

УДК 006.91:681.2+531.7.08

# ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИОННОГО АНАЛИЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

## GRAPHIC-ANALYTICAL METHOD OF ESTIMATION ERROR OF MEASUREMENTS BASED ON DECOMPOSITION ANALYSIS MEASURING CIRCUITS

**В. Л. Соломахо,**

директор Республиканского института инновационных технологий БНТУ, д-р техн. наук, профессор

**С. С. Соколовский,**

доцент кафедры «Стандартизация, метрология и информационные системы» БНТУ, канд. техн. наук, доцент

**V. Solomakho,**

Director of the Republican Institute of Innovative Technologies of the BNTU, Doctor of Technical Sciences, Professor

**S. Sokolovsky,**

Associate Professor of the Department "Standardization, Metrology and Information Systems" of the BNTU, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Дата поступления в редакцию — 09.01.2017 г.

Представленная методика позволяет провести комплексную оценку инструментальной составляющей погрешности измерения путем выделения и структурирования элементарных источников погрешности исходя из принятой метрологической модели методики выполнения измерений.

Presented methodology enables to conduct complex evaluation of instrumental error by structuring the elementary error sources in accordance with the metrological model of measurement procedure.

Ключевые слова: метод, модель, моделирование, объект, погрешность, измерение, анализ.

Keywords: method, model, modeling, object, error, measurement, analysis.

Одним из наиболее эффективных подходов к исследованию и оцениванию погрешностей измерений может быть признан графоаналитический метод, который в ряде случаев является единственно возможным путем достижения цели: при решении задач проектирования методик выполнения измерений (МВИ), сопоставлении конкурирующих вариантов МВИ, проведении метрологической экспертизы средств измерений (СИ) и др. [1–4]. При применении

графоаналитического метода возникает необходимость создания и использования метрологических моделей различных объектов, а именно: объекта измерений как основного объекта моделирования, контролируемого параметра, СИ и вспомогательного оборудования, объединенных в единое комплексное измерительное средство. При метрологическом моделировании может учитываться также влияние условий измерений, а в определенных случаях и некоторые

действия оператора, неидеальность которых способна приводить к возникновению соответствующих погрешностей, влияющих на результаты измерений.

Построение метрологической модели позволяет реализовать общий подход к решению задачи оценивания погрешностей средств измерений, заключающийся в представлении (с использованием аналитических, графических либо графоаналитических методов) процессов преобразования измерительной информации в измерительной цепи исследуемого комплексного измерительного средства (КИС) с учетом факторов, искажающих эту информацию.

По сути, процедура сводится к декомпозиционному анализу измерительных цепей, то есть структурированию каждого исследуемого КИС в виде некоторой иерархической информационной пирамиды. Это позволяет в систематизированном виде отобразить процесс преобразования измерительной информации и вклад в формирование инструментальной погрешности тех элементов конструкции КИС, которые участвуют в реализации данного процесса. Смысл такого структурирования состоит в проведении функционального анализа рассматриваемого

средства измерений с дальнейшим последовательным пошаговым разложением (декомпозицией) его измерительной цепи на составные части или элементы, задействуемые в процессе измерительного преобразования и выстраивании их в некоторую систему функционально взаимосвязанных и взаимообусловленных элементов. Дальнейшее использование такой пирамиды предполагает функциональное моделирование входящих в нее элементов, выделение возможных отклонений реальных элементов от построенных функциональных моделей и определение механизмов их влияния на конечный результат.

Весь процесс такого моделирования и исследования погрешностей средства измерений может быть представлен в виде укрупненной блок-схемы (рис. 1).

