

УДК 658.562.012.7

Д. А. Локтев, к.т.н., доц., Московский государственный горный университет, Группа Технополис, г. Москва

E-mail: d.loktev@technopolice.ru

Современные требования к метрологическому обеспечению производства горных машин

Рассмотрены требования к средствам метрологического обеспечения горных предприятий. Предложены современные методы измерения с использованием последних технических достижений.

Ключевые слова: метрология, точность измерения, погрешность.

D. A. Loktev

Modern Requirements for the Metrological Provision of Production of Mining Machines

Considered the requirements for facilities of metrological provision of mining plants. Proposed by modern methods of measurement using the latest technology.

Keywords: metrology, accuracy, measurement error.

Подход к метрологическому обеспечению машиностроительного производства был достаточно детально проработан в 70х-80х годах прошлого века. Однако впоследствии, в силу различных факторов, эти концепции не претерпели практически никаких изменений. В результате, метрологическое обеспечение на настоящий момент полностью соответствует этим концепциям тридцатилетней давности, но абсолютно не соответствует современным требованиям к этому направлению. Как следствие, на заводах горного машиностроения практически повсеместно отсутствуют системы управления качеством, базирующиеся на статистических методах управления процессами. Основной причиной этого является отсутствие современных цифровых средств измерения, без которых реализация подобных систем невозможна.

По результатам технологического аудита одного из крупнейших в России заводов горного машиностроения были получены результаты, полностью подтверждающие приведенный выше тезис. На данном заводе применяется более 80.000 единиц средств измерения. При этом более 90% этих средств измерения представляют собой шаблоны и другие специальные измерительные приспособления, привязанные к конкретным деталям. Погрешность таких средств измерения находится в диапазоне

0,02...0,5 мм. Цифровые средства измерения отсутствуют. Статистика по основным размерам изготовленных деталей не ведется. Также отсутствуют какие-либо паспорта на изготовленные детали с фактическими размерами.

Очевидно, что подобная ситуация абсолютно не соответствует современным требованиям к организации машиностроительного производства и является сдерживающим фактором для дальнейшего технического, технологического и организационного развития предприятий.

Что нужно сделать на первом этапе создания нормальной системы метрологического обеспечения любого предприятия горной промышленности? Необходимо обеспечить реализацию основных требований ко всем метрологическим средствам. Кратко можно сформулировать пять этих основных требований:

1. Измерение конструктивных параметров деталей с необходимой погрешностью и неопределенностью результатов измерения
2. Сохранение результатов измерения в формате, пригодном для дальнейшего использования в системе статистического управления процессами
3. Обеспечение прослеживаемости результатов измерений (создание протоколов в форматах, соответствующих основным российским и международным нормам, хранение результатов измерения для последующего предоставления по требованию заказчиков или уполномоченных организаций)
4. Измерение ВСЕХ необходимых параметров, представление и анализ результатов измерения в форме, обеспечивающей эффективное и быстрое использование этих результатов для корректировки технологических процессов
5. Обеспечение независимости результатов измерения от субъективных факторов (человеческого, производственных и т.д.)

Рассмотрим эти требования более подробно:

1. Выбор средств измерения по максимально допустимой погрешности и неопределенности измерения

Любое измерение характеризуется погрешностью. Более правильным является применение понятия «неопределенность измерения», которое характеризует разброс значений измеряемого параметра. Неопределенность измерения является более «полной» характеристикой точности измерения, поскольку охватывает как систематические погрешности (в первую очередь, погрешность средства измерения), так и случайные погрешности, оцениваемые, как правило, статистическими методами. Для любого средства измерения можно определить максимально допустимую неопределенность измерения. Допустимая неопределенность измерения формирует требования к выбору средства измерения. В европейских нормах принято, что неопределенность

измерения с применением конкретного средства измерения не должна превышать 10% от величины поля допуска измеряемого параметра. Российские нормы определяют, что погрешность средства измерения линейных величин не должна превышать в среднем одной трети от поля допуска измеряемой величины. С учетом сказанного выше о разнице в понятиях неопределенности и погрешности речь идет примерно об одном порядке вещей.

Таким образом, выбор средства измерения полностью определяется его допустимой погрешностью (естественно, если средство измерения по своему назначению соответствует решаемой задаче). Основным документом для определения предельно допустимой погрешности средств измерения является ГОСТ 8.051-81. На рис. 1 представлен пример определения погрешности средств измерения в соответствии с данным ГОСТом.

