ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р ИСО 22514-7— 2024

Статистические методы

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ

Часть 7

Воспроизводимость процессов измерений

(ISO 22514-7:2021 + Amd.1:2024, Statistical methods in process management — Capability and performance — Part 7: Capability of measurement processes, IDT)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2024

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Закрытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (ЗАО «НИЦ КД») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 125 «Применение статистических методов»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 июля 2024 г. № 999-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 22514-7:2021 «Статистические методы в управлении процессами. Воспроизводимость и пригодность. Часть 7. Воспроизводимость процессов измерений» (ISO 22514-7:2021 «Statistical methods in process management — Capability and performance — Part 7: Capability of measurement processes», IDT), включая изменение Amd.1:2024.

Изменение к указанному международному стандарту, принятое после его официальной публикации, внесено в текст настоящего стандарта и выделено двойной вертикальной линией, расположенной на полях напротив соответствующего текста, а обозначение и год принятия изменения приведены в скобках после соответствующего текста.

Международный стандарт разработан Техническим комитетом ТК 69 Международной организации по стандартизации (ИСО).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА.

Дополнительная сноска в тексте стандарта, выделенная курсивом, приведена для пояснения текста оригинала

5 ВЗАМЕН ГОСТ Р ИСО 22514-7—2014

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© ISO, 2021
© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2024

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Обозначения и сокращения 5
5 Основные принципы 8
6 Выполнение метода 11
7 Исследования для вычисления составляющих неопределенности 16
8 Вычисление суммарной неопределенности 19
9 Воспроизводимость и пригодность процесса 21
10 Воспроизводимость процесса измерений и производственного процесса 25
11 Продолжение анализа стабильности процесса измерений 27
12 Воспроизводимость процесса измерений по альтернативному признаку 27
Приложение А (справочное) Примеры 33
Приложение В (справочное) Используемые статистические методы 38
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам 42
Библиография 43

Введение

Целью процесса измерений является определение значения измеряемой характеристики продукции или процесса. Индексы воспроизводимости процесса измерений определяют на основе статистических свойств результатов измерений для стабильных процессов (процессов в состоянии статистической управляемости).

Вычисление индексов воспроизводимости и пригодности выполняют на основе результатов измерений. Неопределенность результатов измерений, используемых для расчета индексов воспроизводимости и пригодности, должна быть оценена до их использования. Фактическая неопределенность результатов измерений должна быть достаточно небольшой.

Если процесс измерений используют для оценки соответствия характеристики установленным требованиям, неопределенность процесса измерений следует сопоставлять с установленными требованиями. Если процесс измерений используют для управления процессом, неопределенность следует сопоставлять с изменчивостью (вариабельностью) процесса. В обоих случаях должны быть установлены границы приемлемости.

Неопределенность процесса измерений оказывает существенное влияние на качество результатов измерений. Неопределенность определяют на основе статистических свойств повторных измерений и знаний о процессе измерений.

Методы, установленные в настоящем стандарте, направлены на оценку неопределенности измерений (для получения дополнительной информации о неопределенности измерений см. ИСО 17450-2). Поэтому они полезны только в том случае, когда известно, что неопределенность метода и установленная в требованиях неопределенность невелики по сравнению с фактической неопределенностью измерений. Настоящий стандарт устанавливает методы определения и вычисления индексов воспроизводимости для процессов измерений на основе оценок неопределенности. В основе методов, использованных в настоящем стандарте, лежит подход, приведенный в Руководстве ИСО/МЭК 98-3 (GUM).

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Статистические методы

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ

Часть 7

Воспроизводимость процессов измерений

Statistical methods. Process management. Part 7. Capability of measurement processes

Дата введения — 2025—01—01

1 Область применения

В настоящем стандарте установлена процедура валидации измерительной системы и процесса измерений на соответствие установленной метрологической задачи с рекомендованным критерием приемки. Критерий приемки определен в виде индекса воспроизводимости (C_{MS}, C_{MP}) или отношения воспроизводимости (Q_{MS}, Q_{MP}).

Примечание — Настоящий стандарт соответствует Руководству ИСО/МЭК 98-3 (GUM) и устанавливает основные, упрощенные процедуры определения и объединения составляющих неопределенности для оценки индексов воспроизводимости фактического процесса измерений.

Настоящий стандарт разработан в первую очередь для простых одномерных процессов измерений, для которых известно, что неопределенность метода и установленных требований мала по сравнению с неопределенностью выполнения измерений. Настоящий стандарт также может быть использован в похожих ситуациях, когда измеряемую величину используют для оценки воспроизводимости или пригодности процесса измерений, но его не следует применять в случае сложных геометрических измерений, таких как измерение текстуры поверхности и положения объекта, когда необходимо использовать несколько точек измерения или одновременные измерения в нескольких направлениях.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты [для датированных стандартов применяют только указанное издание ссылочного стандарта, для недатированных — последнее издание (включая все изменения)]:

ISO 3534-1, Statistics — Vocabulary and symbols — Part 1: General statistical terms and terms used in probability (Статистика. Словарь и условные обозначения. Часть 1. Общие статистические термины и термины, используемые в теории вероятностей)

ISO 3534-2, Statistics — Vocabulary and symbols — Part 2: Applied statistics (Статистика. Словарь и условные обозначения. Часть 2. Прикладная статистика)

ISO 5725-1, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions [Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Общие принципы и определения]

ISO 5725-2, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method [Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод для определения воспроизводимости и повторяемости стандартного метода измерения]

Издание официальное

ISO 5725-3, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and result — Part 3: Intermediate measures of the precision of a standard measurement method [Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений]

ISO 5725-4, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 4: Basic methods for the determination of the trueness of a standard measurement method [Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений]

ISO 5725-5, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 5: Alternative methods for the determination of the precision of a standard measurement method [Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений]

ISO 5725-6, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 6: Use in practice of accuracy values [Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике]

ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) [Неопределенность измерений. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерений (GUM:1995)]

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ИСО 3534-1, ИСО 3534-2 и ИСО 5725 (все части), а также следующие термины с соответствующими определениями.

ИСО и МЭК ведут терминологические базы данных для использования в области стандартизации по следующим адресам:

- платформа онлайн-просмотра ИСО: доступна по адресу gost.e-ecolog.ru ;
- Электропедия МЭК: доступна по адресу gost.e-ecolog.ru .

3.1 **максимально допустимая погрешность измерений (максимально допустимая погрешность, предел погрешности);** MPE (maximum permissible measurement error, maximum permissible error, limit of error, MPE): Максимальное значение погрешности измерения относительно известного опорного значения величины (3.15), разрешенное спецификацией или нормативными документами для данного измерения, средства измерений (метода измерений) или измерительной системы.

Примечание 1 — Как правило, термин «максимально допустимая погрешность» или «предел погрешности» используют в тех случаях, когда имеется два экстремальных значения.

Примечание 2 — Термин «допуск» не следует использовать вместо термина «максимально допустимая погрешность».

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 4.26, изменено — добавлена аббревиатура термина «MPE»]

3.2 **измеряемая величина** (measurand): Величина, подлежащая измерению.

Примечание 1 — Для детального описания измеряемой величины необходимо знать особенности величины, иметь описание соответствующего физического, химического или иного явления, характерного для тела или вещества, которым присуща эта величина, включая их существенные составляющие, в том числе и химические объекты.

Примечание 2 — Во втором издании VIM, а также в МЭК 60050-300:2001 измеряемая величина определена как «величина, являющаяся объектом измерения».

Примечание 3 — Процесс измерений, включая измерительную систему и условия, при которых выполняют измерения, может изменить явление, тело или вещество таким образом, что измеряемая величина станет отличаться от исходной величины (до выполнения измерений). В этом случае необходимо вводить соответствующую поправку.

Пример 1 — Разность потенциалов между клеммами батареи может уменьшиться при использовании для измерений вольтметра с существенной внутренней проводимостью. Разность потенциалов в разомкнутой цепи может быть рассчитана на основе данных о внутреннем сопротивлении батареи и вольтметра.

Пример 2 — Длина стального стержня в состоянии теплового равновесия с окружающей средой при температуре 23 °С отличается от длины этого стержня при температуре 20 °С, которая и является измеряемой величиной. В этом случае необходимо использовать соответствующую поправку.

Примечание 4 — В химии для «измеряемой величины» иногда используют термин «аналит» или наименование исследуемого вещества или соединения. Такое употребление является ошибочным, поскольку эти термины не имеют отношения к величинам.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.3]

3.3 **неопределенность измерений (неопределенность)** (measurement uncertainty, uncertainty of measurement, uncertainty): Неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине (3.2) на основании измерительной информации.

Примечание 1 — Неопределенность измерений включает составляющие, обусловленные систематическими эффектами, в том числе составляющие, связанные с поправками и приписанными значениями эталонов, а также дефиниальную неопределенность. Иногда поправки на оцененные систематические эффекты не вводят, а вместо этого последние рассматривают как составляющие неопределенности измерений.

Примечание 2 — Параметром может быть, например, стандартное отклонение, представляющее собой стандартную неопределенность измерений (3.6) (или кратная ему величина) или половина длины интервала, имеющего установленную вероятность охвата.

Примечание 3 — Неопределенность измерений, как правило, включает много составляющих. Для некоторых из них на основе статистического распределения величины по результатам измерений могут быть получены оценки типа А (3.4), в виде их стандартного отклонения. Для других составляющих могут быть получены оценки неопределенности измерений типа В (3.5), также характеризуемые стандартным отклонением, полученные по функции плотности распределения, построенной на основе имеющегося опыта или другой информации.

Примечание 4 — В целом для данного набора информации следует понимать, что неопределенность измерений относится к количественной величине, характеризующей объект измерений. Изменение этой величины вызывает изменение соответствующей неопределенности.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.26]

3.4 **оценка неопределенности измерения типа А (оценка типа А)** (Type A evaluation of measurement uncertainty, Type A evaluation): Оценка составляющей неопределенности измерений (3.3), определяемая путем статистического анализа измеренных значений величины, получаемых при определенных условиях измерений.

Примечание 1 — О различных типах условий измерений — см. условия повторяемости измерений, условия промежуточной прецизионности измерений и условия воспроизводимости измерений.

Примечание 2 — Для информации о статистическом анализе, см. например, Руководство ИСО/МЭК 98-3.

Примечание 3 — См. также Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008, 2.3.2, ИСО 5725 (все части), ИСО 13528, ИСО 21748, ISO/TS 21749.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.28]

3.5 **оценка неопределенности измерения типа В (оценка типа В)** (Type B evaluation of measurement uncertainty, Type B evaluation): Оценка составляющей неопределенности измерений (3.3), определяемая способами, отличными от оценки неопределенности измерений типа А (3.4).

Пример — Оценка на основе информации:
- связанной со значениями величины, взятыми из публикаций;
- связанной со значением аттестованного стандартного образца;
- полученной из сертификата калибровки;
- о дрейфе;
- связанной с классом точности поверенного средства измерений;
- полученной, исходя из пределов, установленных на основе опыта.

Примечание — См. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008, 2.3.3.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.29]

3.6 **стандартная неопределенность измерений (стандартная неопределенность)** (standard uncertainty of measurement, standard uncertainty): Неопределенность измерений (3.3), выраженная в виде стандартного отклонения.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.30]

3.7 **суммарная стандартная неопределенность измерений (суммарная стандартная неопределенность)** (combined standard measurement uncertainty, combined standard uncertainty): Стандартная неопределенность измерений (3.6), которую получают суммированием отдельных стандартных неопределенностей измерений, связанных с входными величинами в модели измерений (3.11).

Примечание — В случае корреляции входных величин в модели измерений при вычислении суммарной стандартной неопределенности измерений также необходимо учитывать ковариации (см. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008, 2.3.4).

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.31]

3.8 **расширенная неопределенность измерений (расширенная неопределенность)** (expanded measurement uncertainty, expanded uncertainty): Произведение суммарной стандартной неопределенности (3.7) и коэффициента охвата, превышающего единицу.

Примечание 1 — Коэффициент охвата зависит от вида распределения вероятностей выходной величины в модели измерений (3.11) и выбранной вероятности охвата.

Примечание 2 — Коэффициент охвата в этом определении является числовым коэффициентом.

Примечание 3 — Расширенную неопределенность измерений в документах МЭК иногда называют «полной неопределенностью» [см. раздел 5 Рекомендации INC-1 (1980)] или просто «неопределенностью».

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.35]

3.9 **смещение результата измерения (смещение)** (measurement bias, bias): Оценка систематической погрешности результатов измерений.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.18]

3.10 **результат измерения величины** (measurement result): Множество значений величины, приписываемых измеряемой величине (3.2) вместе со всей другой доступной и существенной информацией.

Примечание 1 — Как правило, результат измерения содержит «соответствующую информацию» о наборе значений величины, при этом некоторые из этих значений могут лучше представлять значение измеряемой величины, чем другие. Эта информация может быть представлена в виде плотности распределения вероятностей.

Примечание 2 — Как правило, результат измерения выражается в виде единственного значения величины и неопределенности измерений (3.3). Если неопределенность измерений можно считать пренебрежимо малой для цели измерений, то результат измерения может быть выражен в виде единственного значения величины. Во многих областях такое представление является обычным способом представления результата измерений.

Примечание 3 — Как правило, в литературных источниках, а также в предыдущем издании Руководства ИСО/МЭК 99 (VIM) результат измерения определен как значение, приписываемое измеряемой величине, и даны пояснения корректного и некорректного результата в соответствии с областью применения измерений.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.9]

3.11 **модель измерений (модель)** (measurement model, model): Уравнение связи между величинами в конкретной измерительной задаче.

Примечание 1 — В общем виде модель измерений есть уравнение $h(Y, X_1, \ldots, X_n) = 0$, где Y — выходная величина в модели измерений, является измеряемой величиной (3.2), значение которой должно быть получено, исходя из информации о входных величинах в модели измерений $X_1, \ldots, X_n$.

Примечание 2 — В более сложных случаях, если есть две или более величин в модели измерения, то модель измерения состоит больше, чем из одного уравнения.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.48]

3.12 **задача измерений** (measurement task): Определение количественной оценки измеряемой величины (3.2) в соответствии с ее определением.

Примечание 1 — Термин «задача измерений» является синонимом цели применения процедуры измерений.

Примечание 2 — Задача измерений может представлять собой:

- сопоставление результатов измерений (3.10) с одной или двумя установленными границами для того, чтобы установить, является ли измеряемая величина приемлемой;
- установление соответствия измеряемой характеристики производственного процесса установленным требованиям;
- определение доверительного интервала заданной средней длины для разности двух значений одной и той же измеряемой величины.

3.13 **процесс измерений** (measurement process): Совокупность операций, проводимых с целью определения значения величины.

[ИСО 9000:2015, 3.11.5]

3.14 **разрешение** (resolution): Наименьшее изменение измеряемой величины, которое является причиной заметного изменения соответствующего показания, полученного с использованием измерительного оборудования.

Примечание 1 — Разрешение может зависеть, например, от шума (собственного или внешнего) или трения. Оно может также зависеть от значения измеряемой величины.

Примечание 2 — Для дисплея цифрового устройства разрешение равно цифровому шагу.

Примечание 3 — Разрешение не обязательно является линейным.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 4.14, изменено — добавлены фраза в определении «полученного с использованием измерительного оборудования», примечания 2 и 3]

3.15 **опорное значение величины (опорное значение)** (reference quantity value, reference value): Значение величины, которое используют в качестве основы для сопоставления со значениями величин того же рода.

Примечание 1 — Опорное значение величины может быть истинным значением измеряемой величины (3.2), в этом случае оно неизвестно, или принятым значением величины, в этом случае оно известно.

Примечание 2 — Опорное значение величины со связанной с ним неопределенностью (погрешностью) измерений (3.3) обычно приводят:

a) для материала, например, аттестованного стандартного образца;

b) устройства, например, стабилизированного лазера;

c) референтной методики измерений;

d) сличения эталонов.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 5.18]

3.16 **повторяемость измерений (повторяемость)** (measurement repeatability, repeatability): Прецизионность измерений в условиях повторяемости измерений.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.21]

3.17 **воспроизводимость измерений (воспроизводимость)** (measurement reproducibility, reproducibility): Прецизионность измерений в условиях воспроизводимости измерений.

[Руководство ИСО/МЭК 99:2007, 2.25, изменено — исключено примечание]

3.18 **стабильность процесса измерений** (stability of a measurement process): Свойство процесса измерений (3.13), благодаря которому его характеристики остаются постоянными во времени.

3.19 **единица, элемент, объект** (item, entity, object): Что-либо, что может быть описано и рассмотрено отдельно.

