуация по обеспечению единства измерений (или сопоставимости результатов измерений, что одно и то же). Типичный (а может быть, и просто характерный, т. е. определяющий) практический случай такой проблемной ситуации состоит в следующем.

Пусть *потребитель А*, находящийся в том же пространственно-временном континууме, что и НСИ, но имеющий в рамках этого континуума свои координаты ($\Delta P_a, \Delta T_a$), нуждается в объекте (изделии) «а», который характеризуется набором потребительских свойств (измеримых показателей качества) $\varphi_k(a)$, $k \in (\overline{1, n})$. При

этом изделие (объект) «а» удовлетворяет запросам (задачам) потребителя A только в том случае, если значения каждого потребительского свойства не выходят за определенные границы в пределах допусков $\Delta_d \varphi_k(a)$ с доверительной вероятностью $f_d(\varphi_k)$.

Поставщик B (изготовитель), имеющий свои координаты (ΔP_0 , ΔT_0), должен обеспечить изготовление изделия «а» со значениями показателей $\varphi_k(a)$ в пределах указанных (заданных) допусков и доверительных вероятностей.

Поскольку и потребитель A , и поставщик B имеют свои интересы и могут пользоваться своим набором методов и средств определения потребительских свойств $\varphi_k(a)$ изделия, то главная проблема для урегулирования их взаимоотношений (и для всего хозяйства страны) состоит в том, чтобы добиться гарантии того, что и поставщик, и потребитель получают сопоставимые результаты измерений соответствующих показателей φ_k , несмотря на разные пути (способы) получения этих результатов для одной и той же величины φ_k . Добиться этого означает выполнить условия (2.19).

Очевидно, что система, обеспечивающая единство измерений между системами B (поставщик) и A (потребитель), должна быть «внешней» по отношению к ним обеим, но принадлежать общему пространственно-временному континууму. Заметим, что описанная проблемная ситуация «поставщик — потребитель» может иметь место внутри предприятия (при прохождении продукции между цехами, ОТК и т. п.), между предприятиями региона или страны, а также между различными странами.

Из этого следует, что для построения системы обеспечения единства измерений важно не столько количество производимых измерений или решения измерительных задач в общей системе измерений, сколько число взаимосвязей «поставщик — потребитель» по каждому измеримому свойству φ_k , т. е. число проблемных ситуаций в рассматриваемой системе (например, НСИ). С точки зрения экономики это определяется степенью специализации и кооперации общественного производства.

Рассмотрим теперь интерпретацию условия сопоставимости результатов измерений в задачах z_i и z_j :

$$\varphi^{3H}(z_j) - \varphi^{3H}(z_i) \leq \sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2} \quad (2.196)$$

при условии $\varphi_r(z_i) = \varphi_r(z_j)$.

В соответствии с (2.8) результаты решения этих задач

$$\varphi^{\text{зн}}(z_j) = n_\varphi(z_j) \cdot [\varphi]_{s_j}; \quad \varphi^{\text{зн}}(z_i) = n_\varphi(z_i) \cdot [\varphi]_{s_i}, \quad (2.20)$$

соответствуют истинным размерам единиц $[\varphi]_{s_j}$ и $[\varphi]_{s_i}$, которые реализованы в s_j и s_i , но которые неизвестны.

Наблюдатели в z_i и z_j считают, что они оба выражают результаты в «принятых единицах» $[\varphi]_0$, т. е. имеют «кажущиеся» результаты:

$$\varphi_{\text{каж}}^{\text{зн}}(z_j) = n_\varphi(z_j) \cdot [\varphi]_0; \quad \varphi_{\text{каж}}^{\text{зн}}(z_i) = n_\varphi(z_i) \cdot [\varphi]_0, \quad (2.20a)$$

разность между которыми составляет

$$\varphi_{\text{каж}}^{\text{зн}}(z_j) - \varphi_{\text{каж}}^{\text{зн}}(z_i) = \{n_\varphi(z_j) - n_\varphi(z_i)\} \cdot [\varphi]_0 = \Delta n_\varphi(z_j, z_i) \cdot [\varphi]_0$$

и сравнивается с $\sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2}$, т. е. сравнение идет по показаниям соответствующих СИ. Действительная же разность значений может не совпадать с кажущейся из-за отличия действительно реализованных в s_i и s_j размеров единиц от принятого:

$$\varphi_{\text{д}}^{\text{зн}}(z_j) - \varphi_{\text{д}}^{\text{зн}}(z_i) = \Delta n_\varphi(z_j, z_i) \cdot [\varphi]_{\text{д}}.$$

Видно, что при $[\varphi]_{\text{д}} \neq [\varphi]_0$, $\varphi_{\text{д}}^{\text{зн}} \neq \varphi_{\text{каж}}^{\text{зн}}$. Иначе говоря, воспроизводимость (сопоставимость) измерений зависит от размера единицы, реализованной в средствах измерений. Отсюда следует, что справедливость выполнения условия (2.19) может быть гарантирована только тогда, когда единицы в сравниваемых измерительных системах z_i и z_j не только одинаковы, но и равны (близки) размеру принятой в данной системе измерений единице.

Это означает, что СОЕИ должна включать в себя подсистему, которая обеспечивает не только единообразие единиц (с точки зрения размеров, реализованных в СИ общей системы измерений), но и их соответствие принятым по соглашению единицам (их определению). *Таковую роль и выполняет система ВЕПР* в соот-

ветствии с той сущностью, которая была предписана ей ранее (п. 8.4). Таким образом, установлено следующее взаимоотношение систем:

$$\text{НСИ} \leftrightarrow \text{СОКИ} \supset \text{СМО} \supset \text{СОЕИ} \supset \text{СВЕПП}. \quad (2.21)$$

9. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ВЕПП

9.1. Основные признаки системы ВЕПП

Подытожим полученные сведения о системе ВЕПП. Согласно п. 8.5, *цель системы ВЕПП* — обеспечение объективной оценки условия сопоставимости измерений (2.19), что сводится к обеспечению соответствия этих единиц принятым по соглашению (близость их к определению) в рамках той же общей системы измерений, с которой соотносится данная система ВЕПП.

В качества общей системы измерений по-прежнему выбираем замкнутую НСИ, т. е. систему вида $\sum_{\text{НСИ}}(T) = \bigcup_k \{I_{z_i}(\varphi_k)\}$,

где

$$I_{z_i}(\varphi_k) \equiv \langle \varphi_k, o_i, \psi_i, \delta_i, g_i, t_i, \Delta t_i, p_i, \dots, [[\varphi_k]_i, m_i, s_i, v_i, w_i, \dots] \rangle, \quad (2.16.1)$$

$$i \in \{z_i(\varphi_k)\}, \quad k \in \{\varphi_k\}, \quad t_i \in T, \quad p_i \in P_{\text{НСИ}}.$$

Замкнутость НСИ означает стабильность множеств:

$$\Phi \equiv \{\varphi_k\} = \{\varphi_1, \dots, \varphi_k, \dots, \varphi_N\}, \quad (2.22)$$

$$Z(\varphi_k) \equiv \{Z_i(\varphi_k)\} = \{\varphi_k, o_i, \psi_i, \delta_i, g_i, t_i, \Delta t_i, p_i, \dots\}, \quad (2.23)$$

$$U(\varphi_k) \equiv \{U_i(\varphi_k)\} = \{[\varphi_k]_i, m_i, s_i, v_i, w_i, \dots\}. \quad (2.24)$$

Множество (2.24) — это множество всех управляемых элементов системы (2.16.1), т. е. элементов, выбираемых при решении конкретной измерительной задачи $Z_i(\varphi_k)$ при конструировании измерительной системы I_{z_i} для решения этой задачи.

Перепишем общее представление полной системы ВЕПР (2.12) в следующем виде:

$$\sum_{\text{ВЕПР}} = \bigcup_k \sum_{\text{ВЕПР}} (\varphi_k) = \bigcup_k \{s_{i_1 b}(\varphi_k), s_{i_2 n}(\varphi_k), m_{i_3 b}(\varphi_k), m_{i_4 n}(\varphi_k)\},$$

$$k \in \{\varphi_k\}, i_1 = (\overline{1, n_1}), i_2 = (\overline{1, n_2}), i_3 = (\overline{1, n_3}), i_4 = (\overline{1, n_4}). \quad (2.12a)$$

Структура частной системы ВЕПР (для заданной ФВ) — иерархическая. Общий вид этой структуры приведен на рис. 2.4.

Входами полной системы ВЕПР являются следующие признаки:

- определения единиц (основной вход), включая представление о каждой ФВ в системе физических величин;
- априорные сведения об основных зависимостях между величинами, характеризующими используемые для воспроизведения единицы физические явления;
- данные о физических константах, входящих в определения единиц и о константах веществ, материалов, процессов и явлений, используемых для реализации единиц (стандартные справочные данные — ССД);
- общие требования к исходным и подчиненным МСИ.

Выходами полной системы ВЕПР являются размеры единиц, реализованные в подчиненных МСИ, замыкающихся на РСИ общей системы измерений, и методы поверки этих РСИ.

Для частной системы ВЕПР все отмеченное относится к заданной физической величине.

Однако для теоретического построения системы ВЕПР необходимо также располагать данными о всех параметрах (признаках) системы измерений НСИ, входящих в ее описание (2.16.1).

9.2. Объем исходных данных для построения систем ВЕПР

Попытаемся оценить мощности однородных множеств для каждого параметра (признака), характеризующего НСИ по описанию (2.16.1).

1. *Число измеряемых ФВ* в НСИ. Анализ был выполнен в [54] и показал, что это число равно ~ 250 :

$$|\Phi| \cong |\{\varphi_k\}| \sim 250. \quad (2.25.1)$$

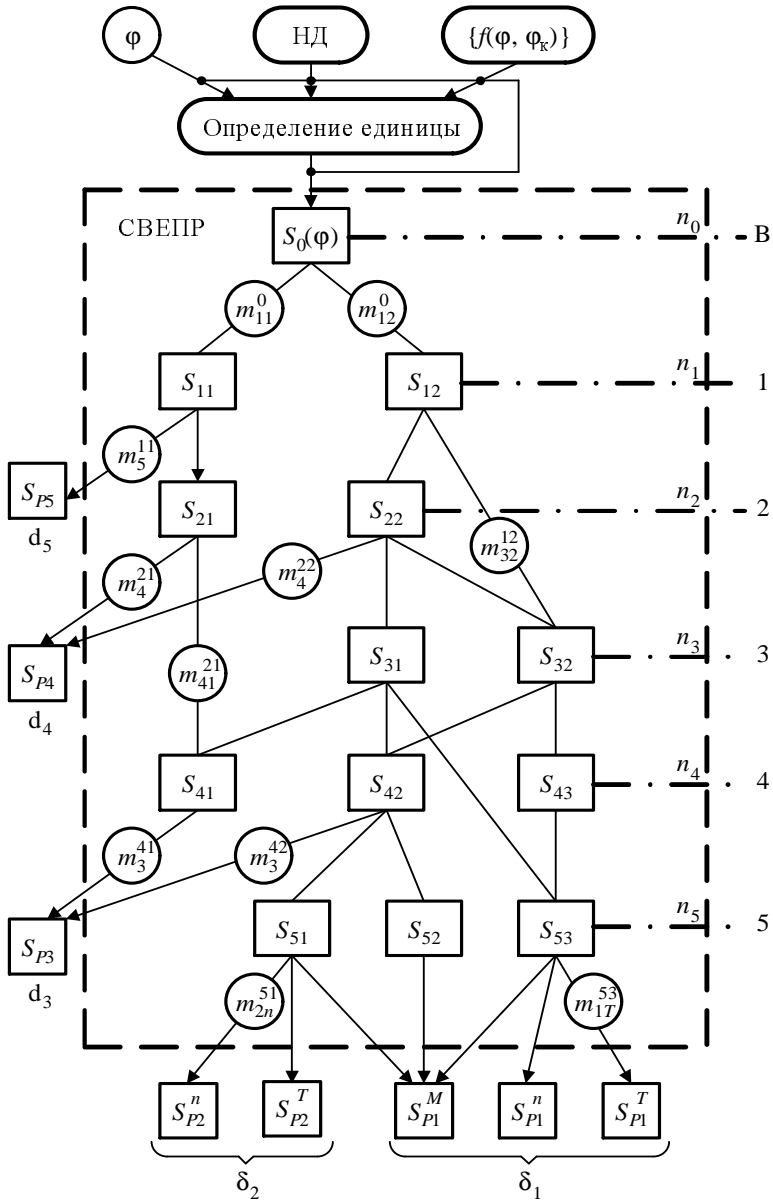


Рис. 2.4. Общая структура частной (для заданной φ) системы ВЕПР

2. *Число единиц измеряемых величин.* Оно, строго говоря, должно соответствовать числу измеряемых величин. На самом деле некоторые ФВ имеют несколько единиц (не считая кратных, дольных и других, связанных однозначно точным числом): время (в макромасштабе), площадь, твердость, давление и др. Гораздо сложнее, когда одна и та же единица используется для разнородных ФВ (подробнее см. в п. 10.2). Будем считать, что

$$|\{\Phi\}| \equiv |\{\varphi_k\}| \approx 250. \quad (2.25.2)$$

Дальнейшие оценки будем производить из расчета на одну измеряемую величину (в среднем).

3. *Число реализаций ФВ* на множестве объектов $\{o_i\}$. Число самих объектов, на которых производятся измерения даже одной ФВ, невообразимо велико. Оценку сделаем по максимуму градаций воспринимаемых размеров величины, исходя из логарифмического закона распределения размеров измеряемых величин [47], максимальных диапазонов их изменений и среднего диапазона восприятия размеров величины (что соответствует условной градации объектов по размерам воспроизводимой ими величины). Считая, что $\varphi_{\max} : \varphi_{\min} \approx 10^{17} : 10^{-17} = 10^{34}$, а диапазон воспринимаемых значений соответствует ~ 10 , получим:

$$|\{\varphi(o_i)\}| \sim 30 \div 40. \quad (2.25.3)$$

Следует, конечно, помнить, что объекты характеризуются не только размером реализованной в них ФВ, но и другими параметрами, влияющими на решение измерительной задачи (агрегатное состояние, неинформативные параметры, состав вещества и др.) Поэтому оценку (2.25.3) можно увеличить примерно на порядок.