Номинальные размеры, мм	Для классов													
	2		3		4		5		6		7		8	
	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ	IT	δ
» 30 » 50	2,5	1,0	4,0	1,4	7	2,4	11	4,0	16	5,0	25	7,0	39	10,0

Рис. 1. Допустимая погрешность средств измерения

Зачастую выбор средства измерения по приведенному стандарту подменяются выбором средства измерения «по ощущениям» или «из имеющихся». Это приводит к несоответствию произведенного замера принятым нормам и такой замер не может служить основанием для принятия дальнейших решений, в том числе по годности изделия.

Другим аспектом этой проблемы зачастую является недостаточная информированность технических специалистов предприятий о теоретической максимальной погрешности применяемых средств измерения. Положение ухудшают некорректные действия некоторых представителей фирм-производителей, подменяющие показатели погрешности показателями дискретности или просто не указывающие эти данные в своей документации. Более 80% опрошенных специалистов различных заводов были уверены, что погрешность цифрового штангенциркуля составляет 0,01 мм. При этом либо сами специалисты подменяли понятия, либо были так информированы торговыми представителями. Для полноты представления отметим, что погрешность цифрового штангенциркуля по принятым в мире нормам составляет ± 30 мкм (для диапазона измерений 0...150 мм), в то время как дискретность действительно составляет 0,01 мм. Все ведущие и уважаемые в мире фирмы обязательно приводят данные о погрешности средств измерений в

своих каталогах. При этом надо внимательно относиться к приведенным цифрам, поскольку в отдельных случаях приводится полная величина погрешности (в указанном случае с штангенциркулем 60 мкм), либо пределы погрешности, которые необходимо складывать или в общем случае – удваивать (в рассмотренном примере ± 30 мкм).

Выбор средств измерения по максимально допустимой погрешности приводит к существенным изменениям в технологическом и метрологическом обеспечении производства. Технические специалисты оказываются перед выбором – или продолжать назначать и применять средства измерения, не соответствующие указанному выше принципу, либо заново пересматривать внутренние нормы и правила. Кроме того, справедливо отметить, что практически не встречаются случаи, когда на предприятиях сегодня применяются более точные средства измерения, чем требуются по нормативным документам. Необходимость применения более точных средств измерения приводит к увеличению вложений в средства измерения. Зачастую технические специалисты опасаются конфликта с финансовыми подразделениями и высшим менеджментом и продолжают приобретать средства измерения, заведомо не подходящие по параметрам точности, но более дешевые.

В завершение этого раздела проиллюстрируем сказанное одним примером. Во время опроса более 50 технических специалистов различных заводов был задан вопрос, какие средства измерения они предполагают применять для измерения диаметров шеек вала с номинальными размерами $\varnothing 30 \pm 0,021$ и $\varnothing 60 \pm 0,03 - 0,06$. Более девяноста процентов были уверены, что для измерения первого размера будет достаточно цифрового микрометра, а для измерения второго размера – цифрового штангенциркуля. Оба решения неправильны, так как не соответствуют изложенным выше принципам. Погрешность средства измерения по ГОСТ 8.051-81 в первом случае должна составлять не более 6 мкм (см. рис. 2), а во втором случае – 9 мкм. Погрешность цифрового микрометра составляет ± 4 мкм, т.е. 8 мкм. Это соответствует требованиям по измерению второго размера, но для измерения первого размера погрешность слишком велика. В этом случае необходимо применение прецизионной механической скобы с цифровым индикатором, имеющим погрешность ± 1 мкм.

2. Использование результатов измерения в системах статистического управления процессами

В рамках данной статьи невозможно охватить все аспекты создания системы статистического управления процессами на предприятии. Отметим коротко, что основной идеей данного подхода применительно к механообрабатывающему производству является сбор информации об истинных размерах изготовленных деталей с последующим статистическим анализом этих данных. Статистический анализ позволяет сделать вывод о пригодности и воспроизводимости процесса, т.е. о том,

насколько полученные размеры соответствуют заданным допускам. Кроме того, методы статистического анализа позволяют оценить управляемость процесса, т.е. возможность постоянного поддержания системы в состоянии изготовления годной продукции. Одной из составляющих систем статистического управления процессами является определение и анализ систематических и случайных величин и параметров, влияющих на точность обработки. Ликвидация этих погрешностей путем соответствующих технических и организационных мероприятий дает возможность управлять процессом, обеспечивая получение годной продукции.