4 Обозначения и сокращения

4.1 Обозначения

a — половина ширины распределения возможных значений входной величины;

a_{OBJ} — максимальное отклонение;

α — уровень значимости;

B_i — смещение;

$B_{i\,max}$ — максимальное найденное смещение;

$\overline{B}_i$ — среднее арифметическое смещений;

C_{MP} — индекс воспроизводимости процесса измерений;

$C_{MP\,min}$ — минимальный индекс воспроизводимости процесса измерений;

C_{MS} — индекс воспроизводимости измерительной системы;

$C_{MS\,min}$ — минимальный индекс воспроизводимости измерительной системы;

C_p — индекс воспроизводимости процесса;

C_{pk} — минимальный индекс воспроизводимости процесса;

$C_{p\,obs}$ — наблюдаемый индекс воспроизводимости процесса;

$C_{p\,real}$ — фактический индекс воспроизводимости процесса;

Δ — разброс/изменчивость[1)] процесса;

Δ_U — 50 % разброса/изменчивости процесса до верхней границы;

Δ_L — 50 % разброса/изменчивости процесса до нижней границы;

[1)] *Синонимом термина «изменчивость» является термин «вариабельность».*

d_{LR} — интервал от последнего опорного значения, для которого все операторы оценили результат измерений как неудовлетворительный до первого опорного значения, для которого все операторы оценили результат измерений как удовлетворительный;

d_{UR} — интервал от последнего опорного значения, для которого все операторы оценили результат измерений как удовлетворительный, до первого опорного значения, для которого все операторы оценили результат как неудовлетворительный;

k — коэффициент охвата;

K — общее количество повторных измерений на одном образце. Образец может быть стандартным образцом или калиброванным исследуемым образцом;

k_{CAL} — коэффициент охвата в соответствии со свидетельством о калибровке;

l — измеренная длина;

L — нижняя граница требований;

$M_{PE\ 1}$ — максимально допустимая погрешность (первой характеристики);

$M_{PE\ 2}$ — максимально допустимая погрешность (второй характеристики);

M_{PE} — максимально допустимая погрешность измерительной системы (MPE-значение);

N — количество стандартных образцов;

n — количество измерений;

n_{ij} — частота *ij* результатов измерений;

n_{ji} — частота *ji* результатов измерений;

P — вероятность;

P_p — индекс пригодности процесса;

$P_{p\ obs}$ — наблюдаемый индекс пригодности процесса;

$P_{p\ real}$ — фактический индекс пригодности процесса;

Q_{attr} — отношение пригодности процесса измерений для альтернативных способов измерений;

$Q_{MS\ min}$ — минимальное отношение пригодности измерительной системы;

Q_{MS} — отношение пригодности измерительной системы;

$Q_{MP\ min}$ — минимальное отношение пригодности процесса измерений;

Q_{MP} — отношение пригодности процесса измерений;

R_E — разрешение измерительной системы;

s — выборочное стандартное отклонение (для среднего смещения);

s_A — выборочное стандартное отклонение (для повторяемости измерительной системы, ANOVA);

s_{EV} — выборочное стандартное отклонение (для повторяемости измерительной системы);

s_{LIN} — выборочное стандартное отклонение (для линейности системы измерений);

s_{obs} — выборочное стандартное отклонение (наблюдаемое стандартное отклонение);

s_{RES} — выборочное стандартное отклонение (со смещением среднего);

T — температура;

ΔT — разность температур;

$t_{1-(\alpha/2)}$ — критическое значение *t*-распределения Стьюдента для двухстороннего доверительного интервала [квантиль распределения Стьюдента уровня $(1 - \alpha/2)$];

U — верхняя граница требований;

u — стандартная неопределенность;

u_a — стандартная неопределенность коэффициента расширения;

u_{AV} — стандартная неопределенность воспроизводимости работы оператора;

u_{BI} — стандартная неопределенность смещения результатов измерений;

u_{CAL} — стандартная неопределенность результатов калибровки по стандартным образцам;

u_{EV} — стандартная неопределенность максимального значения повторяемости или разрешения;

u_{EVR} — стандартная неопределенность повторяемости по стандартным образцам;

u_{EVO} — стандартная неопределенность повторяемости по испытываемым образцам;

u_{GV} — стандартная неопределенность воспроизводимости измерительной системы;

u_{IAi} — стандартная неопределенность взаимодействий;

u_{LIN} — стандартная неопределенность линейности измерительной системы;

u_{MP} — суммарная стандартная неопределенность процесса измерений;

u_{MPE} — стандартная неопределенность, вычисленная на основе максимально допустимой погрешности;

u_{MS} — суммарная стандартная неопределенность измерительной системы;

$u_{MS\text{-}REST}$ — стандартная неопределенность других компонентов, не включенных в анализ измерительной системы;

u_{OBJ} — стандартная неопределенность неоднородности испытываемых объектов;

u_{RE} — стандартная неопределенность разрешения измерительной системы;

u_{REST} — стандартная неопределенность других компонентов, не включенных в анализ процесса измерений;

u_{STAB} — стандартная неопределенность стабильности измерительной системы;

u_{T} — стандартная неопределенность температуры;

u_{TA} — стандартная неопределенность, обусловленная неопределенностью коэффициента расширения;

u_{TD} — стандартная неопределенность перепада температур между исследуемым образцом и измерительной системой;

U_{attr} — расширенная неопределенность результатов наблюдений по альтернативному признаку;

U_{CAL} — расширенная неопределенность калибровки по стандартным образцам;

U_{MS} — расширенная неопределенность измерительной системы;

U_{MP} — расширенная неопределенность процесса измерений;

U_{LIN} — расширенная неопределенность линейности измерительной системы;

$X_{0,135\ \%}$ — квантиль разброса процесса уровня 0,135 %;

$X_{50\ \%}$ — квантиль разброса процесса уровня 50 %;

$X_{99,865\ \%}$ — квантиль разброса процесса уровня 99,865 %;

x_i — i-е значение результата измерений входной величины;

x_m — опорное значение величины;

X_{mid} — средняя точка процесса;

X_{nom} — номинальное значение/номинальный рабочий режим;

$\overline{x}_g$ — среднее арифметическое всех выборочных значений;

y_n — n-й результат измерений;

y_{nj} — nj-й результат измерений;

$\overline{y}$ — среднее арифметическое всех результатов измерений.

4.2 Сокращения

ANOVA — дисперсионный анализ;

GPS — геометрические требования;

GUM — руководство по выражению неопределенности измерения (Руководство ИСО/МЭК 98-3);

MPE — максимально допустимая погрешность;

MPL — граница максимально допустимой погрешности;

SPC — статистическое управление процессом;

VIM — международный метрологический словарь (Руководство ИСО/МЭК 99).

5 Основные принципы

5.1 Общие положения

Метод, установленный в настоящем стандарте, охватывает значительную часть методов оценки неопределенности измерений, которые применяют на практике. В некоторых случаях, когда отсутствуют предварительные условия, необходимые для применения метода, установленного в настоящем стандарте (отсутствие корреляции между величинами, отсутствие факторов чувствительности, наличие простой линейной модели), для оценки неопределенности результатов измерений пользователь должен использовать общий метод в соответствии с Руководством ИСО/МЭК 98-3 (GUM).

Приведенный в настоящем стандарте метод относится к оценке неопределенности измерений (см. также ИСО 17450-2). Поэтому, перед применением метода, необходимо убедиться, что неопределенность метода измерений и неопределенность требований малы по сравнению с неопределенностью измерений. Данный метод не следует использовать для процессов выполнения сложных геометрических измерений, таких как измерение текстуры поверхности и положения объекта, для определения которых необходимы результаты измерений в нескольких точках или одновременные измерения в нескольких направлениях, или то и другое вместе.

Руководство ИСО/МЭК 98-3 (GUM) допускает оценку стандартной неопределенности любым подходящим способом. Различают оценку неопределенности статистическими методами (тип А) и оценку другими методами (типа В). При определении оценки суммарной стандартной неопределенности оба типа оценок могут быть охарактеризованы квадратом стандартных неопределенностей и могут быть обработаны одним и тем же образом. Стандартные неопределенности могут быть объединены для получения суммарной стандартной неопределенности результата измерения. Эту оценку неопределенности выполняют в соответствии с Руководством ИСО/МЭК 98-3 (GUM) с использованием закона распространения неопределенности. Полное описание этой процедуры и дополнительных предположений, на которых она основана, приведено в Руководстве ИСО/МЭК 98-3 (GUM).

Для оценки измерительной системы или процесса измерений могут быть вычислены отношения Q_{MS} или Q_{MP} или индексы воспроизводимости C_{MS} или C_{MP} на основе суммарной стандартной неопределенности измерений и требований.

Суммарная расширенная неопределенность должна быть существенно меньше, чем неопределенность, установленная в требованиях к измеряемой характеристике.

Если составляющие неопределенности на основе эксперимента (оценка типа А) не соответствуют среднему значению этих составляющих в фактической неопределенности процесса измерений, то эти составляющие не могут быть оценены экспериментально. В этом случае они должны быть оценены с помощью математической модели (оценка типа В; например, постоянная температура при проведении исследований в измерительной лаборатории, и нормальные температурные вариации в месте будущего применения). Специалист должен глубоко знать используемую модель измерений.

На рисунке 1 приведена схема поэтапного выполнения метода. Линейность, повторяемость и смещение могут быть определены с помощью стандартного образца, как показано на блок-схеме. Альтернативно смещение может быть определено на основе значения MPE (максимально допустимой погрешности).

5.2 Разрешение

Разрешение является одним из факторов, влияющих на неопределенность измерений. Неопределенность измерений никогда не может быть меньше неопределенности разрешения. Если расширенная неопределенность, вычисленная с учетом фактического разрешения, больше установленной в требованиях к процессу измерений, то измерительная система должна быть улучшена.

При использовании измерительной системы для оценки процессов с двусторонними требованиями, разрешение должно быть меньше 1/20 интервала требований, если только поставщик и потребитель не установили иные требования. При использовании односторонних требований разрешение должно быть меньше 1/10 интервала требований, определенного в 9.3.

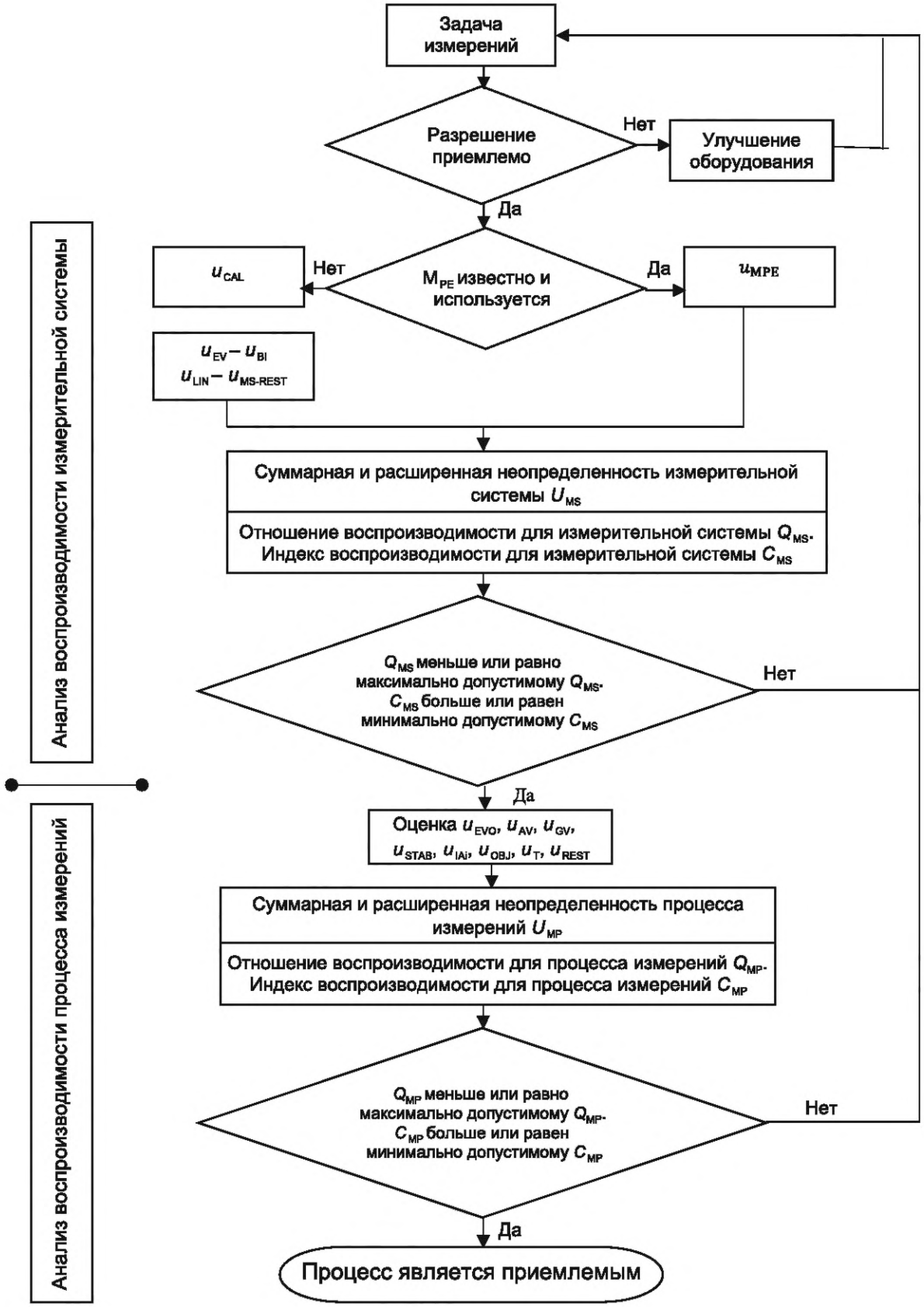


Рисунок 1 — Анализ воспроизводимости процесса измерений

При использовании измерительной системы в управлении производственным процессом с применением методов SPC с двусторонними требованиями разрешение должно быть меньше 1/10 изменчивости процесса, если только поставщик и покупатель не установили иные требования (часто это шесть стандартных отклонений, см. ИСО 22514-1). Поскольку изменчивость процесса может меняться с течением времени, рекомендуется поддерживать требования на уровне 1/20 интервала двусторонних требований или 1/10 интервала односторонних требований, чтобы избежать повторной оценки из-за изменчивости отклонений. Это также относится к случаям, когда воспроизводимость производственного процесса высока и, следовательно, изменчивость производственного процесса очень мала по сравнению с производственными допусками.

5.3 Известная и используемая максимально допустимая погрешность

5.3.1 Общие положения

При использовании стандартной измерительной системы следует определить максимально допустимую погрешность (MPE) исследуемой системы (обычно заданной в виде определенного значения). Для документирования соответствия определенной метрологической характеристики установленным требованиям, заданным в виде одной или нескольких максимально допустимых погрешностей, используют калибровку.

В этом случае для расчета воспроизводимости измерительной системы может быть использовано значение MPE или, если необходимо измерять несколько характеристик, объединенный результат значений MPE вместо применения экспериментального метода. Если в качестве измерительной системы использована совокупность различного оборудования, может быть рекомендовано определение MPE. Если в процессе измерений использована только одна измерительная система, то предпочтительнее использовать экспериментальный метод, поскольку в этом случае суммарная неопределенность, как правило, меньше.

5.3.2 MPE, максимально допустимое отклонение измерительной системы, u_{MPE}

Максимально допустимая погрешность (MPE) или граница погрешности (часто называемая MPL) — это допустимое экстремальное значение отклонения результатов измерений относительно известного опорного значения. MPE всегда описывает половину ширины интервала допустимого отклонения.

Если MPE подтверждено калибровкой, включает неопределенность калибровки и заслуживает доверия, определение отдельных составляющих неопределенности измерительной системы может быть опущено. Для этого необходимо убедиться, что доказательства, представленные поставщиком услуг калибровки, в дополнение к определенному значению MPE содержат, по крайней мере, следующую информацию:

- ссылку на применяемый национальный/международный стандарт по калибровке;
- сведения об использовании методов калибровки, которые были опубликованы и признаны на международном уровне, или аналогичных методов;
- документацию о стандартах (на номинальные значения и неопределенности калибровки), использованных опорных точках и количестве выполненных повторных измерений;
- данные об условиях, в которых была проведена калибровка (лаборатория, фактические отклонения температуры, диапазон влажности воздуха и т. п.);
- независимо от того, принимается ли решение об использовании с учетом или без учета неопределенности калибровки, разрешение должно быть значительно ниже установленного предельного значения погрешности (опорное значение: RE ≤ 25 % MPE).

Важно, чтобы используемое MPE было напрямую связано с фактической задачей измерения. Например, значение MPE микрометра, указанное в ИСО 3611, явно связано с максимально допустимым отклонением длины при различных вариантах его использования на практике. В других случаях, например, MPE, определенное в соответствии с ИСО 10360-2 и ИСО 10360-5, относится только к условиям, определенным в этих стандартах (стилус, окружающая среда, калибровочный шарик, точки зондирования и т. д.), и не имеет отношения к процессам измерения и не должно быть использовано на практике (например, при измерении параллельности) для вычисления Q_{MS} или C_{MS}.

5.4 Пределы воспроизводимости и пригодности для измерительной системы и процессов измерений

Если для конкретного процесса измерений определена соответствующая измерительная система, важно установить предел ее неопределенности измерений. В этом случае выбор измерительной системы является более простым и для рассматриваемых задач измерений.

При отсутствии требований к максимуму Q_{MP} или минимуму C_{MP}, вычисляют Q_{MS} или C_{MS}.

Следующий метод основан на предварительном моделировании некоторых составляющих неопределенности, связанных с процессом измерений, таких как неоднородность объекта измерений, разрешение и температура.

6 Выполнение метода

6.1 Общие положения

Как и любой процесс, процесс измерений находится под влиянием как случайных, так и систематических источников изменчивости. Для оценки и контроля изменчивости процесса измерений необходимо идентифицировать все важные источники его изменчивости и, если возможно, контролировать их. Предполагается, что составляющими неопределенности, не превышающими 10 % от наибольшей составляющей неопределенности, можно пренебречь.

