

УДК 006.91

А.В. Прокопов

Національний університет громадянської захисти України, Харків, Україна

## ПРОБЛЕМА ОБОСНОВАНИЯ УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЯ И ОЦЕНКИ МЕТОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ (НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ) РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ

*Представлен обзор и критический анализ литературы по проблеме обоснования уравнения измерения и оценки методической составляющей погрешности (неопределенности) результата измерения, обсуждаются перспективные пути решения данной проблемы.*

**Ключевые слова:** погрешность, неопределенность, уравнение измерения (модельное уравнение), физико-математическая модель, алгоритм.

### Введение

**Постановка проблемы, анализ последних достижений и публикаций.** В последние годы уравнение измерения (модельное уравнение) стало объектом пристального внимания исследователей во многих странах мира. Под уравнением измерения, как известно [1, 2], понимается функциональная зависимость, связывающая подлежащую определению величину (measurand) с другими величинами, существенными для рассматриваемой измерительной задачи. Проблема строгого обоснования модельного уравнения находит свое отражение в научной программе НФЛ (Великобритания), посвященной разработке математических моделей и программных средств для метрологических приложений [3], важное место занимают теоретические вопросы моделирования уравнений измерений в трудах немецких [4-6], российских [2, 7 – 10] и украинских [11 – 17] метрологов. К сожалению, в большинстве работ анализируются уже известные модели с целью оптимального выбора наиболее подходящих уравнений измерений. В то же время общие принципы обоснования уравнения измерения и

оценки методической составляющей погрешности (неопределенности) результата измерений остаются все еще недостаточно разработанными.

В литературе подчеркивается, что уравнение измерения является основой для разработки методик выполнения измерений, а также реализующих их измерительных процедур и технических устройств, для анализа точности результатов измерений [1, 2, 4, 8]. Отмечается исключительная сложность проблемы вывода (обоснования) уравнения измерения; в частности, в [2] высказывается мнение, что для получения уравнения измерения необходимы такие подходы, которые могут быть отнесены скорее к сфере «искусства нежели науки». Иногда утверждается, что уравнение измерений является одним из компонентов априорных знаний, используемых при решении метрологических задач [8], т.е. предполагается, что данное уравнение должно определяться не с помощью известных с точки зрения метрологии процедур, а в рамках смежных с метрологией наук. Возможно, именно поэтому в Руководстве [1] ничего не говорится о том, как же получить необходимое для анализа уравнение измерения. Вместо этого используются такие непри-

вычные для научно-технической литературы слова как "критическое размышление", "интеллектуальная честность", "профессиональное мастерство".

Отметим, что разработчики Руководства [1] четко осознают все недостатки данного документа. В настоящее время под эгидой BIPM создана специальная рабочая группа WG1. Одной из основных задач этой группы является подготовка специальных приложений (Supplement) к Руководству, в том числе, отдельного приложения, посвященного моделированию измерительных процедур и методологии обоснования уравнения измерений [18]. Таким образом, ведется интенсивная работа по устранению недостатков Руководства [1]. Тем самым подтверждено мнение о том, что проблема строгого обоснования алгоритма получения уравнения измерения остается актуальной, является предметом теории измерений и относится к фундаментальным проблемам метрологии.

**Формулирование цели статьи.** Целью настоящей работы является обзор и критический анализ имеющейся литературы по проблеме обоснования уравнения измерения и оценки методической составляющей погрешности (неопределенности) результата измерения, обсуждение перспективных путей решения данной проблемы.

### Изложение основного материала

Заметным шагом на пути решения данной проблемы являются разработки [4 – 6, 11 – 17], в которых анализируются основные аспекты проблемы, предлагаются общие схемы получения уравнения измерения. В работах [4 – 6], в частности, такая схема раскладывается на пять последовательных этапов, а именно:

(1) Описание измерения, идентификация существенных величин (к которым относятся, в частности, measurand, влияющие величины) и используемого метода измерения.

(2) Анализ измерения, декомпозиция его на отдельные элементы, графическое представление причинно-следственных связей между элементами для некоторого идеального (не подверженного внешним влияниям) измерения в рамках стандартных компонентов моделирования.

(3) Учет всех искажений, эффектов неполного знания о величинах и влияющих факторах, которые могут повлиять на идеальное измерение. Графическая и математическая интерпретация причинно-следственных связей для реального (подверженного внешним влияниям) измерения. Использование корректирующих поправок для учета искажений (внешних влияний).

