УДК 389.14:006.15.7

В.Т. КОНДРАТОВ

ПРОБЛЕМА РАБОТЫ С МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ ЧИСЛАМИ – ПРОБЛЕМА, КОТОРАЯ ОБЪЕДИНИТ МЕТРОЛОГИЮ, ИНФОРМАТИКУ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНУЮ ТЕХНИКУ

V.T. Kondratov

ISSUE OF WORK WITH METROLOGICAL NUMBERS – THE ISSUE, WHICH WILL INTEGRATE METROLOGY, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

The paper describes issue of work with metrological numbers such as the issue of world value which will integrate metrology, computer science and informatics, the ways and methods of its (her) decision.

Викладено суть проблеми роботи з метрологічними числами і функціями як проблеми світового значення, яка об'єднає метрологію, інформатику та обчислювальну техніку.

Описана сущность проблемы работы с метрологическими числами и функциями как проблемы мирового значения, которая объединит метрологию, информатику и вычислительную технику.

Научно-технический прогресс общества и развитие оборонного, промышленного и аграрного комплексов страны неразрывно связаны с развитием метрологии, информатики и вычислительной техники. Без их успешного развития невозможно создание новых информационных технологий, производство высококачественной продукции, создание высокопроизводительных компьютеров, высокоточных при-боров, датчиков, информационно-измеритель-ных и диагностических систем, систем авто-матического управления и другой техники. В точном машиностроении, например, на долю всех производственных процессов приходится 60 – 75 % операций контроля и измерения параметров технологических процессов. С каждым годом увеличивается число информационных технологий, связанных с обработкой результатов контроля, диагностики и испытаний выпускаемой продукции, с созданием базы данных, базы знаний и т. д.

Только благодаря успехам в развитии метрологии, информатики и вычислительной техники могут быть созданы новые информационные технологии, новые микропроцессорные приборы и системы, направленные на обеспечение высокого качества выпускаемой продукции и представляемых услуг.

На сегодняшний день существует еще достаточное количество научных проблем и технических задач, решение которых может дать существенный толчок в развитии приборостроения, информатики, вычислительной техники и кибернетики.

Одной из таких проблем является проблема работы с метрологическими числами. Эта проблема имеет свои начала со времени создания науки метрологии и возникновения необходимости в обработке результатов измерений, представляемых с помощью метрологических чисел.

На современном периоде развития науки метрологии эта проблема еще более заострилась в связи с развитием теории избыточных измерений [1–8] и новых аспектов теории метрологической надежности [9–11]. Возникла острая необходимость в широком использовании метрологических функций для корректного решения метрологических задач, задач метрологической надежности и оценки качества продукции. Как следствие – создание математического аппарата и технических средств, обеспечивающих автоматическую обработку метрологических чисел при решении указанных задач. Поэтому проблема работы с метрологическими числами и функциями весьма актуальны.

Объект исследований – проблема работы с метрологическими числами и функциями.

Предмет исследований – пути и методы решения проблемы работы с метрологическими числами.

Цель работы – ознакомление ученых и специалистов с сущностью проблемы, ее составными частями, путями решения и важностью данной проблемы для метрологии, информатики, вычислительной технике и приборостроения.

Результаты исследований

Математика – фундамент современной цивилизации. Теоретическая математика является фундаментом прикладной математики. В прикладной математике ученые и специалисты работают с большим набором чисел: с целыми числами, рациональными, действительными, метрологическими и приближенными числами [12, 13].

Метрологические числа: основные понятия и определения

Метрологические числа – главные числа прикладной математики, используемой в метрологии. В отличие от чисел в теоретической математике они представляют собой: 1) среднестатистическое значение результата измерений величин разной физической природы, выраженное через значение абсолютной Δ_x, приведенной δ_x или относительной γ_x погрешности, и соответствующие значения верхней и нижней границ интервала (неопределенности), в котором с заданной вероятностью P находится погрешность результата измерений; 2) среднестатистическое значение погрешности результата измерений, выраженное через значение систематической погрешности и значений верхней и нижней границ интервала (неопределенности), в котором с заданной вероятностью P находится случайная составляющая погрешности результата измерений.