6.2 Факторы, влияющие на процесс измерений

6.2.1 Общие положения

В производственной практике данные о неопределенности, как правило, ограничены значением неопределенности, рассчитанным на основе повторяемости процесса измерений с использованием стандартного образца или объекта, типичного для рассматриваемого процесса, обычно называемого исследуемым образцом. Неопределенность, являющаяся результатом любого отклонения от линейности, должна быть преднамеренно скорректирована до нуля или установлена в спецификации изготовителя, например, в терминах максимально допустимой погрешности.

Для оценки повторяемости и смещения процесса измерений рекомендуется использовать известный эксперимент по оценке повторяемости на стандартном образце. На основании этого эксперимента можно оценить индекс воспроизводимости измерений. Этот метод может быть расширен на использование нескольких стандартных образцов, аналогичных или близких по требованиям. В обоих случаях измерительная система может быть скорректирована с помощью идентифицированной систематической погрешности (погрешностей).

Определить линейность модели измерительной системы можно с помощью исследования на основе не менее трех стандартных образцов. Результат этого исследования (функция регрессии) может быть использован для корректировки результата измерений. Это обеспечивает снижение неопределенности, связанной с отклонением корреляционной функции от линейности.

6.2.2 Составляющие неопределенности измерительной системы

6.2.2.1 Виды составляющих неопределенности

Составляющими неопределенности измерительной системы (см. таблицу 4) являются:

- неопределенность, рассчитанная на основе максимально допустимой погрешности;
- неопределенность, определенная на основе комбинации:
- неопределенности калибровки;
- повторяемости или разрешения;
- смещения;
- линейности;
- других составляющих неопределенности.

6.2.2.2 Оценка неопределенности, использующая значение максимально допустимой погрешности

Если измерительное оборудование или стандарт на метод измерений соответствуют установленным значениям MPE по каждой метрологической характеристике, эти значения MPE следует использовать для оценки составляющих неопределенности, как показано в таблице 1.

Таблица 1 — Неопределенность максимально допустимой погрешности

Составляющие неопределенности	Обозначение	Критерий/модель
Значение MPE	u_{MPE}	Стандартная неопределенность, соответствующая максимально допустимой погрешности. $u_{MPE} = \frac{M_{PE}}{\sqrt{3}}$ при использовании предположения о прямоугольном распределении.

Окончание таблицы 1

Составляющие неопределенности	Обозначение	Критерий/модель
		В случаях, когда несколько значений MPE влияют на процесс измерений, суммарная стандартная неопределенность MPE может быть вычислена по формуле: $u_{MPE} = \sqrt{\frac{M_{PE1}^2}{3} + \frac{M_{PE2}^2}{3}} \ldots$

6.2.2.3 Разрешение измерительной системы

Фактическая измерительная система должна иметь такое разрешение, чтобы расширенная неопределенность разрешения, вычисленная на основе стандартной неопределенности, была существенно меньше (обычно 5 %) интервала требований к измеряемой характеристике.

Разрешение измерительной системы (последний знак цифрового представления или округления измеряемой величины) всегда дает составляющую неопределенности. Если составляющая неопределенности, соответствующая повторяемости, полученная на основе экспериментальных данных, больше составляющей неопределенности, соответствующей разрешению, то неопределенность разрешения необходимо учитывать.

Если составляющая неопределенности, соответствующая повторяемости, больше составляющей неопределенности, соответствующей разрешению, то неопределенность разрешения включают в неопределенность повторяемости. В противном случае составляющую u_{RE} следует включить в модель, как показано в таблице 2.

Таблица 2 — Неопределенность разрешения

Составляющие неопределенности	Обозначение	Критерий/модель
Неопределенность, соответствующая разрешению	u_{RE}	$u_{RE} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_E}{2} = \frac{R_E}{\sqrt{12}}$, где R_E — разрешение, относительно которого предполагается, что оно подчиняется прямоугольному распределению. При использовании аналоговых шкал фактическое распределение может быть другим, например, нормальным распределением

6.2.2.4 Вычисление повторяемости, смещения и линейности с использованием стандартных образцов или калиброванных исследуемых образцов

Используемые стандартные образцы или исследуемые образцы должны быть изготовлены в соответствии с национальными или международными стандартами или так называемыми консенсусными стандартами (стандартами, согласованными потребителем и поставщиком). Существующую неопределенность следует определять во время калибровки (см. таблицу 3).

Таблица 3 — Неопределенность калибровки с использованием стандартных образцов

Составляющие неопределенности	Обозначение	Критерий/модель
Калибровка	u_{CAL}	Стандартное отклонение неопределенности калибровки (по свидетельству). В случаях, когда неопределенность указана в протоколе в виде расширенной неопределенности, ее необходимо поделить на соответствующий коэффициент охвата: $u_{CAL} = U_{CAL}/k_{CAL}$

Анализ линейности необходимо выполнять с такой периодичностью, чтобы обеспечить уверенность в том, что оценка значения M_{PE} в период между двумя исследованиями линейности не увеличивается.

6.2.2.5 Экспериментальный метод

Экспериментальный метод позволяет на основе результатов измерений определить коэффициенты уравнения $Y = A + BX$ (функции, связывающей зависимую переменную Y и независимую переменную X).

Результаты измерений, полученные с помощью измерительной системы, соответствуют (неизвестным) значениям параметров калибровочной функции *A* и *B*. Их моделируют с помощью стандартных образцов с калиброванными значениями X_i, заданными в стандартных единицах, а соответствующие «отклики» или показания прибора Y_i фиксируют.

Таблица 4 — Неопределенность измерительной системы

Составляющие неопределенности	Обозначение	Критерий/модель
Неопределенность, соответствующая линейности	u_{LIN}	Случай 1. $u_{LIN} = 0$. Случай 2. $u_{LIN} = \frac{a}{\sqrt{3}}$, где a — половина длины интервала равномерного распределения или известного значения MPE. Случай 3. Значение u_{LIN} определено экспериментально вместе с u_{EVR} (см. пример 2 ниже). Случай 4. Значение u_{LIN} определено на основе свидетельства о калибровке
Неопределенность, соответствующая смещению	u_{BI}	Случай 1. По измерениям на стандартных образцах u_{BI} может быть вычислена как расстояние между значением, соответствующим стандартному образцу, и средним арифметическим результатов измерений. Случай 2. По K повторных измерений на каждом из N (≥2) различных стандартных образцов с $N \cdot K \geq 30$ u_{BI} может быть вычислена по максимальному смещению на всех стандартных образцах. Случай 3. Значение u_{BI} определяют экспериментально вместе с u_{EVR} (см. случай 2 ниже). $u_{BI} = \frac{\lvert \bar{x}_g - x_m \rvert}{\sqrt{3}}$
Неопределенность, соответствующая повторяемости с использованием стандартных образцов	u_{EVR}	Случай 1. u_{EVR} оценивают на основе не менее 30 измерений с использованием стандартного образца. Случай 2. K повторных измерений выполняют на каждом из N (≥2) стандартных образцов с $N \cdot K \geq 30$. Оценивают u_{EVR} и u_{LIN} методом ANOVA
Другие не учтенные составляющие неопределенности	$u_{MS\text{-}REST}$	Например, неопределенность за счет смены персонала, выполняющего измерения

6.2.3 Дополнительные составляющие неопределенности, соответствующей процессу измерений

6.2.3.1 Общие положения

При анализе конкретного процесса измерений в реальных условиях вместе с вышеупомянутыми дополнительными составляющими неопределенности процесса измерений (см. таблицу 5) необходимо выполнить идентификацию и определение дополнительных составляющих неопределенности процесса измерений.

6.2.3.2 Определение составляющих неопределенности на основе эксперимента (тип А)

6.2.3.3 Определение составляющих неопределенности, не включенных в эксперимент (тип В)

В дополнение к оцененным составляющим неопределенности измерительной системы (6.2.2) и оцененным составляющим неопределенности процесса измерений (6.2.3.2) следует, используя математическую модель, определить следующие дополнительные составляющие неопределенности (см. таблицу 6).

Таблица 5 — Неопределенность процесса измерений в условиях повторяемости и воспроизводимости

Составляющие неопределенности	Обозначение	Критерий/модель
Неопределенность, соответствующая повторяемости с использованием исследуемых образцов	u_{EVO}	Для анализа всегда следует использовать не менее пяти исследуемых образцов, на которых выполняют измерения: - не менее двух операторов или - для измерений используют не менее двух различных измерительных систем (если это обоснованно приемлемо). Минимальный объем выборки: 30. Оценку составляющих неопределенности выполняют методом ANOVA. [Руководство ИСО/МЭК 99 (VIM), Руководство ИСО/МЭК 98-3 (GUM), ИСО 5725 (все части), ИСО 13528, ИСО 21748, ISO/TS 21749]. Если влияние оператора отсутствует, количество исследуемых образцов следует увеличить
Неопределенность воспроизводимости, соответствующая влиянию замены оператора от измерения к измерению	u_{AV}	
Неопределенность воспроизводимости, соответствующая воспроизводимости измерительной системы (вместо результатов измерения)	u_{GV}	
Неопределенность, соответствующая влиянию изменения времени измерений в условиях воспроизводимости	u_{STAB}	
Неопределенность, соответствующая взаимодействиям	u_{LAi}	

Примечание 1 — В особых случаях (например, при высокой стоимости проверки) могут быть выполнены два повторения измерений.

Примечание 2 — Если количество выборок менее 30, для оценки расширенной неопределенности может быть использован *t*-критерий Стьюдента (см. раздел 8).

Таблица 6 — Другие неопределенности процесса измерений

Составляющие неопределенности	Обозначение	Критерий/модель
Неоднородность образцов	u_{OBJ}	$$u_{OBJ} = \frac{a_{OBJ}}{\sqrt{3}},$$ где a_{OBJ} — максимально допустимая или ожидаемая погрешность при измерении характеристик объекта (например, отклонение формы)
Температура	u_T	Влияние температуры может быть вычислено по формуле $$u_T = \sqrt{u_{TD}^2 + u_{TA}^2}.$$ Неопределенность, соответствующая перепадам температуры, u_{TD} может быть оценена в соответствии с ИСО 14253-2. $$u_{TD} = \frac{\Delta T \cdot \alpha \cdot l}{\sqrt{3}},$$ где α — коэффициент расширения; ΔT — разность температур. Предполагается прямоугольное распределение. Неопределенность коэффициента расширения может быть оценена в соответствии с ИСО 15530-3. $$u_{TA} = \lvert T - 20\ °C \rvert \cdot u_\alpha \cdot l,$$ где T — среднее арифметическое температуры в процессе измерений; u_α — неопределенность коэффициента расширения; l — наблюдаемое значение измеряемой длины (Amd.1:2024)

В приведенных формулах T — температура. Температуру не следует путать с интервалом требований или целевым значением, используемыми в других разделах настоящего стандарта.

В случае, когда компенсация перепада температур не выполнена заранее, вклад перепада температур в неопределенность следует включать в оценку по приведенной формуле.

Объекты измерений включают также объекты, в которых измерения выполняют встроенные устройства.

6.2.3.4 Влияние отклонений исследуемых образцов на результат измерений

Во многих процессах измерений поверхность исследуемого образца контактирует с измерительной системой в процессе измерений. В зависимости от текстуры поверхностной, а также отклонения формы и геометрических размеров от номинальных взаимосвязь измерительной системы и исследуемого образца формирует составляющую неопределенности. Отклонения зависят от измеряемой величины и распределения точек измерений на образце. (Если измеряемая величина соответствует максимальному значению отклонения и выполняют только одно измерение, то отклонение прямо влияет на результат измерения, однако при выполнении нескольких измерений и вычислении среднего наблюдений отклонения усредняются и не влияют на неопределенность измерений).

Составляющая неопределенности a_{OBJ} может быть определена на основе требований чертежа или с помощью подходящего эксперимента для определения максимального отклонения или неоднородности.

Составляющую u_{OBJ} следует добавить к модели, как показано в таблице 10.

6.2.3.5 Разрешение

Если составляющая неопределенности, соответствующая исследуемому образцу (u_{EVO}), больше неопределенности, соответствующей разрешению, то неопределенность разрешения включают в неопределенность повторяемости. В противном случае компонент u_{RE} следует включить в модель, как показано в таблице 2.

6.2.3.6 Влияние температуры

6.2.3.6.1 Вычисление неопределенности

Неопределенность влияния температуры u_T следует вычислять на основе неопределенности, соответствующей разности температур, и неопределенности, обусловленной неизвестными значениями коэффициентов расширения:

$$u_T = \sqrt{u_{TD}^2 + u_{TA}^2}.$$

6.2.3.6.2 Составляющая неопределенности, соответствующая разности температур и наличием расширения

Температура стандартного образца в требованиях на геометрические размеры и измерение геометрических характеристик равна 20 °С (см. ИСО 1). Однако могут быть использованы и другие значения температуры (например, при анализе влияния температуры на электрические свойства), которые могут быть связаны с абсолютной температурой, временными и пространственными температурными градиентами линейного расширения, изгиба и т. п. измерительной системы. Измерительный прибор и исследуемый объект являются в этом случае причиной появления неопределенности u_{TD}.

Взаимосвязь температуры и линейного размера дает уравнение линейного расширения:

$$\Delta L = \Delta T \, \alpha \, l,$$

где ΔT — соответствующая разность температур;

α — коэффициент температурного расширения материала;

l — рассматриваемая эффективная длина.

При необходимости известное отклонение температуры от эталонной температуры может быть скорректировано как систематическая ошибка.

Неопределенность u_{TD} может, например, быть оценена в соответствии с ИСО 14253-2.

6.2.3.6.3 Неопределенность коэффициента расширения

Часто возникает неопределенность, вызванная изменениями коэффициента расширения исследуемых образцов. В этом случае, неопределенность u_{TA} вычисляют по формуле:

$$u_{TA} = |T - 20\ °C| \cdot u_\alpha \cdot l,$$

где u_α — стандартная неопределенность коэффициента расширения исследуемого образца.

(Amd.1:2024)

Неопределенность u_{TA} может быть также оценена в соответствии с ИСО 15530-3.

7 Исследования для вычисления составляющих неопределенности

7.1 Измерительная система

7.1.1 Общие положения

Для того чтобы исследование позволяло получить необходимую информацию, обязательным условием является определение разрешения измерительной системы и проверки ее соответствия процессу измерений.

Необходимо убедиться, что стандартная неопределенность повторяемости не меньше стандартной неопределенности разрешения. В противном случае неопределенность разрешения необходимо использовать вместо неопределенности повторяемости (max $\{u_{EVR}, u_{EVO}, u_{RE}\}$).

Примененный метод основан на предположении о линейности калибровочной функции измерительной системы. Если известно, что калибровочная функция измерительной системы линейна, неопределенности повторяемости и смещения могут быть найдены с использованием одного (или нескольких) стандартных образцов.

7.1.2 Неопределенности повторяемости и смещения при использовании одного стандартного образца

7.1.2.1 Общие положения

Если составляющая неопределенности u_{LIN} равна нулю или оценена на основе максимально допустимой погрешности (M_{PE}), составляющую u_{EVR} следует определять экспериментально. Определение u_{EVR} основано на оценке повторяемости по результатам измерений на стандартном образце или исследуемом образце. Для оценки совместного воздействия смещения и повторяемости должно быть выполнено не менее 30 измерений. В этом случае неопределенность смещения и изменчивости используют как две составляющие неопределенности u_{EVR} и u_{BI}.

7.1.2.2 Предварительные условия

Опорное значение стандартного образца или исследуемого образца следует выбирать близким к целевому значению. Максимальное отклонение стандартного образца от целевого значения зависит от особенностей измерительной системы.

Необходимо определить опорное значение x_m стандартного образца или исследуемого образца (обычно при калибровке).

Стандартный образец или исследуемый образец необходимо удалять и заменять перед каждым измерением.

В случае одностороннего допуска с естественной границей опорное значение стандартного образца или исследуемого образца следует брать близким к значению, установленному в требованиях.

7.1.2.3 Процедура

Выполняют не менее 30 измерений на стандартном образце или калиброванном исследуемом образце.

На основе фактических результатов измерений смещение (B_i) и стандартную неопределенность повторяемости по данным стандартного образца и стандартную неопределенность смещения оценивают по формулам:

$$u_{EVR} = s = \sqrt{\frac{1}{K-1}\sum_{i=1}^{K}\left(x_i - \overline{x}_g\right)^2}, \; B_i = |\overline{x}_g - x_m|,$$

где K — количество повторных измерений;

x_i — значение i-го результата;

$\overline{x}_g$ — среднее арифметическое результатов измерений.

$$u_{BI} = \frac{B_i}{\sqrt{3}} = \frac{\left|\overline{x}_g - x_m\right|}{\sqrt{3}}.$$

Данная формула может быть использована только в тех случаях, когда невозможно различить систематические и случайные ошибки.

Установка начала отсчета в измерительном оборудовании (установка на нуль) может привести к появлению дополнительной изменчивости, поэтому перед каждым экспериментом важно установить нуль в измерительной системе, используя определенный стандартный образец или исследуемый образец.

Если в эксперименте по определению повторяемости использовано более одного стандартного образца, то в качестве смещения используют наибольшее среднее отклонение от соответствующего стандартного образца. Если дисперсия предполагается постоянной, следует использовать среднюю дисперсию.