(4) Идентификация взаимного влияния величин, введение корреляций.

(5) Преобразование математических соотношений, описывающих причинно-следственные связи с

целью получения модельного уравнения.

Следует отметить, что в этих работах не конкретизированы действия, осуществляемые при математической формулировке задачи.

В статьях [11 – 17] алгоритм получения уравнения измерения представлен семью этапами, а именно (ниже для простоты представлен вариант алгоритма при единственной подлежащей определению величине, в случае двух и более величин – процедура аналогична):

(1) Выбор объекта измерения и предварительная идентификация его свойств, существенных для формирования информационного сигнала, несущего сведения о подлежащей определению величине. Конкретизация данной величины.

(2) Предварительная идентификация физических процессов, воздействующих на информационный сигнал и приводящих к его изменению при прохождении от объекта измерений до измерительного устройства, а также в самом измерительном устройстве. Выбор непосредственно измеряемых величин.

(3) Формулирование системы уравнений (с соответствующими начальными и граничными условиями), описывающих физические процессы, формирующие информационный сигнал и воздействующие на него в процессе его прохождения от объекта измерения до измерительного устройства и в самом измерительном устройстве (математическая формулировка задачи).

(4) Анализ исходных уравнений. Количественная оценка влияния отдельных физических эффектов и процессов на характеристики информационного сигнала при его передаче от объекта измерений до измерительного устройства и при его преобразовании в измерительном устройстве. Упрощение математической формулировки задачи на основе исключения из рассмотрения несущественных при заданном уровне точности физических эффектов и процессов. Оценка погрешности (неопределенности), вызванной учетом указанных эффектов и процессов.

(5) Выбор и обоснование методов решения упрощенных уравнений задачи, позволяющих установить зависимость искомой величины (measurand) от непосредственно измеряемых величин. В этой зависимости в общем случае могут содержаться известные константы, параметры с фиксированными значениями, а также дополнительные неизвестные параметры, учитывающие, например, влияние внешних факторов, и подлежащие независимому определению.

(6) Решение уравнений задачи, анализ установленной зависимости и преобразование ее к виду, наиболее удобному для получения уравнения измерения. Рассматриваются два варианта: а) дополнительные неизвестные параметры представ-

ляются в виде корректирующих поправок - при их расчетно-экспериментальном независимом определении; в) установленная зависимость используется для формулирования системы уравнений, позволяющей найти подлежащую определению величину (measurand) и дополнительные неизвестные параметры - при инструментальном определении этих параметров.

(7) Получение уравнения измерения и оценка методической составляющей погрешности (неопределенности) результата измерения. Приведение полученного уравнения измерения к стандартной форме, соответствующей прямым, косвенным, совокупным, совместным либо системным измерениям.

Математическая формулировка задачи в рамках данного подхода базируется на использовании строгих формулировок физических законов (законов природы) с соответствующими граничными и начальными условиями, учитывающими специфику конкретной измерительной задачи.

### Выводы

Проведенный анализ показывает, что результаты, изложенные в [4 – 6, 11 – 17], могут оказаться полезными при разработке соответствующего приложения к Руководству [1], посвященного методологии обоснования уравнения измерения (модельно-го уравнения).

### Список литературы

1. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. ISO, 1993.
2. Земельман М. А. *Метрологические основы технических измерений* / М.А. Земельман. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 228 с.
3. *New Directions–Future Directions in Mathematics and Scientific Computing: recommendations for the Software Support for Metrology programme 2004-2007*. NPL Report CMSC. 16/03.
4. Кокс М. *Оценивание неопределенности измерений на основе трансформирования распределений с использованием моделирования по методу Монте-Карло* / М. Кокс, П. Харрис, Б.Р.-Л. Зиберт // *Измерительная техника*. – 2003. – № 9. – С. 9-14.
5. *A generalized procedure for modelling of measurement for evaluating the measurement uncertainty* / K.D. Sommer, M. Kochsiek, B.R.L. Siebert a.a. // *17<sup>th</sup> IMEKO World Congress: proceedings*. – Dubrovnik - Zagreb, 2003.
6. *Sommer K.D. Systematic approach to the modelling of measurements for uncertainty evaluation* / K.D. Sommer, B.R.L. Siebert // *Metrologia*. – 2006. – V. 43. – P. S200-S210.