Метрологическому числу присущи три характеристики: среднестатистическое значение результата измерений, приведенное к выходу или ко входу измерительного канала (ИК) средства измерительной техники (СИТ), значения верхней и нижней границ интервала неопределенности, в котором с заданной вероятностью P находится погрешность результата измерений.

В общем случае метрологическое число записывается так:

1) приведенный к выходу ИК результат измерения

$$N'_x = \overline{N_y} + \begin{cases} +\Delta_{N\text{в}} \\ -\Delta_{N\text{н}}, \end{cases} \tag{1}$$

где N'_x – числовое значение результата измерений; $\overline{N_y}$ – среднестатистическое значение результата измерений; $+\Delta_{N\text{в}}$ и $-\Delta_{N\text{н}}$ – соответственно разные и противоположные по знаку числовые значения погрешности результата измерения или числовые значения верхней (индекс „в”) и нижней (индекс „н”) границ интервала неопределенности, асимметричные относительно $\overline{N_y}$,

или, при $\{\Delta_{N\text{в}}\} = \{\Delta_{N\text{н}}\} = \{\Delta_{N\text{г}}\}$,

$$N_y = \overline{N_y} \pm \Delta_{N\text{г}}, \tag{2}$$

где $\pm\Delta_{N\text{г}}$ – равные и противоположные по знаку числовые значения границы интервала неопределенности;

2) приведенный ко входу ИК результат измерения

$$\{x_i\} = \overline{\{x_i\}} \pm \{\Delta_{x\text{г}}\}, \tag{3}$$

$$\{x_i\} = \overline{\{x_i\}} + \begin{cases} +\{\Delta_{x\text{в}}\} \\ -\{\Delta_{x\text{н}}\}, \end{cases} \tag{4}$$

где $\overline{x_i} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}$ – среднее значение измеряемой ФВ; $\pm\{\Delta_{x\text{г}}\}$, $(+\{\Delta_{x\text{в}}\}$ и $-\{\Delta_{x\text{н}}\})$ – соответственно, противоположные по знаку верхнее и нижнее (равные и неравные) значения границ интервала неопределенности;

3) приведенная к выходу ИК погрешность результата измерения

$$\{\Delta_{N\text{н}}\} = \{M[\Delta_N]\} \pm k_p\{\sigma[\Delta_N]\} \tag{5}$$

или

$$\{\Delta_{N\text{н}}\} = \{M[\Delta_N]\} + \begin{cases} +k_{p1}\{\sigma[\Delta_N]\} \\ -k_{p2}\{\sigma[\Delta_N]\}; \end{cases} \tag{6}$$

$$\{\Delta_{N\text{н}}\} = \{M[\Delta_N]\} + \begin{cases} +k_p\{\sigma_1[\Delta_N]\} \\ -k_p\{\sigma_2[\Delta_N]\}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\{\Delta_{N\text{н}}\} = \{M[\Delta_N]\} + \begin{cases} +k_{p1}\{\sigma_1[\Delta_N]\} \\ -k_{p2}\{\sigma_2[\Delta_N]\}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\{M[\Delta_N]\}$ – числовое значение математического ожидания или среднее арифметическое значение погрешности, приведенной к выходу ИК; $-k_p\{\sigma[\Delta_N]\}$ и $+k_p\{\sigma[\Delta_N]\}$ – приведенные ко входу ИК противоположные по знаку нижнее и верхнее (равные между собой) значения границ интервала неопределенности; k_p – доверительный коэффициент, зависящий от вида закона распределения погрешности результата измерений и выбранного значения вероятности P;

4) приведенная ко входу ИК погрешность результата измерения

$$\{\Delta_{x\text{н}}\} = \{M[\Delta_x]\} \pm k_p\{\sigma[\Delta_x]\} \quad (9)$$

или

$$\{\Delta_{x\text{н}}\} = \{M[\Delta_x]\} + \begin{cases} +k_{p1}\{\sigma[\Delta_x]\} \\ -k_{p2}\{\sigma[\Delta_x]\}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\{\Delta_{x\text{н}}\} = \{M[\Delta_x]\} + \begin{cases} +k_p\{\sigma_1[\Delta_x]\} \\ -k_p\{\sigma_2[\Delta_x]\}; \end{cases} \quad (11)$$

$$\{\Delta_{x\text{н}}\} = \{M[\Delta_x]\} + \begin{cases} +k_{p_1}\{\sigma_1[\Delta_x]\} \\ -k_{p_2}\{\sigma_2[\Delta_x]\}, \end{cases} \quad (12)$$