7.1.3 Стандартная неопределенность линейности u_{LIN}

7.1.3.1 Применение методов

Стандартная неопределенность, соответствующая отклонению от линейности, может быть определена двумя методами (методом А или В).

7.1.3.2 Метод В

Данные рабочих таблиц, калибровки/поверки, сертификатов или других документов четко показывают максимальное отклонение от линейности в области применения. К ясности и достоверности информации предъявляют те же требования, что и к МРЕ (см. 5.3). Следует различать следующие ситуации.

Отклонение от линейности установлено с помощью значения a, т. е. в виде области от ($-a$) до ($+a$):

$$u_{LIN} = \frac{a}{\sqrt{3}}.$$

Отклонение от линейности задано стандартным отклонением s_{LIN}:

$$u_{LIN} = s_{LIN}.$$

Отклонение от линейности задано расширенной неопределенностью U_{LIN} с коэффициентом охвата k:

$$u_{LIN} = \frac{U_{LIN}}{k}.$$

7.1.3.3 Метод А

Отклонение от линейности определяют с помощью «экспериментального метода» (см. 6.2.2.5). В этом случае отклонение от линейности описывает доля смещения вне области применения при предположении, что смещение, описанное в 7.1.2.3, является постоянным. На практике переменную и постоянную части смещения трудно выделить с помощью эксперимента.

В «простой линейной оценке» (см. рисунок 2) это разделение опущено, что в некоторых случаях может привести к неверной оценке неопределенности. Однако простая линейная оценка позволяет сократить исследование линейности и обеспечить границы приемлемости с помощью двух стандартных образцов (по одному в области каждой границы). Чтобы повысить качество исследования в любое время можно использовать большее количество стандартных образцов. В целом необходимо не менее 30 измерений, например, при двух стандартных образцах необходимо не менее 15 измерений на каждом; при трех стандартных образцах — не менее 10 измерений на каждом. В этом случае линейность показана не явно, она включена в u_{BI}.

Оценка линейности с помощью ANOVA (см. рисунок 3) предполагает постоянное смещение u_{BI} и такая замена определения смещения соответствует 7.1.2.3. Более того переменную часть u_{LIN} смещения и повторяемости в соответствующей части u_{EVR} оценивают с помощью дисперсионного анализа. В этом случае не менее трех образцов сравнения/стандартных образцов необходимо несколько раз измерить в условиях повторяемости, так чтобы общее количество результатов измерений было не менее 30.

Фактические значения измерений на стандартных образцах должны быть распределены приблизительно равномерно вне области применения измерительной системы, при этом выход за границы допустимой области должен быть правдоподобен.

В обоих случаях неопределенность калибровки на образцах сравнения/стандартных образцах должна быть существенно меньше 5 % допуска характеристики. Наибольшую неопределенность на образцах сравнения/стандартных образцах используют в качестве u_{CAL} (см. 6.2.2.4) для определения суммарной неопределенности измерительной системы. Измеряемые величины должны быть получены в типичных условиях использования измерительной системы.

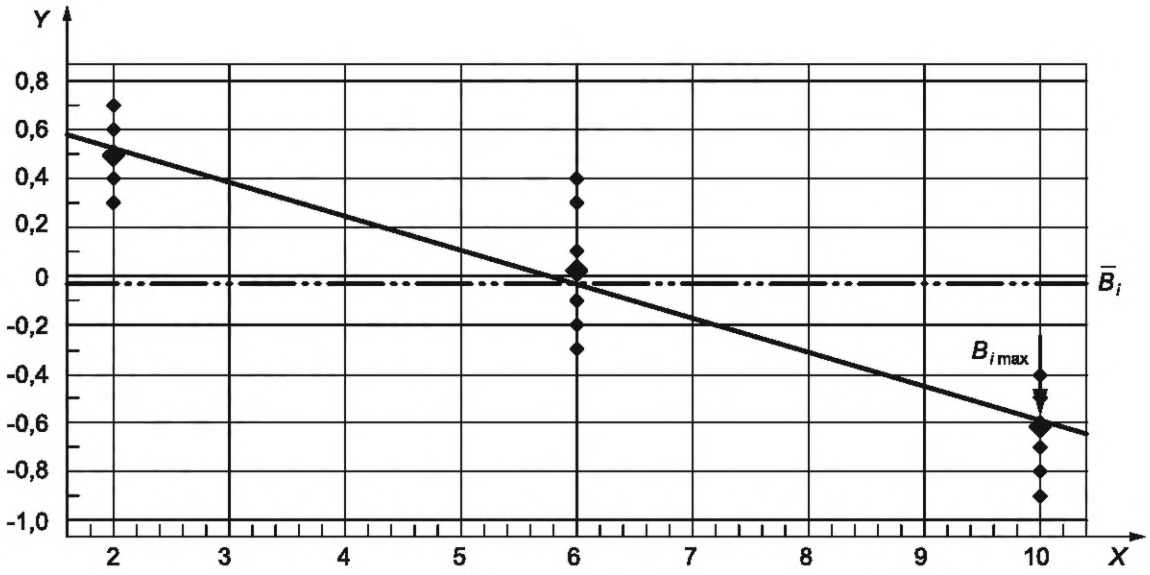
Простая оценка линейности

Смещение вычисляют для каждого образца сравнения/стандартного образца. Если испытания спланированы так, что с выбранным образцом сравнения/стандартным образцом найдена точка максимальной линейности отклонения, это используют в максимальном смещении (см. рисунок 2). Поэтому, если рассмотрение u_{LIN} не нужно, рассматривают только u_{BI}. Для n образцов сравнения/стандартных образцов:

$$B_{i\,max} = \max(B_{i1} \ldots B_{in}),$$

$$u_{BI} = \frac{1}{\sqrt{3}} B_{i\ max},$$

$$u_{LIN} = 0.$$



X — значение, соответствующее образцам сравнения; *Y* — смещение

Рисунок 2 — Определение линейности с максимальным смещением

Кроме того, повторяемость S_{EV} вычисляют для каждого образца сравнения/стандартного образца. Максимальная повторяемость — это u_{EVR} (см. 6.2.2.5) в вычислении суммарной неопределенности измерительной системы.

Такое вычисление линейности соответствует «худшему случаю» в предположении, что линейность соответствует виду кривой для характеристики и максимальное отклонение определено в процессе испытаний. Вычисление не применимо, если линейность соответствует преимущественно случайной изменчивости.

7.1.3.4 Оценка линейности с применением ANOVA

Среднее смещение вычисляют по всем определенным отклонениям от фактических значений образцов сравнения/стандартных образцов, которые преобразуют в стандартную неопределенность по аналогии с 6.2.2.5 в предположении прямоугольного априорного распределения.

$$u_{BI} = \frac{\left(\bar{B}_i\right)}{\sqrt{3}}.$$

Предполагается, что это среднее смещение не может быть скорректировано и изменяется случайным образом после перенастройки или модернизации измерительной системы. Корректируемые части должны быть уведомлены до проверки [см. 5.1 и Руководство ИСО/МЭК 98-3 (GUM)].

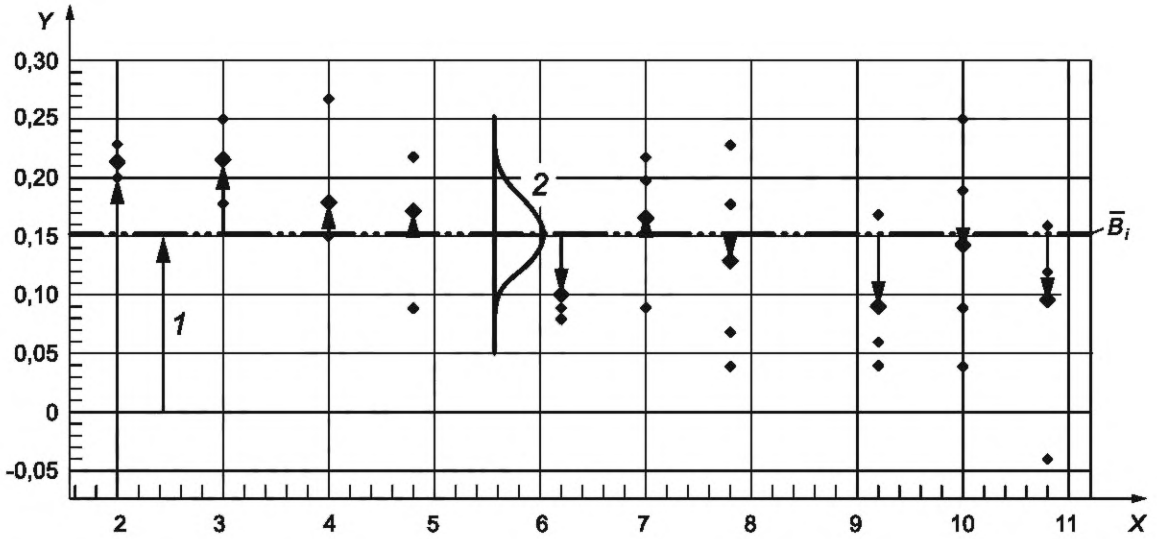
С помощью анализа односторонней изменчивости (см. [23]) могут быть определены отдельные составляющие. Изменчивость среднего смещения (остаточное смещение по отношению к образцу сравнения/номиналу) s_A приводит к переменной доле смещения u_{LIN}:

$$u_{LIN} = s_A.$$

Средняя изменчивость s_{RES} вокруг средних значений отдельных стандартных образцов (оставшиеся остатки) приводит к повторяемости стандартного образца u_{EVR}:

$$u_{EVR} = s_{RES}.$$

Исходные данные для рисунка 3 взяты из ИСО 11095:1996 с десятью стандартными образцами и четырьмя измерениями на каждом из них.



X — значение, соответствующее образцу сравнения; *Y* — смещение; *1* — среднее смещение по всем образцам сравнения; *2* — неопределенность, соответствующая линейности; ◆ — отдельная погрешность; ◆ — среднее смещение образца сравнения

Рисунок 3 — Определение линейности с помощью ANOVA

8 Вычисление суммарной неопределенности

8.1 Общие положения

Суммарную неопределенность измерительной системы и процесса измерений следует вычислять в соответствии с таблицей 9. Вычисления могут быть выполнены только в том случае, когда нет корреляции между составляющими. Дополнительная информация приведена в Руководстве ИСО/МЭК 98-3:2008 (раздел 5).

Таблица 9[1)] — Вычисление суммарной неопределенности

Составляющие неопределенности	Обозначение	Суммарная неопределенность
Калибровка стандартного образца или исследуемого образца	u_{CAL}	$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{LIN}^2 + u_{BI}^2 + u_{EV}^2 + u_{MS\text{-}REST}^2}$, где $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{RE}\}$
Отклонения от линейности	u_{LIN}	
Смещение	u_{BI}	
Повторяемость на стандартных образцах	u_{EVR}	
Разрешение	u_{RE}	
Другие компоненты неопределенности (измерительной системы)	$u_{MS\text{-}REST}$	
Повторяемость на исследуемом образце	u_{EVO}	$u_{MP} = \left(u_{CAL}^2 + u_{LIN}^2 + u_{BI}^2 + u_{EV}^2 + u_{MS\text{-}REST}^2 + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{STAB}^2 + u_{OBJ}^2 + u_T^2 + u_{REST}^2 + \sum_i u_{IAi}^2\right)^{\frac{1}{2}}$, где $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{EVO}, u_{ER}\}$
Воспроизводимость действий оператора	u_{AV}	
Воспроизводимость измерительной системы (различные положения процесса измерений)	u_{GV}	
Воспроизводимость в течение времени	u_{STAB}	
Взаимодействия	u_{IAi}	
Неоднородность измеряемой величины	u_{OBJ}	
Температура	u_T	
Другие компоненты неопределенности (процесса измерений)	u_{REST}	

[1)] *Нумерация таблиц — согласно ISO 22514-7:2021.*

Суммарная стандартная неопределенность измерительной системы может быть оценена по формуле (см. таблицу 9):

$$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{LIN}^2 + u_{BI}^2 + u_{EV}^2 + u_{MS\text{-}REST}^2},$$

где $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{RE}\}$.

Аналогичным образом может быть оценена суммарная стандартная неопределенность процесса измерений (см. таблицу 9):

$$u_{MP} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{LIN}^2 + u_{BI}^2 + u_{EV}^2 + u_{MS\text{-}REST}^2 + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{STAB}^2 + u_{OBJ}^2 + u_T^2 + u_{REST}^2 + \sum_i u_{IAi}^2},$$

где $u_{EV} = \max\{u_{EVR}, u_{EVO}, u_{RE}\}$.

Если рассчитанная по результатам измерений суммарная неопределенность процесса измерений u_{MP} содержит воспроизводимость нескольких измерительных систем, следует использовать все составляющие суммарной неопределенности измерительной системы u_{MS} с наибольшей неопределенностью. Если отдельное вычисление u_{MS} для сопоставляемых измерительных систем невозможно, следует брать для расчета максимальные значения отдельных составляющих (u_{RE}, u_{CAL}, u_{EVR}, u_{LIN}, ...). Также следует обращаться с остальными составляющими неопределенности измерительной системы и процесса измерений, если они оказывают влияние на измерительную систему. Оценка u_{MP}, использующая максимальные значения составляющих, может быть существенно завышенной.

Если вместо применения экспериментального метода использованы значения максимально допустимой погрешности, вычисление суммарных неопределенностей измерительной системы следует выполнять в соответствии с таблицей 10.

Таблица 10 — Вычисление неопределенности с максимальной погрешностью MPE

Составляющие неопределенности	Обозначение	Суммарная неопределенность
Составляющие с максимально допустимой погрешностью измерительной системы	u_{MPE}	Если значения MPE используют вместо применения экспериментального метода, то $u_{MS} = u_{MPE} = \sqrt{\frac{M_{PE1}^2}{3} + \frac{M_{PE2}^2}{3} \ldots}$
Повторяемость по исследуемым образцам	u_{EVO}	Если значения MPE используют вместо применения экспериментального метода, то $u_{MPE} = \sqrt{\frac{M_{PE1}^2}{3} + \frac{M_{PE2}^2}{3} \ldots}$; $u_{MP} = \sqrt{u_{MPE}^2 + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{STAB}^2 + u_{OBJ}^2 + u_T^2 + u_{REST}^2 + \sum_i u_{IAi}^2}$
Воспроизводимость работы оператора	u_{AV}	
Воспроизводимость измерительной системы (различные положения измерительной системы)	u_{GV}	
Воспроизводимость во времени	u_{STAB}	
Взаимодействия	u_{IAi}	
Неоднородность измеряемой величины	u_{OBJ}	
Температура	u_T	
Другие составляющие неопределенности (процесса измерений)	u_{REST}	

При использовании максимально допустимой погрешности на входе измерительной системы u_{MS} вычисляют по следующей формуле:

$$u_{MS} = u_{MPE} = \sqrt{\frac{M_{PE1}^2}{3} + \frac{M_{PE2}^2}{3} + \ldots}.$$

Соответствующую суммарную неопределенность процесса измерений вычисляют по формуле

$$u_{MP} = \sqrt{u_{MPE}^2 + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{STAB}^2 + u_{OBJ}^2 + u_T^2 + u_{REST}^2 + \sum_i u_{IAi}^2}.$$

8.2 Вычисление расширенной неопределенности

Расширенную неопределенность U_{MS} вычисляют по стандартной неопределенности U_{MS}, умножая ее на коэффициент охвата k:

$$U_{MS} = k\, u_{MS}.$$

Тем же методом можно вычислить расширенную неопределенность U_{MP} по стандартной неопределенности u_{MP}:

$$U_{MP} = k\, u_{MP}.$$

Расширенная неопределенность соответствует доверительному интервалу с уровнем доверия 95 %, поэтому использован коэффициент охвата $k = 2$.

Примечание — Если объем выборки n в эксперименте меньше требуемых 30 измерений, то для оценки составляющих неопределенности необходимо использовать вместо стандартного нормального распределения t-распределение Стьюдента с коэффициентом охвата $k = t_{1-(\alpha/2),\nu}$.

Число степеней свободы ν получают в виде произведения количества исследуемых образцов (N), количества операторов (p), количества средств измерений (g) и количества повторных измерений (K) минус единица ($N \cdot p \cdot g \cdot (K - 1)$).

Пример 1 — Использовано 3 образца, 2 оператора, 2 калибра и 3 повторных измерения:
поскольку $\nu = 3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot (3 - 1) = 24$, ***то*** $t_{1-(\alpha/2),\nu} = 2{,}06$.
Пример 2 — Использовано 3 образца, 2 оператора, 2 средства измерений и 2 повторных измерения:
поскольку $\nu = 3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot (2 - 1) = 12$, ***то*** $t_{1-(\alpha/2),\nu} = 2{,}18$.

9 Воспроизводимость и пригодность процесса

9.1 Отношение пригодности

9.1.1 Общие положения

Воспроизводимость процесса измерений может быть охарактеризована отношением пригодности или индексом воспроизводимости. Вычисление индекса воспроизводимости более предпочтительно.

Для оценки измерительной системы или процесса измерений отношения пригодности (Q_{MS} или Q_{MP}) вычисляют на основе неопределенности результатов измерений (см. раздел 8). В соответствии с разделом 8 отношения пригодности измерительной системы (Q_{MS}) и процесса измерений (Q_{MP}) различаются между собой.

Рекомендуемыми значениями являются $Q_{MS} \le 15$ % и $Q_{MP} \le 30$ %.

