

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ОСНОВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Соколовский С. С., Соломахо Д. В., Цитович Б. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

*В статье описано применение моделирования в измерениях и измерительном контроле, что можно рассматривать как «метрологическое моделирование» объектов контроля, операций измерений и измерительного контроля, а также методик измерительного контроля в целом. Метрологическое моделирование позволяет оценивать погрешности проектируемых методик выполнения измерений и оптимизировать методики измерительного контроля на этапе их проектирования.*

Несмотря на исключительно важную роль моделирования в измерениях и измерительном контроле понятие «метрологическое моделирование» пока широкого применения в метрологии не нашло. Моделирование методики выполнения измерений (МВИ) в ряде случаев является единственно возможным путем оценивания погрешности измерений, что необходимо при проектировании МВИ, при сопоставлении конкурирующих МВИ, при проведении метрологической экспертизы и в некоторых других случаях.

Для разработки методики выполнения измерений необходимо создать модели объекта измерений, контролируемого параметра, представленного физической величиной, средств измерений, а также воздействия влияющих величин (условий измерений) на результаты выполнения измерений. В определенных случаях можно моделировать некоторые действия оператора.

В контексте поставленной задачи проведём исследование вопросов метрологического моделирования, базируясь на следующих исходных положениях:

- качество объекта измерений определяется бесконечным множеством физических величин, среди которых находятся измеряемые параметры;

- каждый из параметров воспроизводится на объекте однократно (масса, объем детали и т.п.) либо бесконечное множество раз (твердость поверхности, площадь сечения, толщина детали, высота ступени и др.);

- практически любой из номинально одинаковых геометрических параметров объекта воспроизводится бесконечное множество раз;

- все измерения геометрических параметров изделий являются координатными;

- сфера координатного контроля геометрических параметров изделий охватывает измерения размеров (линейных и угловых), отклонений формы и расположения поверхностей (профилей), параметров их волнистости и шероховатости.

Разработку методики выполнения измерений начинают с создания модели объекта измерений.

**Метрологическая модель объекта измерения** есть упрощенный образ рассматриваемого объекта, используемый при разработке и практическом применении методики выполнения измерений определённого параметра объекта, например, геометрического. Метрологическая модель объекта измерения может быть представлена в той или форме, например, в виде вербального описания, графического изображения, ансамбля аналитических выражений и пр. «Метрологическая модель объекта измерения» – чрезвычайно сложное и многогранное понятие.

Поэтому построить общую классификацию таких моделей, охватывающую все классификационные признаки (критерии классификации), практически невозможно.

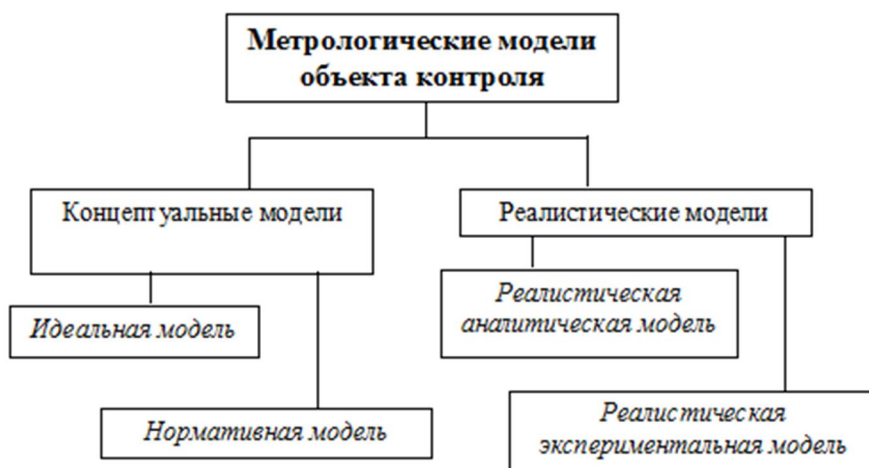


Рисунок 1 – Классификация метрологических моделей объекта контроля по назначению

Более рационально использовать дифференцированный подход, базирующийся на построении частных классификаций с использованием отдельных, наиболее важных классификационных признаков, необходимость использования которых может возникать в ходе решения различных измерительных задач (включая проектирование и практическое применение методик выполнения измерений параметров объектов).