где $\{M[\Delta_x]\}$ – числовое значение математического ожидания или среднее арифметическое значение погрешности, приведенной ко входу ИК; $-k_p\{\sigma[\Delta_x]\}$ и $+k_p\{\sigma[\Delta_x]\}$ – приведенные ко входу ИК и противоположные по знаку нижнее и верхнее (равные между собой) значения границ интервала неопределенности; k_p – доверительный коэффициент, значение которого зависит от вида закона распределения погрешности результата измерений и выбранного значения вероятности P.

Установлено [12], что современная компьютерная технология вообще не умеет работать с метрологическими и приближенными числами и даже не умеет записывать их в компьютерном представлении. Для работы с метрологическими и приближенными числами она использует только их номинальные значения, отбрасывая метрологическую характеристику, превращает полученные номинальные значения в действительное число и работает только с ними. Метрологи, работающие с метрологическими числами, выполняют расчеты вручную, используя, например, рекомендации [14] о действиях над метрологическими числами. При этом чаще всего используется предположение, что распределение вероятности отсчетов измеряемой физической величины подчиняется закону распределения Гаусса (нормальному распределению).

На практике законы распределения погрешностей результатов измерений весьма разнообразны и очень часто далеки от нормального. Большое разнообразие законов распределения погрешностей обуславливает практическую сложность определения доверительных значений погрешностей, так как необходимо иметь таблицы квантилей для всех разновидностей распределений [15]. Математики пока не в состоянии дать таблицы квантилей для всего разнообразия законов распределения. Отсутствие даже приближенных уравнений связи между погрешностями результатов прямых измерений физических величин при разных законах их распределения, но при одних и тех же параметрах функции преобразования ИК, приводит к трудностям определения доверительного интервала.

Практически метрологические данные имеют точность, характеризующуюся тремя (четырьмя) десятичными знаками (относительная погрешность 0,1 % (0,01 %)), что соответствует примерно 10 (14) двоичным разрядам. Компьютер же ведет обработку данных, представленных тридцатью двумя и более двоичными разрядами (до шестидесяти четырех). Что же обрабатывает компьютер в этих лишних разрядах? Подавляющая часть компьютерных ресурсов тратится, как отмечается в [12], на обработку не полезной информации, а шумов.

С точки зрения прикладной математики, компьютерная технология отстает от вычислительных технологий, которые использовали сотни лет назад Ньютон, Непер, Кеплер [12]. Поэтому основными задачами развития вычислительной техники в XXI веке являются: создание, на базе уже существующих, теоретических основ, методологии работы с метрологическими и приближенными числами, языков высокого уровня, пакетов прикладных программ и мультипроцессоров для высокоточного решения метрологических задач, задач метрологической надежности и, в конечном счете, автоматической обработки результатов измерений и диагностики различных процессов и систем, представленных в виде метрологических чисел.

Основная задача развития метрологии и измерительной техники – составление таблиц квантилей для всех разновидностей распределений или разработка приближенных уравнений связи между погрешностями результатов прямых измерений физических величин при разных законах их распределения.

<u>Метрологические функции: основные понятия и определения</u>

Метрологическая функция связи (двух и более) величин разной физической природы – это функция, каждому значению аргумента (аргументов) которой, при неизменных значениях её параметров, соответствуют три числовых значения: номинальное (среднестатистическое) значение функции и соответствующие ему значения верхней и нижней границ интервала неопределенности. Последние характеризуют в общем случае разные по значению и противоположные по знаку отклонения значений функции относительно ее номинального значения. В общем виде метрологическая функция может быть записана следующим образом:

$$y_{\text{м}}(x_i)=\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} f(x_{ij},S_{\text{н}j},S_{\text{л}j},\Delta y_j)\right)+\begin{cases}+\Delta_{y\text{в}}(x_i)\\ -\Delta_{y\text{н}}(x_i)\end{cases}=\overline{y_{\text{н}}(x_i)}+\begin{cases}+\Delta_{y\text{в}}(x_i)\\ -\Delta_{y\text{н}}(x_i),\end{cases} \tag{13}$$

где индексы м, н означают, соответственно, метрологическая и номинальная функции; $S_{\text{н}j}, S_{\text{л}j}, \Delta y_j$ – параметры нелинейной функции преобразования ИК в j-й момент времени; $+\Delta_{y\text{в}}$ и $-\Delta_{y\text{н}}$ – соответственно верхняя и нижняя границы интервала неопределенности.