В соответствии с 8.2 и 9.1 при вычислении этих отношений следует использовать доверительный интервал с уровнем доверия 95 %.

Если оценку процесса измерений выполняют в системе SPC (статистическое управление процессами), необходимо использовать уровень доверия 99,73 %.

9.1.2 Отношение пригодности измерительной системы

$$Q_{MS} = \frac{2U_{MS}}{U - L} \cdot 100\ \%.$$

В формуле использованы установленные значения U и L.

9.1.3 Отношение пригодности процесса измерений

$$Q_{MP} = \frac{2U_{MP}}{U - L} \cdot 100\ \%.$$

В формуле использованы установленные значения U и L.

9.2 Индексы воспроизводимости

На основе общего определения индекса воспроизводимости могут быть вычислены два индекса воспроизводимости (для измерительной системы C_{MS} и процесса C_{MP}) (см. ИСО 3534-2:2006, 2.7).

Рекомендуемые значения индексов C_{MS} и C_{MP} должны быть не менее 1,33. В соответствии с 8.2 и 9.1 при вычислении отношений следует использовать доверительный интервал с уровнем доверия 95 % (и поэтому $k = 2$).

Формулы для вычисления индексов воспроизводимости записаны так, что индексы воспроизводимости $C_{MS\ min}$ и $C_{MP\ min}$ достигают значения 1,33, если наблюдаемые индексы пригодности таковы, что выполняются неравенства

$$Q_{MS\ min} \leq 15\ \%,\ Q_{MP\ min} \leq 30\ \%.$$

Воспроизводимость измерительной системы может быть выражена через индекс воспроизводимости системы C_{MS}:

$$C_{MS} = C_{MS\ min} \cdot Q_{MS\ min} \cdot \frac{(U-L)}{2 \cdot k \cdot u_{MS}} = \frac{4}{3} \cdot 0{,}15 \cdot \frac{(U-L)}{2 \cdot k \cdot u_{MS}} = 0{,}2 \cdot \frac{(U-L)}{2 \cdot k \cdot u_{MS}}.$$

Воспроизводимость процесса измерений может быть выражена через индекс воспроизводимости процесса C_{MP}:

$$C_{MP} = C_{MP\ min} \cdot Q_{MP\ min} \cdot \frac{(U-L)}{2 \cdot k \cdot u_{MP}} = \frac{4}{3} \cdot 0{,}30 \cdot \frac{(U-L)}{2 \cdot k \cdot u_{MP}} = 0{,}4 \cdot \frac{(U-L)}{2 \cdot k \cdot u_{MP}}.$$

(Amd.1:2024)

9.3 Воспроизводимость процесса измерений с односторонними требованиями

В случае односторонних требований отсутствует либо верхний предел, либо нижний предел требований (рисунок 4). Зона допуска не может быть определена, поэтому стандартные формулы для C_{MS} и C_{MP} не могут быть использованы. Чтобы оценить воспроизводимость в этом случае необходимо применить модифицированную формулу для обработки односторонних требований. Такая формула предназначена только для одной стороны распределения производственного и измерительного процесса.

Примечание — В случаях, когда характеристика ограничена так называемым естественным пределом (например, допуски на геометрические параметры, которые не могут быть меньше нуля из-за свойств измеряемой величины), эту естественную границу рассматривают как один из пределов требований и все показатели могут быть рассчитаны в соответствии с 9.1 или 9.2.

Изменчивость процесса Δ (также называемая изменчивостью процесса PV), положение процесса X_{mid} и требуемый индекс воспроизводимости C_p (или P_p) используют для достоверного определения недостающих пределов.

Результат производственного процесса в случае геометрических допусков основан на оценке совокупности точек и, следовательно, представляет собой модель распределения экстремальных значений.

Существует несколько способов определения оценки разброса производственного процесса Δ в соответствии со следующим порядком:

1) определение разброса производственного процесса в соответствии с ИСО 22514-1 и ИСО 22514-2;

2) вычисление разброса производственного процесса на основе эксперимента, описанного в 6.2.3.2;

3) оценка распространения и местоположения производственного процесса по полученным ранее данным аналогичных процессов.

Более подробная информация приведена ниже.

Разброс производственного процесса предпочтительно определять в соответствии с ИСО 22514-1 и ИСО 22514-2, используя объем выборки более 100.

(Amd.1:2024)

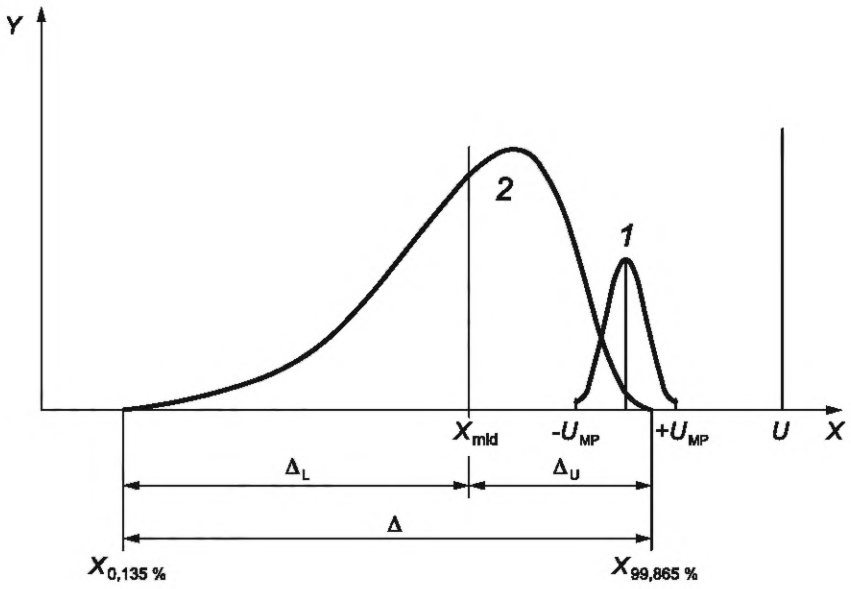
$$\Delta = X_{99{,}865\ \%} - X_{0{,}135\ \%}.$$

Исходя из этого, разброс одностороннего процесса рассчитывают следующим образом:

$$\Delta_U = X_{99{,}865\ \%} - X_{mid};$$

$$\Delta_L = X_{mid} - X_{0{,}135\ \%}.$$

Если доступно только меньшее количество объектов или меньший объем выборки, вместо расчета изменчивости процесса (PV) на основе не менее 10 объектов можно использовать эксперимент, описанный в 6.2.3.2.



X — значение характеристики; *Y* — плотность распределения; *1* — неопределенность результатов измерений; *2* — разброс процесса

Рисунок 4 — Неопределенность результатов измерений в случае односторонних требований

Выбор объектов сталкивается с противоречивым требованием. С точки зрения воспроизводимости следует изучить весь диапазон применения, т. е. следует выбрать объекты, которые охватывают всю область применения. Однако эти специально подобранные объекты не подходят для расчета разброса производственного процесса. Для этой цели необходимо отобрать случайную выборку из производственного процесса.

Если для определения достоверной модели распределения объектов слишком мало, предполагают нормальное распределение. Эмпирическое стандартное отклонение s_p, основанное на этих нескольких объектах, занижает изменчивость процесса. Оптимальную оценку стандартного отклонения, основанную на измерениях этих объектов, можно найти, используя следующую формулу:

$$s_{eff} = \sqrt{\frac{n-1}{n-3}} \cdot s_p,$$

где s_{eff} — оценка истинного стандартного отклонения;

n — количество измерений, использованных при расчете;

s_p — оценка стандартного отклонения.

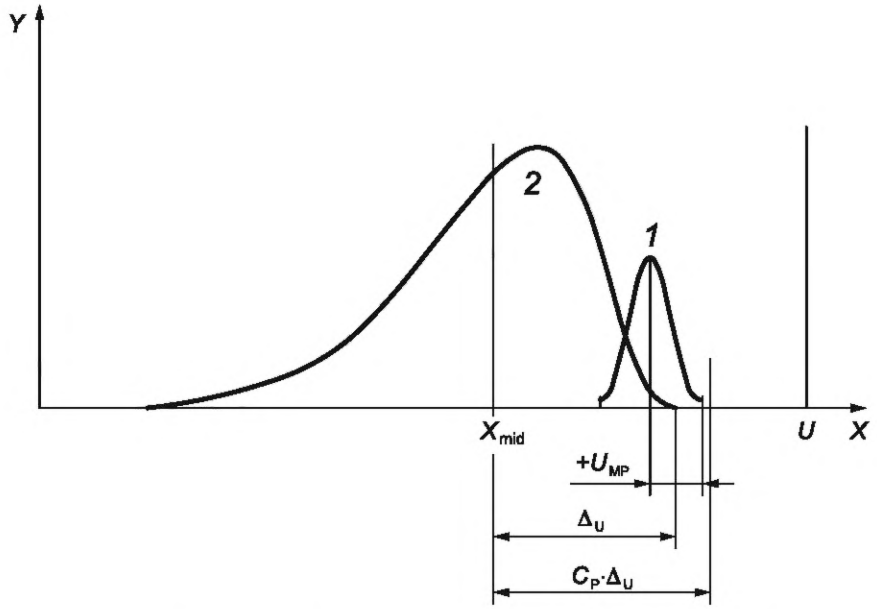
В результате могут быть получены значения половины изменчивости процесса Δ_U и Δ_L:

$$\Delta_U = \Delta_L = 3 \cdot s_{eff} = 3 \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n-3}} \cdot s_p.$$

Если достоверных данных нет или не доступно достаточное количество объектов, разброс процесса Δ_U и положение процесса X_{mid} можно оценить по полученным ранее данным аналогичных процессов. Эта оценка должна быть документирована понятным способом. Замененные пределы зависят от требуемого индекса воспроизводимости производственного процесса и представляют собой оценку границ допуска при выполнении требований воспроизводимости.

Оценкой положения процесса X_{mid} является 50 %-ный квантиль $X_{50\ \%}$ в случае произвольного распределения или $\overline{x}$ в случае симметричного распределения (например, нормального распределения).

Расчет замененных пределов зависит от верхнего или нижнего одностороннего предела (см. рисунок 5 для верхнего предела требований).



X — значение характеристики; *Y* — плотность распределения; *1* — неопределенность результатов измерений; *2* — разброс процесса

Рисунок 5 — Вычисление воспроизводимости измерительной системы/процесса измерений в случае односторонних требований

Если задана верхняя односторонняя граница требований, то индексы воспроизводимости и отношения пригодности рассчитывают следующим образом:

$$C_{MS} = 0{,}2 \cdot \frac{C_p \cdot \Delta_U}{k \cdot u_{MS}} C_{MP} = 0{,}4 \cdot \frac{C_p \cdot \Delta_U}{k \cdot u_{MP}};$$

$$Q_{MS} = \frac{k \cdot u_{MS}}{C_p \cdot \Delta_U} Q_{MP} = \frac{k \cdot u_{MP}}{C_p \cdot \Delta_U}.$$

Если задана нижняя односторонняя граница требований, то индексы воспроизводимости и отношения пригодности вычисляют следующим образом:

$$C_{MS} = 0{,}2 \cdot \frac{C_p \cdot \Delta_L}{k \cdot u_{MS}} C_{MP} = 0{,}4 \cdot \frac{C_p \cdot \Delta_L}{k \cdot u_{MP}};$$

$$Q_{MS} = \frac{k \cdot u_{MS}}{C_p \cdot \Delta_L} Q_{MP} = \frac{k \cdot u_{MP}}{C_p \cdot \Delta_L}.$$

(Amd.1:2024)

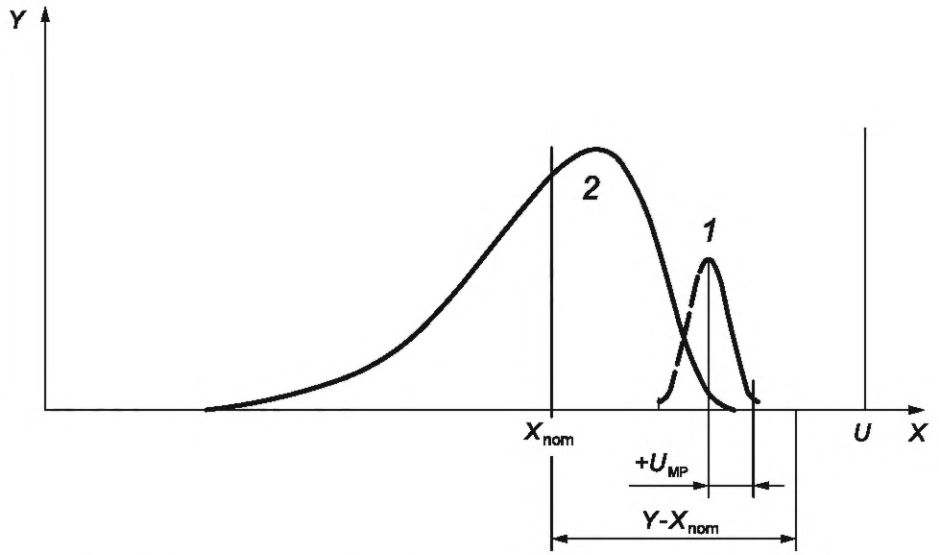
Результирующая разрешающая способность измерительной системы должна быть меньше 1/10 от половины интервала требований ($C_p \cdot \Delta_U$) или ($C_p \cdot \Delta_L$) соответственно (см. 5.2).

Примечание — В отдельных случаях, когда у производственного процесса имеется специальная точка или номинальное значение X_{nom}, член ($C_p \cdot \Delta_U$) или ($C_p \cdot \Delta_L$) должен быть заменен следующим образом:

- в случае верхней границы односторонних требований (см. также рисунок 6)

$$C_p \cdot \Delta_U = U - X_{nom};$$

- в случае нижней границы односторонних требований $C_p \cdot \Delta_L = X_{nom} - L$.



X — значение характеристики; *Y* — плотность распределения; *1* — неопределенность результатов измерений; *2* — разброс процесса

Рисунок 6 — Вычисление и представление показателей воспроизводимости процесса измерений/измерительной системы в случае односторонних требований с номинальным значением

10 Воспроизводимость процесса измерений и производственного процесса

10.1 Соотношение наблюдаемой воспроизводимости процесса и измеренных отношений воспроизводимости

Существует взаимосвязь между наблюдаемой воспроизводимостью процесса и пригодностью процесса ($C_{p\ obs}$, $P_{p\ obs}$), фактическими реальными воспроизводимостью и пригодностью процесса ($C_{p\ real}$, $P_{p\ real}$) и отношением пригодности (Q_{MP}) процесса измерений:

$$C_{p\ real} = \sqrt{\frac{1}{C_{p\ obs}^2} - 2{,}25 \cdot Q_{MP}^2}\,.$$

Пояснения к этой формуле приведены в В.3.

Формула основана на следующих предположениях:

- измеряемые характеристики подчиняются нормальному распределению;
- производственный процесс подчиняется нормальному распределению и находится в состоянии статистической управляемости;
- вычисление индекса C_p основано на уровне вероятности 99,73 % того, что измеряемую характеристику накрывает интервал, длина которого равна шести стандартным отклонениям;
- наблюдаемое эмпирическое стандартное отклонение:

$$s_{obs}^2 \sim (\sigma_p^2 + \sigma_{MP}^2)\,\chi^2(\nu),$$

где σ_p — стандартное отклонение производственного процесса;

σ_{MP} — стандартное отклонение процесса измерений;

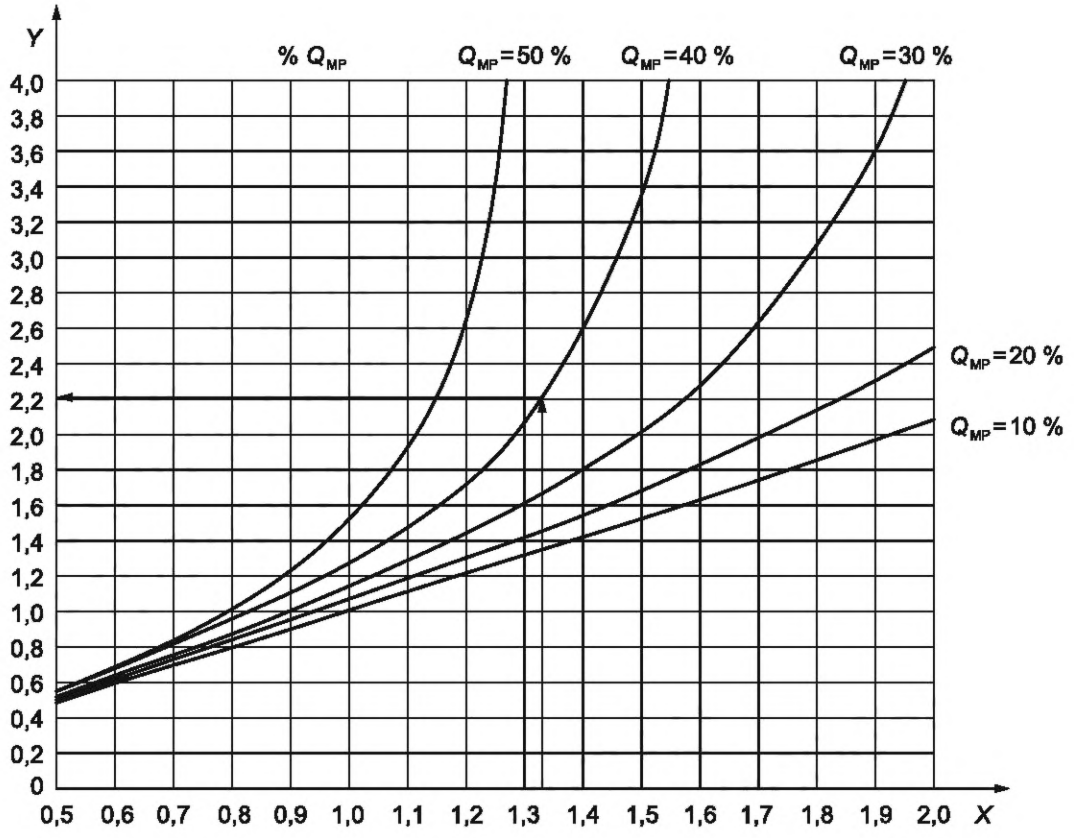
$\chi^2(\nu)$ — квантиль распределения χ^2 с ν степенями свободы.