4. *Число реализаций условий измерений.* По-видимому, можно считать, что это число имеет такой же порядок, как и число различных (по восприятию) градаций размеров измеряемой величины (при этом коэффициент обычно берется 3–4 — по числу влияющих величин). Поэтому

$$|\Psi| \equiv |\{\psi_i\}| \sim 100 = 10^2. \quad (2.25.4)$$

5. *Число значений задаваемых погрешностей.* Его можно оценить по используемому на практике ряду классов точности СИ, который содержит $\cong 10$ значений. Таким образом,

$$|\Delta| \equiv |\{\delta_i\}| \sim 10. \quad (2.25.5)$$

6. *Число форм представлений результатов измерений.* Оно было регламентировано в ГОСТ 8. 011–72 и составляет ≤ 10 .

$$|G| \equiv |\{g_i\}| \sim 10. \quad (2.25.6)$$

7. *Число интервалов времени измерения.* Целесообразно так же, как в п. 7.3, оценить его по числу градаций в реальной практической шкале интервалов Δt от 10^{-9} до 10^7 с.

$$|\{\Delta t_i\}| \sim 20. \quad (2.25.7)$$

8. *Число методов измерений.* С точки зрения общих приемов использования СИ это единицы. Однако с учетом используемых принципов (физических) это трудно оцениваемое число. Пренебрегая последним, т. е. понимая под методом измерений лишь общие приемы использования СИ (наиболее употребительная трактовка), получим оценку:

$$|M| \equiv |\{m_i\}| \sim 10. \quad (2.25.8)$$

9. *Число (номенклатура) используемых СИ.* Оно зависит от диапазона измеряемых размеров ФВ, точности и условий измерений, т. е. от оценок (25.3) – (25.6). В среднем можно считать, что для каждой ФВ

$$|S| \equiv |\{s_i\}| \sim 10^3. \quad (2.25.9)$$

Для многих задач важно знать также номенклатуру свойств СИ, влияющих на результат измерения, т. е. *метрологические характеристики СИ.* Однако с точки зрения построения систем ВЕПР в большинстве случаев этим можно пренебречь.

10. *Число квалификаций оператора* (наблюдателя, измерителя). Не располагая нормативными данными (если таковые имеются), считаем целесообразным выделить три класса операторов: для технических (массовых) измерений (III), для поверочных работ и инженерно-лабораторных измерений (II), для эталонных работ и высокоточных физических экспериментов (I). Поскольку речь идет о параметрах НСИ, то наиболее типичным является только третий класс операторов, таким образом

$$|I| \equiv |\{v_i\}| \leq 3. \quad (2.25.10)$$

11. *Число (номенклатурное) средств вычислительной техники*, используемой при измерении, в настоящее время оценить трудно. Общая номенклатура составляет ~ 100 , но одинакова для всех измерительных задач. С точки зрения построения системы ВЕПР на данном этапе эта оценка представляется малозначительной.

Также едва ли целесообразно оценивать *число пространственно-временных координат* (t_i, p_i) , в которых осуществляются измерения. Эти параметры становятся существенными при рассмотрении вопросов *функционирования* системы ВЕПР. Здесь важно, что $t_i \in T, p_i \in P$ (в НСИ).

Наконец, *число измерительных задач* (номенклатурное) в системе (2.16.1) будет определяться совокупностью оценок по всем вышеприведенным параметрам. При этом необходимо учесть, что значения оценок по некоторым параметрам оказываются взаимосвязанными (взаимообусловленными). Например, форма представления результата, погрешность измерения, квалификация оператора, объем используемой априорной информации и т. п. Поэтому реальную оценку даже номенклатуры измерительных задач дать очень трудно (по-видимому, десятки тысяч разновидностей только по одной измеряемой ФВ). Несомненно одно: даже частная НСИ как совокупность всех измерений по одной ФВ является весьма сложной, по крайней мере 10-мерной, системой с множествами значений по каждому компоненту 10-мерного векторного пространства.

9.3. Общие принципы и алгоритм построения систем ВЕПР

Ввиду огромного объема исходных данных и сложности общей структуры системы ВЕПР решение задачи построения этой системы в общем виде не представляется возможным. Следует также учесть, что большая часть исходных данных, как правило, либо вообще отсутствует, либо известна со значительной степенью неопределенности (неточности), что при многофакторности задачи может свести на нет затраченные на ее решение усилия.

Поэтому целесообразно выбрать принципы и приемы, позволяющие получить реальный эффект от предлагаемого здесь достаточно общего подхода.

Наиболее естественным является *принцип последовательного приближения*: вводятся последовательно некоторые допущения

(т. е. ограничения), которые упрощают задачу и уменьшают ее размерность.

Эффективным в данном случае должен быть также *метод ранжирования и градаций*: в системе выделяются отдельные блоки (подсистемы) либо классы (группы) задач, которые ранжируются как по степени общности, так и по алгоритмической последовательности, и дальше реализуется *принцип этапности решения*, т. е. определяется последовательность решения задачи «по частям».

Наконец, для такого рода задач полезно использовать «*челночный метод*» решения: многократное решение прямых и обратных задач, проверка решений по нескольким «разрезам».

С учетом этих принципов предлагается следующая схема решения задачи теоретического построения полной системы ВЕПР.

На первом этапе решается задача построения системы «снизу вверх». При этом система расчленяется на подсистемы, связанные с определенной ФВ φ , и решаются задачи для каждой отдельной подсистемы $\sum_{\text{ВЕПР}}(\varphi)$ — «задачи φ ».

В этих задачах важным является понятие «*цепь передачи*» размера единицы: цепь последовательных элементов системы (средств передачи размера S_n), связывающая исходное МСИ системы с какой-либо определенной группой (типом) РСИ (см. рис. 2.2). Полезным может оказаться здесь использование аппарата теории графов для формализации связей между соседними уровнями.

Алгоритм решения «задачи φ » состоит в следующем.

1) Исходные данные (п. 9.2) по заданной величине φ группируются в блоки и «привязываются» к типу РСИ — S_{p_i} . При этом предполагается, что номенклатура (типы) РСИ оптимизирована ранее по измерительным задачам.

2) Типы РСИ группируются и ранжируются по точности $S_p(\delta_1), S_p(\delta_2), \dots, S_p(\delta_m)$, причем

$$\delta_1 > \delta_2 > \dots > \delta_m. \quad (2.26)$$

Ранжирование РСИ именно по точности производится по двум причинам. Во-первых, потому что цель системы ВЕПР — максимальное приближение реального размера единиц РСИ к идеальному (по определению), что достигается прежде всего за счет точно-

сти измерений. Во-вторых, среди остальных параметров РСИ только диапазон измерений существенен для построения системы: вполне справедливо допустить, что влияние на точность РСИ других параметров (в первую очередь условий измерений) предусмотрено НД. Что касается диапазона измерений конкретного РСИ, то его ранжирование происходит «автоматически» при их ранжировании по точности. Это следует из самых общих соображений об информативной (или разрешающей) способности приборов: наиболее широкодиапазонные приборы оказываются и наименее точными.

3) Выбирается *самая длинная* цепь передачи. Как это ни кажется парадоксальным на первый взгляд, такую цепь можно определить априори, до построения системы: а именно, ею является цепь передачи, замыкающаяся на наименее точную группу РСИ — $S_p(\delta_1)$. Это очевидно прежде всего из того, что передача размера единицы более точным РСИ потребует меньшего числа ступеней передачи (уровней) при одинаковой для всех РСИ точности исходного МСИ. Более того, наименее точные РСИ составляют наиболее массовую группу РСИ данной ФВ, т. е. почти без исключений справедливо:

$$N_p(\delta_1) > N_p(\delta_2) > \dots > N(\delta_m), \quad (2.27)$$

где $N_p(\delta_i)$ — количество (парк) РСИ данной группы точности. Поэтому и с точки зрения производительности (пропускной способности) цепь передачи единицы к наименее точным РСИ должна быть самой длинной.

4) Производится *построение самой длинной цепи передачи* в первом приближении. Способ построения зависит от выбора (наличия) исходных данных и наоборот. В любом случае нужно знать парк РСИ — N_{p_i} . Возможны следующие варианты.

Вариант 4а. Задано:

– t_{i+1} — время поверки одного СИ на $(i + 1)$ -м уровне по МСИ i -го уровня;

– l_i — число СИ $(i + 1)$ -го уровня, которое может быть поверено по МСИ i -го уровня;

– q_{i+1} — доля СИ $(i + 1)$ -го уровня, признанных по результатам поверки негодными, восстановленных и снова поверенных после восстановления;

- T_{i+1} — межповерочный интервал (среднее время безотказной по метрологической надежности работы) СИ $(i + 1)$ -го уровня;
- τ_i — доля времени, в течение которого МСИ i -го уровня используется для проверки (в рамках заданного периода эксплуатации, т. е. в рамках T_i).

Число МСИ на i -м уровне, необходимых для проверки n_{i+1} СИ на $(i + 1)$ -м уровне, находится из условия непрерывности потока передачи единицы (или так называемого условия временной совместимости) и необходимости проверки всех n_{i+1} СИ за их межповерочный интервал:

$$T_{i+1} \tau_i n_i = \frac{t_{i+1} N_{i+1} (1 + q_{i+1})}{l_i}. \quad (2.28)$$

Зная $N_{p_i} = n_{m+1}$, находим сначала n_m , а затем рекуррентным способом — заселенности всех уровней (n_i) и число уровней m .

Вариант 4б. Задано:

- n_1 — число подчиненных МСИ 1-го уровня в данной цепочке, проверяемых по S_0 (исходному МСИ) за его межповерочный интервал T_0 ;
- σ_Σ — отношение погрешности исходного МСИ к погрешности РСИ;
- g_0 и g_p — коэффициенты Стьюдента для доверительных погрешностей исходного МСИ и РСИ;
- допустимые вероятности брака проверки (предпочтительнее, с точки зрения цели системы ВЕПР, по браку 2-го рода).

По методике МИ 83–76 [46] находим максимально возможное и минимально необходимое (при этих условиях) число уровней m . При этом в расчетах по [46] необходимо внести поправку, обратную коэффициенту заселенности уровня соответствующими подчиненными МСИ [58], т. к. в рассматриваемом случае линейной цепи передачи «бокковые» потоки отсутствуют — см. условие (2.28).

Вариант 4в. Задано:

- n_1 — число МСИ 1-го уровня;
- t_{m+1} — время проверки одного РСИ по МСИ низшего уровня m ;
- l_i — то же, что и в предыдущем варианте;
- h — отношение времени проверки одного МСИ на 2-м уровне по МСИ 1-го уровня ко времени проверки одного РСИ: $h = \frac{t_2}{t_m}$;

- τ_i — то же, что и в варианте 4а;
- $\mu = (1 + q_{i+1}) = 1,25$ — средняя оценка метрологически исправных (годных по результатам поверки) СИ на всех уровнях;
- предполагается также, что межповерочные интервалы для всех МСИ ниже 1-го уровня, а также для РСИ одинаковы и равны: $T_m = 1$ год, а $l_i = 1$.

Тогда по методике, изложенной в работе [87], находится максимальное число МСИ на каждом уровне и минимальное число уровней.

5) Выполняются аналогичные построения для остальных цепей, относящихся к поверке РСИ других групп точности. По полученным результатам строится уточненная *структура системы ВЕПР первого приближения*.

На втором этапе определяются номенклатура МСИ и методы передачи размера единиц на каждой ступени системы, удовлетворяющие следующим условиям:

а) «совместимости» метода передачи и типов МСИ на соседних уровнях, связанных данным методом m_{ij}^{kl} (см. рис. 2.2);

б) задачи, по которой выполнялось построение системы на предыдущем этапе (варианты 4а–4в).

Если какие-то условия удовлетворить не удастся при «имеющемся» наборе средств и методов, пригодных для МСИ, то вносятся соответствующие корректировки в условия задач 4а–4в и построение выполняется заново. Получается уточненная *структура и состав конкретной частной системы ВЕПР первого приближения*.

Аналогичная структура по первым двум этапам выполняется для всех других ФВ $\varphi_k \in \{\varphi_k\}$, измеряемых в рамках общей системы измерений — НСИ. В результате получаем *полную систему ВЕПР первого приближения*, удовлетворяющую целям этой системы в первом приближении.

Очередность выполнения *двух последующих этапов* построения системы ВЕПР может изменяться в зависимости от наличия соответствующих данных, конкретных целей дальнейшего уточнения или уровня общности рассмотрения, имеющихся ресурсов и т. п. На одном из этих этапов (например, *третьем*) проверяется «совместимость» различных частных систем с точки зрения общих свойств системы воспроизведения единиц — см. п. 10.1. На другом этапе возможно решение ряда оптимизационных задач по эко-

номическим критериям, учет параметров функционирования системы ВЕПР (или ее подсистем) и оптимизация по критерию эффективности функционирования системы.

На последнем, *пятом этапе* выявляются несоответствия (невязки) полученных решений отдельным условиям задач на всех предыдущих этапах, вводятся необходимые корректировки в исходные данные и определяются поправки в окончательное решение по первому приближению.

После этого получим оптимальную по составу и структуре полную систему ВЕПР, максимально соответствующую цели и качеству этой системы при имеющемся уровне знаний.

В следующем пункте рассмотрены некоторые проблемы функционирования систем ВЕПР и их оптимизации, а затем некоторые вопросы, связанные с системой воспроизведения размеров единиц и ее влиянием на построение полной системы ВЕПР.

9.4. Эффективность функционирования систем ВЕПР и их оптимизация

9.4.1. Эффективность систем ВЕПР

Введем общие понятия «эффективность» и «качество» систем. Эффективность системы (ϵ) в общем виде определяется отношением полученного от системы эффекта к затратам на ее создание:

$$\epsilon_{\Sigma} \equiv \mathcal{E} \text{ (эффект)} / C \text{ (затраты)}, \quad (2.29)$$

где эффект определим как степень достижения цели (\mathcal{C}) рассматриваемой системы

$$\mathcal{E} \equiv q\mathcal{C}. \quad (2.30)$$

Множитель q будем считать качеством системы, степенью ее соответствия достижению цели. Такая трактовка устраняет путаницу, которую постоянно допускают при использовании этих понятий (зачастую просто отождествляя их), и позволяет внести в них конкретное содержание. В самом деле, определение (2.29) является общепринятым и означает:

эффективность = эффект / затраты = что дает / что берет
(система по отношению к какой-то внешней системе).