Рассмотрим реализацию приведенной блок-схемы на примере оценивания погрешности одного из измерительных каналов, входящих в структуру измерительной системы, предназначенной для измерения деформаций сложных строительных конструкций. Измерительная информация в рассматриваемом примере формируется индуктивным преобразователем перемещений.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма оценивания инструментальной погрешности КИС

Перечень деталей (элементов) конструкции, входящих в структуру измерительного канала

№ п/п	Наименование функционального элемента КИС	№ позиции детали в соответствии с функциональной метрологической схемой КИС
1.	Первичный измерительный преобразователь трансформаторного типа, включающий: <ul style="list-style-type: none"> <li>- корпус преобразователя;</li> <li>- статор преобразователя (реализующий принцип дифференциального трансформатора);</li> <li>- якорь преобразователя;</li> <li>- шток измерительный;</li> <li>- державку</li> </ul>	7 5 6 3 1
2.	Модуль базирования корпуса преобразователя, включающий: <ul style="list-style-type: none"> <li>- втулку базирующую;</li> <li>- стойку крепления корпуса</li> </ul>	4 8
3.	Модуль базирования штока измерительного, включающий: <ul style="list-style-type: none"> <li>- стойку крепления;</li> <li>- втулку установочную</li> </ul>	9 2

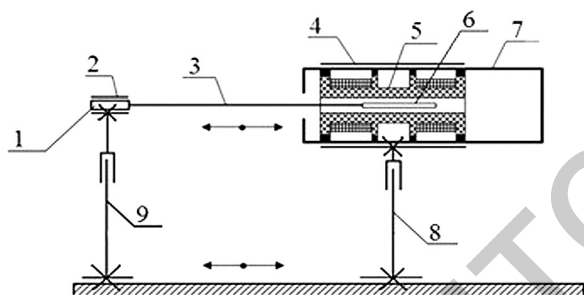


Рис. 2. Функциональная схема измерительного канала:

- 1 — державка,
- 2 — втулка установочная,
- 3 — шток измерительный,
- 4 — втулка базирующая,
- 5 — статор преобразователя (реализующий принцип дифференциального трансформатора),
- 6 — якорь преобразователя,
- 7 — корпус преобразователя,
- 8 — стойка крепления корпуса,
- 9 — стойка крепления

Функциональная схема исследуемого измерительного канала представлена на рис. 2. Принцип использования КИС для мониторинга строительных конструкций изложен в работе [5].

На первом этапе реализации алгоритма путем проведения функциональной экспертизы измерительного канала выполняется детальная

декомпозиция его элементов, результаты которой представляются, как правило, в табличной (см. таблицу) или графической форме. Такой подход позволяет выделить отдельные детали конструкции (механической ее части), их элементы, а также соединения деталей, которые создают базу для построения иерархической информационной пирамиды. Неидеальность выполнения отдельных элементов, формирующих пирамиду, обуславливает наличие источников инструментальной погрешности измерения.

На втором этапе, на основании проведенного анализа в целях выделения источников первичных (элементарных) инструментальных погрешностей и определения механизмов их проявления, строится иерархическая информационная пирамида, представленная на рис. 3.

После проведения процедуры выделения элементарных составляющих инструментальной погрешности по методике, изложенной в работах [6–7], производится оценка уровня их значимости экспертным методом. Мало влияющие источники погрешности на этом этапе исключаются. Не исключенные погрешности оцениваются графоаналитическим методом. С этой целью проводится графическая интерпретация механизмов их возникновения, строятся расчетные схемы и устанавливаются аналитические зависимости для их количественной оценки.