Область неопределенности симметрична по отношению к границам требований.

Коэффициент охвата, используемый при вычислении суммарной неопределенности, равен 2.

Пример — Приведенная формула, рисунок 7 и таблицы 11 и 12 показывают, что фактический индекс воспроизводимости производственного процесса составляет 2,21, а наблюдаемый индекс воспроизводимости составляет 1,33 для Q_{MP} = 40 %.

Примечание — Пример соответствует теоретическому индексу воспроизводимости. Оценки индексов воспроизводимости являются случайными величинами. Оценка наблюдаемого индекса воспроизводимости в этой ситуации изменяется вокруг значения 1,33 с дисперсией, зависящей от объема выборки.



X — наблюдаемое значение C_p; *Y* — фактическое значение C_p

Рисунок 7 — Индекс воспроизводимости процесса как функция наблюдаемого индекса воспроизводимости в зависимости от отношения пригодности процесса измерений Q_{MP}

Таблица 11 — Наблюдаемые и фактические индексы

Наблюдаемое значение C_p	Фактическое значение C_p для				
	Q_{MP} = 10 %	Q_{MP} = 20 %	Q_{MP} = 30 %	Q_{MP} = 40 %	Q_{MP} = 50 %
0,67	0,67	0,68	0,70	0,73	0,77
1,00	1,01	1,05	1,12	1,25	1,51
1,33	1,36	1,45	1,66	2,21	18,82
1,67	1,72	1,93	2,53	Na	Na
2,00	2,10	2,50	4,59	Na	Na

Пример — Значение индекса воспроизводимости C_p = 1,00 вычислено на основе результатов измерений производственного процесса и процесса измерений для Q_{MP} = 30 %.

$$C_{p\ real} = \sqrt{\frac{1}{C_{p\ obs}^2} - 2,25 \cdot Q_{MP}^2} = \sqrt{\frac{1}{1^2} - 2,25 \cdot 0,3^2} = 1,1198.$$

10.2 Соотношение наблюдаемой воспроизводимости производственного процесса и процесса измерений

Соотношение воспроизводимости производственного процесса и процесса измерений также может быть вычислено (см. таблицу 12). Между наблюдаемыми индексами воспроизводимости и пригодности процесса ($C_{p\ obs}$, $P_{p\ obs}$), фактическими индексами воспроизводимости и пригодности процесса ($C_{p\ real}$, $P_{p\ real}$) и индексом воспроизводимости процесса измерений (C_{MP}) существует следующая связь:

$$C_{p\ obs} = C_{p\ real} \frac{1}{\sqrt{1+\left(\sigma_{MP} / \sigma_p\right)^2}}.$$

Таблица 12 — Наблюдаемые и фактические индексы

Наблюдаемое значение C_p	Реальные значения C_p для				
	$\sigma_{MP}/\sigma_p = 0,1$	$\sigma_{MP}/\sigma_p = 0,2$	$\sigma_{MP}/\sigma_p = 0,3$	$\sigma_{MP}/\sigma_p = 0,4$	$\sigma_{MP}/\sigma_p = 0,5$
0,67	0,67	0,68	0,70	0,72	0,75
1,00	1,00	1,02	1,04	1,08	1,12
1,33	1,34	1,36	1,39	1,43	1,49
1,67	1,67	1,69	1,73	1,79	1,86
2,00	2,01	2,04	2,09	2,15	2,24

(Amd.1:2024)

11 Продолжение анализа стабильности процесса измерений

11.1 Продолжение анализа стабильности

При расчетах показателей воспроизводимости и пригодности процесса измерений следует учитывать как краткосрочную, так и долгосрочную стабильность процесса. Однако, изменение смещения, вызванное дрейфом, неумышленным повреждением или новыми дополнительными составляющими неопределенности, которые не были известны при выполнении расчетов воспроизводимости, могут привести к изменению смещения процесса измерений с течением времени. Для определения возможных существенных изменений процесса измерений необходимо использовать контрольную карту.

Для этого необходимо выполнить следующие действия:

Этап 1. Выбрать соответствующий стандартный образец или калиброванный исследуемый образец с известным значением измеряемой характеристики.

Этап 2. Выполнить регулярные измерения на стандартном образце (исследуемом образце).

Этап 3. Нанести результаты измерений на контрольную карту. Контрольные границы вычисляют в соответствии с известными методами построения контрольных границ (см. ИСО 7870-1).

Этап 4. Проверить наличие статистической управляемости процесса. Если процесс находится в состоянии статистической управляемости, предполагается, что процесс измерений не вносит значительных изменений в производственный процесс. Если процесс вышел из управляемого состояния, процесс измерений может внести изменения в производственный процесс и должен быть исследован. При таком подходе процесс измерений должен подвергаться постоянному мониторингу и тогда значительные изменения могут быть обнаружены.

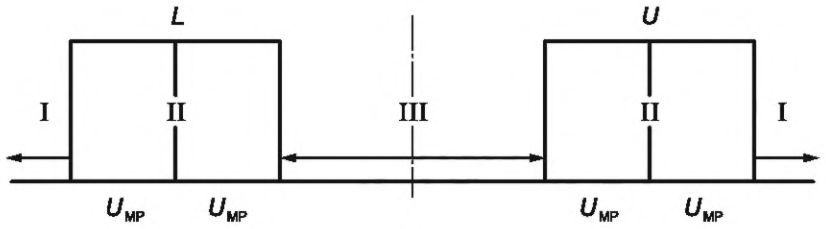
Важно определить интервал между проверками процесса измерений с учетом периодичности калибровок измерительной системы.

12 Воспроизводимость процесса измерений по альтернативному признаку

12.1 Общие положения

Измерения по альтернативному признаку позволяют лишь получить информацию о том, что измеряемая величина соответствует или не соответствует установленному требованию. Чтобы установить воспроизводимость процесса измерений на основе данных контроля по альтернативному признаку, требуется большее количество измерений.

При вычислении показателей воспроизводимости процесса измерений по альтернативному признаку необходимо учитывать, что вероятность конкретного результата зависит от типа характеристики. Например, уровень вероятности положительного решения близок к 100 % для фактически измеренных значений, которые лежат вне границ зоны неопределенности. Для информации о границах требований, см. рисунок 8. С другой стороны, если результаты измерений лежат в середине зоны неопределенности, вероятность составляет приблизительно 50 % (чистая случайность). Как показывает опыт, зона неопределенности не должна превышать 20 %.



I — значения, выходящие за установленные границы; II — значения вокруг установленных границ; III — значения внутри установленных границ

Рисунок 8 — Зона неопределенности (II)

В принципе, предложенный подход делает различие между вычислением воспроизводимости измерений, без использования опорных значений (метод сквозных таблиц) и с опорными значениями (подход обнаружения сигнала) или без них. Если опорные значения известны, рекомендуется использовать двухступенчатый подход.

На практике не существует общего приемлемого метода, но существует много различных методов оценки способности операторов получать устойчивые результаты. В настоящем стандарте установлен один из нескольких методов, не использующих опорные значения, и один метод, использующий опорные значения.

12.2 Вычисление воспроизводимости без использования опорных значений

При вычислении воспроизводимости процесса измерений без использования опорных значений можно проверить только наличие значимых различий между операторами. Однако в этом случае невозможно проверить корректность полученных результатов. Это всегда следует учитывать.

Выбор исследуемых объектов имеет решающее значение. Это следует учитывать. По крайней мере, часть объектов (например, 40 %) должна иметь характеристики в зоне неопределенности (зона II на рисунке 8).

Предлагается следующий стандартный эксперимент.

Не менее 40 различных объектов должны быть проверены три раза двумя операторами (операторами A и B). Каждые три повторных результата измерений, выполненных операторами A и B на 40 объектах, могут быть отнесены к одному из следующих классов:

- класс 1: все три результата проверки на одном и том же объекте дали результат «приемлемый»;
- класс 2: три результата проверки на одном и том же объекте дали различные результаты;
- класс 3: все три результата проверки на одном и том же объекте дали результат «неприемлемый».

Результаты испытаний приведены в таблице 13.

Таблица 13 — Результаты проверки процесса измерений по альтернативному признаку

Частота n_{ij}		Оператор B		
		Класс 1. Результат «+++»	Класс 2. Различные результаты	Класс 3. Результат «- - -»
Оператор A	Класс 1. Результат «+++»	7	3	1
	Класс 2. Различные результаты	10	4	7
	Класс 3. Результат «- - -»	2	1	5

Эти два оператора могут быть проверены с помощью критерия симметрии Баукера. Если не выявлено существенных различий между операторами, то полученные частоты в таблице 13 должны быть достаточно симметричны относительно главной диагонали.

Гипотеза H_0: $n_{ij} = n_{ji}$ $(i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$ утверждает, что частоты n_{ij} и n_{ji}, расположенные симметрично относительно главной диагонали, совпадают.

Статистика критерия имеет вид:

$$X^2 = \sum_{i>j} \frac{\left(n_{ij} - n_{ji}\right)^2}{n_{ij} + n_{ji}} = \frac{(10-3)^2}{10+3} + \frac{(2-1)^2}{2+1} + \frac{(1-7)^2}{1+7} = 8{,}603.$$

Эту статистику сопоставляют с квантилем χ^2-распределения с тремя степенями свободы уровня $(1 - \alpha)$.

Нулевая гипотеза устанавливает, что изменения одной и другой категорий являются случайными. Гипотезу симметрии отклоняют, если значение тестовой статистики критерия больше квантиля χ^2-распределения с тремя степенями свободы уровня $(1 - \alpha)$. В данном случае, гипотеза отклонена, поскольку 8,603 больше 7,815 (квантиль χ^2-распределения с тремя степенями свободы уровня 95 %).

Этот метод может быть использован и для большего количества операторов. В таком случае каждый оператор выполняет три измерения на исследуемом объекте, а затем все комбинации операторов должны быть попарно проверены.

Примечание — В этом случае для этих критериев уровень значимости различен.

12.3 Вычисление воспроизводимости с использованием опорных значений

12.3.1 Вычисление границ зоны неопределенности

Метод основан на обнаружении сигнала и поэтому для его применения требуется исследуемый образец с известными опорными значениями. Приблизительно 25 % исследуемых образцов должно иметь характеристики ниже нижней границы поля допуска, а 25 % исследуемых образцов — выше верхней границы поля допуска.

Цель этого метода состоит в определении зоны неопределенности, в которой оператор неспособен принять однозначное решение. На рисунке 9 показаны результаты проверки процесса измерений по альтернативному признаку, полученные с использованием опорных значений.

12.3.2 Обозначения на рисунке 9

На рисунке 9 измеренные опорные значения представлены в виде кода. Знак «плюс» означает, что оператор по результатам проверки принял решение о приемлемости объекта. Знак «минус» означает, что оператор по результатам проверки принял решение о неприемлемости объекта.

Кружок означает, что все три оператора получили одинаковые результаты испытаний для данного объекта, во всех трех повторных проверках полученный результат соответствует опорному значению.

Треугольник означает, что хотя бы один из операторов получил хотя бы один результат, не соответствующий опорному значению.

12.3.3 Этапы определения зоны неопределенности

Этап 1. Выполняют сортировку данных в соответствии с опорными значениями. На рисунке 9 данные представлены в порядке убывания от наибольшего значения к наименьшему.

Этап 2. В верхней части рисунка 9 выбирают последнее опорное значение, для которого всеми операторами получен результат «неприемлемый». Это значение является границей перехода от символов «–» к символам «+».

0,566 152	–
0,561 457	+

Этап 3. В верхней части рисунка 9 определяют первое опорное значение, для которого всеми операторами первый раз получен результат «приемлемый». Это значение перехода является границей от символов «+» и к символам «+».

0,543 077	–
0,542 704	+

Этап 4. В нижней части рисунка 9 определяют последнее значение, для которого всеми операторами последний раз получены результаты «приемлемый». Это значение является границей перехода от символа «+» к символу «–».

0,470 832	+
0,465 454	–

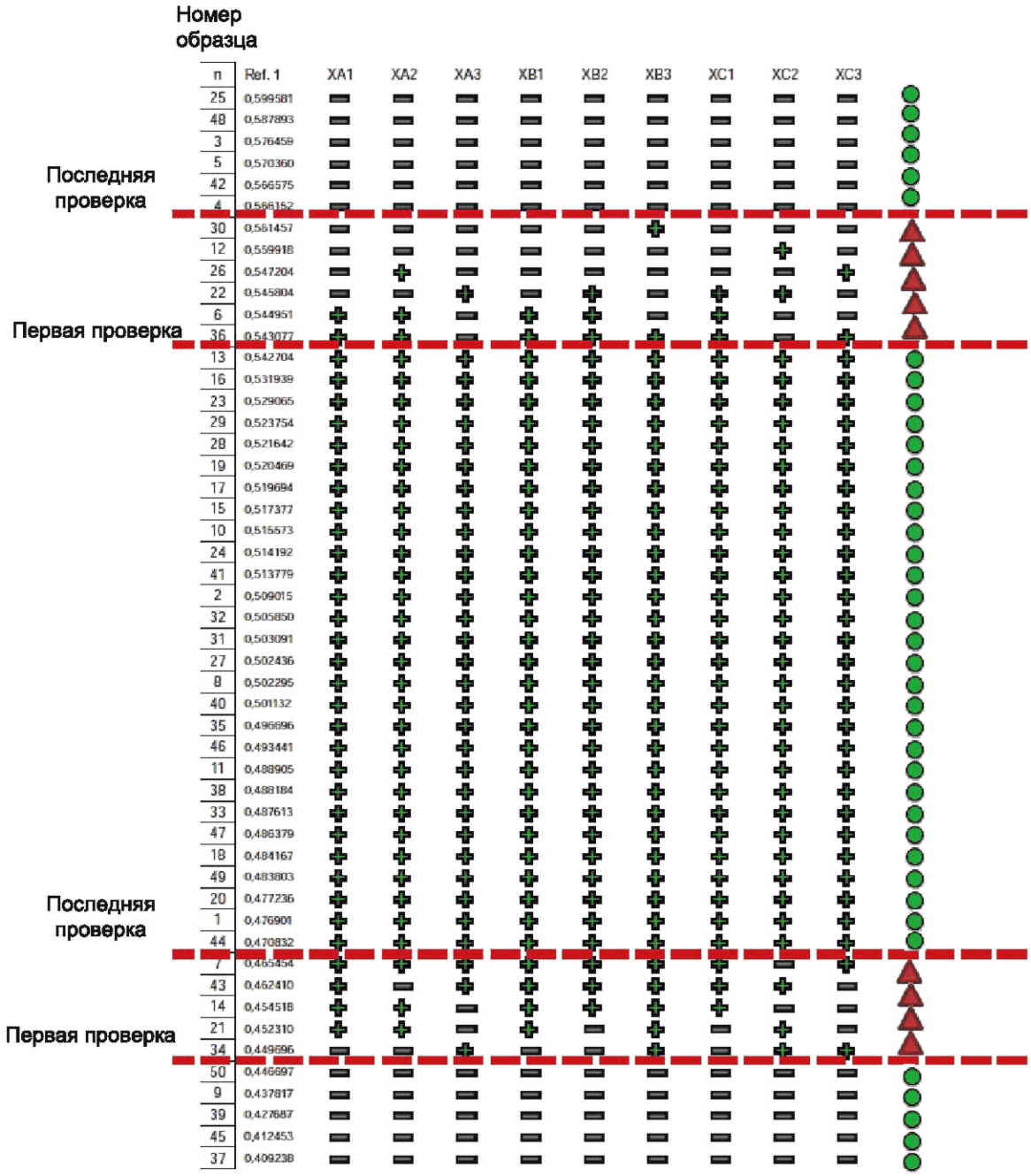


Рисунок 9 — Результаты проверки процесса измерений по альтернативному признаку (пример заимствован из AIAG MSA)

Этап 5. В нижней части рисунка 9 определяют первое значение, для которого всеми операторами получены результаты «неприемлемый». Это значение является границей перехода от символа «+» к символу «–».