7. Розенберг В.Я. *Введение в теорию точности измерительных систем* / В.Я. Розенберг. – М.: Сов. радио, 1975. – 303 с.

8. Цветков Э.И. *Расчетное оценивание погрешностей* / Э.И. Цветков // *Измерительная техника*. – 2000. – № 11. – С. 3-6.

9. Кнорринг В.Г. *Теория измерений как самостоятельная область знаний: характеристические цели и задачи* / В.Г. Кнорринг, Г.Н. Солопченко // *Измерительная техника*. – 2003. – № 6. – С. 13-17.

10. Грановский В.А. *Методы обработки экспериментальных данных при измерениях* / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 228 с.

11. Прокопов А.В. *Погрешность, неопределенность и проблема моделирования в теории измерений* / А.В. Прокопов // *Український метрологічний журнал*. – 2000. – Вип. 4. – С. 23-27.

12. Москаленко М.В. *Физико-математическое моделирование уравнений измерений* / М.В. Москаленко, А.В. Прокопов // *Неопределенность измерения: научные, методические и производственные аспекты: II научно-технический семинар, 26-27 мая 2005 г.: тезисы докл.* – Х.: ХНУРЭ, 2005. – С. 46.

13. Прокопов А.В. *Алгоритм обоснования уравнения измерения и оценки методической погрешности (неопределенности) результата измерений при косвенных измерениях* / А.В. Прокопов // *Измерительная техника*. – 2005. – № 4. – С. 25-29.

14. Москаленко М.В. *Физико-математическое моделирование уравнений измерений* / М.В. Москаленко // *Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 2-й Международный радиоэлектронный форум: сб. науч. трудов*. – Х.: ХНУРЭ, 2005. – С. УП-53-УП-56.

15. Москаленко М.В. *Об учете вида уравнения измерения при оценке неопределенности измерений* / М.В. Москаленко, А.В. Прокопов // *Метрологія та вимірювальна техніка: IV МНТК, 12-14 жовтня 2004 р: наукові праці*. – Х., 2004. – С. 85-87.

16. Прокопов А.В. *Уравнение измерения как фундаментальная проблема метрологии* / А.В. Прокопов // *Наукові праці УІ МНТК «Метрологія та вимірювальна техніка», Т.1, 14-16 жовтня 2008 р.* – Харків: ННЦ «Інститут метрології», 2008. – С. 37-39.

17. Прокопов А.В. *Уравнение измерения как метрологическая проблема в задаче предупреждения чрезвычайных ситуаций* / А.В. Прокопов // *Проблемы надзвичайних ситуацій: зб. наук. пр.* – Х.: НУЦЗУ, 2010. – Вип. 11. – С. 98-104.

18. *News from the JCGM/WG1 [Электронный ресурс]* – Режим доступа к ресурсу: [http://www.bipm.org/utls/en/pdf/news\\_jcgm-wg1.pdf](http://www.bipm.org/utls/en/pdf/news_jcgm-wg1.pdf).

Поступила в редколлегию 27.12.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### ПРОБЛЕМА ОБҐРУНТУВАННЯ РІВНЯННЯ ВИМІРЮВАНЬ ТА ОЦІНКИ МЕТОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ПОХИБКИ (НЕВИЗНАЧЕНОСТІ) РЕЗУЛЬТАТУ ВИМІРЮВАННЯ

О.В. Прокопов

Надано огляд та критичний аналіз літератури, присвяченій проблемі обґрунтування рівняння вимірювань та оцінки методичної складової похибки (невизначеності) результату вимірювань, обговорюються перспективні шляхи вирішення цієї проблеми.

**Ключові слова:** похибка, невизначеність, рівняння вимірювань (модельне рівняння), фізико-математична модель, алгоритм.

**PROBLEM OF THE SUBSTANTIATION OF THE MEASUREMENT EQUATION AND ESTIMATION  
OF THE METHODOLOGICAL ERROR (UNCERTAINTY) OF MEASUREMENT RESULT**

A.V. Prokopov

*The review and the critical analysis of the literature on a problem of a substantiation of the equation of measurement and an estimation of a methodical error (uncertainty) of measurement result is presented, perspective ways of the decision of the given problem are discussed.*

**Keywords:** *error, uncertainty, measurement equation (model equation), physical and mathematical model, algorithm.*