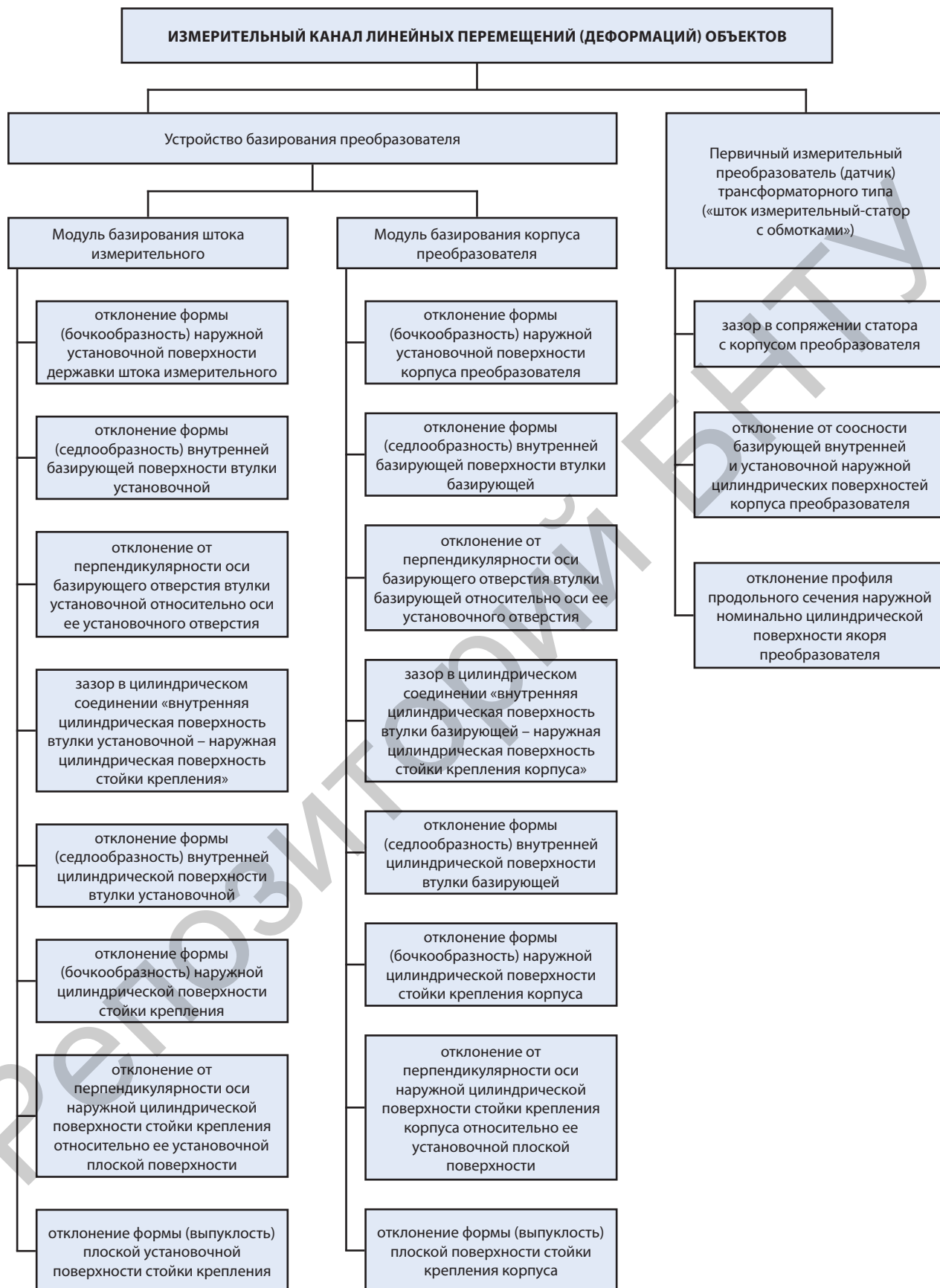
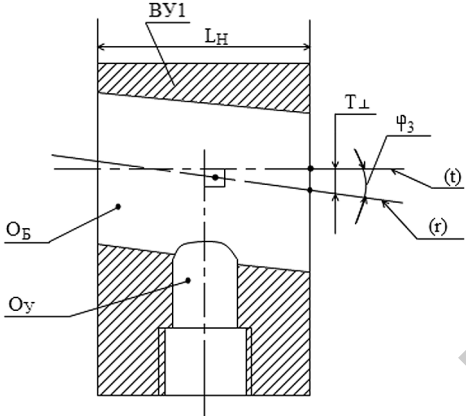
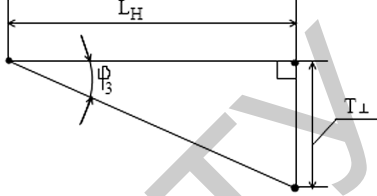
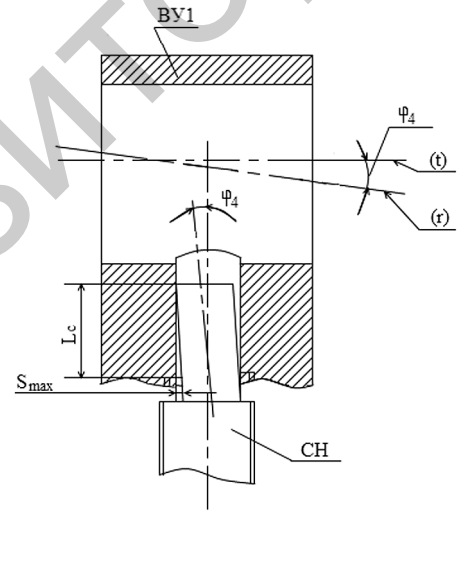
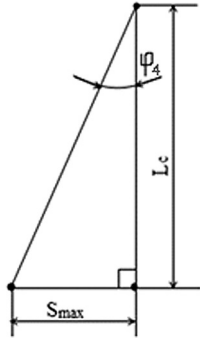
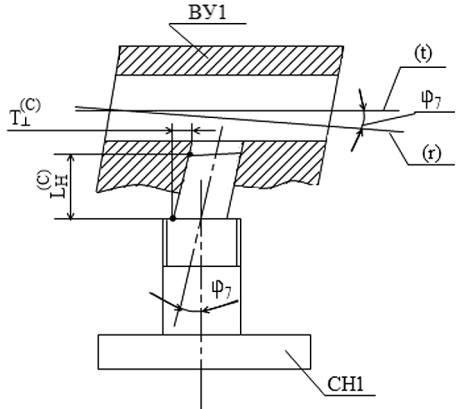
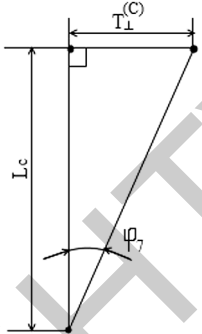