Если ввести понятие проектная эффективность (ε_0), как:

$$\varepsilon_0 = \text{что должна дать} / \text{что берет}$$

(система по отношению к внешней), то тогда $\varepsilon = q\varepsilon_0$ и q (качество) приобретает смысл

$$q = \varepsilon / \varepsilon_0 = \text{что дает} / \text{что должна давать}$$

(система).

Таким образом, **качество** — это показатель внутренних свойств системы, определенных целью внешней системы, а **эффективность** — это показатель ее внешних свойств, обусловленных ее качеством.

Цель (Ц) системы обеспечения единства измерений была сформулирована ранее: выполнение для НСИ одновременно двух условий:

а) близости единиц у различных СИ данной физической величины в НСИ;

б) близости этих единиц к идеальной (по определению).

Формализуем эти условия на языке применяемого в этой работе подхода:

$$\text{а) } [\varphi]_{s_j} - [\varphi]_{s_i} \leq \sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2} \equiv \delta_{ij}; \quad (2.31a)$$

$$\text{б) } [\varphi]_{s_d} - [\varphi]_0 = \delta_d \ll \delta_{ij}. \quad (2.31б)$$

Условие (цель) (2.31а) достигается при изготовлении и поверке РСИ по непосредственным ОСИ (S_m в принятых в п. 9.3 обозначениях); это в основном задача приборостроения и СОЕИ в части, касающейся ведомственных метрологических служб.

Условие (2.31б) означает, что погрешность ОСИ S_m , по которым проверялись РСИ S_i и S_j , используемые при решениях задач z_i и z_j в условиях сопоставимости измерений (2.19), пренебрежимо мала относительно погрешностей S_i и S_j , но не меньше отличия размера единицы, реализованного в этом ОСИ, от идеального. Это и есть задача, которую решает частная система ВЕПР.

Итак, **общей целью частной системы ВЕПР** (для заданной ФВ φ в СОЕИ) является выполнение условия (2.31б) для лю-

бых измерительных задач, удовлетворяющих условию (2.19), или:

$$\text{Ц}(\Sigma_\varphi) : \frac{\delta(s_m)}{\sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2}} = \frac{[\varphi]_{s_m} - [\varphi]_0}{\sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2}} \ll 1$$

для любых $[i \neq j]$ в системе (2.16.1), удовлетворяющих условию:

$$\varphi^{\text{зн}}(z_i) - \varphi^{\text{зн}}(z_j) = \sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2} \quad \text{и} \quad \varphi(z_i) = \varphi(z_j). \quad (2.32)$$

Строго говоря, на это условие, так же как и на условие (2.19), касающееся СОЕИ, необходимо наложить *ограничения по проблемным ситуациям* обеспечения единства измерений, т. е. распространяемость (2.19) и (2.32) не на любую пару (z_i, z_j) , а главным образом на те пары задач, которые решаются в системах «поставщик — потребитель». Практически это оценить трудно, однако указанное ограничение играет еще и другую, более существенную роль — оно позволяет рассматривать только те пары измерительных задач, которые относятся преимущественно к *одному типу используемых РСИ* (и по диапазону, и по точности), что значительно сокращает размерность задач, связанных с определением эффективности системы ВЕПР (и СОЕИ), а точнее, приводит к разделению переменных и аддитивной форме сложения эффективности РСИ разных групп.

Здесь следует сделать еще одно замечание, касающееся эффекта от систем ВЕПР \rightarrow СОЕИ \rightarrow СМО \rightarrow НСИ. Поскольку РСИ используются для оценки качества изделий и у потребителя, и у изготовителя, и, как правило, допуски на соответствующие измеряемые параметры φ_k изделия в обоих случаях одинаковы ($\Delta_{\text{ди}} = \Delta_{\text{дп}} = \Delta_{\text{д}}$), важным становится не только соблюдение условия (2.19), но и *соотношение погрешностей РСИ у потребителя и изготовителя*. Если, например, $\delta_{\text{п}} > \delta_{\text{и}}$, то при $\Delta_{\text{д}} = \delta_{\text{п}}$ риск потребителя (связанный со снижением качества продукции в результате такого измерения) будет больше риска изготовителя (связанного с увеличением затрат на производство продукции), что создает ситуацию снижения качества продукции при выполнении производственных заданий плана. Наоборот, при $\Delta_{\text{д}} = \delta_{\text{и}} > \delta_{\text{п}}$ будет повышаться качество продукции у потребителя за счет повышения затрат у изгото-

вителя (невыполнение плана). Эти важные выводы приводят к следующим *практическим рекомендациям*:

1) потребителей и изготовителей целесообразно оснащать РСИ одинаковой точности ($\delta_{ин} = \delta_{jn}$);

2) при использовании РСИ у потребителей и изготовителей надо выбирать такое соотношение $\frac{\delta}{\Delta_d}$, чтобы вероятность брака по-

верки 1-го и 2-го рода были одинаковы: $p(\text{гн}) = p(\text{нг})$.

Качество q системы ВЕПР (φ) естественным образом можно определить коэффициентом увеличения запаса точности между РСИ (s_i и s_j) и ОСИ (s_m) в условии (2.32), т. е.

$$q(\Sigma_\varphi) = \frac{\sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2}}{\delta_m^{\text{нп}}} \cdot \frac{\delta_m}{\sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2}} = \frac{\delta_m}{\delta_m^{\text{нп}}}, \quad (2.33)$$

где δ_m — реально полученная в системе ВЕПР (φ) погрешность ОСИ, по которому непосредственно поверяется данная группа РСИ, характеризуемая $\delta_p = \sqrt{\delta_{ipr}^2 + \delta_{jpr}^2} = \delta_{pr}$ ($\delta_i = \delta_j$ с учетом полученных рекомендаций), а $\delta_m^{\text{нп}}$ — максимальное значение погрешности этих ОСИ, удовлетворяющее условию (2.32).

Таким образом, в выражении (2.29) для эффективности осталось не определенным только C — затраты на систему. Рассматривая систему ВЕПР как систему, *реально* обеспечивающую выполнение условия (2.32), *общие затраты* C_Σ на реализацию полной системы ВЕПР (2.12а) в таком понимании должны содержать: затраты C_1 на НИОКР по созданию ее элементов (МСИ и методов измерений), затраты C_2 на изготовление необходимого парка МСИ, затраты C_3 на их размещение, затраты C_3 на эксплуатацию элементов системы, транспортные затраты $C_{\text{тр}}$ на РСИ и затраты C_y на управление системой:

$$C_\Sigma = (C_1 + C_2 + C_3) \cdot E_n + C_3 + C_{\text{тр}} + C_y, \quad (2.34)$$

где E_n — нормативный коэффициент эффективности. (Здесь все затраты должны быть приведены к одинаковому временному интервалу: либо к T — полному времени функционирования НСИ

при неизменности ее показателей, либо к $T_{\text{мп}} \in T$ — межповерочному интервалу РСИ, либо к $T_e \in T$ — выбранной единице времени, обычно за год; тогда будем иметь приведенные затраты).

Затраты $(C_1 + C_2 + C_3)$ являются затратами на чисто научно-технические проблемы, а затраты $(C_3 + C_{\text{тр}} + C_y)$ — на решение и реализацию организационно-правовых проблем (включая в C_y разработку НД, касающихся СВЕПР и ее элементов, создание органов управления, системы метрологического контроля и надзора и т. п.).

Поскольку затраты второго вида относятся к элементам более общих систем — СОЕИ, СМО и СОКИ, здесь они рассматриваться не будут. Тогда затраты, относящиеся чисто к системе ВЕПР вида (2.12а), представляются в виде:

$$C(\text{ВЕПР}) = (C_1 + C_2) E_n + C_3 = C(\varphi). \quad (2.34a)$$

Тогда *эффективность системы ВЕПР* (φ) , удовлетворяющей цели (2.32), с учетом (2.33) и (2.34а) можно записать в виде:

$$\varepsilon_{\Sigma(\varphi)} \equiv \frac{\Xi(\varphi)}{C(\varphi)} = \frac{q(\varphi) \cdot \Pi(\varphi)}{C(\varphi)} = \frac{\delta_m}{\delta_m^{\text{нр}}}$$

при $\left(\delta_m^{\text{нр}} \leq \delta_p \frac{1}{C(\varphi)} \right) \geq \frac{\delta_m}{\delta_p [(C_1 + C_2) E_n + C_3]_{\varphi}}$ или

$$\varepsilon_{\Sigma(\varphi, t)} \geq \frac{\delta_m}{\delta_p [C_3(\varphi_k, t) + C_c(\varphi_n, t) E_n]} \quad (2.35)$$

для каждой группы РСИ заданной точности s_{p_i} ; $t \in (\overline{1, m})$; $C_c = C_1 + C_2$.

9.4.2. Оптимизационные задачи

Общая постановка любой задачи по оптимизации какой-либо системы Σ состоит в нахождении значения функционала

$$\varepsilon_{\Sigma} = F(x, u), \quad (2.36)$$

где x — неуправляемые параметры системы, а u — ее управляемые параметры, удовлетворяющие максимуму эффективности системы ε_{Σ} , т. е. нахождение $u_i(\text{max})$, соответствующих

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial u_i} = 0 \text{ и } u_{in} \leq u_{i(\max)} \leq u_{ib}, \quad (2.37)$$

где $i \in I$ — число управляемых параметров.

При этом возможны две постановки задачи:

1) максимизация функции эффективности при заданных ресурсных (и других) ограничениях, что соответствует нахождению максимума эффекта в (2.29);

2) минимизация затрат (ресурсов) при заданном эффекте (уровне целевой функции и качества системы).

В рассматриваемом случае задача оптимизации системы ВЕПР формулируется так: найти параметры u_i , от которых зависят показатели эффективности ε_Σ (ВЕПР):

$$\frac{\delta_m}{\delta_p} = f_\delta(u_i); C_\vartheta = f_\vartheta(u_i) \text{ и } C_c = f_c(u_i), \quad (2.38)$$

при которых эффективность системы достигает максимума

$$\varepsilon_\Sigma^0 = \frac{\delta_{(m)}}{\delta_p (C_\vartheta + C_c E_H)} \rightarrow \max_{u_i}. \quad (2.39)$$

При этом возможны ограничения на все показатели системы, в том числе вытекающие из построения ее структуры, описанные в п. 9.3:

$$u_{in} \leq u_{i(\max)} \leq u_{ib}, \quad C \equiv C_\vartheta + C_c E_H \leq C_{\max}. \quad (2.40)$$

Таким образом, определяющим является *выбор варьируемых (управляемых) параметров* рассматриваемой системы — выбор, зависящий и от уровня рассмотрения, и от поставленной при оптимизации конкретной задачи (выбор какого-то одного интересующего параметра u_i), и от интуиции исследователя, поскольку от того, насколько чувствительна эффективность системы от выбранного параметра, зависит эффективность самой оптимизации (окупаемость затрат на оптимизацию полученным от нее эффектом).

Здесь также возможны различные варианты постановки *оптимизационных задач*, в каждой из которых необходимо выбирать свой набор управляемых параметров, и которые следует решать в определенной последовательности. Сформулируем некоторые из них.

Задача 1. Нахождение оптимального соотношения точности между уровнями системы ВЕПР (φ) в одной цепи передачи размера единиц. В этом случае варьируемыми (управляемыми) параметрами являются показатели эффективности — $\frac{\delta_m}{\delta_p}$ и $\frac{\delta_i}{\delta_m}$. Стоимость создания и эксплуатации каждого элемента системы (МСИ) выражается как функция его точности. Как правило [38, 51, 64, 97], выбирают зависимость вида

$$C = \frac{C_0}{\delta_{\text{отн}}^\alpha}. \quad (2.41)$$

Коэффициенты α и C_0 определяются эмпирически из имеющихся данных о стоимости СИ (данной ФВ) различной точности. Обычно $1 \leq \alpha \leq 2$. Параметр C_0 различается для стоимости создания и стоимости эксплуатации МСИ, а также сильно зависит от вида измерений (измеряемой ФВ).

В простейшем случае задаются, т. е. заранее оцениваются по алгоритмам (см. п. 9.3) параметры m и n_i системы ВЕПР (φ), а также строится функционал эффективности

$$\varepsilon_{\Sigma(\varphi)}^0 = \frac{\delta_m}{\delta_p} \left(\sum_{i=0}^m \frac{n_i C_{0з}}{\delta_i^\alpha} + E_n \sum_{i=0}^m \frac{n_i C_{0с}}{\delta_i^\alpha} \right)^{-1} = \frac{\delta_m}{\delta_p} \left((C_{0з} + E_n C_{0с}) \sum_{i=0}^m \frac{n_i}{\delta_i^\alpha} \right)^{-1} \quad (2.42)$$

и находится его максимум при условии (ограничении), вытекающем из закона накопления погрешностей при передаче размера единицы:

$$\delta_p = \sqrt{\sum_{i=0}^m \delta_i^2}. \quad (2.42.1)$$

Далее задачу можно усложнять для случая всех цепей передачи.

Задача 2. Нахождение оптимальных параметров структуры системы ВЕПР (m и n_k) и погрешностей МСИ при заданных параметрах РСИ (N_p, T_p, δ_p), а также средства воспроизведения единицы ($n_0 = 1, T_0, \delta_0$) — исходного МСИ — (S_0).

В этом случае управляемыми параметрами являются m , n_k и δ_k ($k = 1, \dots, m-1$). При этом накладывается ограничение

$$\prod_{k=0}^{m-1} \frac{\delta_k}{\delta_{k+1}} \leq \frac{\delta_0}{\delta_p} \quad \text{и} \quad \delta_p = \sqrt{\delta_0^2 + \sum_{i=k+1}^m \delta_i^2} \quad (2.43)$$

и выбирается вид эмпирической зависимости, связывающей пропускную способность МСИ и их стоимость с точностью.

Задача 3. Нахождение оптимальных параметров структуры системы ВЕПР (m и n_k) и погрешностей МСИ с учетом вероятностей брака поверки как при передаче размера единицы в пределах системы, так и при поверке РСИ.

