мдк1.2 Тема 2.3.2. 2 Погрешности, возникающие при механических соединениях деталей машин.

Допуски и посадки нужно учитывать при пазовых соединениях.

При обеспечении шестерёнчатых и блочных связей необходимо учитывать

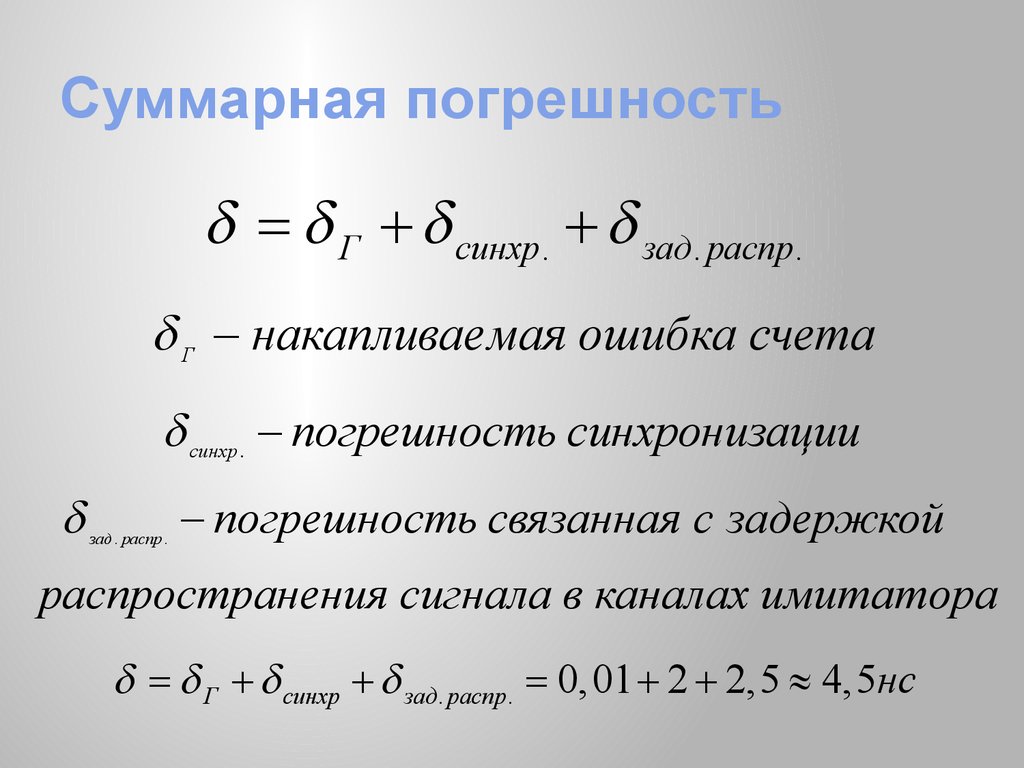
передаточный момент и люфт.

Цепи и ремни должны быть равномерными иначе шаг подачи материала теряется, что может регулироваться скоростью подачи двигателя.

При состыковке валов необходимо учитывать соосность стыковки,

Смещение осей валов приводит к неравномерности передачи вращения и нагрузкам на искривление.

Погрешности, возникающие при механических соединениях деталей машин.



**Суммирование погрешностей измерений**

Измерительные каналы систем автоматизации могут включать в себя несколько средств измерений различных типов, например, датчики, измерительные преобразователи, модули аналогового и частотного ввода и вывода. Погрешность такой системы желательно определять экспериментальным путем [[МИ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#259)], однако это не всегда возможно или целесообразно. В таких случаях используют расчетный метод.

**4.4.1. Исходные данные для расчета**

Исходными данными для расчета погрешности измерительных каналов являются ([[ГОСТ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#285)]):

* метрологические характеристики средств измерений;
* погрешность метода измерений (методическая погрешность);
* характеристики влияющих величин (например, окружающая температура, влажность);
* характеристики измеряемого сигнала.

ГОСТ 8.009 [[ГОСТ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#261)] для всех типов средств измерений устанавливает следующий комплекс метрологических характеристик, который указывается в эксплуатационной документации на средства измерений:

* систематическая составляющая основной погрешности;
* среднеквадратическое отклонение случайной составляющей основной погрешности;
* дополнительная погрешность для каждой из влияющих величин;
* динамическая погрешность.

Некоторые средства измерений обладают гистерезисом - для них кроме перечисленных погрешностей указывается случайная составляющая основной погрешности, вызванной гистерезисом.