Рис. 3. Моделирование измерительного канала в виде иерархической информационной пирамиды

Для рассматриваемого выше примера данная информация может быть представлена, например, следующим образом:

Источники элементарных (первичных) инструментальных погрешностей	Графическая интерпретация механизма возникновения составляющей инструментальной погрешности	Расчетная схема и аналитическое моделирование составляющей инструментальной погрешности
<p>Отклонение формы (бочкообразность) наружной установочной поверхности державки штока измерительного (<math>\Delta_{И1}</math>)</p>		$T_{=}^{(Д)} = \frac{\bar{L}_B^{(Д)}}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1$ $\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot T_{=}^{(Д)}}{\bar{L}_B^{(Д)}}$ $\Delta_{И1} = \Delta_{xt} \left( \frac{1}{\cos \varphi_1} - 1 \right)$
<p>Принятые обозначения:                  ШИ — шток измерительный;                  ВУ1 — втулка установочная, предназначенная для хранения измерительного штока;                  Д — державка измерительного штока;  <math>\bar{L}_B^{(Д)}</math> — протяженность (длина) наружной установочной поверхности державки;  <math>T_{=}^{(Д)}</math> — допуск профиля продольного сечения наружной установочной поверхности державки;                  (t) — теоретическое направление линии измерения;                  (r) — реализуемое направление линии измерения;  <math>\varphi_1</math> — угловое отклонение реализуемого направления линии измерения от теоретического ее направления, возникающее из-за проявления источника <math>T_{=}^{(Д)}</math></p>		
<p>Отклонение формы (седлообразность) внутренней базирующей поверхности втулки установочной (<math>\Delta_{И2}</math>)</p>		$T_{=}^{(В)} = \frac{\bar{L}_B^{(В)}}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi_2$ $\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot T_{=}^{(В)}}{\bar{L}_B^{(В)}}$ $\Delta_{И2} = \Delta_{xt} \left( \frac{1}{\cos \varphi_2} - 1 \right)$
<p>Принятые обозначения:  <math>\bar{L}_B^{(В)}</math> — протяженность (длина) внутренней базирующей поверхности втулки установочной;  <math>T_{=}^{(В)}</math> — отклонение профиля продольного сечения внутренней базирующей поверхности втулки установочной;  <math>\varphi_2</math> — угловое отклонение реализуемого направления линии измерения от теоретического ее направления, возникающее из-за проявления источника <math>T_{=}^{(В)}</math></p>		