На наш взгляд, следует также различать: метрологические функция связи величин разной физической природы; метрологические функции преобразования физических величин; метрологические функции погрешности результата измерений; метрологические двух- и многопараметровые функции распределения значений нормируемых погрешностей результата измерений физической величины во времени и в зависимости от значений одной, двух и более однородных или разнородных физических величин и т. д.

Метрологические функции распределения

Как отмечалось выше, в связи с решением задач метрологической надежности (МН) СИТ, в частности, определения параметров МН СИТ [3–5], существует острая необходимость в широком использовании метрологических функций для корректного решения метрологических задач, задач метрологической надежности и оценки качества выпускаемой продукции, класса точности СИТ и т. д.

Функции распределения представляют собой взаимосвязь метрологических характеристик (МХ) и параметров метрологической надежности СИТ [10, 11]. В частности, например, функция распределения значений приведенной погрешности в течение времени наработки на отказ (функция распределения Кондратова – Вейбулла) имеет следующий вид [10]:

$$\xi_x(t_x)=S_{\xi}\left(t_x/T_{\text{но}}\right)^{k_{\text{ф}}}\exp\left(-\left(t_x/T_{\text{но}}\right)^{k_{\text{ф}}}\right)+\xi_{x0}, \tag{14}$$

где $\xi_x(t_x)$ – любая нормируемая МХ СИТ; $S_{\xi}=e(\xi_{\text{нд}}-\xi_{x0})=e\xi_{x0}(k_{\text{мз}}-k_{\text{мз}}^{0})$ – параметр чувствительности функции (14) к МХ СИТ определенного типа; e – действительное число Эйлера ($e=2,71828182...$); $\xi_{x0}=\overline{\xi_{x0}(t_{x0})}$ – смещение функции распределения, которое представляет собой усредненную нормируемую погрешность результата многократных измерений нормированной по значению ФВ x_0 в момент времени t_{x0}; $\xi_{\text{нд}}$ – нормированная по значению доверительная граница нормируемой погрешности; $k_{\text{мз}}$ – коэффициент метрологического запаса ($k_{\text{мз}} = \xi_{\text{нд}} / \xi_{x0}$); t_x – текущее (календарное) время измерения нормируемой погрешности результата измерений, лет. Индекс x указывает на непрерывное или дискретное изменение данного параметра); $T_{\text{но}}$ – время наработки на метрологический отказ, лет; $k_{\text{ф}}$ – параметр формы или показатель степени нелинейности функции; $k_{\text{мз}}^0 = 1$.

С учетом (14), функции распределения во времени абсолютной, относительной и приведенной основных погрешностей примут, соответственно, вид

$$\Delta_x(t_x) = e(\Delta_{\text{нд}} - \Delta_{x0})(t_x/T_{\text{но}})^{k_{\text{ф}}} \exp\left(-(t_x/T_{\text{но}})^{k_{\text{ф}}}\right) + \Delta_{x0}; \quad (15)$$

$$\gamma_x(t_x) = e(\gamma_{\text{нд}} - \gamma_{x0})(t_x/T_{\text{но}})^{k_{\text{ф}}} \exp\left(-(t_x/T_{\text{но}})^{k_{\text{ф}}}\right) + \gamma_{x0}; \quad (16)$$

$$\delta_x(t_x) = e(\delta_{\text{нд}} - \delta_{x0})(t_x/T_{\text{но}})^{k_{\text{ф}}} \exp\left(-(t_x/T_{\text{но}})^{k_{\text{ф}}}\right) + \delta_{x0}, \quad (17)$$