Одна из важнейших классификаций метрологических моделей по их назначению представлена на рисунке 1.

Проектирование любой МВИ должно начинаться с определения, каким должен быть контролируемый объект для реализации его функционального назначения. Это достигается за счёт использования метрологических моделей рассматриваемого объекта, характеризующих его с концептуальных позиций (концептуальные модели).

К таким моделям можно отнести *идеальную модель* и *нормативную модель* объекта контроля. Под идеальной метрологической моделью контролируемого объекта подразумевается идеализированный образ (описание, представление) объекта, который отражает все его особенности, принципиальные с точки зрения решаемой измерительной задачи, при условии абстрагирования от искажений, свойственных реальному объекту и неизбежных при его физическом воспроизведении или практической реализации. Идеальная метрологическая

модель любого объекта всегда строится по однозначно определённым (например, номинальным) параметрам.

Использование идеальной метрологической модели объекта контроля при проектировании МВИ геометрического параметра позволяет выработать некоторую общую стратегию или концепцию измерения заданного параметра рассматриваемого объекта, поэтому такая метрологическая модель объекта является концептуальной. Выработка общей стратегии или концепции измерения при этом может включать, например, такие действия, как определение формы чувствительного элемента измерительного наконечника, определение видов и диапазонов измерительных и вспомогательных перемещений и пр.

В практике контроля геометрических параметров изделий машиностроения всегда приходится иметь дело с искусственно созданными объектами, которые отличаются от идеальных. Для каждого такого объекта, исходя из его функционального назначения, в любом случае можно определить некоторые допускаемые его отличия от идеального объекта. Таким образом, нормативную модель объекта можно трактовать как заданную тем или иным образом область существования годных объектов со всеми допустимыми отклонениями их параметров. Использование такой модели на этапе проектирования МВИ обеспечивает возможность обоснованного назначения допустимых погрешностей измерений контролируемых параметров

объекта. На завершающем этапе реализации процесса контроля нормативная модель контролируемого объекта используется для определения его годности путём сопоставления с ней экспериментальной модели заданного объекта, полученной в результате решения поставленной измерительной задачи.

Важное значение при решении любой измерительной задачи имеют метрологические модели контролируемого объекта, характеризующие его с учетом искажений, неизбежных при физическом воспроизведении или практической реализации.

Эта группа моделей объединяет *две разновидности реалистических моделей: аналитическую и экспериментальную*. Эти модели должны отражать принципиальные с точки зрения решаемой измерительной задачи особенности реального объекта измерения с искажениями по отношению к идеальной модели.

При этом реалистическая аналитическая модель контролируемого объекта строится на основе анализа некоторой априорной информации как о самом объекте, так и о технологическом процессе его изготовления.

Такой анализ должен быть направлен на выявление возможных характерных искажений рассматриваемого объекта при его изготовлении, что позволяет оптимизировать МВИ в процессе проектирования.

Для проведения анализа предлагается использовать данные различных информационных источников (справочников, описаний технологических процессов, научно-технических журналов и др.).

При этом не исключается возможность статистического исследования технологического процесса изготовления объектов контроля. Получаемую таким образом реалистическую аналитическую модель контролируемого объекта принимают за основу для проектирования наиболее эффективной МВИ.

Принятый за основу первоначальный вариант такой модели и соответствующий ей проект МВИ в дальнейшем могут уточняться с учётом результатов практического применения МВИ. Конечной целью этого процесса является разработка наиболее эффективной МВИ, обеспечивающей возможность воспроизводить экспериментальные модели контролируемых объектов, адекватно заменяющие реальные объекты измерений в рамках решаемой измерительной задачи.