Одним из наиболее простых, но и одним из наиболее информативных методов оценки процесса является составление контрольных карт Шухарта. На рис. 2 представлены контрольные карты для одного из размеров вала редуктора, обработанного на ведущем российском машиностроительном заводе.

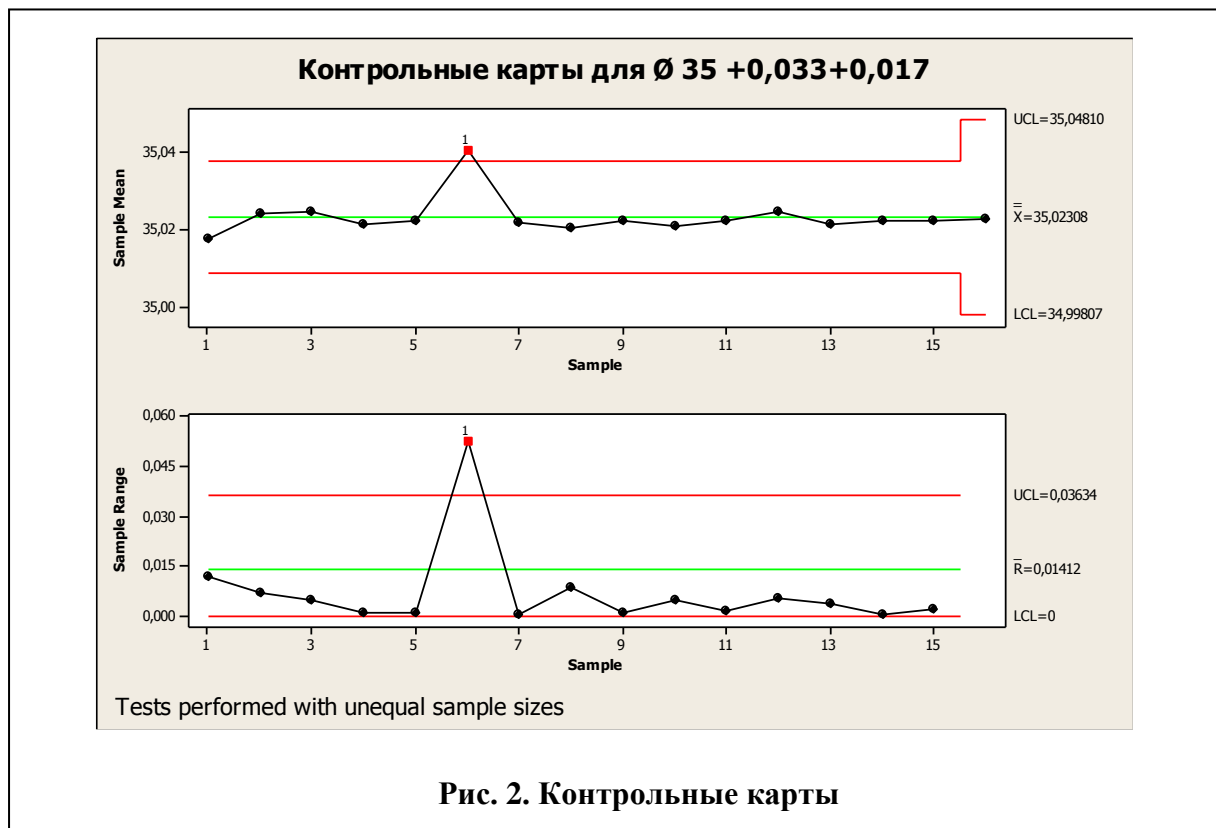
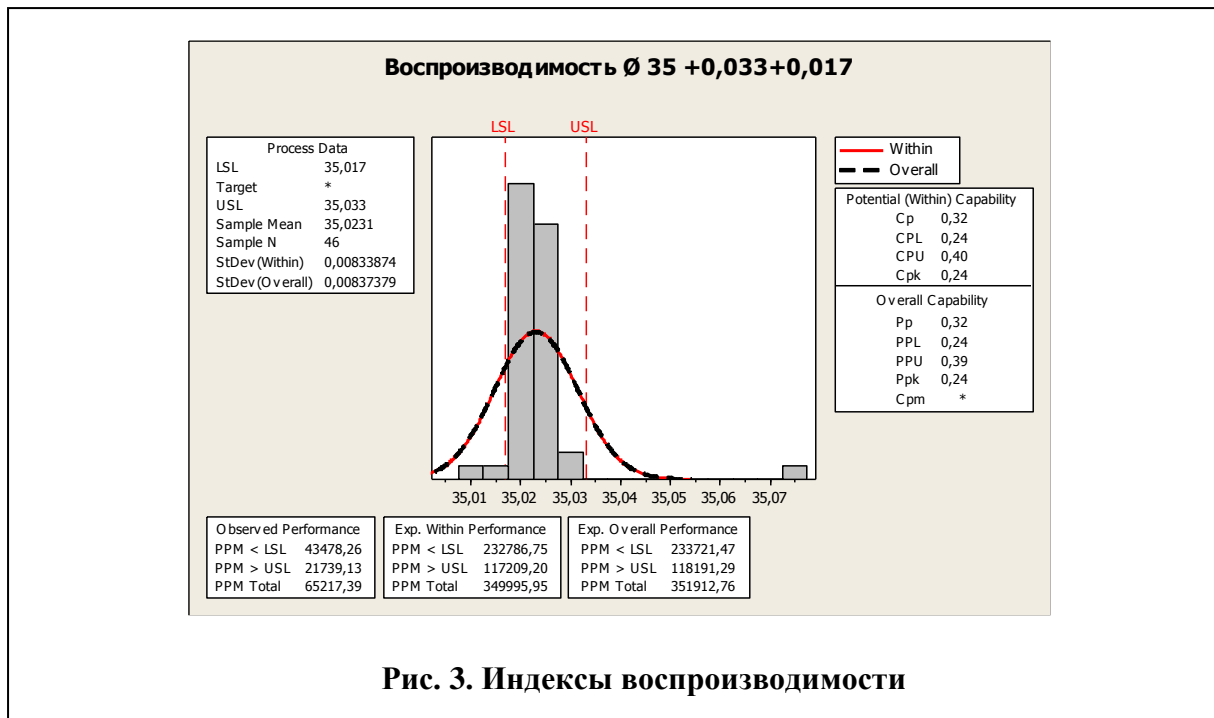


