

УДК 621.791

**П.С. Серенков, канд. техн. наук, доц., В.Л. Соломахо, д-р техн. наук, проф.,
М.Г. Киселев, д-р техн. наук, проф.**

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ «СТРУКТУРИРОВАНИЯ ФУНКЦИИ КАЧЕСТВА» ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НОРМ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ТИПА

В статье рассматриваются вопросы создания методики «сквозного» проектирования норм точности (допусков) изделий механического типа. Исходным является техническое задание на изделие (допустимый диапазон значений параметров изделия), конечным этапом – рабочая документация (требование к точности отдельных элементов). Отличительной особенностью методики является системный и комплексный подходы к процедуре проектирования, что обеспечивает ее объективность и доказательность, а также возможность широкого применения на промышленных предприятиях Республики Беларусь.

Введение

Современные тенденции и темпы развития приборостроения и машиностроения ставят все новые, более жесткие требования к показателям качества выпускаемых промышленностью изделий разнообразного назначения. Каждое изделие при разработке технического задания характеризуется целым рядом требований, среди которых важное место занимают показатели качества.

Современный подход к менеджменту качества предполагает комплексное решение задач планирования, обеспечения, управления и улучшения качества продукции. «Дефекты дешевле предотвратить, нежели потом исправлять», - основной принцип разработки современных систем качества. Известно, что «львиная доля» качества формируется именно на начальных этапах жизненного цикла продукции.

Таким образом, требования к качеству продукции определяются и обеспечиваются уже на допроизводственных этапах. Системный подход к разработке и проектированию изделий механического типа предполагает три основных стадии [1].

1. Проектирование идеологии изделия – System Design.
2. Проектирование параметров – Parameter Design.
3. Проектирование допусков – Tolerance Design.

Главной задачей при проектировании изделий является обеспечение на стадии разработки заданной точности функционирования. Проектирование сопряжено с принятием множества решений, связанных с точностью функционирования отдельных элементов и изделия в целом. Очевидно, что для ее обеспечения одного конструкторского опыта недостаточно: необходимы навыки и широкие знания в области теории механизмов, линейной теории точности, квалиметрии, математической статистики и теории вероятности.

Решение задачи осложняется и потому, что изделия различны по применению заложенных в них физических принципов, по конструкции и назначению. Но при всем разнообразии изделия обладают некоторыми общими признаками, что открывает возможность разработки общей обоснованной методики проектирования.

Однако анализ практических наработок и свидетельства целого ряда специалистов показали, что третья стадия – проектирование допусков или проектирование норм точности – методически и практически проработана недостаточно [1].

В СССР существовало несколько научных школ, занимающихся в той или иной мере этой проблемой [2...9]. Наиболее близко с позиций системности, комплексности и универсальности является подход В. В. Кулагина, формализующий проектирование допусков при разработке оптико-механических средств измерения с заданными показате-

лями точности [2]. Заслуживают внимание методики проектирования допусков параметрических цепей в машиностроении [6].

Следует отметить, что существующие методики обеспечения функциональной точности требуют сегодня существенной переработки, т.е. необходима их адаптация к современному уровню технического прогресса.

В Белорусском национальном техническом университете разработана методика проектирования норм точности, которая соответствует современным требованиям обеспечения качества средств измерения, реализует системный подход Quality Function Deployment (QFD) «структурирование функции качества» [1]. Методика с учетом накопленного опыта обеспечивает «сквозное» проектирование норм точности, т.е. от технического задания на изделие (допустимый диапазон значений функциональных, эксплуатационных и других параметров) до рабочих чертежей деталей и сборочных единиц (требование к точности отдельных элементов).

Методика проектирования норм точности основывается на положениях линейной теории точности, основное уравнение которой имеет вид [2]:

$$uy_{\Sigma} = uy_{теор} + \sum C_s \cdot iq_s \quad (1)$$

где $uy_{теор}$ - теоретическая неопределенность; C_s - коэффициенты влияния первичных неопределенностей; iq_s - первичные неопределенности параметров; uy_{Σ} - суммарная прогнозируемая неопределенность.