Задача аналогична предыдущей, но намного сложнее и требует дополнительных исходных данных:

- зависимость от точности стоимости создания и эксплуатации как годных, так и негодных МСИ;
- стоимость потерь от эксплуатации негодных РСИ;
- законы распределения погрешностей всех МСИ и РСИ (это — главная трудность).

Задача 4. Оптимизация параметров системы ВЕПР по структуре взаимосвязей между ее элементами (зависимость методов передачи размеров единицы от типа МСИ).

Задача может быть сформулирована на языке теории графов, но трудно реализуется практически.

Задачи указанных типов уже рассматривались ранее в литературе. Представляет особый интерес формулировка задачи оптимизации систем ВЕПР по *степени централизации воспроизведения единицы* (см. п. 10.1). Фактически задача сводится к нахождению такого значения n_0 (число МСИ на верхнем уровне системы ВЕПР), при котором соответствующий функционал (2.39) обращается в максимум. Для этого необходимо каким-то образом выразить n_0 через другие параметры системы. Например, это могут быть рекуррентные соотношения типа (2.28), к которым добавляется эмпирическая зависимость типа (2.41) одного из управляемых параметров ($\tau_i, T_i, t_{i+1}, q_{i+1}, l_i$) от погрешности соответствующего МСИ, учет вероятностей брака поверки и т. п.

Очевидно, что при $n_0 = 1$ имеем *полную централизацию* воспроизведения единицы, а при $n_0 \rightarrow N_p$ — *полную децентрализацию*.

Удобно в этой связи степень централизации характеризовать величиной, обратной n_0 :

$$\chi \equiv n_0^{-1}; 1 \geq \chi \geq N_p^{-1}. \quad (2.44)$$

Задача 5. Нахождение оптимальной степени централизации (χ) воспроизведения единицы в системе ВЕПР (ϕ) при варьировании остальных параметров системы:

$$n_i = n_{i+1} \frac{t_{i+1}}{T_{i+1}} \cdot \frac{(1 + q_{i+1})}{\tau_i l_i}, \quad i = (\overline{0, m});$$

$$0 \leq n_i - n_{i+1} \frac{t_{i+1}}{T_{i+1}} \cdot \frac{(1 + q_{i+1})}{\tau_i l_i} < 1;$$

$$\sigma_i = f_0(t_{i+1}, T_{i+1}, \tau_i, q_{i+1}, l_i);$$

$$p_i = f_p\left(\frac{\Delta_i}{\sigma_i}, \sigma_{i-1}\right), \quad \rho_i = f_p(\sigma_i);$$

$$C_{C_i} = f_C(\sigma_i), \quad C_{\sigma_i} = f_{\sigma}(\sigma_i);$$

$$\sigma_p = \sqrt{\sum_{i=0}^m \sigma_i^2}, \quad (2.45)$$

где σ — СКО передачи размера единицы, Δ — допустимая погрешность МСИ, p — вероятность брака проверки, ρ — распределение СКО данного МСИ; остальные обозначения введены ранее.

Решение в общем виде такой сложной задачи практически невозможно. Поэтому необходимо сделать некоторые допущения, основанные на ранее полученных, достаточно общих эмпирических соотношениях. Некоторыми из них могут быть:

1) выбор эмпирических зависимостей стоимости от погрешностей в виде (2.41) при $1 \leq \alpha \leq 2$;

2) ограничение интервала соотношения погрешностей соседних уровней значениями, полученными из уже решенных оптимизационных задач: $2 < (\delta_{i+1} / \delta_i) < 3,5$.

Уже было выяснено [58, 64, 69], что влияние погрешностей верхних элементов системы (ζ_0, ζ_1, \dots) будет тем меньше, чем большее число уровней их отделяет от РСИ. Следовательно, допустимы и целесообразны:

- уменьшение соотношения погрешностей передачи соседних разрядов при продвижении к верхним уровням;
- неучет влияния брака поверки на верхних уровнях на брак поверки на нижнем уровне и вероятность выявления негодных РСИ (при $m \gg 1$), и др.

Очевидно, что эти вопросы требуют дополнительных самостоятельных исследований.

Здесь важно подчеркнуть, что решение указанного типа задачи 5 в [51] (под n_0 там понималось число рабочих эталонов, но это не меняет сути дела) показало, что существует оптимальное соотношение между n_0 , m и ζ_i при $n_0 \neq 1$, т. е. при определенной степени децентрализации воспроизведения. Иначе говоря, децентрализация может быть обоснована экономически.

10. СИСТЕМА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

10.1 Основные свойства системы

Систему воспроизведения единиц (2.12.1) представим в виде:

$$\sum_b \{sb_{i_k}(\varphi_k), mb_{i_k}(\varphi_k)\}; k = 1, 2, \dots, |\Phi|; i_k = 1, 2, \dots, n_{0_k} \quad (2.46)$$

1. *Входными параметрами* (входами) системы являются:

- $\Phi = \{\varphi_k\}$ — множество определений ФВ, т. е. информация I_{a1} о свойствах каждой измеряемой в рамках НСИ физической величине;
- $[\Phi] = \{[\varphi_k]\}$ — множество определений единиц ФВ (априорная информация I_{a2});
- $\{\mu_i\}$ — информация I_{a3} о значениях фундаментальных физических констант и других констант веществ, материалов, явлений и процессов, используемых для воспроизведения единиц (априорная информация в рамках страны);
- $\{f(\varphi_i, \varphi_j)\}$ — информация I_{a4} о зависимостях между ФВ, участвующими в измерительной системе, реализующей воспроизведение единицы (для всех φ_k);

– информация I_{a5} по общим требованиям к измерительной системе, реализующей воспроизведение единицы (из основополагающих НД на исходные МСИ).

Выходными параметрами системы являются реальные размеры единиц, передаваемые подчиненным МСИ соответствующими методами передачи.

Таким образом, входами системы является *только априорная информация*, что соответствует понятию воспроизведения единицы, сформулированному ранее.

2. Из п. 9.4 следует, что уже с чисто экономической точки зрения возможны и целесообразны системы ВЕПР (φ), имеющие определенную степень *децентрализации воспроизведения единицы*, которые могут иметь несколько исходных МСИ с одинаковыми свойствами. Проанализируем, какие при этом возникают ограничения *метрологического* характера.

Уравнение воспроизведения единицы — см. (2.11):

$$\varphi^{\text{зн}}(z_{\text{эт}}) = n_{\varphi}(s_{\text{эт}}) \cdot [\varphi_r]_{\text{эт}} = n_{\varphi_r}(s_{\text{эт}}) \cdot n_{[\varphi]}(s_{\text{эт}}) \cdot [\varphi_0], \quad (2.47)$$

откуда следует, что размер единицы $\varphi_{\text{эт}}$, реализованный в исходном МСИ, отличается от «идеального размера» единицы $[\varphi_0]$, строго соответствующего ее определению, на

$$\Delta[\varphi]_{\text{эт}} = [\varphi]_0 - [\varphi]_k = \{1 - n_{[\varphi]}(s_{\text{эт}})\} \cdot [\varphi_0]. \quad (2.48)$$

Очевидно, что при наличии нескольких исходных МСИ, расположенных в разных местах, для них должно соблюдаться то же условие сопоставимости результатов измерений (2.19), что и для любых измерительных систем в НСИ, которое, как показано в конце п. 8.5, равносильно условиям (2.31а) и (2.31б). Однако в данном случае (для исходных МСИ) нет других МСИ, от которых можно было бы получить размер единицы. Поэтому остается только одно — строгое соблюдение условия корректности измерений (2.10), что требует:

а) достаточно большого объема качественной информации о зависимостях вида (2.9.1) – (2.9.7);

б) создания максимально идентичных условий в измерительных системах $z(S_{\text{э}i})$ и $z(S_{\text{э}j})$, реализующих «параллельное» воспроизведение единицы. Таким образом, принципиальных ограничений на наличие нескольких исходных МСИ (т. е. средств воспроизведе-

ния) данной ФВ не существует, причем эти исходные МСИ могут быть, в принципе, при любом числе уровней системы ВЕПР, вплоть до одного первого ($m = 1$). По-видимому, построение системы ВЕПР снизу вверх нужно вести до того уровня, когда различие в методах и средствах, знаниях и квалификации операторов (и т. п. компонентов) измерительных систем, находящихся в разных местах и условиях, можно сделать пренебрежимо малыми. Такое положение, как подсказала практика, имеется, например, в тахеометрии: по мере роста уровня оснащенности и квалификации метрологических лабораторий степень децентрализации должна будет увеличиваться и распространяться на другие виды измерений.

3. Возьмем за основу две очевидные аксиомы воспроизведения:

а) воспроизведение единицы в рамках НСИ требуется всегда, если только есть необходимость измерения соответствующей ФВ (т. к. для любого измерения нужна единица);

б) при любом измерении косвенным методом происходит воспроизведение единицы измеряемой величины φ , независимо от существования других средств измерений данной ФВ.

Вторая аксиома, в частности, говорит о том, что все производные единицы могут быть воспроизведены косвенным методом при помощи СИ других ФВ, от которых данная величина зависит (через которые определяется), т. е. с помощью так называемых заимствованных СИ. Если это СИ основных величин (см. п. 10.2), то для случая определения φ через три основные величины:

$$\varphi \equiv f(\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c), [\varphi] \equiv [\varphi_a]^\alpha, [\varphi_b]^\beta, [\varphi_c]^\gamma, \quad (2.49)$$

$$\varphi^{\text{ЭН}}(z_\varphi) \equiv f(n_{\varphi a}(s_a), n_{\varphi b}(s_b), n_{\varphi c}(s_c)) \cdot [\varphi_a]^\alpha [\varphi_b]^\beta [\varphi_c]^\gamma = n_\varphi [z_\varphi] \cdot [\varphi]. \quad (2.50)$$

Здесь важно отметить, что, хотя результат измерения при помощи заимствованных СИ и выражается через ее единицу, сама по себе совокупность этих заимствованных СИ (s_a, s_b, s_c) еще не имеет реального размера $[\varphi]$. Другое дело, если мы объединим эти СИ в одну установку (измерительную систему s_φ), которую *аттестовали именно по измеряемой величине* φ ; тогда эта аттестованная установка уже имеет аналог «показания прибора» по φ и реализует определенный размер $[\varphi]_s$. Из этого следует, что, если воспроизводить единицу косвенным методом можно, то *передавать ее размер*

косвенным методом принципиально нельзя. К сожалению, подобную ошибку содержат некоторые поверочные схемы, особенно в области теплофизических измерений (например, в ГОСТ 8.140–82, 8.026–96 и др.).

Таким образом, для случая *производных единиц* воспроизводить их можно либо аттестованными установками (исходными МСИ), собранными из заимствованных СИ определяющих (основных) величин, либо *исходным (эталонным) методом*, когда совокупность заимствованных СИ по φ не аттестована, но аттестован метод воспроизведения с использованием заимствованных СИ.

Для *основных единиц* обязательность наличия исходных МСИ в системе ВЕПР очевидна по двум причинам:

- из-за произвольности выбора размера их единиц («по соглашению»);
- из-за необходимости использования основных единиц при измерениях производных величин.

Дополнительное метрологическое требование, которое определяет необходимость введения МСИ на каком-то уровне системы ВЕПР (даже для производных единиц), связано с наличием среди РСИ парка СИ непосредственного оценивания φ (приборов), которые неизбежно требуют аттестации по φ , т. е. передачи им размера соответствующей единицы.

4. Поскольку исходное МСИ любой системы ВЕПР должно обеспечивать:

- а) воспроизведение единицы;
- б) ее хранение в интервале времени, превышающем межповерочные интервалы всех подчиненных МСИ (в идеале — в пределах функционирования всей СВЕПР);
- в) передачу размера единицы всем непосредственно подчиненным МСИ, то это определяет минимально *необходимый состав исходного МСИ*:
 - *генератор* (источник) физической величины, единица которой подлежит воспроизведению;
 - *аттестующее устройство* размера ФВ, которое, собственно, и устанавливает единицу $[\varphi]_{\text{эт}}$;
 - *компаратор* (компараторы), обеспечивающий передачу размера единицы всем непосредственно подчиненным МСИ.

В связи с тем что в исходных МСИ добиваются максимального постоянства условий (и других компонентов системы), а также максимального учета влияния внешних факторов, в состав ком-

плекса исходного МСИ вводят также вспомогательные устройства для указанных целей.

5. На практике исходное МСИ, даже соответствующее структурным требованиям системы ВЕПР, не всегда может обеспечить воспроизведение единицы и передачу ее размера с требуемой точностью всей номенклатуре РСИ данной ФВ, например по диапазону этой ФВ.

Тогда поступают двояко:

1) либо создают еще один (или несколько) тип исходного МСИ на требуемый диапазон φ ;

2) либо пытаются расширять диапазон по ступеням поверочной схемы сверху вниз (процесс масштабного преобразования). Последнее особенно характерно, когда исходное МСИ воспроизводит единицу в какой-нибудь одной точке шкалы значений φ .

В обоих случаях возникает одна проблемная ситуация: как сопоставить размер единицы для разных участков шкалы значений (размеров) ФВ? Условие сопоставимости размеров в виде (2.19) для этого случая не годится, т. к. здесь $\varphi_r(z_i) \neq \varphi_r(z_j)$. На практике используются различные приемы калибровки мер, обладающих свойством аддитивности. Не вдаваясь в технику этих приемов, попытаемся сформулировать условие сопоставимости результатов измерений для этого случая.

Используя (2.8), введем понятие «относительный результат измерений»:

$$\varphi_{\text{отн}}^{\text{зн}}(z_i) = \frac{\varphi^{\text{зн}}(z_i)}{n_{\varphi}(z_i)} = [\varphi_r]_{s_i} = n_{[\varphi_r]}(s_i) \cdot [\varphi]_0.$$

Тогда условие сопоставимости измерений для случая $\varphi_r(z_i) \neq \varphi_r(z_j)$ можно сформулировать следующим образом.