Рис. 2. Контрольные карты

На контрольных картах видно, что процесс имеет некоторую нестабильность. Для оценки потенциала управляемости процесса применяются индексы воспроизводимости C_p и P_p . На рис. 3 приведена оценка индексов воспроизводимости для той же серии измерений, для которой построены контрольные карты на рис. 2.



При индексе воспроизводимости меньше единицы процесс не является стабильным и управляемым. Это означает, что в любой момент возможно появление бракованных деталей. При значении индекса воспроизводимости равного 1 процесс становится управляемым. Применительно к контрольным картам это означает, что все расчетные значения точек контрольных карт находятся в заданном диапазоне. Этот диапазон составляет 6σ ($\pm 3\sigma$), где σ – среднее квадратичное отклонение. Именно этот факт положил начало широко распространенному подходу к управлению качеством продукции, получившему во всем мире название «метод шести сигм». Сегодня во всем мире в качестве нижней границы индекса воспроизводимости C_p практически повсеместно принято значение 1,33. Это соответствует статистической вероятности получения 63 бракованных деталей на миллион изготовленных деталей. Для ответственных размеров (например, в автомобильной и авиакосмической промышленности) устанавливается значение индекса воспроизводимости равное 2. Это соответствует примерно 0,002 бракованных деталей на миллион. Для достижения данного результата устанавливается ограничение на разброс истинных размеров, соответствующее 50% от заданного поля допуска. Если все измеренных детали укладываются в половину поля допуска и имеют незначительное колебание, то возможно получение $C_p=2$. Отметим, что для приведенного на рис. 3 процесса индексы воспроизводимости меньше единицы и процесс неуправляем.

Современное производство трудно представить без внедрения методов статистического управления процессами - по данным опроса Американской ассоциации производителей редукторов, проведенного в ноябре 2011 года, 67% производителей уже работают с внедрением этих

методов и еще 5% планируют внедрение в 2012 году. В условиях единичного и мелкосерийного производства применение этих методов имеет свои особенности, но система должна быть внедрена.

Для нормального функционирования такой системы необходимо накапливать и обрабатывать информацию о фактических размерах изготовленной продукции. Поэтому полноценную систему статистического управления процессами на предприятии невозможно реализовать без применения цифровых средств измерения, связанных с системой сбора и анализа информации. При формировании технического задания на разработку современной системы необходимо предусматривать соответствующие аппаратные и программные возможности у средств измерения.