Основная погрешность может быть указана без разделения ее на части (на систематическую, случайную и погрешность от гистерезиса), и этот вариант является наиболее распространенным. Случайную составляющую указывают в случае, когда она больше 10% от систематической [[ГОСТ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#261)].

Дополнительная погрешность указывается в виде функции влияния внешнего фактора на основную погрешность или ее составляющие: систематическую и случайную. Обычно эта функция представляет собой линейную зависимость и тогда указывается только коэффициент влияния, например, 0,05%/ºС.

Динамическая погрешность указывается с помощью одной из следующих характеристик: импульсная, переходная, амплитудно-частотная и фазочастотная, амплитудно-фазовая характеристика, передаточная функция. Для минимально-фазовых цепей указывается только ампитудно-частотная характеристика, поскольку фазо-частоная однозначно может быть получена из амплитудно-частотной характеристики.

Для расчета методической погрешности могут быть указаны сопротивления проводов, среднеквадратическое значение или спектральная плотность помех в них, емкость, индуктивность и сопротивление источника сигнала, а также другие факторы, которые возникают при создании системы, включающей средства и объект измерений.

Характеристики измеряемого сигнала задаются в виде функции от времени или функции спектральной плотности. Для случайного входного сигнала задается спектральная плотность мощности или автокорреляционная функция. Во многих случаях для оценки погрешности бывает достаточно знания скорости нарастания входного сигнала.

**4.4.2. Методы суммирования погрешностей**

Перед суммированием все погрешности делятся на следующие группы:

* систематические и случайные;
* в группе случайных - коррелированные и некоррелированные;
* аддитивные и мультипликативные;
* основные и дополнительные.

Такое деление необходимо потому, что систематические и случайные погрешности, а также коррелированные и некоррелированные суммируются по-разному, а аддитивные погрешности нельзя складывать с мультипликативными.

Если некоторые погрешности указаны в виде доверительных интервалов, то перед суммированием их нужно представить в виде среднеквадратических отклонений (см. раздел ["Точечные и интервальные оценки погрешности"](https://www.bookasutp.ru/Chapter4_1_5.aspx#PointEstimation)).

Дополнительные погрешности могут складываться с основными либо перед суммированием погрешностей, либо на заключительном этапе, в зависимости от поставленной задачи. Второй вариант часто предпочтительнее, поскольку он позволяет оценивать погрешность всего измерительного канала в зависимости от величины внешних влияющих факторов в конкретных условиях эксплуатации.

При последовательном соединении нескольких средств измерений погрешности, проходя через измерительный канал с передаточной функцией (функцией преобразования) https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image015.gifмогут усиливаться или ослабляться. Для учета этого эффекта используют коэффициенты влияния, которые определяются как https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image453.gif. Все погрешности перед суммированием приводят к выходу (или входу) измерительного канала путем умножения (деления) на коэффициент влияния. В дальнейшем будем предполагать, что такое приведение уже выполнено.

Погрешности средств измерений являются случайными величинами, поэтому при их суммировании в общем случае необходимо учитывать соответствующие законы распределения. На практике пользуются более грубыми упрощенными методами, разработанными математической статистикой.

Математическое ожидание погрешностей средств измерений, как правило, равно нулю. Если это не так, то его (в виде поправки) складывают с систематической составляющей погрешности. В средствах автоматизации введение поправки выполняется автоматически с помощью микроконтроллера, входящего в состав средств измерений. Математическое ожидание случайной составляющей всегда равно нулю, поскольку при нормировании метрологических характеристик его относят к систематической составляющей.

Наиболее полное определение итоговой погрешности измерительного канала состояло бы в нахождении функции распределения суммы нескольких погрешностей измерения. Однако функция распределения суммы случайных величин находится с помощью операции свертки [[Орнатский](https://www.bookasutp.ru/References.aspx" \l "253" \o "Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техни...)], что приводит к значительным практическим трудностям. Поэтому для оценки итоговой погрешности ограничиваются только суммированием дисперсий погрешностей.

Погрешности суммируют по однородным группам, затем находят общую погрешность, используя геометрическое суммирование для случайных погрешностей и алгебраическое для детерминированных.

Существует три способа суммирования погрешностей:

* алгебраический:

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image454.gif, | (4.100) |

где https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image455.gif- номер погрешности, https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image139.gif- их количество.

* геометрический:

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image456.gif, | (4.101) |

где https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image457.gif- среднеквадратическое значение https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image455.gif-той погрешности;

* с учетом корреляции:

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image458.gif. | (4.102) |

В этой формуле https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image459.gifпотому, что члены с https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image460.gifуже учтены в сумме https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image461.gif, а https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image462.gifдля того, чтобы суммировать только члены, лежащие ниже диагонали корреляционной матрицы, поскольку вследствие ее симметричности https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image463.gif+https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image464.gif=https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image465.gif.