Для каждой измеряемой ФВ $\varphi \in \Phi$ в рассматриваемой общей системе измерений существуют такие наборы

$$U_i = U([\varphi]_i, m_i, s_i, v_i, w_i), U_j = U([\varphi]_j, m_j, s_j, v_j, w_j)$$

управляемых параметров системы (2.26), что при любых $j \neq i$ и $\varphi_r(z_i) \neq \varphi_r(z_j)$ можно обеспечить выполнение

$$\left| \varphi_{\text{отн}}^{\text{зн}}(z_j) - \varphi_{\text{отн}}^{\text{зн}}(z_i) \right| = \left| [\varphi_{rj}]_{s_j} - [\varphi_{ri}]_{s_i} \right| \leq \sqrt{\delta_{i_{\text{отн}}}^2 + \delta_{j_{\text{отн}}}^2} \cdot [\varphi]_0$$

или

$$\left| n_{[\varphi]}(z_j) - n_{[\varphi]}(z_i) \right| \leq \sqrt{\delta_{i_{\text{отн}}}^2 + \delta_{j_{\text{отн}}}^2}. \quad (2.51)$$

Введя обозначения $\Delta_{[\varphi]}(z_i) \equiv 1 - n_{[\varphi]}(z_i)$ и $\Delta_{[\varphi]}(z_j) \equiv 1 - n_{[\varphi]}(z_j)$, уравнение (2.51) можно записать в виде:

$$\left| \Delta_{[\varphi]}(z_i) - \Delta_{[\varphi]}(z_j) \right| \leq \sqrt{\delta_{i_{\text{отн}}}^2 + \delta_{j_{\text{отн}}}^2}. \quad (2.51a)$$

Это означает, что разница отклонений размеров единиц, реализованных в измерительных системах I_{z_i} и I_{z_j} , от идеального размера $[\varphi_0]$ не должна превышать средней квадратической суммы заданных относительных погрешностей измерений в этих системах.

Условие (2.51a) справедливо не только для всех средств измерений НСИ, но и для исходных и подчиненных МСИ.

Таковы принципиальные требования физико-метрологического характера к воспроизведению единиц; все остальные связаны с конкретными технико-экономическими аргументами, часть из которых была изложена в п. 9.4.

10.2. О выборе основных величин и основных единиц

Вопрос о построении систем единиц (СЕ) в метрологической теории и практике обсуждался давно, долго и обстоятельно (см., например, [34, 44, 71, 80, 93]). Гораздо реже встречается в метрологической литературе понятие «система физических величин» (СФВ); некоторые авторы даже отрицают целесообразность введения и рассмотрения такой системы. Здесь, в связи с проблемами построения системы ВЕПР и изучением свойств системы воспроизведения единиц, остановимся только на отдельных общих вопросах, касающихся взаимосвязи этих систем (величин и единиц).

1. Хотя и ФВ, и их единицы могут вводиться произвольно и *принципиально произвольно* может быть построена система ФВ (и соответствующая ей система единиц), это справедливо в маловероятной ситуации, когда кто-то вздумал бы по-новому, полностью отбросив весь накопленный человечеством запас знаний, описывать окружающий нас материальный мир. На самом деле

физическое (естественнонаучное) мировоззрение, являясь отражением свойств объективной реальности, выбрало для себя и столетиями апробировало *вполне определенную* систему представлений об этой реальности, в основе которых лежат понятия и величины, отражающие наиболее общие и устойчивые свойства окружающей действительности.

Наиболее общее представление заключается в следующем: материя существует во времени и пространстве, форма ее существования — движение. Основные величины должны неизбежно отражать эти фундаментальные атрибуты материи. Со свойствами пространства и времени связаны основные законы сохранения (энергии, импульса, момента количества движения). Для характеристики положения материальных объектов в пространственно-временном континууме вводят величины: *время, длина и угол*.

Что касается длины и времени, то отнесение их к категории основных величин СФВ не вызывало и не вызывает ни у кого сомнений. Это же относится и к их единицам.

К сожалению, до сих пор нет единого мнения относительно статуса плоского угла и его единицы. Это нашло отражение и в международной системе СИ, где для угловых единиц была в свое время введена особая (и не очень понятная) категория дополнительных единиц. Для единицы плоского угла сложилась абсурдная ситуация: с одной стороны, это безразмерная единица, с другой — она имеет свое наименование, т. е. проявляет свойства именованного числа. Большинство авторов продолжают считать плоский угол производной величиной. Однако даже с физической точки зрения все возможные пространственные соотношения нельзя описать одной длиной: нельзя представить реальную, а не формальную комбинацию линейных величин, заменяющую угол; вращательные движения не сводятся к поступательным и т. д. Обстоятельный разбор статуса плоского угла и его единицы дан в работах [52, 99], результаты которых, в целом, тоже свидетельствуют в пользу признания его основной величиной СФВ. Будем считать, что пространственно-временные свойства материального мира потребовали введения трех основных (независимых) величин:

L — длина, T — время, Φ — угол (плоский).

2. Следующий, не менее общий атрибут материи — движение. Оно доступно нашему восприятию через взаимодействие, мерой

которого служит *энергия* E — одно из основных общих понятий физического мировоззрения.

Набором величин (L, T, Φ, E) как основными (исходными) понятиями для описания окружающего нас мира, вероятно, можно было бы и ограничиться, если бы не многообразие форм проявления энергии (механическая, электромагнитная, тепловая, ядерная и т. п.), которые, хотя и относятся к *одному родовому* понятию, настолько специфичны, что зачастую не сводимы или трудно сводимы друг к другу: неточность соответствующих эквивалентов заставляет в каждой специфической области проявления энергии и соответствующего вида взаимодействия вводить специфическую величину, характеризующую соответствующий вид взаимодействия и круг явлений, связанных с энергией.

В механике, где определяющим является *гравитационное* взаимодействие, это — *масса* тела (объекта) (m). Здесь мы не останавливаемся на тонкостях в различии гравитационной и инерционной масс, тем более что общая теория относительности показывает (постулирует) их эквивалентность.

В электродинамике основной вид взаимодействия — *электромагнитное*. Основным источником электромагнитного поля служит электрический *заряд* q , и основной величиной следует выбирать либо заряд, либо скорость его изменения во времени — *электрический ток* (I).

В термодинамике характерны взаимодействия статистического характера, связанные с обменом энергией между макросистемами. Степень изменения энергии макросистем в процессах теплообмена характеризует *температура* (Θ), которую также выбирают в качестве основной величины.

Оптические явления — это разновидность электромагнитных взаимодействий. Поэтому вводить здесь самостоятельную основную величину не имеет смысла. Существование в СИ единицы силы света (канделы) в качестве основной единицы обусловлено не столько объективной необходимостью, связанной со спецификой явлений в оптике, сколько с необходимостью измерять некоторые световые характеристики (в видимой области оптического спектра), связанные с субъективными восприятиями световых полей глазом. Это, по сути дела, внесистемные величины и единицы.

Наиболее сложными для понимания на сегодняшний день являются энергетические взаимодействия в области ядерных явле-

ний (слабое и сильное), особенно - сильные взаимодействия, которые сейчас трудно охарактеризовать одной из ФВ. Для слабых взаимодействий можно в качестве основной характеристики выбрать *активность* радионуклидов, характеризующую скорость радиоактивного распада (результат слабого взаимодействия).

В области физикохимии основной величиной считается количество вещества и ее единица — моль. Однако их роль в СФВ настолько неопределенна и дискуссионна, что большое число специалистов сегодня склонны вывести их из разряда основных.

Заметим, что моль, по его теперешнему определению, — это просто масштабный коэффициент, связывающий единицу макромассы (килограмм) с единицей атомной (микро) массы.

Таким образом, в свете сегодняшнего физического мировоззрения в качестве основных величин СФВ можно принять: L (длина), Φ (угол), T (время), M (масса), I (электрический ток), Θ (температура), A (активность радионуклида).

3. Можно показать, что понятие размерности относится как к единицам, так и к самим величинам. Размерность служит как бы качественной характеристикой ФВ, определяет ее род. В этой связи важны два аспекта.

Во-первых, устранение из системы основных величин (или их необоснованное уменьшение) приводит к тому, что разнородные величины приобретают одинаковые размерности, чего нельзя допускать в точной науке. Так происходит сегодня при исключении из основных величин плоского угла, что еще раз свидетельствует о его статусе основной величины и единицы.

Во-вторых, поскольку величина и ее единица — однородные понятия и должны выражаться одним видом именованного числа, в системе СФВ \leftrightarrow СЕ нельзя допускать неоднозначной связи между ФВ и ее единицей. Вместе с тем, именно так происходит со многими величинами скорости (вращения, расхода) и счетными, когда величины совершенно разной физической природы выражаются одинаковыми единицами. На это неоднократно обращалось внимание ранее, например в [20].

4. Практика осуществления эталонов воспроизведения основных единиц показывает, что зачастую в качестве основной единицы выступает совершенно не та, что принята в СЕ по соглашению. Это можно принять, как правило, со следующим объяснением. Основные величины выбираются на основе целесообразности, про-

стоты и общности описания материального мира, тогда как основные единицы — из практических соображений, и прежде всего из требования достижения наивысшей точности, т. е. по несколько разным критериям. В то же время переходы от воспроизведения основных единиц по соглашениям к наиболее точным единицам другого рода осуществляются всегда на основе их тесной взаимосвязи через фундаментальные физические константы (ФФК) (ср.: Ампер, Вольт, Ом и μ ; длина, частота и C_0). При этом *сохраняется число* основных единиц (базовых в данной области). Поэтому целесообразно сформулировать правило: **число основных единиц должно равняться числу основных величин системы; число основных единиц по соглашению должно равняться числу воспроизводимых базовых единиц реальной системы ВЕПР.**

10.3. Система воспроизведения единиц в области измерений параметров ионизирующих излучений

Система воспроизведения единиц в области измерений параметров ионизирующих излучений (ИПИИ) охватывает широко применяемые в науке и практике измерения активности радиоактивных нуклидов, дозиметрию фотонного, бета- и нейтронного излучений, измерения параметров полей и источников электронного, фотонного и нейтронного излучений. Система ВЕПР в области ИПИИ базируется на семи государственных первичных и семи государственных специальных эталонах. Обычно эталон состоит из нескольких установок, каждая из которых воспроизводит размер одной и той же единицы, но в различных диапазонах энергий частиц или фотонов или для различных видов излучения и т. п.

Анализ существующей системы эталонов выявляет ряд существенных недостатков, обусловленных отсутствием единого подхода при формировании системы ВЕПР в такой сложной области, характеризующейся многообразием видов излучений (и соответствующих источников излучений), а также условий их измерений [энергетические диапазоны, среда, специфика излучений (тормозное, импульсное и т. п.)]. Так, функционирует одна система ВЕПР для измерения активностей для различных видов излучений и различные системы для дозиметрии (фотонного, бета- и нейтронного излучений).

Специальный эталон единицы плотности потока нейтронов имеет меньшую погрешность, чем первичный эталон той же единицы (по крайней мере, на границе диапазона воспроизведения).

Для воспроизведения единицы объемной активности функционирует только государственный специальный эталон; есть ряд и других примеров.

Системный подход к построению системы воспроизведения единиц в данной области измерений должен быть основан на общих физических представлениях об ионизирующем излучении как о поле и его источниках и выборе исходных (базисных) величин, через которые могут быть выражены остальные величины (полнота описания системы, взаимосвязь элементов, иерархическая зависимость). Попытка такого рода была предпринята в 1974 г. В.В. Скотниковым и др. [73]. Попытаемся систематизировать и развить идеи этой работы в свете современных представлений.

Прежде всего, следует уточнить физические объекты и явления, участвующие в процессе измерения в этой области:

- собственно «ионизирующее излучение», т. е. все типы излучений, связанные с радиоактивным распадом ядер (α -, β -, γ - и конверсионное излучение) или с ядерными реакциями (потоки заряженных и нейтральных элементарных частиц и фотонов), а также рентгеновское и тормозное (т. е. жесткое электромагнитное) излучение, обусловленное взаимодействием указанных типов излучений с атомными системами;

- источники этого излучения (главным образом источники радиоактивного излучения);

- среда (вещества), с которой взаимодействует излучение;

- явления, происходящие в этой среде в результате прохождения через нее излучения.

Под ионизирующим излучением (ИИ), строго говоря, надо понимать всякое электромагнитное или корпускулярное излучение, способное заметным образом производить ионизацию атомов среды, через которую оно проходит (слова «заметным образом» здесь означают, что явление ионизации является одним из основных при прохождении данного излучения через среду). Поскольку ионизация требует затраты определенной энергии на преодоление сил притяжения электронов в атомах (или молекулах), можно иначе сказать, что ионизирующее излучение — это электромагнитное или корпускулярное излучение, для которого ионизационные потери энергии являются основными при прохождении этого излу-

чения через вещество. На самом деле, эта область в настоящее время включает в себя измерения параметров нейтронных потоков — нейтрального (в смысле заряда) излучения, ионизирующее действие которого ничтожно по сравнению с другими видами его взаимодействий (разного рода ядерных реакций). Кроме того, измерения ионизирующих излучений охватывают не только измерения параметров самого ионизирующего излучения, но и измерения параметров источников этого излучения, а также параметров среды, с которой взаимодействует излучение, и явлений, вызываемых этим излучением в среде.

В более широком плане, по-видимому, необходимо выделить область «ядерных измерений», охватывающую всю специфическую область измерений в ядерной физике и ядерной технике (включая ее прикладные области).

Обобщенное поле излучения определим [73] как состояние в пространстве, физические свойства которого в данной точке и в данный момент времени обусловлены наличием в этой точке частиц или квантов. Поле определенного вида частиц в данной точке и в данный момент времени характеризуется распределениями по значениям импульсов и энергии. Следовательно, основная характеристика поля излучения должны быть величиной дифференциальной по всем свойствам обобщенного поля. Такой наиболее полной и универсальной (как с точки зрения теории, так и с точки зрения практики) характеристикой полей и источников ИИ является спектральная характеристика излучения или (в широком смысле) спектр излучения.

При заданной (выбранной) системе пространственно-временных координат спектр излучения в самом общем виде описывается зависимостью вида:

$$S = \sum_i n_i(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}) = f(\vec{r}, t, E, \vec{\Omega}, i), \quad (2.52)$$

где n_i — число частиц данного сорта i (излучения) в точке с координатами \vec{r} , имеющих энергию E и движущихся в направлении $\vec{\Omega}$ (единичный угловой вектор) в момент времени t . Физическая величина n , соответствующая зависимости (2.52) при фиксированных значениях аргументов, имеет смысл дифференциальной (пространственно-временной, энергетически-угловой) плотности излучения.