Примечание - В соответствии с современными подходами в предлагаемой методике проектирования норм точности вводится понятие *неопределенности* вместо *погрешности*. Это позволяет применять рекомендации [10] при решении задачи комплексирования параметров проектируемых средств измерения.

В линейной теории точности для решения задач проектирования норм точности практическую ценность представляют два основных принципа:

1) принцип независимости действия неопределенностей, который заключается в том, что все действующие неопределенности являются независимыми, т.е. значение одной из неопределенностей не определяет значений остальных;

2) принцип суперпозиции действующих неопределенностей, который заключается в том, что суммарное воздействие на выходную величину всех неопределенностей равно сумме воздействий каждой из действующих неопределенностей с учетом ее коэффициента влияния.

Уравнение (1) и принципы линейной теории точности составляют доказательную основу разработанной методики.

Структуризация объекта проектирования как информационной «пирамиды»

Отличительной особенностью и идеологической основой методики является «послойная» структуризация объекта проектирования (изделия механического типа) в виде иерархической информационной «пирамиды» (рис. 1). Процедура распределения комплексного показателя качества изделия (И) в виде допускаемого диапазона рассеяния $P \pm U$ в соответствии с иерархией его структуры (ФУ – функциональные устройства, КЦ – конструктивные цепи, СД – соединения деталей, Д – детали) и называется процедурой проектирования норм точности.

Примечание - P – номинальное значение показателя качества изделия; U – расширенная неопределенность показателя качества.