3. Обеспечение прослеживаемости результатов измерения

Отсутствие прослеживаемости (согласно международному определению **прослеживаемость**: свойство результата измерения быть отнесенным к значениям установленных единиц измерения, как правило, национальных или международных эталонов, путем непрерывной цепи сличений, со всеми установленными неопределенностями). Иными словами, применяемое метрологическое оборудование должно быть откалибровано с применением эталонов, которые в свою очередь должны быть откалиброваны или поверены в соответствии с установленными для них нормами. Тогда для каждого измерения гарантируется и подтверждается достоверность этого измерения. На практике это означает, что любой результат измерения, выполненный на измерительном оборудовании, откалиброванном по международным нормам и правилам, признается любым предприятием в любой стране мира. Отсутствие прослеживаемости означает отсутствие возможности подтверждения качества выпущенной продукции на соответствие технической документации и рано или поздно приведет к конфликтам с заказчиками по вопросам качества продукции.

Теоретически, любое средство измерения при соблюдении соответствующих норм и правил может обеспечивать прослеживаемость результата измерения. Однако большинство покупателей доверяет сегодня цифровым средствам контроля, выпущенным ведущими фирмами и откалиброванным (поверенным) по методикам этих фирм с применением соответствующего высококачественного оборудования.

4. Измерение ВСЕХ необходимых параметров, представление и анализ результатов измерения в форме, обеспечивающей эффективное и быстрое использование этих результатов для корректировки технологических процессов

Отсутствие цифровых значений фактических величин различных параметров приводит к тому, что технологический персонал в большинстве случаев не получает в результате измерения конкретных

значений, необходимых для корректировки технологического процесса. В результате приходится оценивать имеющиеся отклонения косвенными методами и прибегать к пробной обработке. Потери времени на подобную пробную обработку и возможные потери от брака могут привести к существенному увеличению себестоимости продукции и даже к тому, что вместо запланированной прибыли от выпуска изделия будет получен убыток. Современные средства измерения представляют результаты замера в наглядном (цифровом и графическом) виде и практически всегда дают сразу информацию о величине необходимой коррекции. Приведем два примера реализации этого требования.

При обработке на токарном станке с ЧПУ обработка детали ведется по управляющей программе, в которой задаются номинальные размеры детали. Если замер детали фиксирует отклонение от заданной величины, необходимо ввести коррекцию на размер. Для определения величины коррекции при применении обычных средств контроля необходимо рассчитать разницу между номинальным и фактическим размером. Большинство операторов производит этот расчет столбиком на бумажке, при этом вероятность ошибки достаточно велика. Современная система измерения, например, система измерения валов MarShaft, в протоколе измерения не только показывает фактический размер, но и автоматически рассчитывает отклонение от середины поля допуска (правая колонка на рис. 4). Имея такой протокол, оператор может очень быстро ввести коррекции по всем размерам.

№	Характеристики	Номин. разм	ВГД/НГД	Факт. разм.	Гистограмма	ОоСПД
1	правая шейка	24.1000	$\begin{matrix} 0.2400 \\ -0.2400 \end{matrix}$	24.0945	UT  TM	от -0.0055
2	общая длина	308.1200	$\begin{matrix} 0.2000 \\ 0.0000 \end{matrix}$	308.1420	UT  TM	от -0.0780

Рис. 4. Пример протокола системы измерения валов

Второй пример относится к области обработки цилиндрических зубчатых колес.

Одной из основных погрешностей, возникающих при обработке цилиндрических колес, является отклонение направления линии зуба. Эта погрешность легко корректируется на зубофрезерных станках с ЧПУ путем изменения траектории перемещения червячной фрезы вдоль оси детали. Но сначала надо рассчитать корректирующее значение. С помощью традиционных средств измерения эта непростая задача. Но с применением современной зубоизмерительной машины эта задача решается без проблем. Стандартный протокол зубоизмерительной машины содержит поле, в котором указаны значения коррекции направления с обеих сторон зуба (рис. 5, *fHbm* в последней строке). Эти данные просто

вводятся в соответствующие поля интерфейса система ЧПУ зубофрезерного станка и будут учтены при обработке следующей детали.