Знание этой величины в интересующих точках пространства позволяет получить (в большинстве случаев простым математическим интегрированием) практически все интересующие, с точки зрения измерений, величины и параметры полей и источников ионизирующих излучений.

1) *Дифференциальная плотность потока* излучения φ (число частиц в точке с координатами \vec{r} , имеющих энергию E , движущихся в направлении $\vec{\Omega}$ и пересекающих за 1 с в момент времени t плоскую поверхность площадью 1 см², перпендикулярную вектору $\vec{\Omega}$):

$$\varphi_i(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = n_i(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \cdot U_i, \quad (2.53)$$

где U — скорость движения частиц при тех же условиях.

2) *Дифференциальный поток* излучения через поверхность ΔS :

$$P_i(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = \int_{s=0}^{s+\Delta s} \varphi_i(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dS. \quad (2.54)$$

3) *Дифференциальная интенсивность* (плотность потока энергии) излучения:

$$I_i(\vec{r}, \vec{\Omega}, t) = \int_{E=0}^{\infty} \varphi_i(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) E dE. \quad (2.55)$$

4) *Дифференциальная поглощенная доза* излучения для данного вещества (B), характеризующегося зависимостью $\sigma_i(E_i)$ сечения поглощения излучения типа i от энергии:

$$D(\vec{r}, b) = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm};$$

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\int_t \sum_i \frac{\int_{E, \Omega} \varphi_i(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) E dE d\Omega}{\int_{E, \Omega} \varphi_i(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dE d\Omega}}{\int_t \sum_i \frac{\int_{\Omega=0}^{4\pi} I_i(\vec{r}, \vec{\Omega}, t) d\Omega}{\varphi_i(\vec{r}, t)}}. \quad (2.56)$$

5) *Активность радионуклидов:*

$$A(t) = \frac{dN}{dt} = \frac{1}{\Pi_i, E_0} \int_{\Omega=0}^{4\pi} P_i(\vec{r}_0, E, \vec{\Omega}, t) d\Omega \Bigg|_{\substack{t_0=0 \\ E=E_0}}, \quad (2.57)$$

где Π_i, E_0 — доля данного вида (i) излучения с фиксированной энергией E_0 в одном акте распада.

6) *Выход источника* по излучению i :

$$W_i(t) = 4\pi r^2 \int_{E=0}^{\infty} \int_{\Omega=0}^{4\pi} \varphi_i(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) dE d\Omega, \quad (2.58)$$

и т. д.

Указанные выше соотношения выражают идеализированную (безотносительно к конкретным реальным условиям) связь между соответствующими величинами, вытекающую из их определений.

В каждом реальном случае необходимо учитывать конкретные условия получения информации о входящих в эти уравнения параметрах и величинах и использовать в ряде случаев дополнительные закономерности и параметры.

Такие задачи возникают при создании конкретной измерительной установки (или метода), однако об указанных связях и соподчиненности между различными величинами нельзя забывать, поскольку они являются принципиальными (это следует из определений физических величин).

Следует заметить, что в указанные соотношения в ряде случаев входят параметры (сечение реакций, средняя энергия ионообразования, параметры схемы распада), которые являются продуктом научного эксперимента, и, следовательно, здесь четко проявляется важность получения достоверных справочных данных в области ядерной физики.

Итак, в рамках рассматриваемой системы в качестве исходных физических величин можно принять величины, служащие аргументами в исходной спектральной зависимости (2.52):

$$n, \vec{r}, t, E, \vec{\Omega}. \quad (2.59)$$

С точки зрения точности измерений проблематичными являются только две специфические для данной области измерений вели-

чины — n (число частиц) и E (энергия частиц), т. к. \vec{r} , t и $\vec{\Omega}$, являющиеся пространственно-временными характеристиками, во всех реальных случаях измерений в области ионизирующих излучений выступают как классические (а не квантово-механические) величины, и, следовательно, их измерения относятся к классической области измерений.

Проблема измерения (число единиц или фотонов) сводится, по сути дела, к проблеме определения *эффективности* детекторов излучений и регистрирующей системы. Заметим сразу, что вторая часть этой проблемы является общей для всех видов излучений и зависит главным образом от n . Зато первая часть (детекторная) сильно зависит как от сорта (вида) излучения (i), так и от его энергетического диапазона.

Однако решение этой главной проблемы — определение *эффективности* (чувствительности) детекторов к разным видам излучений — представляется возможным осуществить единым путем, а именно путем использования аттестованных по активности источников излучения:

$$\varepsilon_i = \frac{(n_i)_{\text{дет}}}{t(A_i)_{\text{ист}} \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi}}, \quad (2.60)$$

где ε_i — эффективность детектора к излучению i ; $(n_i)_{\text{дет}}$ — скорость счета частиц i в детекторе; $(A_i)_{\text{ист}}$ — аттестованная активность источника по излучению i ; $\Delta\Omega$ — коллимационный телесный угол.

Измеряемыми величинами при этом являются только телесный угол и скорость счета в детекторе (такая, какая она есть, т. е. не совпадающая с истинной скоростью счета в данном месте поля излучения).

Возможным, в перспективе, путем определения активности источников явится измерение активности через постоянные распада и массу радиоактивного источника.

Активность радионуклида однозначно связана с его постоянной распада (λ) и количеством атомов (N) радионуклида в источнике (препарате) в виде:

$$A = \lambda \cdot N, \quad (2.61)$$

где $\lambda = \frac{\ln 2}{T \frac{1}{2}}$ — константа распада, характеризующая данный ра-

дионуклид и определяемая ядерной структурой изотопа. Она может быть определена с весьма высокой точностью: $\approx 10^{-4}$ [102] для некоторых изотопов с удобным периодом полураспада $T \cdot 1/2$ путем относительных измерений числа вылетающих частиц через определенные промежутки времени.

Гораздо более проблематичным является определение N — числа атомов радионуклида в источнике. Однако, учитывая успехи последних лет в приготовлении чистых веществ (в том числе и в радиохимии, и в масс-спектрометрии), в исследовании их спектрального состава, в определении числа Авогадро и др., можно считать эту проблему в перспективе решаемой.

Задача сводится к получению достаточно чистого образца моноизотопа (с примесями $\leq 0,01\%$), его взвешиванию (между прочим, даже среди существующих эталонов в области ИИ эталон массы радия имеет лучшую точность воспроизведения и хранения: $\approx 0,1\%$), пересчету массы в число атомов с помощью числа Авогадро (N_0) и атомов массы изотопа (M):

$$N = \frac{mN_0}{M}. \quad (2.62)$$

Если удастся приготовить образец (источник) хоть какого-нибудь изотопа с удобным $T \cdot 1/2$ и измерить в нем N с погрешностью $\leq 0,1\%$, то с такой же погрешностью можно будет определить его активность и, следовательно, эффективность детекторов для некоторых видов излучений.

Надо отметить, что как в существующем методе определения активности A , так и в предлагаемом методе нахождения эффективности детекторов необходимым элементом априорных знаний является достаточно точное знание схемы распада радионуклида, т. е. знание каналов распада, соотношения их интенсивностей, энергий излучения в каждом канале и других элементов схемы распада.

Иначе говоря, определяющим фактором развития этой области измерений при любой постановке вопроса является опережающее

развитие ядерно-спектроскопических методов и средств измерений (по крайней мере, это касается ядерной спектроскопии при относительных измерениях).

Проблема измерения другой специфической для ядерной физики величины — энергии E_i — до сих пор решалась главным образом «внутри» самой ядерной спектроскопии преимущественно методом относительных измерений. Лишь в немногочисленных работах, выполненных за рубежом, изредка делались попытки увязать используемые в ядерной спектроскопии меры энергии излучений (главным образом фотонного) с мерами длины в области рентгеновского спектра (которая до последнего времени не была связана с областью оптического излучения) или с аннигиляционной массой (т. е. с такой фундаментальной константой, как масса покоя электрона \overline{m}_e и скорость света \overline{c}).

Между тем известно, что не так давно созданный оптико-рентгеновский интерферометр [98] позволяет связывать энергетические шкалы оптического и рентгеновского диапазона электромагнитного излучения, а уже давно существующие высокопрецизионные кристалл-дифракционные спектрометры позволяют связывать шкалы рентгеновского и γ -излучения с точностью $\approx 10^6$.

Таким образом, реальной становится возможность задания размера единицы энергии ядерного моноэнергетического излучения через размер одной из основных единиц механических величин — метра, воспроизводимого по длине волны оптического излучения. При этом энергетические реперы в области рентгеновского (или гамма-) излучения становятся первичными по отношению к энергетическим реперам в других видах ядерных излучений, т. к. последние, если и определяются абсолютными методами, то с гораздо худшей точностью, чем та, что ожидается для электромагнитного излучения.

Среди заряженных частиц только электроны (\bar{e}) имеют сравнимые с фотонами по точности методы измерения энергий.

При этом для них возможны три пути:

1) определение энергий конверсионных линий по E_γ и энергиям связи электронов в атоме (т. е. опять же по рентгеновским данным):

$$E_e = E_\gamma - E_{св};$$

2) измерение энергий электронов по разности потенциалов:

$$\Delta E = e \cdot \Delta V;$$

3) измерение энергий конверсионных линий в однородном магнитном поле:

$$E = f(H\rho),$$

где H — величина магнитного поля; ρ — радиус кривизны.

Два последних метода могут служить для контроля первого метода (дополнительное согласование единиц измерений в различных областях).

Что касается других видов ядерных излучений (протонов, нейтронов и др.), то требования практики к точности измерения их энергий гораздо менее жесткие, а методы «замыкаются» на знание энергий либо фотонного, либо электронного излучений.

Рассмотренная выше система ФВ в области ионизирующих (точнее, ядерных) излучений, а также анализ этой системы с точки зрения измерений (прежде всего прецизионных) позволяют предложить подход к формированию соответствующей системы взаимосвязанных эталонов в рассматриваемой области измерений. В соответствии с этой системой базовыми эталонами в рассматриваемой области должны быть первичные эталоны единиц активности и энергии ядерного излучения. На основе этих эталонов возможно создание эталона исходной дифференциальной характеристики полей и источников ядерных излучений — плотности излучения.

Заключение

1. Проведенные исследования по классификации систем воспроизведения единиц ФВ и передачи их размеров (часть I) показали необходимость естественного углубления и уточнения сущности целого ряда основополагающих понятий метрологии, связанных с воспроизведением единиц измерений и передачей их размеров. Поэтому довольно большая часть работы посвящена анализу этих понятий. Основные результаты исследований таковы.

Введено понятие *«метрологическая система»*, и путем анализа сущности измерений как простейшей метрологической системы выявлены элементарные метрологические множества, на основе которых можно строить метрологические системы более сложного порядка.

Исходя из анализа сущности практической метрологии, построена иерархия *«собственно метрологических систем»* по линии системы ВЕПР. Выявлены и формализованы отличительные признаки собственно метрологических систем в этой иерархии, в частности сформулированы условия корректности (достижения требуемой точности) и условия сопоставимости измерений, определяющие целевую функцию «системы обеспечения качества измерений» и ее важнейшей составляющей — «системы обеспечения единства измерений».

На основе анализа сущности измерений как процесса нахождения значения ФВ (в частности, основываясь на постулатах о соотношениях априорной и апостериорной информации), выявлено содержание и заново сформулированы понятия *«воспроизведение»*, *«хранение»* и *«передача»* размера единицы ФВ. Тем самым, определено место системы ВЕПР в системе обеспечения единства измерений как системы, обеспечивающей сравнение размеров единиц, реализованных в каждом конкретном СИ в виде априорной измерительной информации.

Введены понятия *«полная система ВЕПР»*, *«частная система ВЕПР»* и проанализирована структура частной системы ВЕПР. Показана целесообразность введения обобщенного понятия для неформальных элементов системы ВЕПР — «метрологическое

средство измерений». Формальную часть системы ВЕПР составляют методы передачи размера единицы.

Исходя из иерархической структуры системы ВЕПР, в метрологических СИ выделены три класса: *исходные МСИ*, *подчиненные МСИ* и *вспомогательные МСИ*, каждый из которых несет свою специфическую смысловую нагрузку (метрологическую функцию).

С этих позиций проанализированы узаконенные в настоящее время категории (разновидности) исходных, подчиненных и вспомогательных МСИ.

С точки зрения *межвидовой классификации* (частных) систем ВЕПР (безотносительно к виду измерений) проанализированы действующие в настоящее время средства и методы воспроизведения единиц ФВ и передачи их размеров по нескольким классификационным признакам (степень централизации воспроизведения единицы, способ воспроизведения — во времени и по отношению к процессу передачи, а также некоторым другим).

Классификация *по степени централизации воспроизведения* единицы позволила выявить четыре типа систем ВЕПР: с полной (ПЦ), кратной (КЦ) и локальной (ЛЦ) централизацией в ГСИ, а также с полной децентрализацией (ДЦ). Показано, что только 27 из действующих государственных поверочных схем с государственными эталонами во главе можно отнести к системам типа ПЦ, остальные представляют собой различные комбинации систем разных типов.

Классификация *по способу воспроизведения во времени* выявила два типа исходных МСИ (с непрерывным и дискретным способом воспроизведения). При этом показана необходимость ввести дополнительную метрологическую характеристику исходных МСИ (в частности, государственных эталонов) — воспроизводимость.

Классификация *по отношению процесса воспроизведения единицы к процессу передачи ее размера* выявила две группы исходных МСИ, одна из которых воспроизводит единицу только в момент передачи (не содержит источника ФВ) и, строго говоря, должна иметь отличное от государственного эталона наименование (например, ПУВТ).

Рассмотрены некоторые вопросы *видовой классификации* систем ВЕПР (по отношению к конкретным ФВ), в том числе общая номенклатура измеряемых ФВ, проблема однородности ФВ с точки зрения систем ВЕПР, проблема физических постоянных для

систем ВЕПР и вопрос о системах ВЕПР для безразмерных величин (коэффициентов).

При этом, в частности:

– показано, что установить полную номенклатуру ФВ достаточно трудно и необходим дальнейший анализ и углубление понятия «физическая величина»;

– продемонстрирована иерархичность системы ФВ, в том числе физических постоянных;

– уточнена роль физических констант при воспроизведении единиц ФВ в зависимости от того, однородна ли (или нет) константа с данной ФВ, в связи с чем уточнена роль ГСССД;

– выявлено, что уже существует около 15 систем ВЕПР для физических постоянных; проанализирован возможный тип таких систем;

– доказано, что существование систем ВЕПР (тем более типа ПЦ) для безразмерных величин (коэффициентов) выглядит мало обоснованным.