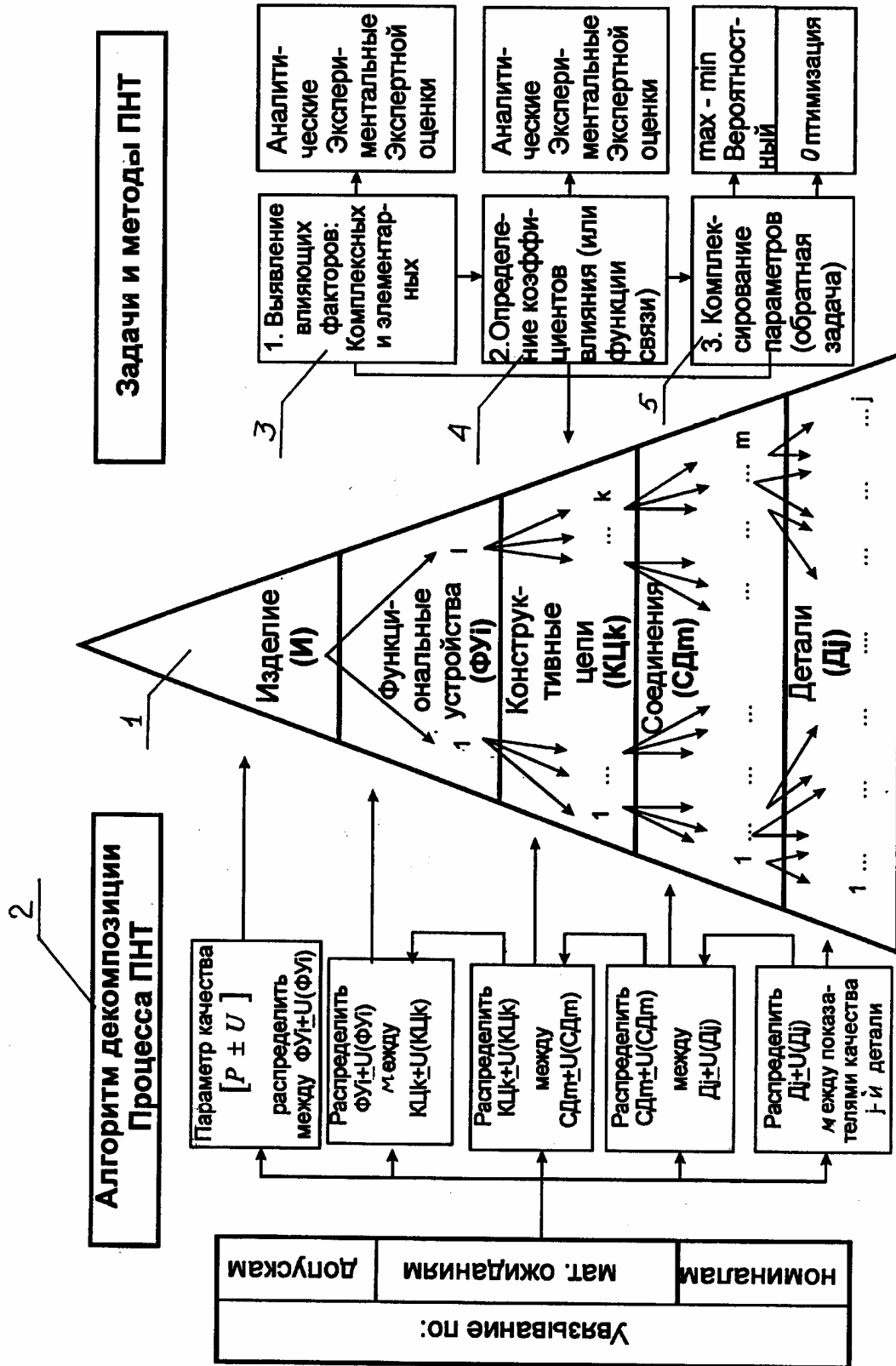


Рис. 1. Информационная «пирамида» изделия как основа развертывания функции качества (QFD)

Проектирование норм точности - это процесс проведения проектировочных расчетов параметрических цепей (в том числе и размерных), в результате которых заданный комплексный диапазон рассеяния каждого из параметров, определяющих работоспособность изделия или его составных частей, оптимально распределяется между всеми составляющими в виде частных диапазонов рассеяния или норм точности.

Методика проектирования норм точности включает в себя комплекс алгоритмов-методик:

- структуризации данных о качестве (рис. 1, поз. 1);
- рациональному распределению показателей качества изделия между его структурными элементами для различных уровней иерархии пирамиды (рис. 1, поз. 2);
- явлению и классифицированию влияющих факторов на каждом уровне (рис. 1, поз. 3);
- оценки их коэффициентов влияния (рис. 1, поз. 4);
- комплексированию приведенных неопределенностей (рис. 1, поз. 5).

Методология системного подхода к проектированию норм точности и соответствующая методика построены на следующих принципах.

1. Принцип функциональной декомпозиции.

Всякое контрольное приспособление как сложное изделие можно расчленить на более простые составляющие элементы, вплоть до деталей, которые будут обладать следующими свойствами: функциональной автономностью; взаимно «поглощаться» друг другом.

2. Модульный принцип формирования информационной «пирамиды» проектируемого изделия.

Всякое изделие, в том числе средство измерения, можно представить в виде структурной иерархической «пирамиды», как некоторый наделенный показателями качества формализованный объект. Этот принцип позволяет разделить процесс назначения норм точности на ряд параллельных и независимых процессов (модулей), имеющих общие алгоритмы решения задач, но различные методы.

3. Системность, предполагающая, что объект и процедура проектирования норм точности построены как система со строгой последовательностью и взаимодействием элементов на каждом «слое» информационной «пирамиды».

4. Проектирование норм точности необходимо рассматривать в комплексе с первой (проектирование идеологии изделия) и второй (проектирование параметров) стадиями системного подхода к проектированию.

Весь процесс проектирования норм точности (ПНТ) можно разбить на последовательное решение трех основных задач (см. рис. 1):

- 1) выявление влияющих факторов (комплексных и элементарных);
- 2) определение коэффициентов влияния или функциональной зависимости между факторами;
- 3) комплексирование параметров.

Первая задача ПНТ - выявление влияющих факторов

Процесс нахождения действующих неопределенностей включает два этапа.

1. Выявление всех без исключения источников потенциальных неопределенностей.
2. Идентификация среди них действующих неопределенностей.

Первая задача самая сложная и ответственная во всей методике проектирования норм точности. В настоящее время существует два подхода к решению этой задачи: полностью формализованный подход; подход, основанный только на экспертных оценках.