Экспериментальная модель может считаться адекватно заменяющей реальный объект измерений в том случае, если методическая погрешность из-за идеализации объекта измерений будет пренебрежимо малой, по сравнению с доминирующей составляющей погрешности измерений, например, с инструментальной. В противном случае методическую погрешность следует оценить и учитывать ее оценку при комплексировании составляющих погрешности измерений.

На основании проведенного анализа различных метрологических моделей объектов контроля, классифицированных по функциональному назначению, общий порядок их использования при разработке и практическом использовании МВИ можно графически интерпретировать с помощью схемы, представленной на рисунке 2.

Как следует из проведенного выше анализа, одной из ключевых задач, которые приходится решать в ходе разработки любой МВИ, является задача оценивания адекватности воспроизводимых с помощью данной МВИ экспериментальных моделей реальным объектам измерений. Поэтому в контексте проводимого исследования весьма важное значение имеет построение системы классификации экспериментальных моделей контролируемых объектов.

Целью классификации экспериментальных моделей объектов координатного контроля является повышение эффективности исследования методических погрешностей измерений, возникающих из-за отличия принятой за основу модели реального объекта измерения самому объекту. При построении такой классификации будем рассматривать окончательно оформленные экспериментальные модели реальных объектов измерений, используемые на завершающем этапе процедуры измерительного контроля для непосредственного определения по ним искомых геометрических параметров контролируемых объектов.

Очевидным и наиболее важным с точки зрения проводимого исследования критерием классификации, или классификационным признаком, экспериментальных моделей объектов контроля является тип или характер измерительной информации о контролируемой поверхности или профиле, на основании которой определяются искомые их геометрические параметры (размеры, отклонения формы, распо-

## Метрологическое обеспечение измерений

ложения и пр.). Такой классификационный признак по-другому можно назвать видом измеренной поверхности (профиля) и он, по сути, позволяет классифицировать рассматриваемый класс метрологических моделей по их содержанию.

По данному классификационному признаку, или критерию классификации, экспериментальные модели контролируемых объектов подразделяются на *дискретные, аналоговые, аналогово-дискретные и дискретно-аналоговые*.

При этом *дискретную модель* контролируемого элемента объекта контроля получают в виде массива измеренных координат ограни-

ченного количества контрольных точек, характерным образом расположенных на поверхности (профиле). Произведя необходимую обработку полученных результатов измерения, находят искомое значение контролируемого геометрического параметра объекта.

*Аналогово-дискретные модели* объектов контроля получают на основе использования ряда автоматизированных средств измерения. Особенность таких средств состоит в том, что они позволяют осуществлять непрерывное измерение отклонений точек и представлять измерительную информацию в виде непрерывных кривых, характеризующих реальную форму профилей контролируемой поверхности.

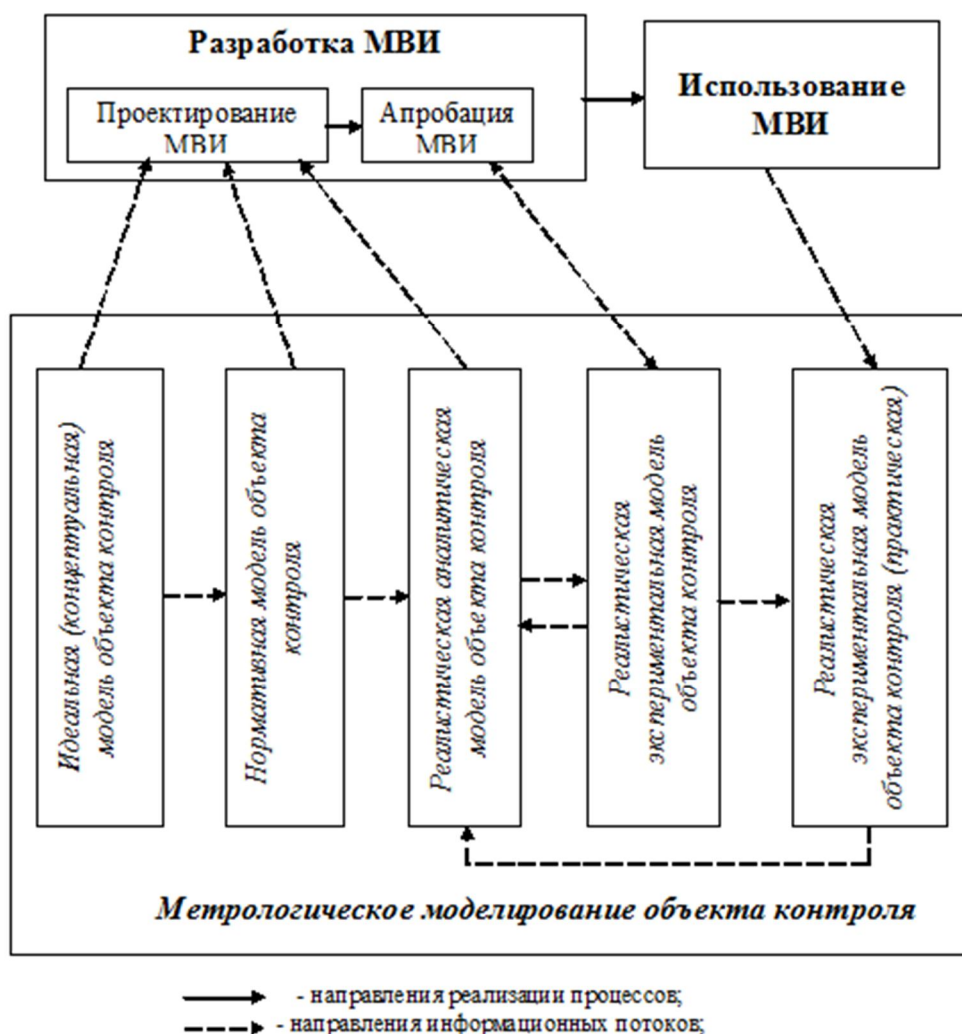


Рисунок 2 – Использование метрологических моделей объекта контроля в ходе разработки МВИ и при измерении параметров

Совокупность такого рода кривых, относящихся к различным нормальным сечениям реальной поверхности, и определяет измеренную поверхность, которая в данном случае может считаться аналогово-дискретной (описывается рядом дискретно расположенных аналоговых профилей).

При дальнейшей обработке такой исходной измерительной информации с целью нахождения искомого значения контролируемого геометрического параметра реальной поверхности, ее измеренные аналоговые профили подвергаются вторичной дискретизации. В расчет принимаются отклонения отдельных точек профилей, располагающихся на записанных кривых с определенным шагом.

В итоге такой операции аналогово-дискретная измеренная поверхность преобразуется в некоторую дискретную модель реальной поверхности, т.е. опять же приходят к дискретной конечной реализации экспериментальной модели.

*Аналоговые экспериментальные модели* объектов контроля воспроизводятся, например, с помощью оптических приборов, основанных на явлении интерференции света.

Такого типа приборы позволяют получить полную информацию о рельефе контролируемой поверхности. Генерируемая ими интерференционная картина представляет собой аналоговую модель реальной поверхности, в данном случае можно говорить о получении при таких измерениях аналоговых измеренных поверхностей.

Отличительной особенностью получения *дискретно-аналоговых экспериментальных моделей* является использование аналоговых моделей поверхностей, аппроксимирующих реальные поверхности объектов, аналитически воспроизводимых по результатам измерения отклонений минимально необходимого, но достаточного количества контрольных точек. Исходя из этого, можно утверждать, что первичные измеренные поверхности, получаемые на начальном этапе реализации этих моделей, будут дискретными.

В процессе дальнейшей обработки такой исходной измерительной информации дискретные модели аналитически преобразуются в аналоговые модели аппроксимирующих поверхностей, адекватно заменяющих реальные поверхности при оценке их искомым геометрических параметров. Можно сделать вывод, что

воспроизводимые таким образом экспериментальные модели объектов по своей сути напрямую нельзя отнести ни к одной из рассмотренных выше классификационных групп. Исходя из принципов реализации этих моделей, можно говорить о том, что они образуют самостоятельную группу дискретно-аналоговых моделей.