Источники элементарных (первичных) инструментальных погрешностей	Графическая интерпретация механизма возникновения составляющей инструментальной погрешности	Расчетная схема и аналитическое моделирование составляющей инструментальной погрешности
<p>Отклонение от перпендикулярности оси базировочного отверстия втулки установочной относительно оси ее установочного отверстия (<math>\Delta_{И3}</math>)</p>		 $T_{\perp} = \frac{\bar{L}_H}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi_3$ $\varphi_3 = \operatorname{arctg} \frac{T_{\perp}}{\bar{L}_H}$ $\Delta_{И3} = \Delta_{xt} \left( \frac{1}{\cos \varphi_3} - 1 \right)$
<p>Принятые обозначения:  <math>O_{\text{Б}}</math> — базировочное отверстие установочной втулки;  <math>O_{\text{У}}</math> — установочное отверстие установочной втулки;  <math>L_{\text{Н}}</math> — протяженность (длина) базировочного отверстия;  <math>T_{\perp}</math> — допуск перпендикулярности оси базировочного отверстия относительно оси установочного отверстия втулки;  <math>\varphi_3</math> — угловое отклонение реализуемого направления линии измерения от теоретического ее направления, возникающее из-за проявления источника <math>T_{\perp}</math></p>		
<p>Зазор в цилиндрическом соединении «внутренняя цилиндрическая поверхность втулки установочной — наружная цилиндрическая поверхность стойки крепления» (<math>\Delta_{И4}</math>)</p>		 $S_{\max} = \bar{L}_c \cdot \operatorname{tg} \varphi_4$ $\varphi_4 = \operatorname{arctg} \frac{S_{\max}}{\bar{L}_c}$ $\Delta_{И4} = \Delta_{xt} \left( \frac{1}{\cos \varphi_4} - 1 \right)$
<p>Принятые обозначения:  <math>СН</math> — стойка крепления измерительного штока (стойка несущая);  <math>L_{\text{С}}</math> — длина сопряжения установочной втулки со стойкой крепления измерительного штока;  <math>S_{\max}</math> — наибольший предельный зазор в сопряжении;  <math>\varphi_4</math> — угловое отклонение реализуемого направления линии измерения от теоретического ее направления, возникающее из-за проявления источника <math>S_{\max}</math></p>		

Источники элементарных (первичных) инструментальных погрешностей	Графическая интерпретация механизма возникновения составляющей инструментальной погрешности	Расчетная схема и аналитическое моделирование составляющей инструментальной погрешности
<p>Отклонение от перпендикулярности оси наружной цилиндрической поверхности стойки крепления, относительно ее установочной плоской поверхности (<math>\Delta_{И7}</math>)</p>		 $T_{\perp} = \frac{\bar{L}_H}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi_7$ $\varphi_7 = \operatorname{arctg} \frac{T_{\perp}}{\bar{L}_H}$ $\Delta_{И7} = \Delta_{xt} \left( \frac{1}{\cos \varphi_7} - 1 \right)$
<p>Принятые обозначения:  <math>L_H^{(C)}</math> — протяженность (длина) наружной цилиндрической поверхности стойки крепления измерительного штока;  <math>T_{\perp}^{(C)}</math> — допуск перпендикулярности оси наружной цилиндрической поверхности стойки крепления измерительного штока относительно ее установочной нижней плоской поверхности;  <math>\varphi_7</math> — угловое отклонение реализуемого направления линии измерения от теоретического ее направления, возникающее из-за проявления источника <math>T_{\perp}^{(C)}</math></p>		

Аналогично рассчитываются остальные элементарные составляющие инструментальной погрешности измерений.