Формализованный подход к реализации первого этапа – выявления источников неопределенностей – может быть представлен методом Н.Г. Бруевича [4]; второго этапа –

идентификации действующих неопределенностей – методом Н.А. Калашникова [2]. Подход, основанный на экспертных оценках, может быть представлен наряду с традиционными методами экспертных оценок методом матриц влияния В.В. Кулагина [2] (рис. 2).

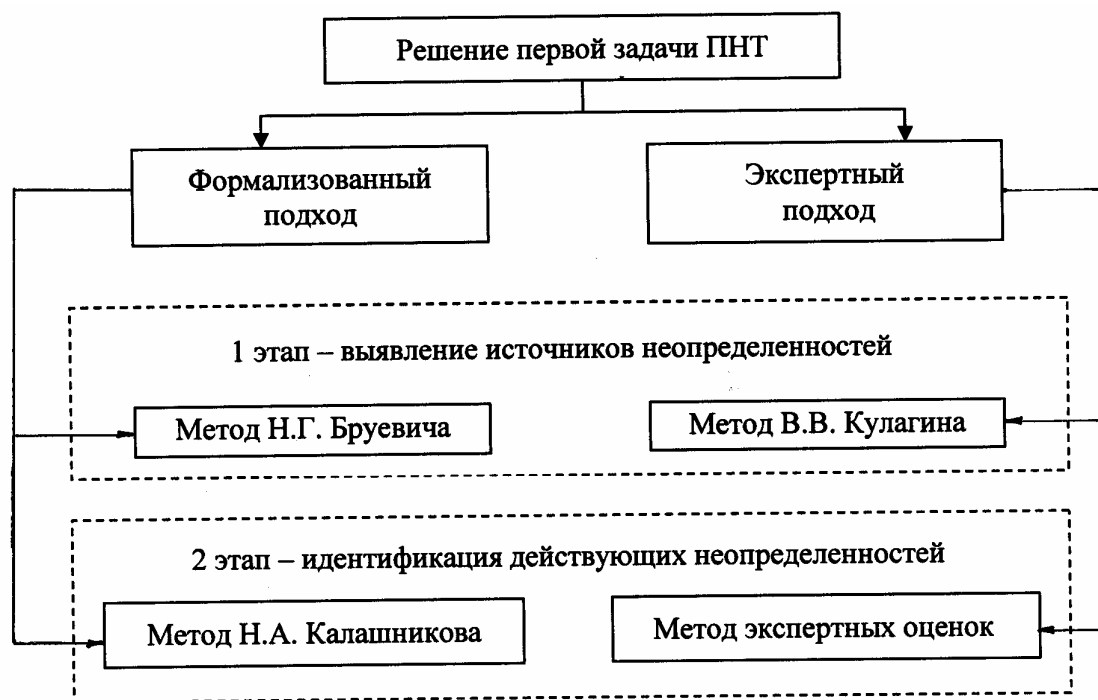


Рис. 2. Схема и методы решения первой задачи проектирования норм точности средств измерения

В предлагаемой методике проектирования норм точности на доказательной основе приводится обоснование количества уровней информационной «пирамиды» изделия механического типа, а также разработан формализованный подход к процедуре идентификации действующих неопределенностей норм точности на всех уровнях информационной «пирамиды» (рис. 3).

Вторая задача ПНТ – определение функции связи

Вторая задача опирается на основное уравнение линейной теории точности (1), где связь между результирующей и первичными неопределенностями представляется в виде полинома первой степени, т.е. задача нахождения функции связи сводится к определению коэффициентов влияния действующих неопределенностей.

Все возможные способы решения второй задачи основываются на двух принципиально различных подходах: кинематическом и силовом [2...9]. В первом случае определяющими являются: геометрические особенности построения механизма, вся совокупность геометрических связей между его звеньями, обеспечивающая их относительное взаимное расположение. При силовом подходе в дополнение к учёту совокупности геометрических связей рассматриваются силовые воздействия, обеспечивающие движение механизма, что связано с преодолением внутренних сопротивлений и выполнением полезной работы.