Рассмотрен вопрос о *техничко-экономической эффективности* систем ВЕПР.

Введено понятие «*метрологический эффект*», с помощью которого проанализирована относительная эффективность систем ВЕПР разного типа. Сформулированы общие *необходимые и достаточные условия* создания централизованных систем ВЕПР того или иного типа.

Проведенные исследования по **разработке физико-метрологических основ построения систем воспроизведения единиц ФВ и передачи их размеров (часть II)** выявили необходимость использования системного подхода к рассматриваемой проблеме, показали возможность и эффективность применения теоретико-множественного аппарата для описания различного рода метрологических систем и необходимость включения в рассмотрение широкого комплекса взаимосвязанных вопросов.

Основные результаты исследований следующие.

Проведен *анализ литературы* по исследуемым вопросам и определены основные направления исследований в рамках долгосрочной Программы фундаментальных исследований по метрологии.

Определена *система основных исходных понятий* теории описания и построения системы ВЕПР (род и размер ФВ, измерительная задача, измерительная система, метод измерения, воспроизведе-

дение единицы, передача размера единицы, метрологические средства измерений, метрологическая система и др.).

Рассмотрено *описание измерения* как простейшей метрологической системы (2.4) и как процесса решения измерительной задачи.

Как *система* измерение содержит определенный набор управляемых и неуправляемых (задаваемых) элементов.

Как *процесс* измерение состоит из трех этапов последовательного преобразования формального и неформального типов.

При этом ярко проявилась роль априорной информации при измерениях. Показана общая зависимость результата измерения от всех его компонентов, проанализированы наиболее существенные связи между ними и выведено общее *уравнение корректности измерения* (2.10).

Показано, что формализованное описание отдельного измерения позволяет успешно переходить к формализованному описанию различных метрологических систем. Введены и конкретизированы понятия «*общая система измерений*» и, как частное, «*Национальная система измерений*», по отношению к которой все собственно метрологические системы (СМО, СОЕИ, СВЕПР) являются «надстройками».

Исследована общая структура системы ВЕПР, выявлены ее подсистемы и элементы. На основе представления обобщенного элемента системы средств ВЕПР — *метрологических средств измерений* в виде мер, приборов и преобразователей, получены возможные типы связей между элементами (методы передачи размеров единиц). Показано, что метод непосредственных сличений (без компаратора) и метод косвенных измерений не могут служить методами передачи размеров единиц.

На языке принятой формализации рассмотрено уравнение передачи размера единицы аттестацией и показано, как изменяется при этом размер единицы аттестуемого СИ.

В качестве главного критерия эффективности функционирования всех собственно метрологических систем (в том числе СВЕПР) выбрано *качество измерений*, выполняемых в НСИ; рассмотрены основные показатели качества: точность, достоверность, правильность, сходимость, воспроизводимость и сопоставимость результатов измерений. Показано, что наиболее общими и неизменными являются два — *точность* и *сопоставимость*, характерные для оценок влияния систем ВЕПР (и СОЕИ) на НСИ.

Для замкнутой НСИ сформулированы условия обеспечения необходимого уровня качества измерений по обоим показателям: условие *обеспечения заданной (требуемой) точности* измерения в рамках НСИ (2.18) и условие *сопоставимости измерений* в рамках НСИ (2.19).

Эти условия позволяют сформулировать требования к системе, являющейся непосредственной «надстройкой» над НСИ, которая обеспечивает возможность выбора необходимых управляемых параметров.

Показана равнозначность понятий «*сопоставимость*» и «*единство измерений*», что позволило определить СОЕИ как систему, обеспечивающую выполнение условия сопоставимости измерений.

Введено понятие «*проблемная ситуация*» по обеспечению единства измерений, связанная с системой «поставщик — потребитель» и показано, что для построения СОЕИ важно не столько количество произведенных в НСИ измерений, сколько число проблемных ситуаций в ней.

Показано, что условие сопоставимости измерений (2.19) может быть обеспечено не только тогда, когда единицы, реализованные в двух разных измерительных системах, одинаковы, но и тогда, когда они близки к «истинному» размеру единицы (по определению). Это позволило конкретизировать и формализовать цель *СОЕИ* и *СВЕПР* (как составной части СОЕИ).

Произведены общие оценки параметров НСИ и размерности описания этой системы (10-мерная система с множеством реализаций $\sim 10^{13}$) как необходимые для построения СВЕПР. Так как в общем виде решение задачи ее построения не представляется возможным, разработаны основные *принципы и приемы* построения, позволяющие использовать общий подход к системе. Рассмотрены *алгоритмы построения* системы на разных этапах.

Анализ формализованной цели СВЕПР показал важность учета соотношения погрешностей у потребителя и изготовителя в проблемной ситуации по СОЕИ и позволил сформулировать *две практические рекомендации* по этому вопросу.

На основе цели СВЕПР и анализа затрат на осуществление СВЕПР как научно-технической системы составлен функционал *эффективности* функционирования системы ВЕПР и рассмотрена постановка нескольких типов оптимизационных задач.

Введено понятие «*степень централизации*» воспроизведения единицы и показана принципиальная возможность постановки и решения задач оптимизации по степени централизации с учетом экономических факторов.

Отдельно рассмотрены основные свойства *системы воспроизведения единиц*. Проанализированы входные параметры системы, уравнение воспроизведения единицы и условие сопоставимости при децентрализованном воспроизведении единицы. Показано, что принципиальных ограничений метрологического характера на степень централизации воспроизведения единицы не существует.

На основе сформулированных *аксиом воспроизведения* проанализированы основные метрологические требования к средствам и методам воспроизведения основных и производных единиц ФВ.

Показана необходимость введения в практику аттестованных эталонных (исходных) методов для воспроизведения некоторых производных единиц. Определен минимально необходимый состав исходных МСИ.

Исследована проблема сопоставимости результатов измерений на разных участках диапазона значений измеряемой величины, особенно характерная при воспроизведении единицы в «одной точке».

Сформулирована точка зрения авторов на взаимоотношение системы ФВ с системой единиц ФВ, с точки зрения выбора основных величин. Предложено в качестве *основных величин системы физических величин*, отражающих современное физическое мировоззрение и охватывающих все области физики, выбрать: длину, угол, время, массу, силу электрического тока, температуру и активность радионуклида. Подчеркнута важность взаимно однозначного соответствия между величинами и их единицами. В то же время обращено внимание на то, что группы основных величин и основных единиц не обязательно должны совпадать по номенклатуре (но быть одинаковыми по числу элементов).

В качестве приложения к изложенной теории построения системы воспроизведения единиц в отдельных областях измерений рассмотрена область измерений параметров ионизирующих излучений. Подробно проанализированы преимущества и перспективы реализации системы взаимосвязанных исходных МСИ в области ИПИИ, основанной на выборе активности радионуклидов и энергии излучения в качестве базовых величин системы, которые, в

свою очередь, опираются на фундаментальные константы и относительные измерения соответствующих величин.

Вывод:

разработаны основы теории, комплексно учитывающей весь спектр вопросов, связанных с проблемой воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров и построением соответствующей системы ВЕПР.

Библиографический список

1. *Авакян А.А.* Совершенствование методов прогнозирования потребности народного хозяйства в средствах измерений // Измерит. техника. 1981. № 6. С. 68.
2. *Александров В.С., Себекин А.П., Слаев В.А.* Основные направления развития научных исследований в области метрологии // Тр. III сессии Междунар. науч. шк. «Совр. фундаментальные пробл. и прикл. задачи теории точности и качества машин, приборов, систем» ТРАРАQMDS'98. СПб., 1998. С. 103.
3. *Балалаев В.А.* Общее описание процесса измерения // Измерит. техника. 1985. № 8. С. 3.
4. *Балалаев В.А., Скотников В.В., Слаев В.А., Романов В.Н.* Методологические аспекты метрологии // Тез. докл. VI Всесоюз. науч.-техн. конф. «Метрология в радиоэлектронике». М., 1984. С. 3.
5. *Балалаев В.А., Скотников В.В., Слаев В.А., Фоменко В.И.* О роли временных соотношений в процессах измерений // Тез. докл. III Всесоюз. симп. «Динамические измерения». Л., 1981. С. 9.
6. *Балалаев В.А., Скотников В.В., Слаев В.А.* и др. Анализ структуры и сущности процесса измерений // Тез. докл. VI Всесоюз. науч.-техн. конф. «Метрология в радиоэлектронике». М., 1984. С. 63.
7. *Беляков В.В., Закашанский А.И.* Использование методов теории массового обслуживания при определении потребности в средствах поверки // Измерит. техника. 1976. № 7. С. 10.
8. *Бородачев Н.А.* Основные вопросы теории точности производства. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 412 с.
9. *БСЭ.* 2-е изд. Т. 21, С. 363.
10. *Бурдун Г.Д., Марков Б.Н.* Основы метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1985. 256 с.
11. *Васильев А.И., Зеленцов Б.П., Цибина А.А.* О некоторых вопросах совершенствования системы обеспечения единства измерений // Измерит. техника. 1976. № 4. С. 8.

12. *Васильев А.И., Зеленцов Б.П., Цибина А.А.* О сущности терминов «единство измерений» и «единообразие средств измерений» // Научно-техническая терминология (реф. инф.). М.: Изд-во ВНИИКИ, 1974. № 8. С. 6.
13. *Васильев А.И., Зеленцов Б.П., Цибина А.А.* Система управления единством измерений // Измерит. техника. 1972. № 4. С. 3.
14. *Внедрение* и применение СТ СЭВ 1052–78 «Метрология. Единицы физических величин». Метод. указания (РД 50-169-79). М.: Изд-во стандартов, 1979.
15. *Вострокнутов Н.Н., Земельман М.А., Кошлаков В.М.* Выбор образцовых средств для периодической поверки с использованием вероятностных критериев // Измерит. техника. 1977. № 7. С. 19.
16. *Гнеденко Б.В.* Большие системы. Теория, методология, моделирование. М.: Наука, 1971. 327 с.
17. *Голованов В.Н.* Законы в системе научного знания. М.: Мысль, 1970. 231 с.
18. *Горбацевич С.В.* Некоторые соображения об определении, воспроизведении и содержании единиц физических величин и эталонах // Измерит. техника. 1981. № 4. С. 10.
19. *Горбацевич С.В.* Определение и воспроизведение единиц физических величин // Метрология. 1972. № 12. С. 3.
20. *Горбацевич С.В., Долинский Е.Ф., Юдин М.Ф.* Система единиц и счетные единицы // Измерит. техника. 1978. № 8. С. 40.
21. ГОСТ 8.057–80 ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения. М.: Изд-во, стандартов, 1980.
22. ГОСТ 8.061–80. ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение. М.: Изд-во стандартов, 1980.
23. ГОСТ 8.372–80. ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Порядок разработки, аттестации, регистрации, хранения и применения. М.: Изд-во стандартов, 1980.
24. ГОСТ 8.525–85. ГСИ. Установки высшей точности для воспроизведения единиц физических величин. Порядок разработки, аттестации, регистрации, хранения и применения. М.: Изд-во стандартов, 1985.
25. *Грановский В.А.* Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения. Л.: Энергоатомиздат (ЛЮ), 1984. 224 с.

26. Долгов В.А., Кривов А.С., Ольховский А.Н., Гришанов А.А. Перспективное планирование методов измерений // Метрология. 1981. № 3. С. 27.
27. Долинский Е.Ф. Анализ результатов поверок мер и приборов // Измерит. техника. 1958. № 3. С. 22.
28. Долинский Е.Ф. Обработка результатов измерений. М.: Изд-во стандартов, 1973. 192 с.
29. Долинский Е.Ф. Погрешности измерений и обработка результатов измерений. М.: Машиностроение, 1967. 57 с.
30. Иванов В.А. Решение измерительных задач с применением теории групп // Фундаментальные проблемы метрологии. (Мат. Всесоюз. семинара). Л.: ВНИИМ, 1981. С. 30.
31. Исаков Г.В. Проблемы управления системой передачи размеров единиц физических величин // Измерит. техника. 1978. № 1. С. 18.
32. Исследование и разработка классификации измерений (Отчет по теме 01.08.00.14, научн. рук. Л.И. Довбета). Л.: НПО ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1981.
33. Исследования по разработке основных направлений развития системы обеспечения единства измерений в областях измерений, закрепленных за ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (Науч.-техн. отчет по НИР 97/11а, отв. исп. В.А. Слаев.). СПб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1998. 357 с.
34. Камке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения. М.: Мир, 1980, 208 с.
35. Канунов А.И., Кондакова Т.В., Рузаев Е.П., Цимбалист Э.И. Алгоритм построения оптимальных иерархических поверочных систем // Стандартизация и измерительная техника. Красноярск, 1978. Вып. 4. С. 3.
36. Карташова А.Н. Достоверность измерений и критерии качества испытаний приборов. М.: Изд-во стандартов, 1967. 168 с.
37. Кашлаков В.М. Современные методы обеспечения качества поверки средств измерений (обзор). М.: Изд-во ВНИИКИ, 1985. 52 с.
38. Кравченко С.А. Необходимый запас точности между ступенями поверочной схемы в области фазовых измерений // Измерит. техника. 1973. № 1.
39. Крамов А.В., Семенюк А.Л. Выбор образцовых средств при поверке средств измерений (обзор). М.: Изд-во ВНИИКИ, 1975. 68 с.