0,449 696	+
0,446 697	–

Этап 6. Вычисляют длину интервала d_{UR} от последнего опорного значения, для которого все операторы получили результат «неприемлемый» до первого значения, для которого все операторы признали результат «приемлемый»

$$d_{UR} = 0{,}566152 - 0{,}542704 = 0{,}023448.$$

Этап 7. Вычисляют длину интервала d_{LR} от последнего значения, для которого все операторы получили результат «приемлемый» до первого значения, для которого все операторы получили результат «неприемлемый».

$$d_{LR} = 0{,}470832 - 0{,}446697 = 0{,}024135.$$

Этап 8. Вычисляют среднее арифметическое d значений d_{UR} и d_{LR}:

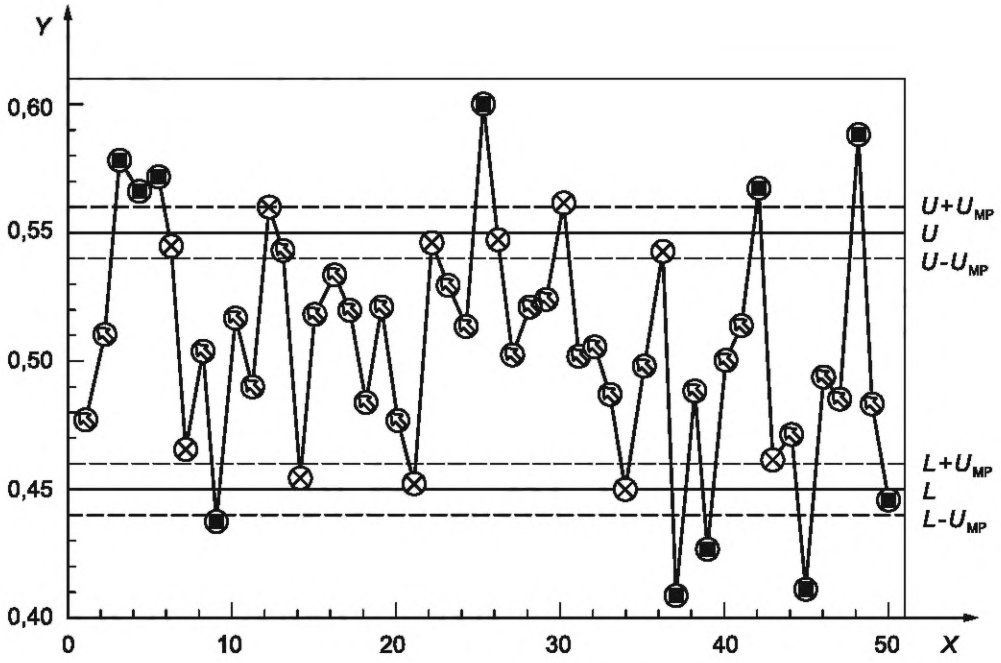
$$d = (d_{UR} + d_{LR})/2 = 0{,}023448 + 0{,}024135 = 0{,}0237915.$$

Этап 9. Вычисляют диапазон зоны неопределенности:

$$U_{attr} = d/2 = (0{,}0237915)/2,$$

$$Q_{attr} = 2 \cdot U_{attr}/(U - L) = 2 \cdot [(0{,}0237915)/2]/0{,}1 = 0{,}24, \text{ где } U - L = 0{,}1 \text{ мм}.$$

Таким образом, $Q_{attr} = 24$ %.



X — номер образца; *Y* — опорное значение, мм

Рисунок 10 — Карта значений

На рисунке 10 показан другой способ представления результатов проверки образцов, все опорные значения и зона неопределенности. Некоторые специалисты предпочитают такую форму представления данных.

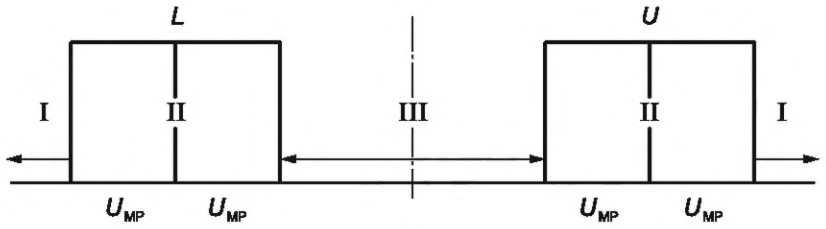
Примечание — Усилия, требуемые для выполнения этого метода значительны, так как кроме выполнения измерений 50 опорных значений требуется выполнить и зарегистрировать остальные 450 результатов измерений.

Исследуемые образцы следует выбирать так, чтобы охватить область неопределенности (см. рисунок 10).

12.4 Продолжение анализа

Поскольку в процессе измерений измерительная система может измениться (например, в результате износа) необходимо периодически проводить ее анализ.

Для продолжения мониторинга процесса измерений, по крайней мере, один оператор должен проверить, по крайней мере, три исследуемых образца с установленными опорными значениями. Исследуемые образцы должны быть отобраны так, чтобы опорные значения были расположены вне зон неопределенности и можно было ожидать получение правильного результата (соответствующего опорному значению). См. рисунок 11, например, исследуемые образцы имеют опорные значения в зоне I (слева), в зоне III и в зоне I (справа).



I — значения, выходящие за установленные границы; II — значения вокруг установленных границ III — значения внутри установленных границ

Рисунок 11 — Зона неопределенности (II)

Результаты проверки принимают, если все три результата соответствуют опорному значению. В противном случае измерительную систему не следует использовать, пока она не будет отрегулирована или изменена.

Диапазон зоны неопределенности может быть определен экспериментально (см. раздел 11) или получен на основе требований приемлемости процесса измерений (Q).

$$U_{MP\ max} = Q_{MP\ max}\ (U - L)/2.$$

Необходимо учитывать, что расширенную неопределенность обычно определяют для уровня доверительной вероятности 95 %. В данном случае она не была вычислена.

Для вычисления доверительного интервала используют биномиальное распределение.

Приложение А
(справочное)

Примеры

А.1 Пример исследования линейности с использованием трех стандартных образцов

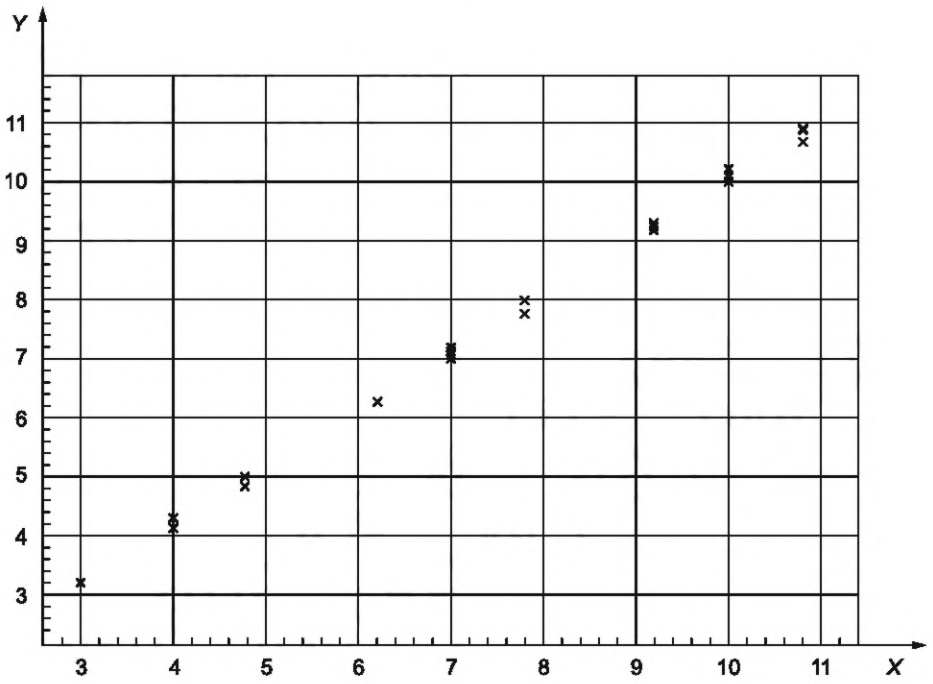
А.1.1 Общие положения

Пример заимствован из ИСО 11095. В примере описан эксперимент по калибровке оптической измерительной системы (оптического микроскопа с измерительным устройством). Истинные значения и значения измерений находятся в диапазоне от 0,5 до 12 микрон. Согласно свидетельству о калибровке неопределенность калибровки u_{CAL} составляет 0,005 мкм.

Таблица А.1 — Результаты измерений на стандартных образцах

Истинные значения x_n	Значения y_{nj} для четырех повторных измерений на десяти стандартных образцах, $K = 4$, $N = 10$			
	y_{n1}	y_{n2}	y_{n3}	y_{n4}
6,19	6,31	6,27	6,31	6,28
9,17	9,27	9,21	9,34	9,23
1,99	2,21	2,19	2,22	2,20
7,77	8,00	7,81	7,95	7,84
4,00	4,27	4,15	4,15	4,15
10,77	10,93	10,73	10,92	10,89
4,78	4,95	4,87	5,00	5,00
2,99	3,24	3,17	3,21	3,21
6,98	7,14	7,07	7,18	7,20
9,98	10,23	10,02	10,07	10,17

Данные таблицы А.1 представлены на рисунке А.1.



X — значение, соответствующее стандартному образцу, мкм; *Y* — результаты измерений, мкм

Рисунок А.1 — Данные эксперимента и истинные значения

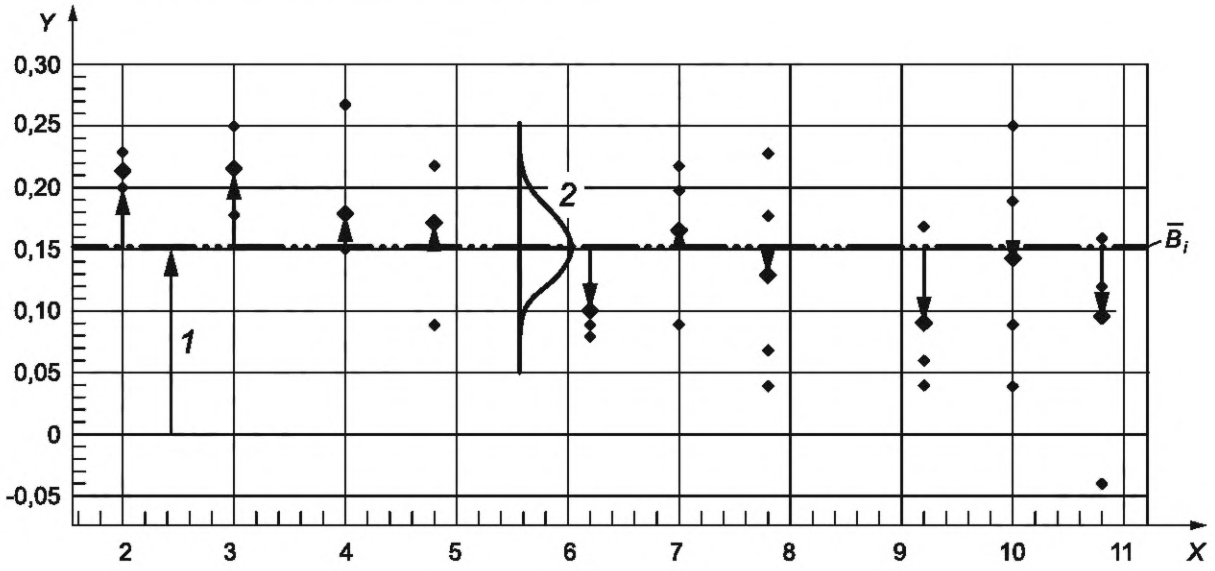
А.1.2 Вычисление средних и остатков

Вычисления приведены в таблице А.2.

Таблица А.2 — Вычисление остатков

Истинные значения x_n	$\overline{y}_n$	B_{in}	Остатки			
			e_{n1}	e_{n2}	e_{n3}	e_{n4}
6,19	6,292 5	0,102 5	0,017 5	–0,022 5	0,017 5	–0,012 5
9,17	9,262 5	0,092 5	0,007 5	–0,052 5	0,077 5	–0,032 5
1,99	2,205 0	0,215 0	0,005 0	–0,015 0	0,015 0	–0,005 0
7,77	7,900 0	0,130 0	0,100 0	–0,090 0	0,050 0	–0,060 0
4,00	4,180 0	0,180 0	0,090 0	–0,030 0	–0,030 0	–0,030 0
10,77	10,867 5	0,097 5	0,062 5	–0,137 5	0,052 5	0,022 5
4,78	4,955 0	0,175 0	–0,005 0	–0,085 0	0,045 0	0,045 0
2,99	3,207 5	0,217 5	0,032 5	–0,037 5	0,002 5	0,002 5
6,98	7,147 5	0,167 5	–0,007 5	–0,077 5	0,032 5	0,052 5
9,98	10,122 5	0,142 5	0,107 5	–0,102 5	–0,052 5	0,047 5

Данные таблицы А.2 представлены на рисунке А.2.



X — значение, соответствующее стандартному образцу; *Y* — смещение; *1* — среднее смещение всех стандартных образцов; *2* — неопределенность, соответствующая линейности; ◆ — отдельные ошибки; ◆ — среднее смещение стандартного образца

Рисунок А.2 — График отклонений и истинных значений

А.1.3 Таблица ANOVA

Заданные параметры:

$N = 10$ — количество стандартных образцов (фактор А);

$K = 4$ — количество повторных измерений на каждом образце.

Вычисленные значения:

$\overline{B}_i = 0{,}152$ — среднее арифметическое всех смещений.

Таблица А.3 — Таблица ANOVA

Источник	Сумма квадратов *SS*	Число степеней свободы ν	Средний квадрат *MS*	Оценка дисперсии $\hat{\sigma}_i^2$	Статистический критерий *F*	Критическое значение F_0	Оценка σ
Фактор А	0,077 39	9	0,008 599	0,001 121	2,089 6	2,210 7	0,033 4809
Остаточная ошибка	0,123 45	30	0,004 115	0,004 115			0,064 1483
Общее значение	0,200 84	39					

А.1.4 Оценка составляющих неопределенности

Вычисление оценки неопределенности и среднего смещения по данным таблицы А.3:

неопределенность, соответствующая смещению, $u_{\mathrm{BI}} = \dfrac{\bar{B}_i}{\sqrt{3}} = 0{,}0878$;

неопределенность, соответствующая линейности, $u_{\mathrm{LIN}} = \hat{\sigma}_A = 0{,}0335$;

неопределенность, соответствующая повторяемости по стандартным образцам, $u_{\mathrm{EVR}} = \hat{\sigma}_{\mathrm{RES}} = 0{,}0641$.

А.2 Экспериментальное определение неопределенности процесса измерений

В дополнение к оценкам составляющих неопределенности измерительной системы, найденным в А.1, необходимо определить некоторые дополнительные составляющие неопределенности (u_{EVO}, u_{AV}, u_{IAi}) процесса измерений по данным процесса в реальных условиях. В таблице А.4 приведены все исходные данные.

Таблица А.4 — Результаты измерений на десяти стандартных образцах тремя операторами

Оператор	Номер образца	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3
1	1	8,120	8,435	8,480
1	2	7,445	6,815	7,490
1	3	9,965	10,010	9,560
1	4	6,140	5,960	6,365
1	5	5,690	5,600	5,780
1	6	2,855	2,450	2,585
1	7	10,685	10,595	10,775
1	8	6,725	6,275	6,545
1	9	4,970	5,105	5,510
1	10	9,875	10,100	9,875
2	1	8,200	8,290	8,245
2	2	7,300	7,120	7,075
2	3	9,660	9,340	9,250
2	4	6,095	6,185	6,185
2	5	5,080	5,340	5,440
2	6	2,315	2,585	2,315
2	7	10,450	10,840	11,050
2	8	6,240	6,120	6,300
2	9	5,015	5,285	5,150
2	10	10,080	9,800	9,970
3	1	8,525	8,435	8,345

Окончание таблицы А.4

Оператор	Номер образца	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3
3	2	7,535	7,355	7,085
3	3	9,830	9,695	9,515
3	4	6,140	6,140	6,050
3	5	5,780	5,735	5,555
3	6	2,630	2,360	2,585
3	7	10,865	11,000	11,180
3	8	6,590	6,500	6,725
3	9	5,060	5,195	5,105
3	10	10,190	9,785	9,965

На основе данных таблицы А.4 может быть выполнен дальнейший анализ дисперсий (таблица А.5).

Таблица А.5 — Таблица дисперсионного анализа

Составляющая неопределенности	Число степеней свободы ν	Сумма квадратов *SS*	Средний квадрат *MS*	Оценка дисперсии $\hat{\sigma}_i^2$	$u_i = +\sqrt{\hat{\sigma}_i^2}$	Тестовая статистика *F*	Критическое значение F_0, α = 5 %
Оператор	2	0,519	0,260	0,007 38	0,086 83	6,810	3,150
По стандартным образцам	9	526,9	58,54	6,500	n/a	1536	2,040
Взаимодействие операторов с образцами	18	0,686	0,038 1	0,002 05	0,045 28	1,193	1,778
Повторяемость	60	1,917	0,032 0	0,032 0	0,178 9	—	—

Поскольку составляющие неопределенности, начиная со строки «взаимодействие операторов с образцами», являются несущественными ($F < F_0$), они могут быть объединены. Можно разработать модифицированную таблицу дисперсий, такую как таблица А.6.