В разработанной методике проектирования норм точности приведены рекомендации по выбору наиболее рациональных методов определения коэффициентов влияния для каждого уровня информационной «пирамиды» изделия типа «средство измерения».

1. Изделие	И		
2. Функциональные устройства	ФУ		$U\varphi^x = \begin{matrix} 1. \text{ Собственная кинематическая неопределенность функционирования} \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} + \begin{matrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \left. \vphantom{\begin{matrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix}} \right\} \text{частные неопределенности функционирования}$
3. Конструктивные цепи	КЦ		
4. Соединения	СД		
5. Детали	Д		

Рис. 3. Обоснование количества уровней информационной пирамиды изделия и источников действующих неопределенностей

Третья задача ПНТ – комплексирование параметров

Под комплексированием будем понимать процедуру решения прямой или обратной задач параметрических цепей.

Прямая задача заключается в том, чтобы, зная результат (допускаемое значение результирующей неопределенности положения или перемещения рабочего элемента), распределить его между составляющими. Данная задача достаточно сложна, именно ее решение ищут в ходе проектирования норм точности. Обратная задача состоит в том, чтобы, зная значения составляющих, определить результирующий показатель качества. Решение данной задачи тривиально однозначно и относится к категории анализа.

Комплексирование случайных неопределенностей [2, 6] возможно двумя способами:

- 1) методом максимума и минимума;
- 2) вероятностным методом.

Выбор метода зависит от некоторых факторов, среди которых главным является степень риска и знание вероятностных характеристик первичных неопределенностей

как случайных величин.

Решение задачи комплексирования параметров цепи как случайных величин выглядит следующим образом:

- увязывание по номинальным значениям

$$A_{\Sigma}^0 = \sum_{i=1}^n C_i \cdot A_i^0 ; \quad (2)$$

- увязывание по средним отклонениям

$$em_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n C_i \cdot em_i ; \quad (3)$$

- увязывание по допускам

$$T_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2 \cdot T_i^2} . \quad (4)$$

Данные выражения верны при условиях, что:

а) все параметры цепи распределены по нормальному закону распределения;
б) математическое ожидание каждой случайной величины совпадает со средним отклонением при ее нормировании;

в) диапазон рассеяния случайной величины ($\pm 3\sigma$) на уровне доверительной вероятности $P = 0,9973$ (принимается теоретически равным значению допуска этой величины при ее нормировании).

Очевидно, что это решение задачи комплексирования требует существенной доработки в части требований, касающихся вероятностных характеристик случайных неопределенностей и особенностей их комплексирования. Была упущена из виду возможность отличия закона распределения случайной величины от нормального.

Разработанная методика проектирования норм точности включает в себя решение задачи приведения закона распределения случайных значений параметров к нормальному, причем поставленная задача решается по-разному на различных уровнях иерархической структуры изделия.

Любой из законов распределения можно привести к нормальному, используя методику, применяемую для аналогичных целей выражения неопределенности результатов измерения [10]. Введение коэффициента приведения допуска учитывает несоответствие действительного закона распределения параметра нормальному закону. Коэффициент приведения действительного закона распределения параметра к нормальному закону распределения определяется по зависимости:

$$K_{\text{ПР}} = \frac{u_i^3}{u_i^H} , \quad (5)$$

где u_i^3 - стандартная неопределенность действительного закона распределения неопределенности параметра; u_i^H - стандартная неопределенность нормального закона распределения.

Для наиболее типичных законов распределения (равновероятного, Симпсона, нормального) коэффициент приведения $K_{\text{ПР}}$ принимает значения 1,7; 1,22; 1,0 соответственно. В результате, увязывание по допускам по формуле (4) производится в соответствии с скорректированным выражением:

$$T_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2 \cdot T_i^2 \cdot K_{PP}^2} . \quad (6)$$

Заключение

Особенностью предлагаемой методики является тот факт, что на каждом уровне информационной «пирамиды» проектируемого изделия механического типа решаются все три задачи, при этом результат проектирования норм точности на каждом уровне является исходными данными для расчетов на следующем уровне.