Создание модели контролируемого параметра объекта измерений, представленного физической величиной, начинают с идентификации величины (например, длина, которая подходит для всех линейных размеров, отклонений формы или/и расположения поверхностей, высотных и шаговых параметров шероховатости). Далее определяют вид параметра: охватывающий размер (отверстие); охватываемый размер (вал); размер, не относящийся ни к охватывающим, ни к охватываемым (высота ступеньки, глубина глухого отверстия, межосевое расстояние, отклонение формы или/и расположения поверхностей и др.).

На основании этой классификации в рамках принятой концепции измерения определяют конфигурацию и направление рабочих перемещений чувствительных элементов средств измерений, их конструкции и размеры с учетом формы контролируемого элемента объекта и его инструментальной доступности.

Решение таких задач позволяет ответить на вопросы о возможности использования стандартизованных СИ, имеющихся нестандартных СИ, либо о необходимости проектировать новые нестандартные СИ.

Этот элемент анализа приводит к созданию моделей средств измерений, которые планируется использовать в разрабатываемых МВИ. При намечаемом использовании стандартных или унифицированных СИ можно оценить ожидаемые значения инструментальных составляющих погрешности измерений.

В случае необходимости разработки нестандартных СИ устанавливают их допустимые погрешности, которые затем включают в техническое задание на проектирование нестандартных СИ.

Моделирование воздействия условий измерений на результаты выполнения измерений начинают с анализа влияющих величин. Выявляют величины, влияющие на измеряемый объект (изменяющие контролируемый параметр объекта), влияющие на применяемые СИ (изменяющие расположение элементов СИ или

иным образом искажающие преобразуемый сигнал измерительной информации), а также влияющие на измеряемый объект и применяемые СИ одновременно. Затем определяют характер воздействия влияющих величин на результаты измерений и, двигаясь обратным путем, нормируют нормальные области значений влияющих величин так, чтобы вносимые из-за их воздействий составляющие погрешности измерений были пренебрежимо малыми по сравнению с инструментальной составляющей погрешности.

В случае если можно ожидать выхода влияющих величин за нормальные области значений, следует назначить рабочие области значений одной или нескольких влияющих величин, оценить возникающие при выходе за нормальные области значений составляющие погрешности измерений и учитывать их значения при комплексировании всех составляющих.

Моделирование действий оператора предпочтительно исследовать экспериментально. Моделирование отсчитывания результата с устройства отображения информации СИ с аналоговым выходом широко описано в метрологической литературе и сводится к оценке результатов при отсчитывании с округлением или с интерполированием.

### **Выводы**

1. Проектирование методик выполнения измерений и методик измерительного контроля невозможно без создания и использования метрологических моделей средств измерений и контролируемых объектов.

2. Предложенные в настоящей работе допущения и/или исходные положения обеспечивают возможность создания адекватных метрологических моделей объектов при контроле их геометрических параметров.

3. На основе проведенного анализа предложены два вида реалистических моделей (аналитическая и экспериментальная), необходимые для получения оценки методической составляющей погрешности измерений в процессе проектирования МВИ. Предложены также критерии адекватности моделей, которые позволяют оптимизировать МВИ на стадии её разработки.

4. Особое значение при контроле геометрических параметров объекта приобретают разновидности реалистических моделей (дискретные, аналоговые, аналогово-дискретные и дискретно-аналоговые), позволяющие с достаточной строгостью оценивать методические составляющие погрешности измерений на стадии проектирования МВИ.

---

Sokolovsky S. S., Solomakho D. V., Tsitovitch B. V.

### **Metrological modeling as a basis of measurement technique design and implementation**

The article describes the use of modeling in measurements and control, which can be regarded as “metrological modeling” of the measurement objects, measuring process and measuring techniques in general. Metrological simulation allows to estimate the projected errors of measurement procedures and techniques to optimize the measuring control design stage.

*Поступила в редакцию 11.06.2010.*