На основании полученных результатов интегральную оценку инструментальной погрешности КИС можно получить путем комплексирования элементарных оценок с учетом вероятностного характера их проявления, используя следующую аналитическую модель:

$$\Delta_{И\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n k_i^2 \Delta_{Иi}^2},$$

где  $\Delta_{И\Sigma}$  — суммарная инструментальная погрешность КИС;  $\Delta_{Иi}$  — элементарная составляющая инструментальной погрешности КИС;  $k_i$  — коэффициент относительного рассеяния,

учитывающий степень отличия от нормального распределения  $i$ -го элементарного источника погрешности.

Коэффициенты  $k_i$  вводятся только при числе составляющих звеньев менее шести, при большем же количестве таких звеньев (как в рассматриваемом примере) этот коэффициент можно не учитывать [8]. Тогда окончательное выражение для комплексирования оценок элементарных (первичных) инструментальных погрешностей примет вид:

$$\Delta_{И\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{Иi}^2}.$$

Проведенная практическая апробация данной методики расчета демонстрирует высокую

эффективность применения метрологического моделирования при оценке погрешностей средств измерений. Использование при этом модели средства измерения в виде иерархической информационной пирамиды позволяет реализовать системный подход к исследованию источников инструментальной погрешности, что гарантирует выделение всех значимых элементарных составляющих погрешности, облегчает их аналитическое описание и, соответственно, количественное оценивание.

#### Литература:

1. Серенков, П. С. Методы менеджмента качества. Проектирование норм точности / П. С. Серенков, Ю. Б. Слесивцева. — Минск: ИВЦ Минфина, 2009. — 334 с.
2. Соколовский, С. С. Метрологическое моделирование как основа проектирования и реализации методик выполнения измерений / С. С. Соколовский, Д. В. Соломахо, Б. В. Цитович // Приборы и методы измерений. — 2010. — № 1. — С. 147–152.
3. Соколовский, С. С. Классификация метрологических моделей / С. С. Соколовский, Д. В. Соломахо, Е. А. Герман // Материалы 8 МНТК «Наука — образованию, производству, экономике — 2010». — Минск: БНТУ, 2010. — С. 341.
4. Соломахо, В. Л. Теория, расчет и проектирование оптимизированных методик координатного контроля в машиностроении / В. Л. Соломахо, Б. В. Цитович, С. С. Соколовский, Д. В. Соломахо. — Минск: БНТУ, 2012. — 239 с.
5. Соломахо, В. Л. Инструментальная поддержка метрологического обеспечения систем мониторинга автомобильных и железнодорожных мостов // В. Л. Соломахо, С. С. Соколовский, В. А. Шапарь, Д. В. Соломахо // Новости науки и технологий. — 2015. — № 4. — С. 3–8.
6. Кершенбаум, В. Я. Решение задач квалитрии в машиностроении / В. Я. Кершенбаум, Р. М. Хвастунов. — М.: АНО «Технонефтегаз», 2001.
7. Соколовский, С. С. Методы менеджмента качества. Квалитрия: Учебно-методическое пособие / С. С. Соколовский. — Минск: БНТУ, 2008. — 160 с.
8. Мягков, В. Д. Допуски и посадки: Справочник в 2-х томах. Т. 2. / В. Д. Мягков, М. А. Палей // — Л.: Машиностроение, 1983. — С. 36.