В методике рассмотрены особенности проектирования норм точности на различных уровнях иерархии изделия, приведено обоснование использования тех или иных способов выявления и комплексирования приведенных неопределенностей, разработаны методы оптимизации норм точности составляющих средство измерения узлов, сборочных единиц, соединений, деталей.

Практически полезной стороной методики является обоснование и формализация принятия решения по обеспечению заданного уровня точности проектируемого изделия.

В общем случае, задача проектирования норм точности считается решенной, если

$$u_{\Sigma} \leq [u_{\Sigma}] , \quad (7)$$

где $[u_{\Sigma}]$ – заданное значение неопределенности параметра.

Если неравенство (7) не выполняется, то из формулы (1) очевидны пути уменьшения суммарной неопределенности по формальному признаку:

- ужесточить допуски на первичные неопределенности (уменьшить составляющие $u(q_s)$);
- уменьшить коэффициенты влияния влияющих параметров (составляющая C_s);
- уменьшить количество действующих неопределенностей (количество членов под знаком суммы);
- уменьшить (компенсировать) теоретическую неопределенность;
- ввести в цепь дополнительное звено – компенсатор, благодаря которому для каждого конкретного случая исполнения будет реализовано требуемое неравенство (7);
- увеличить заданное значение неопределенности параметра $[u_{\Sigma}]$, предварительно согласовав его с требованиями заказчика.

Эти методы основываются на принципах полной и неполной взаимозаменяемости и позволяют решить задачу проектирования норм точности с помощью тех средств и методов, которыми располагает заказчик.

Таким образом, данная методика позволяет алгоритмизировать процедуру проектирования норм точности, основывается на научном подходе, призвана решать различные по сложности и значимости задачи и подходит к применению в различных областях промышленности.

Методика достаточно успешно использована на ряде промышленных предприятий машиностроения и приборостроения и может быть рекомендована как инструмент обеспечения качества изделий (средств измерения, контрольных и технологических приспособлений, машин механического типа) на этапе разработки для предприятий, широко использующих эти изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taguchi Methods. Case Studies from the U.S. and Europe : ASI Press, 1989.
2. **Кулагин, В. В.** Основы конструирования оптических приборов: учеб. пособие для приборостроительных вузов / В. В. Кулагин. – М. : Машиностроение, 1982.
3. **Бородачев, Н. А.** Основные вопросы теории точности производства / Н.А. Бородачев. – М. : Изд-во АН СССР, 1950.
4. **Бруевич, Н. Г.** Точность механизмов / Н. Г. Бруевич. - М. : Гостехтеоретиздат, 1946.
5. **Грейм, И. А.** Элементы проектирования и расчет механизмов приборов: учеб. пособие для студентов вузов по специальности «Приборы точной механики» / И. А. Грейм. – Л. : Машиностроение, 1972.
6. **Дунаев, П. Ф.** Расчет допусков размеров / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. - М. : Машиностроение, 1981.
7. **Иванцов, А. И.** Основы теории точности измерительных устройств: учеб. пособие для вузов / А. И. Иванцов. - М. : Изд-во стандартов, 1972.
8. **Любатов, Ю. В.** Функциональные вычислительные механизмы / Ю. В. Любатов. - М. : Оборонгиз, 1960.
9. **Тайц, Б. А.** Точность и контроль зубчатых колес / Б. А. Тайц. - М. : Машиностроение, 1972.
10. Руководство по выражению неопределенности измерения: пер. с англ. / Под науч. ред. проф. В. А. Слаева. – СПб. : ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999.

Белорусский национальный технический университет
Материал поступил 25.12.2005

P.S. Serenkov, V.L. Solomakho, M.G. Kiselev
Realization to QFD-techologies by designing
the rates to accuracy product of mechanical
type
Belarusian National Technical University

The questions of creation of “door-to-door” tolerance design method for mechanical products are considered in this paper. Requirements specification of the product is initial data (permissible range of parameters of the product), working documentation (permissible range of parameters of individual parts of the product) is output of tolerance design. Distinctive feature of the method is system and complex approaches to the tolerance design procedure. This provides objectivity, validity and possibility of wide application of this method in industrial enterprises of the Republic of Belarus.