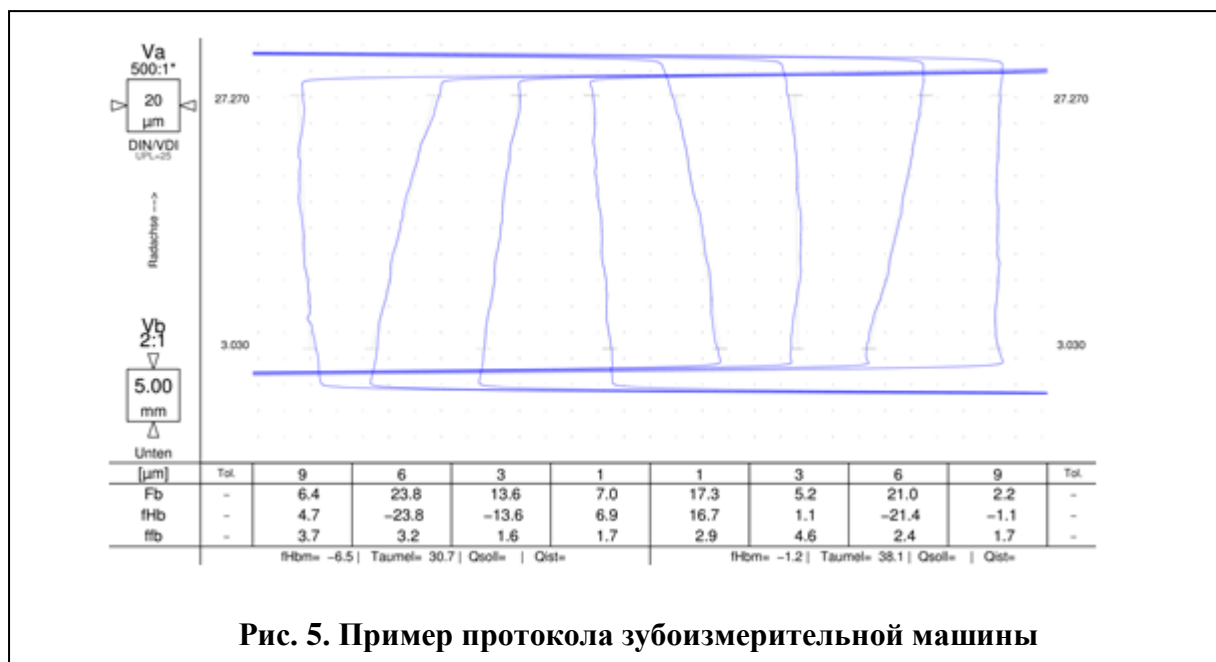


Рис. 5. Пример протокола зубоизмерительной машины

Второй составляющей рассматриваемого требования к средствам измерения является возможность измерения всех необходимых параметров детали, включая те, измерение которых обычными средствами затруднено или невозможно. Практически ни для кого из производителей не является секретом, что большое количество размеров не измеряется вообще или измеряется косвенными методами, так как напрямую измерить их невозможно. Технологи при этом вспоминаю недобрым словом конструкторов, которые так проставили размеры, и метрологов, которые не смогли подобрать подходящее средство измерения. В итоге измеряются те параметр детали, которые можно измерить, а не те параметры, которые надо измерять.

Приведем только два примера подобных размеров и измерений. Первый пример – измерение параметров резьбы. Основным средством измерения в этом случае является резьбовой калибр. Однако он не дает никакой информации об истинных размерах резьбы. Калибр является комплексным средством измерения и одновременно «оценивает» несколько параметров годности резьбы – шаг, угол профиля, радиусы на вершине и впадине, наружный и внутренний диаметры и, косвенно по совокупности размеров, средний диаметр. Если при измерении резьбовым калибром выявлено отклонение (непроходной калибр «идет» или проходной «не идет»), то необходимы другие измерения для определения причины – какой именно из параметров резьбы сделан с отклонением. При этом некоторые параметры резьбы могут быть с известной, обычно невысокой, точностью измерены традиционными средствами, некоторые могут быть измерены с применение достаточно редких на сегодняшний

день приборов (например, профильных микроскопов), а некоторые вообще не могут быть измерены прямым методом. К последним относится один из основных параметров резьбы – средний диаметр, по которому и поставляется основной допуск на резьбу. В итоге – как было отмечено выше – измеряем не то, что нужно, а то, что можем.