где $\Delta_{\text{нд}}$, $\gamma_{\text{нд}}$ или $\delta_{\text{нд}}$ – нормированная по значению доверительная граница интервала неопределенности, в которых с заданной вероятностью P находится, соответственно, абсолютная, относительная или приведенная погрешности результата измерений; $\Delta_{x0} = \overline{\Delta_{x0}(t_{x0})}$, $\gamma_{x0} = \overline{\gamma_{x0}(t_{x0})}$ и $\delta_{x0} = \overline{\delta_{x0}(t_{x0})}$ – смещение функции распределения, которое представляет собой, соответственно, абсолютную, относительную или приведенную погрешность результата многократных измерений нормированной по значению ФВ x_0 в момент времени t_{x0}.

Двупараметровая метрологическая функция распределения Кондратова–Вейбулла (14) может быть представлена, например, с указанием интервала неопределенности непосредственно в уравнении величин (при постоянном значении показателя формы) в виде

$$\xi_x(t_x / T_{\text{но}}) = S_\xi \left(\frac{t_x}{T_{\text{но}} + \begin{cases} -\Delta T_{\text{нон}} \\ +\Delta T_{\text{нов}} \end{cases}} \right)^{k_{\text{ф}}} \exp\left(-\left(\frac{t_x}{T_{\text{но}} + \begin{cases} -\Delta T_{\text{нон}} \\ +\Delta T_{\text{нов}} \end{cases}} \right)^{k_{\text{ф}}} \right) + \xi_{x0} + \begin{cases} +\Delta\xi_{x\text{в}} \\ -\Delta\xi_{x\text{н}}, \end{cases} \quad (18)$$

где $+\Delta T_{\text{нов}}$ и $+\Delta\xi_{x\text{в}}$ – соответственно, верхние границы приращения времени наработки на отказ и погрешности результата измерений; $-\Delta T_{\text{нон}}$ и $-\Delta\xi_{x\text{н}}$ – соответственно, нижние границы приращения времени наработки на отказ и погрешности результата измерений.

Метрологические функции распределения используются для определения параметров метрологической надежности СИТ, например, времени наработки на отказ, с прогнозируемой погрешностью измерений.

Для решения проблемы работы с метрологическими функциями, метрологическими и приближенными числами в настоящее время разрабатывается аппроксиметическая вычислительная технология, которая включает в себя следующие направления исследований [12]:

1. Сведение всех метрологических чисел к приближенным числам по определенной процедуре.

2. Установление однозначной связи между приближенными числами и новым объектом теоретической математики – аппроксиметом [13]. Аппроксимет – фундаментальный числовой объект теоретической математики такой же, как целое, рациональное или действительное число.

3. Разработка теоретической математики аппроксиметов – теории аппроксиметических множеств, аппроксиметической алгебры, теории функций аппроксиметических переменных, аппроксиметической топологии и геометрии с использованием накопленного опыта работы с приближенными числами.

4. Разработка, на основе теоретической математики аппроксиметов, компьютерных технологий обработки аппроксиметов (форматов их представления, алгоритмов обработки и т. д.).

5. Создание процедур ввода метрологических чисел в компьютер в человекочитаемом формате и формате автоматического ввода, преобразования в аппроксиметы, преобразования аппроксиметов в метрологические числа и представления результатов обработки на дисплее.

6. Создание симуляторов аппроксиметического процессора в программном виде и специальных микропроцессоров, осуществляющих аппроксиметическую обработку нецелых данных.

7. Создание микропроцессоров аппроксиметической обработки данных для использования их в разнообразных системах управления.

8. Создание или модернизация языков программирования и операционных систем для работы с метрологическими данными.

9. Разработка основного программного обеспечения по обработке метрологических данных.

10. Создание или модернизация пользовательских программ обработки метрологических данных.

Согласно [12–14], на сегодня уже разработана теоретическая математика аппроксиметов, написана монография и учебник; разработаны алгоритмы аппроксиметической обработки метрологических данных на компьютере; создана бета-вер-сия программного аппроксиметического калькулятора на шесть действий арифметики, поскольку в аппроксиметике используется не четыре арифметических действия, а шесть – сложение, вычитание, умножение и деление аппроксиметов, умножение аппроксимета на целое число и возведение аппроксимета в целую степень. Необходимо создать еще метрологическое обеспечение разработанных прикладных программ обработки метрологических чисел.