40. *Краснощеков П.С.* Математическое моделирование операций. М.: Знание, 1984. 64 с.
41. *Кримштейн Я.А.* Оптимизация структуры метрологических сетей // Измерит. техника. 1977. № 3. С. 21.
42. *Кудрявцев О.А., Семенов Л.А., Фридман А.Э.* Математическое моделирование систем обеспечения единства измерений // Физические проблемы точных измерений (Мат. II Всесоюз. совещания по теор. метрологии. Л., 1983). Л.: Энергоатомиздат (ЛЮ), 1984. С. 8.
43. *Макаров И.М.* и др. Целевые комплексные программы. М.: Знание, 1980. 135 с.
44. *Маликов М.Ф.* Основы метрологии. Ч. 1. Учение об измерении. М.: Комитет по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1949. 479 с.
45. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
46. МИ 83–76. ГСИ. Методика определения параметров поверочных схем. М.: Изд-во стандартов, 1976.
47. *Новицкий П.В.* Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968. 248 с.
48. *Общая теория систем.* М.: Мир, 1966. 187 с.
49. *Орнатский П.П.* Автоматические измерения и приборы. 4-е изд. Киев: Вища шк., 1980. 500 с.
50. *Педан М.С., Селиванов М.Н.* Опыт применения ГОСТ 8.057–73 при создании и развитии эталонной базы страны // Общие вопросы метрологии. [Тр. метролог. ин-тов СССР; Вып. 200 (260)]. 1977. С. 112.
51. *Петров В.П., Рясный Ю.В.* Вопросы построения оптимальных поверочных схем // Исслед. в обл. радиотехнических измерений. [Тр. ВНИИМ, Вып. 204 (264)]. Л., 1976. С. 5.
52. *Пилипчук Б.И.* Единицы плоского и телесного угла // Теор. вопр. метрологии. [Тр. метролог. ин-тов СССР; Вып. 237 (297)]. 1979. С. 77.
53. *Проненко В.И., Якирин Р.В.* Метрология в промышленности. Киев: Техника, 1979. 222 с.
54. *Разработка классификации систем воспроизведения и передачи размеров единиц.* (Отчет по НИР 01.08.00.16, науч. рук. В.А. Балалаев). Л.: НПО ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1981. 88 с.

55. *Разработка* логико-математической модели системы передачи размеров единиц от эталонов к рабочим средствам измерений. (Отчет по НИР 01.08.00.09, научн. рук. Л.А. Семенов). Л.: НПО ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1979.
56. *Разработка* прогноза развития системы обеспечения единства измерений в СССР на период до 2005 г. (Отчет по НИР 01.08.00.07, научн. рук. В.А. Балалаев). Л.: НПО ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1982.
57. *Резник К.А.* Математико-статистический анализ систем передачи размеров единиц физических величин от государственных эталонов рабочим средствам измерений: Канд. дис. Л.: НПО ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1974.
58. *Резник К.А.* Определение числа ступеней поверочных схем // Общие вопросы метрологии. [Тр. метролог. ин-тов СССР; Вып. 200 (260)]. Л.: Энергия, 1977. С. 106.
59. *Резник К.А.* Соотношение между погрешностями образцового и поверяемого приборов // Метрология. 1971. № 4.
60. *Ройтман М.С., Цимбалист Э.И., Рузаев Е.Н.* и др. Построение оптимальных структур систем метрологического обеспечения // Измерения, контроль, автоматизация. 1981. № 5 (39). С. 13.
61. *Романов В.Н., Слаев В.А.* Обобщение задачи многоцелевой оптимизации систем на основе нечетких множеств // Метрология. 1985. № 12. С. 3.
62. *Романов В.Н., Слаев В.А.* Формализация понятия качества метрологических систем на основе нечетких множеств // Метрология. 1985. № 1. С. 11.
63. *Романов В.Н., Слаев В.А.* Принципы образования системы основных понятий метрологии // Тез. докл. Всесоюз. науч.-тех. семинара «Теор. пробл. электрометрии». Тарту, 1985. С. 10.
64. *Рубичев Н.А., Фрумкин В.Д.* Оптимальная структура поверочной схемы // Измерит. техника. 1970. № 3. С. 3.
65. *Садовский В.Н.* Основания общей теории систем. М.: Наука, 1974.
66. *Саркисян С.А.* и др. Большие технические системы. М.: Наука, 1977. 350 с.
67. *Саркисян С.А.* и др. Анализ и прогноз больших технических систем. М.: Наука, 1983. 280 с.
68. *Свинцов В.С.* К вопросу моделирования процесса эксплуатации средств измерений // Метрология. 1985. № 4. С. 3.

69. *Свинцов В.С.* Оптимизация поверочных систем по экономическому критерию // Метрология. 1980. № 9. С. 13.
70. *Семенов Л.А., Ушаков Н.П.* Оптимальное размещение образцовых средств гидрофизических измерений // Исследования в области гидрофизических измерений. (Тр. метролог. ин-тов СССР). Л.: Энергия, 1976. С. 102.
71. *Сена Л.А.* Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1977. 336 с.
72. *Сирая Т.Н.* Основные метрологические характеристики групповых эталонов // Теор. вопр. метрологии. [Тр. метролог. ин-тов СССР; Вып. 237 (297)]. Л., 1979. С. 17.
73. *Скотников В.В., Фоминых В.И., Юдин М.Ф.* Систематизация величин и создание эталонных комплексов // Измерит. техника. 1974. № 9. С. 83.
74. *Слаев В.А.* Математические аспекты теории измерений // Тез. докл. науч.-техн. конф. «Датчик-96». Т. 1. Гурзуф, 1996. С. 14–15.
75. *Слаев В.А.* Метрологические проблемы информационных технологий // Измерит. техника. № 11. 1994. С. 4.
76. *Слаев В.А.* О месте теоретической метрологии в системе наук и ее предметной области // Тез. докл. науч.-техн. конф. «Диагностика, информатика и метрология – 95». СПб., 1995. С. 23.
77. *Слаев В.А.* Принципы разработки классификатора видов измерений // Системные исследования в метрологии. (Тр. НПО ВНИИМ им. Д.И. Менделеева). Л., 1985. 23 с.
78. *Слаев В.А., Чуновкина А.Г., Чурсин А.В.* Повышение качества измерений планированием измерительной процедуры // Измерит. техника. 1999. № 10. С. 9.
79. *Сретенский В.Н., Келин А.В., Криксунов В.М.* Исходные положения теории и практики прикладной метрологии // Измерит. техника. 1969. № 5. С. 6.
80. *Студенцов Н.В., Селиванов М.Н.* Международная система единиц — закономерное развитие метрической системы мер // Измерит. техника. 1983. № 3. С. 22.
81. *Тарбеев Ю.В.* Актуальные задачи научных метрологических исследований // Измерит. техника. 1985. № 9. С. 36.
82. *Тарбеев Ю.В.* Состояние и перспективы развития эталонной базы в области электрических измерений // Изв. АН СССР (Сер. «Энергетика и транспорт»). 1978. № 3. С. 5.

83. *Тарбеев Ю.В.* Эталонная база СССР в X пятилетке // Д.И. Менделеев — основоположник современной метрологии. Под ред. В.В. Бойцова. М.: Изд-во стандартов, 1978.
84. *Тарбеев Ю.В., Балалаев В.А.* Состояние и перспективы развития теории обеспечения единства измерений // Физические проблемы точных измерений (Мат. II Всесоюз. совещ. по теор. метрологии. Л., 1983). Л.: Энергоатомиздат (ЛО), 1984, С. 4.
85. *Тиходеев П.М.* Очерки об исходных (метрологических) измерениях. М.;Л.: Машгиз, 1954. 216 с.
86. *Цибина А.А.* О методах установления переменных межповерочных интервалов для образцовых и рабочих средств измерений // Надежность средств измерительной техники. (Тр. СНИИМ. Вып. 4). Новосибирск, 1970.
87. *Цибина А.А., Шилов А.М.* Метод определения структуры поверочной схемы // Измерит. техника. 1970. № 11. С. 17.
88. *Цибина А.А., Шилов А.М., Низовкина Н.Г.* Расчет экономической эффективности при установлении научнообоснованных межповерочных интервалов // Измерит. техника. 1981. № 8. С. 71.
89. *Шилов А.М.* Модель системы передачи размера единицы от эталона рабочим средствам измерений // Измерит. техника. 1974. № 8. С. 80.
90. *Широков К.П.* Интерпретация уравнений связи между физическими величинами // Тр. метролог. ин-тов СССР; Вып. 200 (260). 1977. С. 3.
91. *Широков К.П.* Об основных понятиях метрологии // Общие вопросы метрологии. [Тр. метролог. ин-тов СССР; Вып. 130 (190)]. 1972. С. 6.
92. *Широков К.П.* Общие вопросы метрологии. М.: Машиностроение, 1967. 96 с.
93. *Шишкин И.Ф.* Качество и единство измерений. Л.: Изд-во СЗПИ, 1982. 83 с.
94. *Шишкин И.Ф.* Теоретическая метрология. Л.: Изд-во СЗПИ, 1983. 84 с.
95. *Энгельс Ф.* Диалектика природы. М.: Политиздат, 1975. 81 с.
96. *Яновская С.А.* Методологические проблемы науки. М.: Мысль, 1972. 278 с.
97. *Crow E.L.* Optimum Allocation of Calibration Errors. / Industr. Qual. Control. 1966. V. 23. № 5.

98. *Deslattes R.D., Green R.L., Kessler E.G.* / Journal de Physique. C. 3. № 3. 1984. Т. 45. P. 41.
99. *Eder W.E.* A Viewpoint on the Quantity «plane Angle». Metrologia. 1982. № 18. P. 1.
100. *Eisenhart Ch.* Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument Calibration Systems / J. of Res. NBS, Engineering and Instrumentation. 1963. № 2, April – June.
101. *International Vocabulary of basic and general Terms in Metrology.* ISO, 1984.
102. *Lorenz A.* Decay Data for Radionuclides used as Calibration Standards / IAEA. Vienna, 1982.
103. *Rosengren L.G.* Optimal Design of Hierarchy of Calibrations / IMEKO VI. Dresden, 1973. Sec. 1, Preprint. Berlin, 1973. P. 122.
104. *Wiener V.E., Cretu F.M.* Projektierung der Makrosystems fur metrologische Versicherung // Meas. und Instr. Acta IMEKO. 1974. V. 1.
105. *Yonden W.I.* Uncertainties in Calibration // IRE Transactions on Instrumentation, 1962.
106. *Синяков А.И., Федоров А.М.* Техничко-экономические обоснования государственных поверочных схем // Квалификация и качество. 2000. № 2. С. 18.
107. *Синяков А.И., Федоров А.М.* О горизонтальных связях в ступенях поверочных схем для передачи размеров единиц физических величин // Квалификация и качество. 2001. № 1. С. 18.
108. *Лячнев В.В., Синяков А.И., Федоров А.М.* Воспроизведение, хранение и передача размеров единиц физических величин // Компетентность. 2004. № 2. С. 16

Оглавление

Список использованных сокращений.....	3
---------------------------------------	---

Часть I. РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПЕРЕДАЧИ ИХ РАЗМЕРОВ	5
--	----------

1. Введение.....	5
1.1. Цель, предмет и задачи исследования.....	5
1.2. Метод и структура исследования.....	7
2. Анализ сущности системы ВЕПР	8
2.1. Понятие метрологической системы.....	9
2.2. «Элементарные» метрологические системы	10
2.3. Измерение как простейшая метрологическая система	12
2.4. Собственно метрологические системы	14
2.5. Иерархия метрологических систем	17
2.6. Система ВЕПР как подсистема	20
2.7. Анализ понятий «воспроизведение единицы» и «передача размера единицы» физической величины	24
2.8. Структура системы ВЕПР.....	30
3. Разновидности элементов частной системы ВЕПР	32
3.1. Исходные МСИ.....	32
3.2. Подчиненные МСИ	33
3.3. Вспомогательные МСИ	34
3.4. Методы передачи размера единицы	35
4. Межвидовая классификация частных систем ВЕПР.....	37
4.1. Классификация по степени централизации воспроизведения размера единицы	38
4.2. Классификация систем ВЕПР по способу воспроизведения единицы.....	42
4.3. Другие аспекты межвидовой классификации.....	43
5. Некоторые проблемы видовой классификации частных систем ВЕПР	46
5.1. О формальном и фактическом числе ФВ	47

5.2. Однородность ФВ и системы ВЕПР	50
5.3. Проблема «физических постоянных» в системах ВЕПР	51
5.4. О системах ВЕПР для безразмерных ФВ (коэффициентов) ..	54
6. О технико-экономической эффективности различных систем ВЕПР	55

Часть II. РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПЕРЕДАЧИ ИХ РАЗМЕРОВ

61

Введение	61
7. Анализ состояния вопроса и выбор основных направлений исследования	62
7.1. Исходные позиции для анализа	62
7.2. Краткий обзор работ по теории построения систем ВЕПР	63
7.3. Нормативные документы, действующие в области систем ВЕПР	70
7.4. Выбор основных направлений исследования	73
8. Основы описания систем ВЕПР	76
8.1. Исходные понятия	76
8.2. Измерение как простейшая метрологическая система	77
8.3. Априорная информация при измерениях	81
8.4. Структура системы ВЕПР	85
8.5. Окружающая среда и границы системы ВЕПР	92
9. Основы построения системы ВЕПР	101
9.1. Основные признаки системы ВЕПР	101
9.2. Объем исходных данных для построения систем ВЕПР	102
9.3. Общие принципы и алгоритм построения систем ВЕПР	106
9.4. Эффективность функционирования систем ВЕПР и их оптимизация	111
9.4.1. Эффективность систем ВЕПР	111
9.4.2. Оптимизационные задачи	115
10. Система воспроизведения единиц физических величин	120

10.1 Основные свойства системы	120
10.2. О выборе основных величин и основных единиц	125
10.3. Система воспроизведения единиц в области измерений параметров ионизирующих излучений	129
Заключение.....	138
Библиографический список.....	145

*Балалаев Владимир Алексеевич
Слаев Валерий Абдуллович
Синяков Александр Игнатьевич*

Теория систем воспроизведения единиц и передачи их размеров

Издание подготовлено в АНО НПО «Профессионал»
191023, Санкт-Петербург, ул. Садовая, 28–30, корп. 35
Тел./Факс: 321-67-38, 110-59-91, 115-14-35
mail@naukaspb.ru, mis@npomis.com
www.naukaspb.ru, www.npomis.com

Ответственный за издание: *Полуда А.А.*
Ответственный за подготовку: *Жадобина Т.И.*
Ответственный редактор: *Белканова Л.В.*
Редактор: *Чернухо Л.Д.*
Компьютерная верстка: *Николаева А.А.*

Сдано в набор 26.07.2004. Подписано к печати 28.10.2004
Формат 60×90/16
Объем 10 печ. л. Тираж 300 экз.