При https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image466.gifвыражение (4.102) переходит в формулу алгебраического суммирования (см. также (4.31)):

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image467.gif, | (4.103) |

где https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image468.gifскладывается со своим знаком, т.е. коррелированные погрешности с противоположными знаками частично взаимно компенсируются, если их коэффициент корреляции равен единице.

При https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image469.gifпогрешности вычитают попарно, в соответствии с (4.32):

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image470.gif, | (4.104) |

т.е. при отрицательной корреляции погрешности частично компенсируются, если они имеют один и тот же знак.

Учитывая, что получить удовлетворительные оценки коэффициентов корреляции практически довольно трудно, используют следующий прием: при https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image471.gifсчитают, что https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image472.gif, при https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image473.gifполагают https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image474.gif[[Орнатский](https://www.bookasutp.ru/References.aspx" \l "253" \o "Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техни...), [Новицкий](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#248)].

**4.4.3. Систематические погрешности**

В наиболее типовом случае систематические составляющие основных погрешностей средств измерений суммируются геометрически, по формулам (4.30), (4.101), поскольку они являются случайными величинами.

Формулы геометрического суммирования были получены для среднеквадратических погрешностей (см. (4.25)). Поэтому, если комплекс метрологических характеристик средств измерений включает предел допускаемых значений систематической составляющей основной погрешности https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image475.gifбез указания среднеквадратического значения (по ГОСТ 8.009 [[ГОСТ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#261)]), то соответствующую ему среднеквадратическое значение находят, в соответствии с рекомендациями РД 50-453-84 [[РД](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#260)], по формуле

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image476.gif. | (4.105) |

Эта формула справедлива, если нет оснований полагать, что функция распределения данной погрешности является несимметричной и имеет несколько максимумов.

Метрологическая инструкция МИ 2232-2000 [[МИ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#254)] рекомендует иную формулу - половину предела допускаемой погрешности.

Выбор способа суммирования систематических составляющих основных погрешностей не является однозначным и это связано с отсутствием полной информации о законе распределения. Дело в том, что причиной существования основной погрешности является как технологический разброс параметров электронных компонентов, так и нескомпенсированная нелинейность. Технологический разброс обычно является случайным и на этом основании систематическая составляющая погрешности может рассматриваться как случайная величина на множестве средств измерений одного и того же типа. Поэтому в формулах для расчета погрешностей она учитывается *геометрически*. Однако нелинейность передаточной характеристики средства измерений (нелинейность АЦП, нормирующих усилителей, термопар) у всех экземпляров приборов одного типа будет иметь примерно один и тот же вид, величину и знак. Например, погрешность, вызванная нелинейностью, в начале шкалы может быть положительной, в середине шкалы - отрицательной. у верхнего предела шкалы - опять положительной, и так *для всех экземпляров* приборов одного типа. Поэтому погрешности, обусловленные нелинейностью, должны суммироваться алгебраически.

В современных модулях аналогового ввода используется автоматическая калибровка, позволяющая уменьшить случайную компоненту систематической погрешности и в этом случае преобладающей является детерминированная погрешность нелинейности.

Поскольку ГОСТ 8.009 [[ГОСТ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#261)] не предусматривает нормирование таких тонких нюансов поведения погрешностей, выбор способа суммирования начинает зависеть не от технических, а от политических факторов. Если фактическая погрешность окажется выше расчетной и это повлечет за собой угрозу жизни людей, большой экономический ущерб, техногенную катастрофу и т. п. [[МИ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#254)], то суммирование погрешностей выполняют алгебраически, причем используют не среднеквадратические отклонения, а пределы допустимых значений погрешности.

Если известен знак систематической погрешности, то его учитывают при суммировании.

Для наиболее ответственных применений следует использовать средства измерений, для которых указаны погрешность без разделения на случайную и систематическую компоненты, поскольку в этом случае погрешность указана с доверительной вероятностью, равной единице. Если же используются средства измерений, для которых указана случайная составляющая, то для них рассчитывают величину погрешности при доверительной вероятности, равной единице. Это условие существенно завышает требования к точности средства измерений.

Алгебраическое суммирование часто дает слишком завышенную оценку погрешности. Поэтому МИ 2232-2000 [[МИ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#254)] предусматривает промежуточный вариант между формулами геометрического и алгебраического суммирования:

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image477.gif, | (4.106) |

где https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image478.gif- поправочный коэффициент, равный 1,2 для наиболее важных параметров устройств аварийной защиты и блокировки, контроля за соблюдением требований техники безопасности и экологической безопасности, контроля характеристик готовой продукции [[МИ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#254)].

Для конкретных экземпляров приборов могут быть указаны не номинальные характеристики (имеющие одну и ту же величину для всех приборов данного типа), а индивидуальные. В этом случае систематическая погрешность является не случайной, а детерминированной величиной, поэтому должна учитываться в итоговой погрешности измерительного канала *алгебраически*.

**4.4.4. Случайные погрешностей**

Случайные составляющие основной погрешности средств измерений по ГОСТ 8.009 [[ГОСТ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#261)] задаются своими среднеквадратическими отклонениями, поэтому их суммирование выполняется непосредственно по формуле геометрического суммирования (4.101).

Если случайная погрешность является коррелированным случайным процессом (см. п. ["Функция автокорреляции"](https://www.bookasutp.ru/Chapter4_1_3.aspx)) и задана в виде функции автокорреляции https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image050.gifили спектральной плотности мощности https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image479.gif, то сначала находят среднеквадратическое значение случайной составляющей погрешности по формуле [(4.19)](https://www.bookasutp.ru/Chapter4_1_3.aspx#(4.19)):

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image480.gif, | (4.107) |

где https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image481.gif- верхняя граничная частота полосы пропускания всего измерительного канала или цифрового фильтра, используемого при обработке полученных данных. Если задана функция автокорреляции, то спектральную плотность мощности находят по формуле (4.17).

Случайная составляющая погрешности может быть уменьшена в несколько раз (в зависимости от величины фликкер-шума) путем усреднения результатов многократных измерений (см. п. ["Многократные измерения"](https://www.bookasutp.ru/Chapter4_2.aspx)).

**4.4.5. Дополнительные погрешности**

Дополнительные погрешности задаются в виде функции влияния внешних факторов (температуры, влажности, напряжения питания) на основную погрешность измерения или, в случае линейной функции влияния, коэффициентом влияния. Например, может быть задано, что основная погрешность увеличивается на +0,05% при изменении напряжения питания на +20%.

Если задан диапазон изменения влияющих величин, в качестве их математического ожидания для расчетов с помощью функции влияния берут их среднее значение [[РД](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#260)].

Среднеквадратическое отклонение дополнительной погрешности для линейной функции влияния находят по формуле [[РД](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#260)]

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image482.gif, | (4.108) |

где https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image483.gif- коэффициент влияния внешнего фактора; https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image484.gif- нижняя и верхняя граница изменения влияющей величины.

Дополнительная погрешность может увеличивать как систематическую, так и случайную составляющую основной погрешности. Для этого функции влияния задаются раздельно на каждую составляющую.

Если известно, что дополнительные погрешности нескольких средств измерений коррелируют (например, синхронно возрастают при увеличении напряжения питания в сети или температуры окружающей среды), то такие погрешности суммируют как коррелированные величины, с учетом коэффициента корреляции (4.102) - (4.104).

Дополнительные погрешности считаются несущественными, если их сумма составляет менее 17% от наибольшего возможного значения инструментальной погрешности в рабочих условиях эксплуатации [[ГОСТ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#261)].

**4.4.6. Динамические погрешности**

Динамическая погрешность при известном входном сигнале является детерминированной. Она обычно приводит к занижению показаний измерительного прибора. Суммирование таких погрешностей выполняется алгебраически.

Подробнее об оценке динамической погрешности см. п. ["Фильтр и динамическая погрешность"](https://www.bookasutp.ru/Chapter4_3.aspx#FilterAndError) и книгу [[Орнатский](https://www.bookasutp.ru/References.aspx" \l "253" \o "Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техни ...) ].

Динамическая погрешность считается несущественной, если она составляет менее 17% от наибольшего возможного значения инструментальной погрешности в рабочих условиях эксплуатации [[ГОСТ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#261)].

**4.4.7. Нахождение итоговой погрешности**

После суммирования погрешностей по группам, как это было описано выше, результат измерения обычно выражают в виде

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image485.gif, | (4.109) |

где https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image486.gif- измеренное значение; https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image117.gif- сумма всех погрешностей, которые складывались алгебраически, т.е. детерминированных погрешностей. Детерминированные погрешности могут быть прибавлены к измеренной величине в качестве поправки; https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image122.gif- сумма всех случайных погрешностей, которые складывались геометрически, в том числе с учетом корреляционных связей:

|  |  |
| --- | --- |
| https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image487.gif, | (4.110) |

где https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image488.gif- сумма всех систематических погрешностей измерительного канала; https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image489.gif- сумма всех случайных погрешностей; https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image490.gif- сумма всех дополнительных погрешностей; https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image491.gif- сумма всех случайных составляющих методических погрешностей, включая погрешность программного обеспечения (см. раздел ["Погрешность метода измерений"](https://www.bookasutp.ru/Chapter4_1_5.aspx#MethodError)). Детерминированные составляющие методических погрешностей учитываются в слагаемом https://www.bookasutp.ru/Chapter4.files/image117.gif.

Вместо среднеквадратического отклонения может быть указан предел допустимых значений. Однако должно быть явно указано, какая именно оценка погрешности использована, поскольку доверительные вероятности для предела допустимых значений (единица) и для среднеквадратического отклонения (0,68) существенно отличаются.

Случайная, систематическая и дополнительная погрешности могут быть указаны раздельно. МИ 1317-2004 [[МИ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#265)] рекомендует "вместе с результатом измерений представлять характеристики его погрешности или их статистические оценки". Поэтому состав характеристик погрешности может быть выбран в каждом конкретном случае индивидуально, в зависимости от смысла решаемой задачи.

При выполнении многократных измерений результат измерений должен содержать также указание на количество измерений, использованных при усреднении и интервал времени, в течение которого были выполнены измерения [[МИ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#265)].

Поскольку выражение для суммы дисперсий случайных величин (4.25) получено независимо от закона распределения, геометрическое суммирование погрешностей дает правильное значение дисперсии независимо от законов распределения отдельных составляющих. Однако при этом ничего нельзя сказать о функции распределения суммарной погрешности, в том числе о надежности (доверительной вероятности) полученного результата. Тем не менее, поскольку при суммировании пяти и более погрешностей закон распределения суммы близок к нормальному независимо от законов распределения отдельных слагаемых [[Орнатский](https://www.bookasutp.ru/References.aspx" \l "253" \o "Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техни ...)], то, зная среднеквадратическое отклонение итоговой погрешности, можно использовать нормальный закон распределения для указания доверительного интервала и доверительной вероятности результата измерений.

**Нахождение погрешности измерительного канала в условиях недостатка исходных данных**

При оценке погрешности измерительных каналов средств автоматизации следует по возможности использовать экспериментальный метод. Однако в случаях, когда это невозможно или экономически нецелесообразно, делают расчет по изложенной выше методике. Типичной проблемой, которая при этом возникает, является отсутствие некоторых исходных данных. В этой ситуации метрологическая инструкция МИ 2232-2000 [[МИ](https://www.bookasutp.ru/References.aspx#254)] рекомендует использовать следующие "значения по умолчанию":

* среднеквадратическое значение погрешности принимается равным половине предела допускаемых значений погрешности;
* математическое ожидание основной и дополнительной погрешности принимается равным нулю;
* корреляция между отдельными составляющими погрешности отсутствует;
* случайная составляющая погрешности измерений является некоррелированной случайной величиной (белым шумом) или вырождается в систематическую погрешность;
* функции распределения внешних влияющих величин предполагаются равномерными или нормальными;
* считается, что инерционные свойства средств измерений не оказывают влияния на погрешность измерений.

**4.5. Заключение к главе "Измерительные каналы"**

В зависимости от цели исследований или измерений необходимо различать такие характеристики измерительных каналов, как разрешающая способность, порог чувствительности, динамический диапазон или точность.

Усреднение результатов многократных измерений возможно только при большой случайной составляющей погрешности и практически редко дает повышение точности более чем в 2...3 раза. Однако это не относится к разрешающей способности, которая может быт увеличена существенно.

Нельзя игнорировать динамическую погрешность измерений, которая обычно не указывается в эксплуатационной документации. Отсутствие информации о ее величине не свидетельствует об отсутствии самой погрешности.

При выборе частоты дискретизации аналогового сигнала перед измерениями с максимальной частотой, допускаемой модулем ввода, необходимо убедиться, что спектр помехи лежит ниже половины частоты дискретизации или использовать дополнительно антиалиасный фильтр.

Ошибки, допущенные на этапе проектирования и монтажа автоматизированной системы, могут сделать измерения недостоверными.

При нахождении итоговой погрешности измерений следует различать детерминированные, случайные и коррелированные погрешности, которые суммируются по-разному.

Одним из путей упрощения методики расчета погрешностей может быть использование средств измерений с большой избыточностью по точности. Тогда учет тонких нюансов теории погрешностей становится излишним.