Таким образом, существуют все предпосылки для создания современной компьютерной технологии работы с метрологическими и приближенными числами, процессоров для решения метрологических задач, задач оценивания метрологической надежности СИТ и качества выпускаемой продукции. Для этого необходимо объединить усилия ученых и специалистов в области метрологии, информатики и вычислительной технике.

Выводы

Развитие теории и методов избыточных измерений, а также теории метрологической надежности СИТ стало предпосылкой широкому использованию метрологических чисел и метрологических функций для решения широкого круга теоретических и практических задач.

Приведены формы представления, основные понятия и определения метрологическим числам и функциям, что дало возможность подтвердить их многообразие и важность проблемы работы с метрологическими числами.

Существует острая необходимость в создании математического аппарата, программных и технических средств автоматической обработки метрологических чисел для обеспечения корректного решения метрологических задач, задач метрологической надежности СИТ и оценки качества продукции.

Большое разнообразие законов распределения погрешностей обуславливает практическую сложность определения доверительных значений погрешностей, следовательно, достоверных значений метрологических чисел, так как необходимо иметь таблицы квантилей для всех разновидностей распределений. Математики пока не в состоянии представить метрологам таблицы квантилей для указанного разнообразия законов распределения.

Установлено, что одной из проблем метрологии, информатики и вычислительной техники является проблема работы с метрологическими числами: проблема автоматического ввода-вывода метрологических чисел в микропроцессор, их автоматическая обработка в соответствии со специальным прикладным программным обеспечением и метрологическое обеспечение последнего.

Объединение усилий ученых и специалистов в области метрологии, информатики и вычислительной технике обеспечит решение проблемы работы с метрологическими числами и даст возможность осуществить новый прорыв в научном и прецизионном приборостроении.

1. *Кондратов В.Т.* Стратегічна теорія XXI століття // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – № 2. – С. 11–16.
2. *Кондратов В.Т.* Теория избыточных измерений // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 1. – С. 7–24.
3. *Кондратов В.Т.* Теория избыточных измерений /В сб. докладов междунар. науч.-техн. конф. „Метрологическое обеспечение измерительных систем”; Под ред. А.А.Данилова. – Пенза, 2005. – С. 191–210.

4. *Кондратов В.Т.* Методы избыточных измерений: определения и классификация // Науч. тр. IX междунар. НТК „Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики": Дополнительный сб. – М.: МГПИ, 2006. – С. 42–57.
5. *Кондратов В.Т.* Классификация методов избыточных измерений // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2006. – № 2. – С. 7–17.
6. *Кондратов В.Т.* Теория избыточных измерений и ее структура // Науч. тр. X Юбилейной междунар. НТК „Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики": Приборостроение. – М.: МГПИ, 2007. – С. 143–150.
7. *Кондратов В.Т.* Классификацмя математических моделей избыточных измерений физических величин // Там же – С. 127–134.
8. *Кондратов В.Т.* Математические модели избыточных измерений I, II и III родов // Там же – С. 134–141.
9. *Кондратов В.Т., Сахнюк И.А.* Особенности и состояние проблемы метрологической надежности средств измерений // Украинский метрологический журнал. – 2007. – № 2. – С. 10–14.
10. *Кондратов В.Т.* Теория метрологической надежности: функция распределения Кондратова – Вейбулла // Вісн. Хмельницького нац. ун-ту. Сер. Технічні науки. – 2008. – № 3. – С. 101–113.
11. *Кондратов В.Т.* Теория метрологической надежности: функция распределения Кондратова–Коши // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 1. – С. 23–31.
12. *Юровицкий В.М.* Компьютерная катастрофа приближается. Третья вычислительная революция / Интернет. http: // www.Ibe.ru/cgi–bin/href/Yurovitsky? 171. – С. 8.
13. http://www.computerra.ru/exclusive/15.html.
14. *Метрологическое* обеспечение качества текстильных материалов и товаров: Методические указания к лабораторным работам по курсам „Общая теория измерений", „Метрология, стандартизация и сертификация". – Иваново 2004. – 30 с.
15. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.

Получено 09.07.2008