Решить указанную задачу позволяет измерение резьбы на контурографе. При таком измерения в явном виде определяются все размеры резьбы, включая «теоретические» - например, средний диаметр или полная высота профиля как размер между несуществующими точками пересечения боковых сторон профиля (рис. 6).



Рис. 6. Измерение резьбы на контурографе

Вторым примером является измерение размеров, подобно указанным на рис. 6. Для технолога обеспечение таких размеров всегда является определенной проблемой, поскольку их невозможно измерить. Рабочий вынужден применять простейшие средства измерения (например, штангенциркуль), прикладывая на глаз губки прибора к местам, которые ему (рабочему) представляются линиями пересечения поверхностей. В то же время, современные средства измерения типа системы измерения валов, легко измеряют или рассчитывают указанные размеры. Размер от торца до начала конической поверхности на такой системе может быть измерен напрямую, а размер до линии пересечения цилиндра и конуса рассчитан автоматически из параметров этих двух поверхностей. На оптической системе измерения валов оба размера измеряются напрямую.

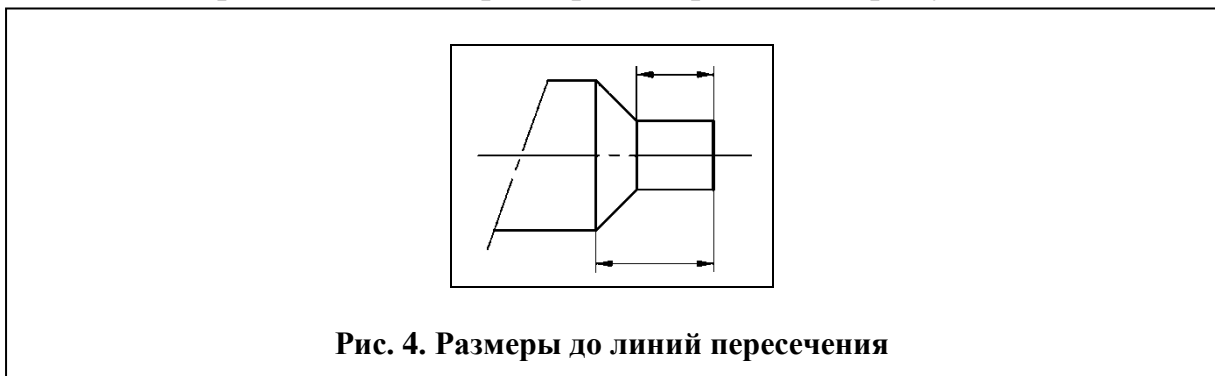


Рис. 4. Размеры до линий пересечения

5. Обеспечение независимости результатов измерения от субъективных факторов (человеческого, производственных и т.д.)

Завершают наш обзор требований к современному метрологическому оснащению несколько слов о необходимости обеспечения независимости и объективности измерения. Этот тезис ни у кого не вызывает ни малейшего сомнения, однако очень часто можно увидеть как опытные рабочие пользуются «своими» методами оценки в процессе измерения. Например, при использовании шаблона вместо положенного в таких случаях щупа «измеряют» зазор между деталью и шаблоном на просвет, на глаз. Или, покачивая в отверстии гладкий калибр, задумчиво произносят «Еще пару соток надо убрать». Нельзя отрицать, что с годами приходит опыт и рабочие, много лет обрабатывающие одни и те же детали, начинают «чувствовать» размер. Но им подражают молодые ребята, только что вставшие к станку. Поэтому средство измерения должно быть сконструировано таким образом, чтобы никакие, правильные или неправильные, действия оператора не могли повлиять на результат измерения. Наиболее расхожий пример – замена двухточечного нутромера (который надо покачивать вверх-вниз для поиска нижней точки) на трехточечный, который однозначно позиционируется в отверстии.

Второй возможный источник искажения результатов измерения – ошибки при записи цифровых значений, умышленные или не умышленные. Если производство оснащено цифровыми средствами измерения и при этом целью является создание системы статистического управления, а функция фиксации фактического результата остается за контроллером (измерил – записал на листе бумаги – потом ввел в компьютер), то надежность такой системы крайне мала. Искажение результата может произойти на любом этапе. Отсюда следующее (и последнее) требование – системы измерения должны автоматически фиксировать фактические значения размеров деталей и быть оснащены программными и аппаратными средствами для передачи этих данных во внешнюю компьютерную систему для статистического анализа.