Таблица А.6 — Модифицированная таблица дисперсий

Составляющая неопределенности	Число степеней свободы ν	Сумма квадратов *SS*	Средний квадрат *MS*	Оценка дисперсии $\hat{\sigma}_i^2$	$u_i = +\sqrt{\hat{\sigma}_i^2}$	Тестовая статистика *F*	Критическое значение F_0, α = 5 %
Оператор	2	0,519	0,260	0,007 54	0,086 83	7,776	3,114
По стандартным образцам	9	526,9	58,54	6,501	n/a	1754	2,002
Повторяемость	78	2,603	0,033 4	0,033 4	0,182 7	—	—

Затем могут быть определены составляющие неопределенности процесса измерений:
u_{AV} = 0,08683;
u_{EVO} = 0,1827.

А.3 Определение составляющих неопределенности, не учтенных в эксперименте

Определение составляющих неопределенности типа В не включено в эксперименты в А.1 и А.2.
Составляющая неопределенности, соответствующая разрешению u_R, имеет вид:

$$u_{RE} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{12}} = 0{,}00144.$$

Составляющая неопределенности u_{RE} меньше u_{EVR}. Поэтому составляющую u_{RE} не следует использовать.

Все следующие составляющие неопределенности равны нулю:

u_{OBJ};

u_{T};

u_{STAB};

u_{REST}.

А.4 Определение суммарной и расширенной неопределенности

Суммарная неопределенность измерительной системы: u_{MS} = 0,114, расширенная неопределенность этой системы: U_{MS} = 0,228.

Суммарная неопределенность процесса измерений: u_{MP} = 0,223, расширенная неопределенность этого процесса: U_{MP} = 0,446.

А.5 Оценки воспроизводимости измерительной системы и процесса измерений

Если установлены требования $U - L = 11 - 2 = 9$, то отношения воспроизводимости и индексы воспроизводимости имеют вид:

% Q_{MS} = 5,1 %;

% Q_{MP} = 9,9 %;

$$C_{MS} = \frac{0,2 \cdot (U - L)}{2 \cdot k \cdot u_{MS}} = \frac{0,2 \cdot (11 - 2)}{2 \cdot 2 \cdot 0,144} = 3,95;$$

$$C_{MP} = \frac{0,4 \cdot (U - L)}{2 \cdot k \cdot u_{MP}} = \frac{0,4 \cdot (11 - 2)}{2 \cdot 2 \cdot 0,223} = 4,03.$$

Приложение В
(справочное)

Используемые статистические методы

В.1 F-критерий

При сопоставлении двух дисперсий гипотезу о равенстве дисперсий отклоняют, если $\frac{s_1^2}{s_2^2} < \frac{1}{F_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right);\nu_2;\nu_1}}$ или $\frac{s_1^2}{s_2^2} > F_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right);\nu_1;\nu_2}$.

Примечание — Более подробная информация об F-критерии приведена в ИСО 2854.

В.2 Таблицы ANOVA

Таблицы ANOVA использованы для вычислений, приведенных в таблицах А.3 и А.5. Таблицы ANOVA приведены в таблицах В.1—В.7.

Таблица В.1 — Таблица дисперсионного анализа для таблицы А.3

Источник	Сумма квадратов SS	Число степеней свободы ν	Средний квадрат MS	Оценка дисперсии σ^2_i	Статистический критерий F	Критическое значение F_0	Оценка
Фактор А	SS_A	$\nu_A = N - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{\nu_A}$	$\sigma^2_A = \frac{MS_A - MS_{Res}}{K}$	$F = \frac{MS_A}{MS_{Res}}$	$F_{1-\alpha;\nu_1;\nu_2}$ $\nu_1 = \nu_A$ $\nu_2 = \nu_{Res}$	$\hat{\sigma}_A = \sqrt{\sigma^2_A}$
Остаточная ошибка	SS_{Res}	$\nu_{Res} = N(K-1)$	$MS_{Res} = \frac{SS_{Res}}{\nu_{Res}}$	$\sigma^2_{Res} = MS_{Res}$			$\hat{\sigma}_{Res} = \sqrt{\sigma^2_{Res}}$
Общее значение	SS_{tot}	$\nu_{tot} = NK - 1$					
Для A имеется N стандартных образцов (фактор А), которые измеряют k раз каждый (см. А.1). Неопределенность, соответствующая линейности: $u_{LIN} = \hat{\sigma}_A$. Неопределенность, соответствующая повторяемости: $u_{EVR} = \hat{\sigma}_{RES}$.							

Таблица В.2 — Схема отбора данных

Образцы P	Данные для оценки А			
	$a = 1$	$a = 2$	…	$a = \nu$
$p = 1$	x_{111} … x_{11r}	x_{211} … x_{21r}	…	$x_{\nu 11}$ … $x_{\nu 1r}$
$p = 2$	x_{121} … x_{12r}	x_{221} … x_{22r}	…	$x_{\nu 21}$ … $x_{\nu 2r}$
…	…	…	…	…
$p = w$	x_{1w1} … x_{1wn}	x_{2w1} … x_{2wn}	…	$x_{\nu w1}$ … $x_{\nu wn}$
Случайный фактор А (то, что исследуют) имеет ν уровней: индекс a изменяется от 1 до ν. Случайный фактор Р (образцы) имеет w уровней: индекс p изменяется от 1 до w. Количество повторных измерений: индекс r изменяется от 1 до n.				

Таблица В.3 — Схема вычисления суммы квадратов

Сумма квадратов для оценки изменчивости	$SS_{AV} = nw\sum_{a=1}^{\nu}\left(\bar{y}_a - \bar{y}_{tot}\right)^2$
Сумма квадратов для оценки изменчивости от образца к образцу	$SS_{PV} = n\nu\sum_{p=1}^{w}\left(\bar{y}_p - \bar{y}_{tot}\right)^2$
Сумма квадратов для оценки взаимодействия (исследуемый показатель — образец)	$SS_{IA} = n\sum_{a=1}^{\nu}\sum_{p=1}^{w}\left(\bar{y}_{ap} - \bar{y}_a - \bar{y}_p + \bar{y}_{tot}\right)^2$
Сумма квадратов ошибок (остаточная ошибка = повторяемость)	$SS_{Res} = \sum_{a=1}^{\nu}\sum_{p=1}^{w}\sum_{r=1}^{n}\left(y_{apr} - \bar{y}_{ap}\right)^2$
Общее среднее	$\bar{y}_{tot} = \frac{1}{\nu wn}\sum_{a=1}^{\nu}\sum_{p=1}^{w}\sum_{r=1}^{n} y_{apr}$
Средние по ячейкам $\nu \cdot w$	$\bar{y}_{apr} = \frac{1}{n}\sum_{r=1}^{n} y_{apr};\ a = 1 \ldots \nu;\ p = 1 \ldots w$
Средние по исследуемым показателям ν	$\bar{y}_{apr} = \frac{1}{w}\sum_{p=1}^{w}\bar{y}_{ap};\ a = 1 \ldots \nu$
Средние по образцам w	$\bar{y}_p = \frac{1}{\nu}\sum_{a=1}^{\nu}\bar{y}_{ap};\ p = 1 \ldots w$

Таблица В.4 — Таблица ANOVA для полнофакторной модели с двумя случайными факторами

Источник	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Средний квадрат	F	p-значения
Исследуемый показатель	SS_{AV}	$f_{AV} = \nu - 1$	$MS_{AV} = \frac{SS_{AV}}{f_{AV}}$	$F_{AV} = \frac{MS_{AV}}{MS_{IA}}$	$1 - G(F_{AV}; f_{AV}; f_{IA})$
Образцы	SS_{PV}	$f_{PV} = w - 1$	$MS_{PV} = \frac{SS_{PV}}{f_{PV}}$	$F_{PV} = \frac{MS_{PV}}{MS_{IA}}$	$1 - G(F_{PV}; f_{PV}; f_{IA})$
Взаимодействие исследуемого показателя и образцов	SS_{IA}	$f_{IA} = (\nu - 1)(w - 1)$	$MS_{IA} = \frac{SS_{IA}}{f_{IA}}$	$F_{IA} = \frac{MS_{IA}}{MS_{Res}}$	$1 - G(F_{IA}; f_{IA}; f_{Res})$
Остаточная ошибка	SS_{Res}	$f_{Res} = \nu w(n - 1)$	$MS_{Res} = \frac{SS_{Res}}{f_{Res}}$		
Общее значение	SS_{tot}	$f_{tot} = \nu wn - 1$			
$G(F; f_1; f_2)$ — интегральная функция F-распределения.					

Таблица В.5 — Оценки составляющих дисперсии

Дисперсия, соответствующая исследуемому показателю	$\hat{\sigma}^2_{AV} = \frac{1}{wn}\left(MS_{AV} - MS_{IA}\right) \cong \sigma^2_{AV}$
Дисперсия, соответствующая образцам	$\hat{\sigma}^2_{PV} = \frac{1}{\nu n}\left(MS_{PV} - MS_{IA}\right) \cong \sigma^2_{PV}$
Дисперсия, соответствующая взаимодействию (исследуемый показатель — образец)	$\hat{\sigma}^2_{IA} = \frac{1}{n}\left(MS_{IA} - MS_{Res}\right) \cong \sigma^2_{IA}$
Дисперсия остаточной ошибки	$\hat{\sigma}^2_{EVO} = MS_{Res} \cong \sigma^2_{Res}$

Таблица B.6 — Стандартные неопределенности

Стандартная неопределенность исследуемого показателя	$u_{AV} = \sqrt{\hat{\sigma}^2_{AV}}$
Стандартная неопределенность взаимодействия	$u_{IA} = \sqrt{\hat{\sigma}^2_{IA}}$
Стандартная неопределенность повторяемости	$u_{EVO} = \sqrt{\hat{\sigma}^2_{EVO}}$

Если взаимодействие между оператором и образцом является не существенным, т. е. p-значение меньше $\alpha = 0{,}05$, факторы повторяемости и взаимодействия следует объединить в единую составляющую:

$$SS_{Pool} = SS_{EVO} + SS_{IA}.$$

Это приводит к изменению данных в таблице ANOVA (см. таблицу B.7).

Таблица B.7 — Таблица модифицированного ANOVA, если влияние взаимодействия является не существенным

Источник	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Средний квадрат	F	p-значения
Исследуемый показатель	SS_{AV}	$f_{AV} = \nu - 1$	$MS_{AV} = \frac{SS_{AV}}{f_{AV}}$	$F_{AV} = \frac{MS_{AV}}{MS_{Pool}}$	$1 - G(F_{AV}; f_{AV}; f_{Pool})$
Образцы	SS_{PV}	$f_{PV} = w - 1$	$MS_{PV} = \frac{SS_{PV}}{f_{PV}}$	$F_{PV} = \frac{MS_{PV}}{MS_{Pool}}$	$1 - G(F_{PV}; f_{PV}; f_{Pool})$
Ошибка	SS_{Pool}	$f_{pool} = \nu w(n-1) + (\nu - 1)(w-1)$	$MS_{Pool} = \frac{SS_{Pool}}{f_{Pool}}$		
Общее значение	SS_{tot}	$f_{tot} = \nu wn - 1$			

Стандартная неопределенность имеет вид:

$$u_{EVO} = \sqrt{MS_{Pool}};$$

$$u_{AV} = \sqrt{\frac{MS_{AV} - MS_{Pool}}{wn}}.$$

B.3 Взаимосвязь воспроизводимости процесса измерений и воспроизводимости производственного процесса

Для процесса с нормальным распределением применяют следующие вычисления.

1 Для производственной характеристики, подчиняющейся нормальному распределению $N(\mu; \sigma^2)$:

$$\hat{C}_P = \frac{U - L}{6s}.$$

2 Наблюдаемый индекс воспроизводимости обозначают $C_{p\ obs}$.

$C_{p\ obs}$ — индекс воспроизводимости, характеризующий изменчивость производственного процесса и процесса измерений.

$$C_{p\ obs} = \frac{U - L}{6\sqrt{\sigma_P^2 + \sigma_{MP}^2}},$$

где σ_p — стандартное отклонение производственного процесса;

σ_{MP} — стандартное отклонение процесса измерений.

Тогда

$$C_{p\ obs} = \frac{U - L}{6\sqrt{\sigma_P^2 + \sigma_{MP}^2}} = \frac{U - L}{6\sigma_P\sqrt{1 + \sigma_{MP}^2 / \sigma_P^2}} = \frac{U - L}{6\sigma_P\sqrt{1 + (\sigma_{MP} / \sigma_P)^2}} = C_{p\ real}\frac{1}{\sqrt{1 + (\sigma_{MP} / \sigma_P)^2}}.$$

3 Взаимосвязь отношения воспроизводимости с фактическим индексом воспроизводимости обозначают $C_{p\ real}$.

В соответствии с формулами раздела 9:

$$Q_{MP} = \frac{2U_{MP}}{U-L} \Rightarrow Q_{MP} = \frac{4\sigma_{MP}}{U-L}.$$

4 В соответствии с формулами перечисления 2 (выше):

$$6^2 \cdot \sigma_P^2 + 6^2 \cdot \sigma_{MP}^2 = \frac{(U-L)^2}{C_{p\ obs}^2}.$$

5 В соответствии с формулами перечислений 1, 3 и 4:

$$6^2 \cdot \frac{(U-L)^2}{6^2 \cdot C_{p\ real}^2} + \frac{6^2}{4^2} \cdot Q_{MP}(U-L)^2 = \frac{(U-L)^2}{C_{p\ obs}^2},$$

где $C_{p\ real}$ — индекс воспроизводимости процесса, вычисленный с использованием только стандартного отклонения процесса σ_p.

Значение $C_{p\ real}$ больше значения $C_{p\ obs}$, равны эти индексы только при нереалистичном предположении о том, что дисперсия процесса измерений равна 0.

В соответствии с разделом 5:

$$\frac{1}{C_{p\ real}^2} + \frac{9}{4}\frac{Q_{MP}^2}{1} = \frac{1}{C_{p\ obs}^2}.$$

После очевидных преобразований

$$C_{p\ real} = \left(\frac{1}{C_{p\ obs}^2} - \frac{9}{4} \cdot Q_{MP}^2\right)^{-1/2}.$$

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
ISO 3534-1	IDT	ГОСТ Р ИСО 3534-1—2019 «Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 1. Общие статистические термины и термины, используемые в теории вероятностей»
ISO 3534-2	IDT	ГОСТ Р ИСО 3534-2—2019 «Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 2. Прикладная статистика»
ISO 5725-1	IDT	ГОСТ Р ИСО 5725-1—2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения»
ISO 5725-2	IDT	ГОСТ Р ИСО 5725-2—2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений»
ISO 5725-3	IDT	ГОСТ Р ИСО 5725-3—2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений»
ISO 5725-4	IDT	ГОСТ Р ИСО 5725-4—2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений»
ISO 5725-5	IDT	ГОСТ Р ИСО 5725-5—2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений»
ISO 5725-6	IDT	ГОСТ Р ИСО 5725-6—2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике»
ISO/IEC Guide 98-3:2008	IDT	ГОСТ 34100.3—2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения»

Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты.

Библиография

[1] ISO 1 Geometrical product specifications (GPS) — Standard reference temperature for the specification of geometrical and dimensional properties

[2] ISO 2854 Statistical interpretation of data — Techniques of estimation and tests relating to means and variances

[3] ISO 7870-1 Control charts — Part 1: General guidelines

[4] ISO 10012 Measurement management systems — Requirements for measurement processes and measuring equipment

[5] ISO 10360-2 Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions

[6] ISO 10360-5 Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) — Part 5: Coordinate measuring machines (CMMs) using single and multiple stylus contacting probing systems using discrete point and/or scanning measuring mode

[7] ISO 11095:1996 Linear calibration using reference materials

[8] ISO/TR 12888 Selected illustrations of gauge repeatability and reproducibility studies

[9] ISO 13528 Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison

[10] ISO 14253-2 Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification

[11] ISO/TR 14468:2010 Selected illustrations of attribute agreement analysis

[12] ISO 15530-3 Geometrical product specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement — Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards

[13] ISO 16269-4 Statistical interpretation of data — Part 4: Detection and treatment of outliers

[14] ISO 17450-2 Geometrical product specifications (GPS) — General concepts — Part 2: Basic tenets, specifications, operators, uncertainties and ambiguities

[15] ISO 21748 Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty evaluation

[16] ISO/TS 21749 Measurement uncertainty for metrological applications — Repeated measurements and nested experiments

[17] ISO 22514-1 Statistical methods in process management — Capability and performance — Part 1: General principles and concepts

[18] ISO 22514-2 Statistical methods in process management — Capability and performance — Part 2: Process capability and performance of time-dependent process models

[19] ISO/TS 28037 Determination and use of straight-line calibration functions

[20] ISO/IEC Guide 99:2007 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)

[21] Measurement Systems Analysis (MSA) Version/Edition: 4 June 2014 — AIAG Automotive Industry Action Group

[22] Verband der Automobilindustrie (VDA), Volume 5, Capability of Measurement Processes, Capability of Measuring Systems, 3rd completely revised edition 2021

[23] Graf, Henning, Stange, Wilrich «Formulas and Tables of Applied Mathematical Statistics», Springer Verlag

УДК 658.562.012.7:65.012.122:006.354 ОКС 03.120.30

Ключевые слова: процесс, воспроизводимость и пригодность процесса, индексы воспроизводимости и пригодности, многомерная количественная характеристика, поле допуска, показатель воспроизводимости процесса, оценка воспроизводимости процесса, показатель пригодности процесса, оценка пригодности процесса

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 31.07.2024. Подписано в печать 15.08.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 4,95.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru