Курс «Метрология и информационно-измерительная техника»

Практические занятия

общая тема: расчёт погрешностей результатов измерения

Продолжительность: 8 занятий

**Цель занятий:** научиться правильно рассчитывать погрешности измерений, правильно записывать результаты измерений и находить эффективные способы улучшения точности измерений

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **№** | Содержание |  |
| **Тема 1** | 1 Инструкция «Расчёт погрешностей прямых измерений синусоидальных напряжений методом МНС» |  |
|  |  |
| **1.1 Пример** и**змерения с помощью электронного (аналогового) вольтметра** |  |
| 1.1.1 Расчёт предельных значений *инструментальных* *составляющих* (∆о.п., ∆Θ.п.) погрешности результата измерения |  |
| 1.1.2 Расчёт предельного значения погрешности, допускаемой субъектом (погрешность *отсчитывания*) ∆отс.п |  |
| 1.1.3 Расчёт предельного значения погрешности взаимодействия объекта с прибором ∆вз.п |  |
| 1.1.4 Расчёт предельного значения *частотной составляющей погрешности* ∆*f*.п. |  |
| **1.2 Пример измерения с помощью отечественного цифрового мультиметра** |  |
| 1.2.1 Расчёт предельных значений *инструментальных* *составляющих* (∆о.п., ∆Θ.п.) погрешности результата измерения |  |
| 1.2.2 ∆отс.п=0 |  |
| 1.2.3 Расчёт предельного значения погрешности взаимодействия объекта с прибором ∆вз.п |  |
| 1.2.4 Расчёт предельного значения *частотной составляющей погрешности* ∆*f*.п. |  |
| **1.3 Пример** и**змерения с помощью зарубежного цифрового мультиметра** |  |
| 1.3.1 Расчёт предельных значений *инструментальных* *составляющих* (∆о.п., ∆Θ.п.) погрешности результата измерения |  |
| 1.3.2 ∆отс.п=0 |  |
| 1.3.3 Расчёт предельного значения погрешности взаимодействия объекта с прибором ∆вз.п |  |
| 1.3.4 Расчёт предельного значения *частотной составляющей погрешности* ∆*f*.п. |  |
| **ПриложениЕ** |  |
| Особенности нормирования метрологических характеристик измерителей напряжения |  |
| 1.4 Индивидуальное задание 1 (ИЗ1). Шаблон с пояснениями |  |
| 1.5 Контрольная работа 1 (КР1). Выполняется студентами, которые не справились с ИЗ1 |  |
| 1.6 Примеры вопросов к *Прометей*-тестированию по теме 1 |  |
| **Тема 2** | 2 Инструкция «Расчёт погрешностей прямых измерений полигармонических напряжений методом МНС» |  |
|  |  |
|  | … |  |
|  | 2.7 Примеры вопросов к *Прометей*-тестированию по теме 2 |  |
| **Тема 3** | 3 Инструкция «Расчёт погрешностей косвенных измерений» |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  | 3.7 Примеры вопросов к *Прометей*-тестированию по теме 3 |  |

**Тема 1. Расчёт погрешностей прямых измерений переменных напряжений методом наихудшего случая (МНС)**

**Тема 1** будет раскрыта на трёх примерах ***прямых измерений***\* ***синусоидальных напряжений***.

Источники погрешностей указаны на рис. 1.

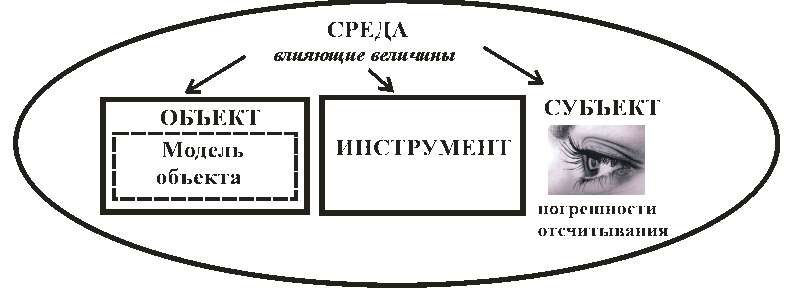


Рисунок 1 – Источники погрешностей прямых измерений

Виды погрешностей, изучаемые на занятиях

***Основная***, ∆о. Нормируется для нормальных условий эксплуатации прибора.

***Дополнительная температурная***, ∆Θ. Нормируется для температурных условий, отличающихся от нормальных

Другие дополнительные1). В работе не рассматриваются.

***Частотная***, ∆*f.* Нормируется для частот, отличных от нормальных.

***Отсчитывания***, ∆отс. Нормируется для ситуаций, когда стрелка прибора устанавливается между делениями аналоговой шкалы.

**Взаимодействия**, ∆вз. Возникает всегда, когда выходной импеданс объекта Zвых= 0.

Погрешности от формы сигнала2. Могут возникать при измерении полигармонических напряжений.

Примечания

1 Эти составляющие погрешности результата измерения в представленном материале не рассматриваются;

2 Эти погрешности будут рассмотрены в теме 2

Расчёт погрешностей проводится ***методом наихудшего случая*** (МНС). В этом случае рассчитываются **предельные значения** погрешностей

Результаты измерений записываются в следующем формате:

|  |  |
| --- | --- |
| **РИ = (ИЗ ± ∆п) ЕИ; *Р*=1** где:  ∆п.=Σ∆i.п. =  = ∆о.п.+∆Θ.п.+∆f.п.+∆отс.п.+∆вз.п. | Обозначения:  РИ – результат измерения; ИЗ – измеренное значение;  ЕИ – единица измерения; ∆п – предельное значение погрешности результата;  *Р*=1 символ применённого метода расчёта – *МНС*. Это означает:  «с вероятностью *Р*=1 *истинное значение* величины находится в диапазоне ИЗ ± ∆**п**» |

Примечания

1 Рассматриваемые погрешности с добавленным индексом «п», фактически представляют собой диапазон значений, например, **∆о.п** = ±0,45 В = (-0,45…0,45) В. В этом диапазоне находится реальное значение погрешности **∆о.**, которое нам в эксперименте остаётся неизвестным.

2 Предельное значение погрешности взаимодействия всегда имеет отрицательное значение, например, **∆**вз.п = - 1,0 В = (-1,0…0) В. В метрологических расчётах её, обычно, симметрируют: **∆**вз.сим.п = ± 0,5 В.

3 Предельное значение погрешности результата **∆п.** должно иметь всегда *два значащих разряда*. Некоторые «каверзные» примеры (значащие разряды подчёркнуты): 1,**0** В; 0,1**0** В; 0,**0**1**0** В; 42 кВ, 4,2 кВ; 0,42 кВ; 0,**0**42 кВ.

* 1. **Пример** **измерения с помощью электронного милливольтметра В3-38. Прибор применён в цикле лабораторных занятий (ЛР№1)**

Исходные данные:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| схема эксперимента | форма *uвых(t)* – синусоидальная: | | Вольтметр В3-38 |
|  |  | *f* ≈ 1 кГц  *k*a = 1,41  *k*ф = 1,11 |  |

Электронный (аналоговый) милливольтметр В3-38 имеет 12 пределов измерений от 1 мВ до 300 В, шкала проградуирована в СКЗ синусоидального напряжения.

Примечание – Обратите внимание на усложнённую графему использованного вольтметра, которая помимо символа V (вольтметр) и ~ (переменное напряжение), даёт информацию о двух наиболее важных особенностях этого вольтметра. Графема содержит обозначение применённого способа нормирования класса точности – символ приведённой погрешности γ, а также типа реализованного детектора: детектор средневыпрямленного значения (СВЗ). Такой прибор предназначен для измерения синусоидальных напряжений, при измерении полигармонического напряжения (ПГН) прибор позволит измерить его СВЗ.

Таблица 1.1 – Актуальные характеристики из технического описания (ТО) прибора

|  |  |
| --- | --- |
| Отображаемое напряжение переменного тока | СКЗ *синусоидального* напряжения |
| Пределы измерений, *U*к | 1, 3, 10, 30, 100 и 300 мВ;  1, 3, 10, 30, 100 и 300 В |
| Класс точности | 4,0 |
| Коэффициент амплитуды (*пик-фактор*, *крест-фактор*), *k*а.V | 1,41 |
| Диапазон нормальных значений частот, ∆*F*норм | 45…106 Гц |
| Диапазон рабочих значений частот, ∆*F*раб. | 20… 5⋅106 Гц |
| Диапазон *нормальных* (*значений*)температур ∆Θнорм. | (20±5) °С |
| Диапазон *рабочих* (*значений*) температур ∆Θраб. | (0…45) °С |
| Температурный коэффициент (влияния), *k*Θ | (∆о.п/10) В/°С |
| Входное сопротивление *RV* | 4000 кОм ±10% |
| Входная ёмкость, *CV*, макс | 15 пФ |

В эксперименте было получено:

- выбран **предел измерений**: *U*к = 10 В {максимально близок к измеренному значению};

- отсчитанное субъектом значение: *U*отс*=* 9,10 В {получено путём округления до четвертой части деления};

- возможный диапазон температуры окружающей среды: ∆Θср. = (+10… +15) °С {термометра не было, предположили по внешним ощущениям}

- с помощью осциллографа убедились, что сигнал имеет форму синусоиды с частотой 1 кГц.

Расчёт будем проводить последовательно.

**1.1.1 Расчёт предельного значения *основной* *составляющей* погрешности результата измерения** ∆о.п**.**

Предельное значение основной абсолютной погрешности ∆о.п рассчитывается на основании известного класса точности:

∆о.п = [кл.т.]·*U*к / 100 % = 4,0·10 / 100 % = 0,4 В, где: (1.1)

[кл.т.] = класс точности = γо.п·(*приведённая погрешность,* выраженная в процентах) = 4,0 %.

* + 1. Предельное значение температурной погрешности рассчитываем по выражению:

∆Θ.п = **∆**Θмакс.⋅*k*Θ = 5⋅∆оп/10 = 5⋅0,04 = 0,2 В, (1.2)

где ***k*Θ** задан в табл. 1.1, а ∆Θмакс рассчитываем в соответствии с рис. 1.1:

∆Θмакс = |Θнорм.мин - Θср.мин| = |(20-5) – 10| = 5 °С;

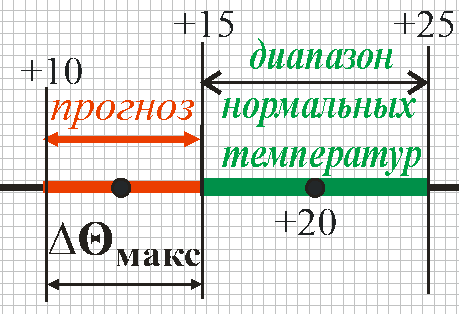


Рисунок 1.1

* + 1. **Расчёт и учёт предельного значения *частотной составляющей погрешности* ∆*f*.п.**

В том случае, если частота измеряемого напряжения входит в *расширенный диапазон частот* вольтметра (рис. 1.5), необходимо учесть *частотную погрешность* ∆*f*.п. В отечественной практике она задаётся равной основной погрешности **∆***f*.п **= ∆**о.п.



∆*F*раб = *f*1…*f*4; ∆*F*норм = *f*2…*f*3; ∆*F*расш.н= *f*1…*f*2; ∆*F*расш.в. = *f*3…*f*4

Рисунок 1.5 – Частотные диапазоны вольтметров

Расширенный диапазон частот указан в ТО: ∆*F*расш.н = (≥20 … 45) Гц и ∆*F*расш.в = (>1 106…5·106) Гц. Частота исследуемого сигнала в нашем примере *f*c = 1 кГц, т.е. входит в *диапазон* *нормальных* (значений)частот и частотная погрешность, таким образом, ∆*f*.п = 0.

**1.1.4 Расчёт погрешности, допускаемой субъектом (погрешность *отсчитывания*)**

*Погрешность отсчитывания* Δотс. допускает субъект во время отсчитывания результата по аналоговой шкале. Она возникает всегда, когда стрелка прибора устанавливается между делениями и необходимо получить промежуточное значение.

Поясним процедуру оценки Δотс. на графическом примере.

На рис. 1.2 в сильно увеличенном виде показано одно деление шкалы, т.е. расстояние между соседними метками на шкале. Стрелка прибора установилась между метками.

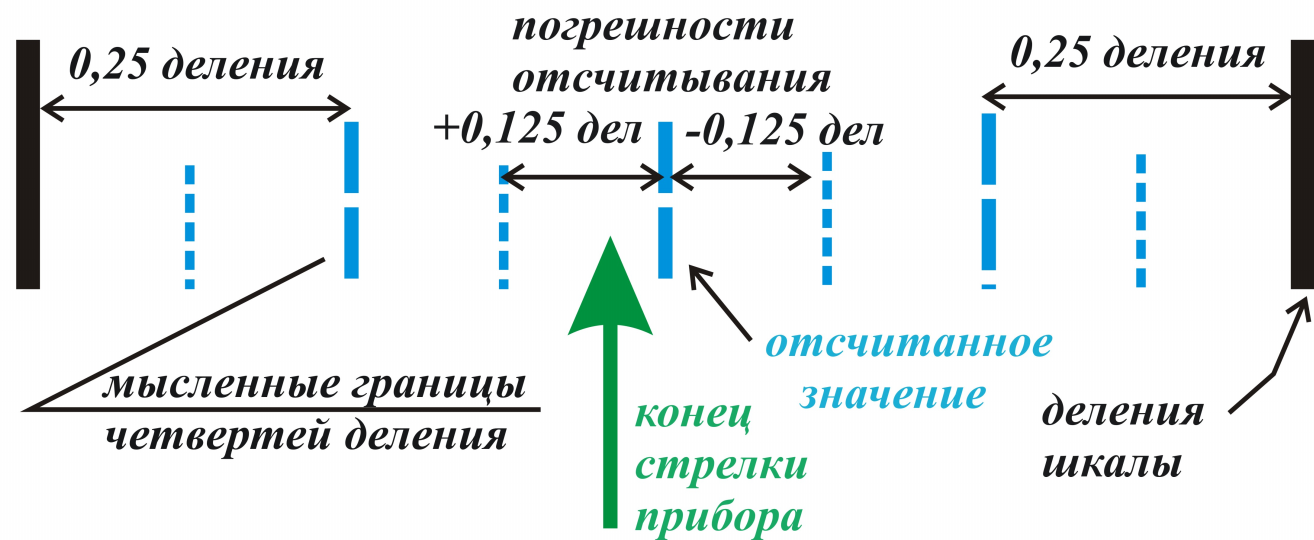


Рисунок 1.2 – Иллюстрация процедуры считывания результата измерения по аналоговой шкале

Мысленно пространственный интервал между делениями делим на четыре\* равные части. В этом случае результат измерения можно будет отсчитать с округлением до четверти деления. Погрешность отсчитывания в этом случае Δотс,п=±0,125q

Шкала применяемого в задании вольтметра представлена на рис. 1.3. Она сложная и содержит две вложенные шкалы: верхняя с конечной отметкой 10 – для пределов 1 В, 10 В и 100 В, нижняя с конечной отметкой 30 – для пределов 3 В, 30 В и 300 В. Для выбранного в эксперименте предела 10 В – наиболее близок к измеренному напряжению – необходимо использовать верхнюю шкалу (0…10):



Рисунок 1.3 – Система шкал используемого прибора

Шкала равномерная, цена деления рассчитывается по формуле:

*q* = *U*к/*αк* = 10 В/50 дел = 0,2 В, где *αк* – общее число делений на шкале.

Окончательно имеем:

∆отс.п = 0,125 × *q* = 0,125 × 200 мВ = 25 мВ (1.4)

* + 1. **Расчёт и учёт погрешности, обусловленной взаимодействием объекта с прибором**

На этом этапе необходимо рассчитать: **Δ**вз.п, **Δ**вз.сим.п, поправку к измеренному значению η и исправленное значение результата *U*испр.

Уточним схему эксперимента (см. рис. ниже). Используем в расчёте известные из ТО два входных параметра вольтметра *RV* и *CV*:

|  |  |
| --- | --- |
| Уточнённая схема эксперимента | Восстановим актуальные сведения: |
| Рисунок 1.4 | - входное сопротивление *RV*= 4000 кОм±10%;  - входная ёмкость *CV* ≤ 15 пФ |

Провели дополнительный эксперимент и получили значение

*R*вых ≈ 5 кОм

Рассчитаем значение погрешности взаимодействия по известному выражению:

Δвз.п. ≈ – *U* (+ 0,5*·*ω2

= - 9,10 (

Обратим внимание, что погрешность взаимодействия в отличии от других составляющих всегда имеет один знак – отрицательный. Это будет неудобно при окончательной записи результата измерения, поэтому проведём *процедуру симметрирования* Δвз.п и введения *поправки* η в измеренное значение.

Предельное значение ***отсимметрированной*** погрешности взаимодействия:

Δвз.сим.п. = ± |Δвз.п./2| = ±|-0,011/2| = ± 0,0055 В (1.5)

Значение поправки в измеренное значение: η=0,0055 В

Измеренное значение с учётом поправки *U*испр:

*U*испр = *U*отс+ η = 9,10 + 0,0055 = 9,106 ≈ 9,11 В (1.6)

**1.1.6 Подведём итог, просуммировав рассчитанные значения составляющих погрешности:**

***U=*** (*U*испр ± Σ∆) = [9,11 ± (0,4 +0,2+ 0+0,025 + 0,0055)] В **≈(9,11 ± 0,63) В; *Р*=1** (1.7)

Заметим: погрешность округлена до двух значащих разрядов

**Точность результата = δп=100⋅0,63/9,11 = ±6,9 %**

* 1. **Пример измерения с помощью отечественного цифрового мультиметра В7-58. Прибор применяется в цикле лабораторных занятий (ЛР№1)**

Расчёты проводятся аналогично разделу 1.1.

Исходные данные:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| схема эксперимента | форма *uвых(t)* – синусоидальная: | | мультиметр В7-58 |
|  |  | *f* ≈ 1 кГц.  *k*a = 1,41  *k*ф = 1,11 |  |

Многофункциональный цифровой прибор (мультиметр) В7-58 позволяет измерять несколько электрических величин (токи, напряжения и сопротивление), шкала проградуирована в СКЗ синусоидального напряжения – также, как и в первом случае.

Примечание – Обратите внимание на усложнённую графему использованного вольтметра, которая помимо символа V (вольтметр) и ~ (переменное напряжение), даёт информацию о двух наиболее важных особенностях этого вольтметра. Графема содержит обозначение применённого способа нормирования класса точности – символ относительной погрешности с/d, а также типа реализованного детектора: детектор среднеквадратического значения (СКЗ). Использованный тип детектора позволяет измерять как синусоидальные напряжения, так и полигармонические.

Таблица 1.2 – Актуальные характеристики из технического описания (ТО) мультиметра

|  |  |
| --- | --- |
| Измеряемые величины | *U, u, I, i, R* |
| Измеряемое напряжение переменного тока | СКЗ *гармонического* и *полигармонического* напряжения |
| Пределы измерений, *U*к | 200 мВ; 2, 20, 200 и 600 В |
| Класс точности во всём диапазоне рабочих температур и частот, c/d | 0,6/0,1 |
| Длина шкалы | 2000 |
| Единица младшего разряда (на использованном пределе 20 В), *q* | 10 мВ |
| Диапазон нормальных значений частот, ∆*F*норм | не указан |
| Диапазон рабочих значений частот, ∆*F*раб | 20…105 Гц |
| Диапазон нормальных значений температур, ∆Θнорм | (20±2) °С |
| Диапазон рабочих значений температур, ∆Θраб | +5…+40 °С |
| Температурный коэффициент (влияния) *k*Θ | (0,5·∆о.п/10) |
| Значение сопротивление *RV* | 10 МОм ±10% |
| Значение ёмкости *CV*, макс, пФ | не указан |

**О проведённом эксперименте известно:**

- выбран предел измерений *U*к = 20 В {максимально близок к отсчитанному по дисплею значению};

- отсчитанное по дисплею значение:*U*отс*=* 09,10 В

{следует обратить внимание, что старший разряд отображённого результата незначащий – ноль, что свидетельствует о сниженной точности измерения. Об этом же свидетельствует и факт измерения в середине шкалы};

- температура окружающей среды Θср = +27 °С {измерено с помощью термометра}.

* + 1. **Расчёт предельного значения *основной* *составляющей* погрешности результата измерения** ∆о.п**.**

Предельное значение основной относительной погрешности δо.п рассчитывается на основании известного класса точности:

δо.п.= [*с*+*d*( - 1] % = [0,6+0,1·( – 1)] = [0,6+0,1·(– 1)] = [0,6+0,1·(2,198 – 1)] =

= [0,6+0,120] = 0,72 % , где c/d – заявленный класс точности

Значение предельной основной погрешности рассчитаем по известной формуле:

∆о.п = δо.п.·*U* / 100 = 0,72×9,10 / 100 = 0,0655 В (1.8)

* + 1. Предельное значение температурной погрешности рассчитываем по выражению:

∆Θ.п = ∆Θмакс× *k*Θ = 5×0,5·∆оп / 10 = 5 °С×0,5·0,0655 В / 10 °С = 0,0164 В, (1.9)

где: ∆Θмакс =|Θнорм.макс - Θср.| = |(20+2) – 27| = 5 °С;

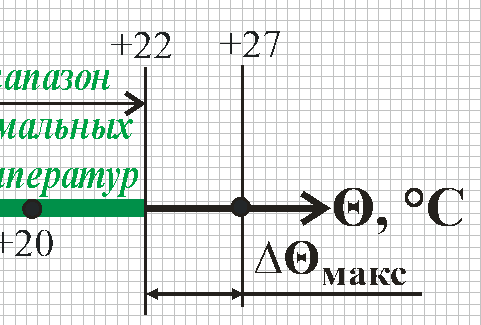


Рисунок 1.6

**1.2.3 Расчёт предельного значения *частотной составляющей погрешности* ∆*f*.п.**

В документации на мультиметр расширенный диапазон частот не указан, следовательно: **∆***f*.п.= 0 (1.10)

* + 1. **Расчёт погрешности, допускаемой субъектом (погрешность *отсчитывания*)**

Эта составляющая погрешности отсутствует, т.к. прибор цифровой и ошибки при считывания результата не возникает:

∆отс.п = 0 (1.11)

* + 1. **Расчёт погрешности, обусловленной взаимодействием объекта с прибором (инструментом)**

На этом этапе необходимо рассчитать: **Δ**вз.п, **Δ**вз.сим.п, поправку к измеренному значению η и исправленное значение результата *U*испр.

Уточним схему эксперимента (см. рис. ниже). Используем в расчёте известные из ТО два входных параметра вольтметра *RV* и *CV*:

|  |  |
| --- | --- |
| Уточнённая схема эксперимента | Восстановим актуальные сведения: |
| Рисунок 1.4 (повтор) | - сопротивление *RV*= 10 МОм±10%;  - входная ёмкость *CV* ≤ 50 пФ\* (типовое значение)  Примечание – В ТО не указано, но физически оно есть – оцениваем типовым значением |

Проведены дополнительные измерения:

- сопротивление источника сигнала *R*вых≈5 кОм;

- частота исследуемого напряжения *f*с ≈ 1 кГц.

**Решение.**

Рассчитаем предельное значение погрешности взаимодействия:

Δвз.п ≈ - *U* (+ 0,5*·*ω2

= - 9,1 (

Последующие расчёты, проведённые аналогично разделу 1.1.5, дают нам следующие результаты:

- предельное значение **отсимметрированной** погрешности взаимодействия:

Δвз.сим.п. = ± |Δвз.п/2| = |0,0041 / 2| = ± 0,0021 В (1.12)

- поправка к измеренному значению: η=0,0021 В

- *измеренное значение* с учётом поправки:

*U*испр = *U*отс+η = 9,10 В+ 0,021 В ≈ 9,121 В (1.13)

* + 1. Подведём итог, просуммировав рассчитанные значения составляющих погрешности (пронумерованы):

***U=*** (*U*испр ± Σ∆) =

[9,121 ± (0,0655 + 0,0164+0 + 0+0,0021)] В **≈(9,121 ± 0,084) В; *Р*=1** (1.14)

Заметим: погрешность округлена до двух значащих разрядов

**Точность результата = δп=100⋅0,084/9,121=±0,92%**

* 1. **Пример измерения с помощью зарубежного цифрового мультиметра   
     Victor 205. Прибор применяется в лабораторном цикле (ЛР№1)**

Расчёты проводятся аналогично разделу 1.1.

Исходные данные:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| схема эксперимента | форма *uвых(t)* – синусоидальная: | | мультиметр Victor 205 |
|  |  | *f* ≈ 1 кГц  *k*a=1,41  *k*ф=1,11 |  |

Многофункциональный цифровой прибор (мультиметр) Victor 205 позволяет измерять несколько электрических величин (токи, напряжения, сопротивление, ёмкость, частота), шкала проградуирована в СКЗ синусоидального напряжения – также, как и у других вольтметров/мультиметров.

Примечание – Обратите внимание на усложнённую графему использованного вольтметра, которая помимо символа V (вольтметр) и ~ (переменное напряжение), даёт информацию о двух наиболее важных особенностях этого вольтметра. Графема содержит обозначение применённого способа нормирования класса точности – символ относительной погрешности δ//n, а также типа реализованного детектора: детектор среднеквадратического значения (СКЗ). Использованный тип детектора позволяет измерять как синусоидальные напряжения, так и полигармонические.

Таблица 1.3 – Актуальные характеристики из технического описания (ТО) мультиметра

|  |  |
| --- | --- |
| Измеряемые величины | *U, u, I, i, R, С, f* |
| Измеряемое напряжение переменного тока | СКЗ гармонического или *полигармонического* напряжения |
| Пределы измерений, *U*к | 2, **200**, 600 В |
| Класс точности на выбранном пределе, δ//*n* | 0,8 // 5 |
| Диапазон рабочий значений частот, ∆*F*раб. | 40…1000 Гц |
| Диапазон нормальных значений температур ∆Θнорм. | (23±5) °С |
| Диапазон рабочих значений температур, ∆Θраб, | 0…+40 °С |
| Температурный коэффициент (влияния), *k*Θ, В/°С | не указан |
| Значение входного сопротивления *RV* | 10 МОм |
| Значение входной ёмкости *CV*, макс | не указано |

О проведённом эксперименте известно:

- выбран предел измерений *U*к = 200 В {максимально близок к отсчитанному значению};

- отсчитанное значение *U*отс*=* 009,1 В {следует обратить внимание, что два старших разряда отсчитанного значения незначащие – нули, что свидетельствует о низкой точности измерения. Об этом же свидетельствует и факт измерения в начале шкалы};

- температура окружающей среды Θср = +27 °С {измерено с помощью термометра}.

Примечания – Графему «0,8//5» мы применили как краткую запись метрологической характеристики прибора, стилизованную под советские стандарты.

* + 1. **Расчёт предельного значения *основной* *составляющей* погрешности результата измерения** ∆о.п**.**

Предельное значение основной относительной погрешности δо.п рассчитывается на основании известного класса точности:

∆о.п = δо.п. + *n·q* = (0,8 9,1 / 100) + 5×0,1 = 0,0728 + 0,50 ≈ 0,573 В

Прибор цифровой, зарубежный, точностная характеристика, указанная в таблице символически 0,8//5, в оригинальной технической документации выглядит так: *0,8 % of reading + 5 counts ofleast significant digit*. Используется и более краткая запись: 0,8% *R*+5*d*. Или ещё более кратко: 0,8%+5. В переводе это означает: 0,8% от считанного с дисплея значения+5 единиц младшего разряда (*q*, квантов). При расчётах эти сведения необходимо использовать так: ∆о.п= ± (∆о.п.1+∆о.п.2) = ± (0,8 + *5·q*).

* + 1. Предельное значение температурной погрешности рассчитываем по выражению:

∆Θ.п = ∆Θмакс× *k*Θ = 0 (1.15)

∆Θ.п= 0 т.к. температура среды, измеренная термометром, не превысила нормальные значения: 27 °С ∈ (23±5) °С.

**1.3.3 Расчёт предельного значения *частотной составляющей погрешности* ∆*f*.п.**

В документации на мультиметр расширенный диапазон частот ни в каком виде не указан, следовательно **∆***f*.п.=0 В (1.16)

**1.3.4 Расчёт погрешности, допускаемой субъектом (погрешность *отсчитывания*)**

Эта составляющая погрешности отсутствует, т.к. прибор цифровой и ошибки при отсчитывания результата не возникает:

∆отс.п = 0 В (1.17)

**1.3.5 Расчёт погрешности, обусловленной взаимодействием объекта с прибором**

В этом разделе необходимо рассчитать: **Δ**вз.п, **Δ**вз.сим.п, поправку к измеренному значению η и исправленное значение результата *U*испр.

Расчёт будем проводить аналогично разделу 1.1.5.

|  |  |
| --- | --- |
| Уточнённая схема эксперимента | Восстановим актуальные сведения: |
| Рисунок 1.4 (повтор) | - значение сопротивления *RV*≈10 МОм;  - значение ёмкости *CV* ≤ 50 пФ\* (тип. значение)  Примечание – В ТО не указано, но физически оно есть – оцениваем типовым значением |

Проведено дополнительное измерение:

- сопротивление источника сигнала *R*вых ≈ 5 кОм;

**Решение**.

Предельное значение погрешности взаимодействия:

Δвз.макс ≈ – *U* (+ 0,5*·*ω2

= - 9,1 (

Дальнейшие расчёты, дают нам следующие результаты:

- предельное значение **отсимметрированной** погрешности взаимодействия:

Δвз.сим.п. = ± |Δвз.п/2| = |0,046 / 2| = ± 0,023 В (1.18)

- поправка к измеренному значению: η=0,023 В

- *измеренное значение* с учётом поправки:

*U*испр = *U*+η = 9,1 В+ 0,023 В ≈ 9,12 В (1.19)

**1.3.6** Подведём итог, просуммировав рассчитанные значения составляющих погрешности (пронумерованы):

***U=*** (*U*испр ± Σ∆) = [9,12 ± (0,573 + 0 + 0+0,0023)] В ≈(**9,12 ± 0,58) В; *Р*=1** (1.20)

погрешность округлена до двух значащих разрядов

**Точность результата = δп = 100⋅0,58/9,12 = ±6,4 %**

**Заключение**

1. В таблице ниже отображены основные результаты проведённых расчётов. Наиболее точно напряжение измерено с помощью мультиметра В7-58/2 (±0,70 %). Такой результат можно объяснить двумя причинами:

- высоким классом точности;

- фактом измерения в середине шкалы прибора\*.

Примечание – В конце шкалы она будет ещё выше

Этот мультиметр имеет и другие важные преимущества: высокая точность реализуется в широком диапазоне частот (до 100 кГц) и мультиметр относиться к классу *True RMS*, что позволяет его применять, в том числе и для измерений полигармонических напряжений (тема 2).

Недостаток – относительно высокая цена (22 000 рублей).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Использованные *AC*-измерители | В3-38 | В7-58/2 | Victor 205 |
| 1 | Класс точности | 4,0 | 0,6/1 | 0,8//5 |
| 2 | *U*к, В | 10 | 20 | 200 |
| 3 | *U*отс, В | 9,1  конец шкалы | 09,100  середина шкалы | 009,10  начало шкалы |
| 4 | *U*отс+ η, В | 9,11 | 9,12 | 9,12 |
| 6 | ∆отс.п, В | 0,025 | 0 | 0 |
| 7 | ∆м.п.=∆вз.сим.п + ∆*f*.п, В | 0,0055+0 | 0,0021+0 | 0,023+0 |
| 8 | ∆п, В | 0,63 | 0,084 | 0,58 |
| 9 | Точность результата δп, % | **±6,91** | **±0,92** | **±6,4** |

2. Мультиметр Victor 205 – неудачный выбор\* для измерения переменных напряжений, т.к. имеет всего три мало востребованных предела измерений: 2, 200 и 600 В. Именно этот факт привёл к существенному снижению точности, т.к. измерение было вынуждено осуществлено в начале диапазона измерения. Частотный диапазон мультиметра также сравнительно узкий (40 Гц…1 кГц).

Преимуществами можно считать:

- невысокая цена (≈1000 руб.);

- способность измерять СКЗ ПГН (*True RMS*);

- наличие функции измерения частоты. Она всегда востребована при измерении переменных напряжений.

Примечания

1 В качестве замены для этого ММ можно приобрести за ***бо***льшие деньги другие изделия этого производителя: **VC9808+, VC97 (*http://victor-multimeter.com*).** Это приборы, которые имеют больше пределов измерений, позволяют измерять ПГН, частоту сигнала, эл. сопротивление и др.

2 В «безвыходном» положении, когда под рукой нет более точного измерителя, можно воспользоваться косвенным методом измерения. Для этого необходимо переключить прибор на более чувствительный предел – в нашем случае 2 В – и включить между объектом и ММ делитель напряжения из резисторов, сопротивление которых можно измерить тем же самым ММ.

3. Точность результата, полученного с помощью аналогового милливольтметра В3-38, соизмерима с низкой реализованной точностью мультиметра Victor 205, но причина здесь другая – низкий класс точности электронного прибора (4,0). Она могла бы быть и значительно хуже, но удалось провести измерение в конце выбранного диапазона. Этому способствовало наличие большого числа (12) пределов измерений. Вывод: низкий класс точности в некоторых случаях может быть компенсирован большим числом пределов измерений.

**справочный раздел**

Задача: требуется рассчитать погрешность результата прямого измерения

**∆**≈∆о.+∆Θ. +∆f.+∆отс.+∆вз.сим.+∆ф.. где символически обозначены погрешности:

***- основная***, ∆о. Нормируется для **нормальных условий** эксплуатации прибора.

***- дополнительная температурная***, ∆Θ. Нормируется для температурных условий, отличающихся от нормальных

- ***другие дополнительные****\**. В расчётах не рассматриваются.

***- частотная***, ∆*f.* Нормируется для частот, отличных от нормальных.

***- отсчитывания***, ∆отс. Нормируется для ситуаций, когда стрелка прибора устанавливается между делениями аналоговой шкалы.

**- *взаимодействия***, ∆вз. Возникает всегда, когда выходной импеданс объекта Zвых≠ 0.

- ***погрешности от формы сигнала***, ∆ф.. Могут возникать при измерении полигармонических напряжений. Рассматриваются в теме 2.

Примечание - Дополнительные погрешности возникают в приборе под воздействием влияющих величин – параметров окружающей среды: температура, влажность, атмосферное давление, электромагнитные и гравитационные поля …

Используемый метод расчёта – *метод наихудшего случая* (МНС):

**∆п**≈∆о.п+∆Θ.п. +∆f.п+∆отс.п+∆вз.сим.п+∆ф.п.

**1 Варианты расчёта основной составляющей погрешности результата**

Задача: по известным характеристикам прибора требуется рассчитать **∆о.п.**

Эта погрешность рассчитывается по классу точности прибора для измерений, проведённых в *нормальных условиях*:

- форма сигнала синусоидальная;

- частота сигнала должна принадлежать *диапазону нормальных частот\** прибора   
*f* ⊂ ∆*F*норм;

Примечание – Если он указан

- температура окружающей среды должна принадлежать диапазону нормальных температур Θср. ⊂ ∆Θнорм;

- для аналоговых приборов – указатель отсчётного устройства должен располагаться на одном из оцифрованных делений.

**1.1 В измерениях использован аналоговый прибор**

Из ТО\* прибора выясняется его *класс точности* и производится расчёт*.*

Примечание – Класс точности у аналоговых приборов указан также на их лицевой панели (циферблате).

Пример. Пусть *класс точности* равен [0,5]. Это означает: *предельное значение основной приведённой погрешности* γо.п=0**,5** %, где по определению γо.п.= 100 ∆о.п./*U*нор= 100 ∆о.п/*U*к.

По известному классу точности рассчитаем требуемое ∆о.п.=[кл.т.]⋅*U*к/100%. (С1.1)

**1.2 В измерениях использован цифровой прибор советского производства**

В ТО такого прибора класс точности задаётся в формате  *с*/*d*, например: **1,0**/**0,5**. Это означает, что *предельное значение основной относительной погрешности* равно

δо.п = ±[**1,0**+**0,5** ( – 1)], %. (С1.2)

где *U*отс – значение, отсчитанное по дисплею прибора

Тогда требуемое ∆о.п.= δо.п *U*отс. (С1.3)

**1.3 В измерениях использован цифровой прибор зарубежного производства (или современный отечественный)**

**Вариант 1.3а.**

Метрологическая характеристика в ТО обычно задаётся не для прибора в целом, а для выбранного диапазона (предела) этого прибора и выглядит, к примеру, так:

***0,8******% of reading* (показание) *+ 5 counts ofleast significant digit* (цифра)**.

Используется и более краткая запись: 0,8% *R*+5*d*. Или ещё более кратко, например, в таблицах: 0,8%+5. В переводе это означает: «0,8% от считанного с дисплея значения + 5 единиц младшего разряда (*q*, квантов)».

При расчётах эти сведения необходимо использовать так:

∆о.п= ± (∆о.п.1+∆о.п.2) = ± (0,8 + *5·q*) (С1.4)

Примечание – В дальнейшем класс точности в аналогичном случае будем обозначать форматом δ//*n,* например: 0**,8**//**5**.

**Вариант 1.3б.**

В некоторых ТО рассмотренная метрологическая характеристика представляется в модифицированном виде, например, 1,2%+1,0 V. Здесь второе слагаемое уже подсчитано и представлено в единицах напряжения:

∆о.п= ± (∆о.п.1+∆о.п.2) = ± (1,2 + 1,0) (С1.5)

Если возникает необходимость в более короткой записи, то её будем представлять в формате δ//*V,* например,1,2//+1.

**Вариант 1.4 В измерениях использован высокоточный зарубежный цифровой прибор**

При нормировании высокоточных приборов в некоторых зарубежных ТО метрологическая характеристика представляется, к примеру, в таком виде:

**0,02% *of reading* (показание) *+* 0,01% *of range* (предел)*.*** Или короче:**0,02 %+0,01 %.**

Расчёт в этом случае проводится в соответствии с представленной формулой:

∆о.п. =0,02**·***U*отс/100+ 0,01 *U*к/100 (С1.6)

Примечание – Класс точности в аналогичном случае будем обозначать форматом δ///γ, где γ – символ *приведённой погрешности*

**1.5 В измерениях использован цифровой прибор со сложным нормированием метрологических характеристик**

Метрологические характеристики современных приборов могут нормироваться более сложно. Обычно такая процедура предусмотрена для относительно дорогих приборов.

Общим основанием для такого нормирования является желание производителей, расширить частотный диапазон вольтметра и ввести индивидуальные метрологические нормы на назначаемых частотных участках – **поддиапазонах**.

Известны два способа нормирования погрешностей с учётом частотного влияния.

**Вариант 1.5а (*типовой).* Такой вариант используется достаточно часто.**

В качестве примера приведём характеристики отечественного мультиметра В7-86 (табл. С1).

Таблица детализирует метрологические характеристики мультиметра в зависимости от выбранного предела и частотного поддиапазона.

Для расчёта основной погрешности необходимо помимо отсчитанного по шкале напряжения *U*отс знать частоту измеренного напряжения *f*.

**Таблица С1** – Метрологические характеристики мультиметра В7-86

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Частотные поддиапазоны | Пределы измерений | | | | |
| 200 мВ | 2 В | 20 В | 200 В | 750 В |
| 20 Гц…1 кГц | 0,5%+0,5 мВ | 0,3%+2 мВ | 0,3%+10 мВ | 0,4%+100 мВ | 0,5%+1000 мВ |
| >1 кГц…10 кГц | 1,0%+1 мВ | 0,6%+5 мВ | 0,6%+20 мВ | 1,8%+200 мВ | 1,0%+1000 мВ |
| >10 кГц…20 кГц | 1,0%+1 мВ | 0,6%+5 мВ | 0,6%+20 мВ | 1,8%+200 мВ | 2,5%+1000 мВ |
| >20 кГц… 100 кГц | 2,0%+2 мВ | 1,5%+20 мВ | 1,5%+200 мВ | 2,5%+200 мВ | - |

Пример расчёта. Имеем: *U*отс =99,00 мВ, *f*≈0,5 кГц:

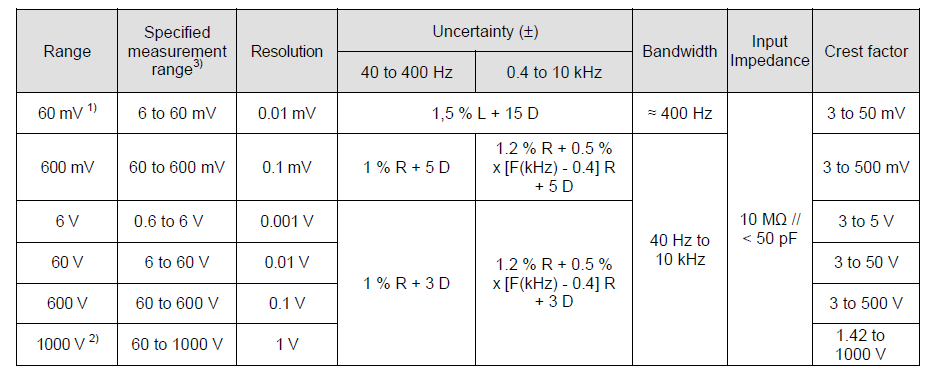
∆о.п.= 0,5⋅*U*отс/100 + 0,5 мВ = 0,5⋅99/100 + 0,5 мВ = 0,495+0,5 = 0,995≈1,0 мВ

**Вариант 1.5б (*французский*)*.* Этот способ нормирования встречается в ТО на французские приборы.**

В качестве примера приведём характеристики мультиметра *Chauvin Arnoux* С.А. 5277 (Франция).

Метрологические характеристики представлены в оригинальной табл. C2.

**Таблица С2**



Столбец «*Uncertainty»* (неопределённость, в нашем случае – погрешность ) разбит на два – каждый вмещает характеристики своего частотного диапазона. В левом столбце указаны метрологические нормы рассмотренным выше способом (см. раздел 1.3), а в правом содержаться более сложные выражения. Разберём для примера вторую строку таблицы:

- диапазон измерений – 60…600 мВ;

- чувствительность (*resolution*; ЕМР) – 100 мкВ;

- для сигналов с частотами 40…400 Гц *неопределённость* (*предельное значение основной погрешности*) указана в формате δ//*n* – 1,5% *R* + 15 *D*;

*-* для сигналов с частотами >0,4…10 кГц *неопределённость* (*предельное значение основной погрешности*) указана в «изощрённом» формате δ(*f*)//*n*:

2%·*R*+0,5 [*f* -0,4]%·*R* +5*D*, где *f* ≥5 и выражена в кГц (С1.7)

**2 Варианты расчёта дополнительной температурной составляющей погрешности результата**

Задача: требуется рассчитать погрешность ∆Θ.п.

Исходная формула для расчёта: ∆Θ.п.= *k*Θ×∆Θмакс, где: (С1.8)

***k*Θ – *температурный коэффициент влияния*** на показание вольтметра. Берётся из ТО;

Примечание – Если в ТО коэффициент *k*Θ не указан, то для расчётов следует использовать типовое значение *k*Θ=∆о.п./10 °С

**∆Θмакс – максимальное отклонение температуры** среды от ближайшего нормального значения температуры, которое может возникнуть во время эксперимента. Рассчитывается в соответствии с графикой, представленной на рисунках 1 и 2.

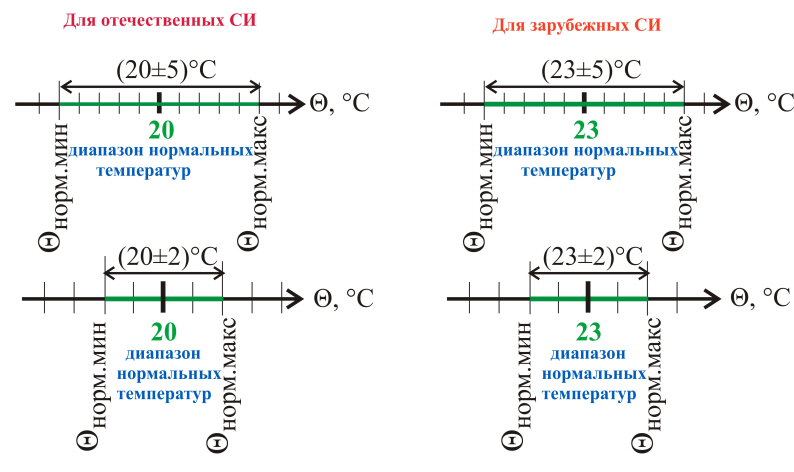


Рисунок 1.1 – Графическое описание диапазона нормальных температур

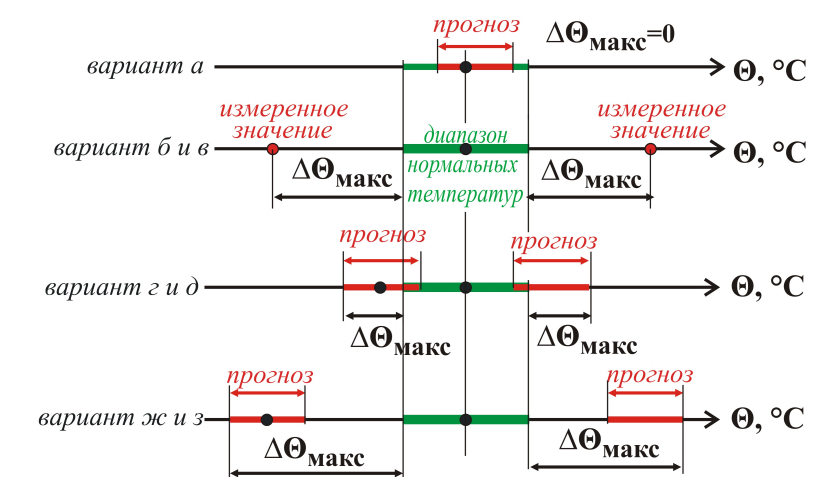


Рисунок 1.2 – Расчёт максимального отклонения температуры

Варианты нормирования температурного коэффициента *k*Θ.

**Вариант 2а. Отечественный**

*k*Θ=*k*⋅∆о.п./10°С где *k* =0,5; 1; 1,5; 2; 3…

**Вариант 2б. Зарубежный, типовой**

Типовая запись в ТО выглядит так:

*Temperature coefficient 0.1×(spec. accuracy)/°C (0° to 18 and 28° to 50°C) all functions and ranges except for VAC*

В переводе на русский-технический это буквально означает, что *k*Θ определён за пределами диапазона нормальных температур и равен ∆о.п./10 °С.

**Вариант 2в. Зарубежный, французские приборы**

Запись в ТО: *Temperature coefficient (0.15 %+0.1 D) / 1°C.*

Выражение в числителе пересчитывается в ∆о.п. рассмотренным в (С1.4) способом.

**3 Варианты расчёта частотной составляющей погрешности результата**

Задача: требуется рассчитать погрешность ∆f.п.

Примечание – В вариантах 1.5а и 1.5б были рассмотрены ситуации, когда частотная погрешность учитывалась в основном метрологическом выражении

Частотная погрешность учитывается (∆f.п.≠0) только в том случае, если производитель указывает в ТО расширенные частотные области (рис. 1.3). В противном случае прибору назначается только диапазон рабочих значений частот и ∆f.п.=0



∆*F*раб = *f*1…*f*4; ∆*F*норм = *f*2…*f*3; ∆*F*расш.н= *f*1…*f*2; ∆*F*расш.в. = *f*3…*f*4

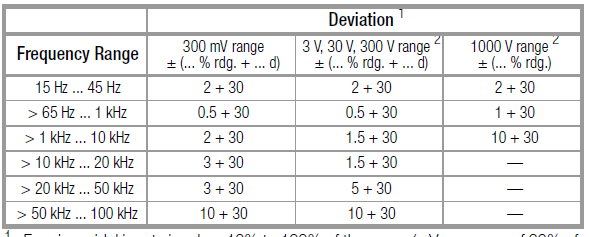
Рисунок 1.3 – Частотные диапазоны вольтметров

Известны два способа нормирования частотной погрешности: отечественный и немецкий.

**Вариант 3.1** В отечественной практике для сигнала с частотой f ⊂ ∆*F*расш частотная погрешность ∆f.п.= ∆о.п..

**Вариант 3.2а.**

В качестве примера приведём частотные характеристики ЦММ от производителя *Gossen Metrawatt* типа *Metrahit IM Ixtra* (ФРГ) в виде оригинальной таблицы.



Из таблицы следует, что:

- *диапазон нормальных значений* частот >45…65 Гц;

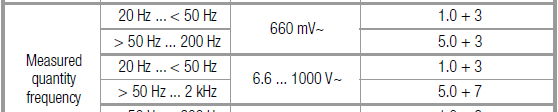
- частотные погрешности зависят, во-первых, от выбранного предела измерения. См. три столбца: 300 мВ, 3/30/300 В или 1000 В;

- частотные погрешности зависят, во-вторых, от области расширения частотного диапазона: ∆*F*расш.1 (15…45 Гц), …, ∆*F*расш.6.(>50 …100 кГц).

В ячейках таблицы указана информация о частотной погрешности в формате δ//n. Применив (С1.4) к выбранному из ячейки значению, получим значение ∆f.п.

**Вариант 3.2б.**

В качестве примера приведём частотные характеристики ЦММ от производителя *Gossen Metrawatt* типа *Metraline* DM61/62 (ФРГ) в виде оригинальной таблицы.



Из таблицы следует, что:

- для ЦММ вместо диапазона нормальных частот назначена **только одна** нормальная частота 50 Гц;

- частотные погрешности зависят, во-первых, от выбранного предела измерения: 600 мВ или все остальные;

- частотные погрешности зависят, во-вторых, от области расширения частотного диапазона ∆*F*расш.н (20 Гц…<50 Гц) или ∆*F*расш.в.(>50 Гц…200 Гц/2000 Гц).

В крайнем правом столбце указана информация о частотной погрешности в формате δ//n. Применив (С1.4), получим значение ∆f.п.

**4 Варианты расчёта погрешности отсчитывания результата**

Задача: требуется рассчитать погрешность ∆отс.п.

*Погрешность отсчитывания* Δотс. допускает субъект во время отсчитывания результата по аналоговой шкале. Она возникает всегда, когда стрелка прибора устанавливается между делениями и необходимо получить промежуточное значение.

Поясним процедуру оценки Δотс. на графическом примере.

На рис. 1.4 в сильно увеличенном виде показано одно деление шкалы, т.е. расстояние между соседними метками на шкале. Стрелка прибора установилась между метками.

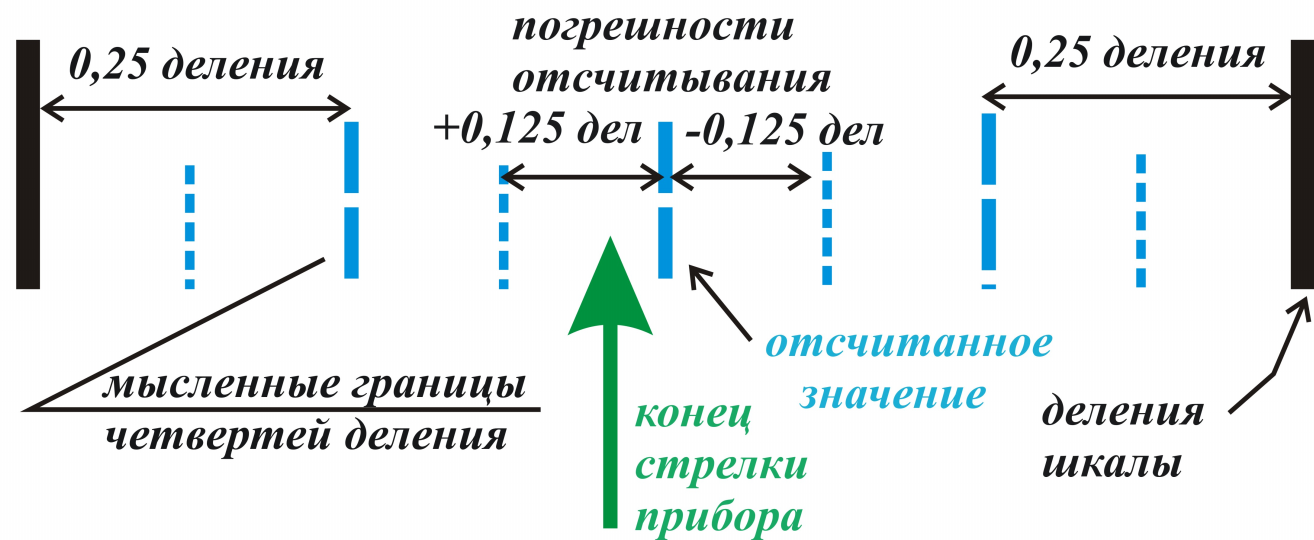


Рисунок 1.4 – Иллюстрация процедуры считывания результата измерения по аналоговой шкале

Субъект должен рассчитать промежуточное значение. Делается это следующим образом.

Мысленно пространственный интервал между делениями делим на четыре равные части. В этом случае результат измерения можно будет отсчитать с округлением до четверти деления. Возможные варианты значений: +0,25⋅*q*, +0,50⋅*q* или +0,75⋅*q*. Где *q* – *цена деления шкалы (квант)*.

При этом – см. рисунок – *предельное значение погрешности округления* **не превышает** Δотс,п = ± 0,125×*q*. Например, если *q* = 1,0 В/дел, то погрешность отсчитывания   
Δотс,п = ± 0,125 дел×1,0 В/дел **=** ± 0,125 В…

Примечания

1 Использование на шкале зеркального отражателя позволяет минимизировать погрешность отсчитывания: ∆отс=∆пар+∆окр≈∆окр. Где ∆пар – погрешность параллакса

1. В том случае, если стрелка остановилась точно на делении, будем считать ∆отс.п=0.

**5 Варианты расчёта погрешности взаимодействия результата**

Задача: требуется рассчитать погрешность ∆вз.п.

При измерении напряжений мы часто забываем, что источник сигнала имеет конечное значение выходного сопротивления.

На рис. 1.5 показано, что этот факт приводит к возникновению погрешности ∆вз в измерениях: мы измеряем не электродвижущую силу *E*, а напряжение *U*, возникающее между точками контроля в момент подключения вольтметра *V*. На рис. 1.5а представлены пояснительная графика и расчётная формулы для Δвз при измерениях напряжений постоянного тока, а на рис. 1.5б – при измерениях напряжений переменного тока.

Следует обратить внимание, что значение Δвз всегда **отрицательно**. Это отличает её от других составляющих погрешности измерений и требует особого к себе отношения.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| а) | б) | *U* и *E* – *среднеквадратические значения* синусоидального напряжения;  *СV* – входная (паразитная) ёмкость вольтметра, включённая параллельно *RV* |
| **δвз.= -**  100  **Δвз.**≈ - *U* () | **Δвз.**≈ - *U* (+ 0,5*·*ω2 | |

Рисунок 1.5 – Расчётная графика для погрешностей взаимодействия

Воспользуемся наименее сложным из представленных выражений **δвз.= -**  и проведём **оценочный** расчёт погрешности. Пусть *R*вых=100 кОм, а *RV*=1000 кОм. Тогда имеем δвз. = -10%. Это очень плохой результат! Вполне возможно, что инструментальная погрешность будет существенно ниже, и наши затраты на приобретение высокоточного прибора оказались напрасными. При этом использованное значение*RV* следует считать типовым, а значение *R*вых≥100 кОм – уже не редкость для современных электронных схем, которые создаются под требование малого собственного потребления…

*Погрешность взаимодействия* можно *симметрировать* и, сделав это, – использовать в расчётах наравне с остальными погрешностями: Δвз.сим.п. = ± |Δвз.п / 2|.

При этом в *отсчитанное значение* результата *U*отс необходимо ввести (добавить) поправку η, численно равную η = |Δвз.сим.п.|: *U*испр. = *U*отс+ η.

Типовое выражение для расчёта значения *погрешности взаимодействия* вольтметра **∆**вз на синусоидальном сигнале имеет следующий вид:

Δвз.≈ -*U*(δвз.а+δвз.р) = -*U* (+ 0,5*·*ω2, (Б1.1)

где δвз.а и δвз.р – соответственно *активная* и *реактивная* составляющие погрешности взаимодействия

Примечание – В том случае, если в паспортных данных на прибор входная ёмкость не указана, то для расчётов предлагается использовать типовое значение *CV*=50 пФ.

Добавление (07.09.21).

Входное сопротивление многодиапазонного аналогового вольтметра.

[отрывок из конспекта лекции]

«В отличие от амперметров вольтметры должны иметь большое входное сопротивление для снижения погрешности взаимодействия с объектом измерения. Входное сопротивление в магнитоэлектрического измерительного механизма (МЭИМ) обусловлено сопротивлением провода подвижной (измерительной) катушки. Оно мал***о*** (несколько сотен **ом**) и чтобы его увеличить, последовательно включают *добавочное сопротивление* (*R*доб; рисунок 2.2).

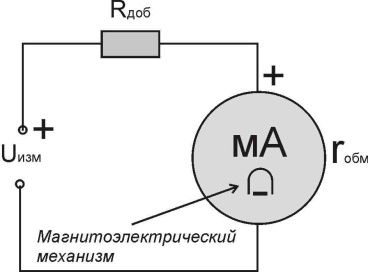


Рисунок 2.2 – Структура вольтметра постоянного тока на базе МЭИМ

Проведём расчёт значения добавочного сопротивления. Оно рассчитывается по (2.1), где *U*к – *конечное значение* диапазона измерений, а *I*по *- ток полного отклонения –* ток в *обмотке* катушки, при котором стрелка прибора установится на отметке *U*к:

|  |  |
| --- | --- |
| *R*вх = *R*доб + *r*обм = *U*к/*I*по | (2.1) |

Пусть *I*по = 100 мкА,*U*к = 100 В, тогда *R*вх=1 МОм. Значение *r*обм обычно известно из характеристик выбранного микроамперметра, тогда можно рассчитать *R*доб\*. Полученный результат нас может удовлетворить: входное сопротивление в 1 МОм достаточно хороший результат. Но посмотрим, какие значения *R*вх мы получим для м***е***ньших диапазонов измерений. Так для *U*к = 10 В из (2.1) мы имеем уже *R*вх =100 кОм, напряжению *U*к = 1 В соответствует *R*вх =10 кОм. Последний результат нас мало будет удовлетворять, но позволит ещё использовать такой вольтметр для измерений в заведомо низкоомных цепях».

В ТО многодиапазонного аналогового вольтметра *RV* либо задаётся в виде таблицы, либо рассчитывается: *RV* = *kRV*⋅*U*к, где:

*kRV*⋅– расчётный коэффициент входного сопротивления

*U*к – выбранный предел измерения