

ББК 6Ф3

И49

Рецензент канд. техн. наук, проф. Д.Н. Яманов

Илюхин А.А.

И49 Измерения в телекоммуникационных системах: пособие по проведению практических занятий. - М.: МГТУ ГА, 2015. - 32 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Измерения в телекоммуникационных системах» по Учебному плану для студентов IV курса специальности 10.05.02 (090302) очной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 26.02.15 г. и методического совета 26.03.15 г.

Подписано в печать 10.04.2015 г.

Печать офсетная

Формат 60x84/16

1,47 уч.-изд. л.

1,86 усл. печ. л.

Заказ № 1993/

Тираж 80 экз.

Московский государственный технический университет ГА

125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20

Редакционно-издательский отдел

125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

© Московский государственный
технический университет ГА, 2015

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

Кафедра основ радиотехники и защиты информации
А.А. Илюхин

**ИЗМЕРЕНИЯ
В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

ПОСОБИЕ
по проведению практических занятий

*для студентов IV курса
специальности 10.05.02 (090302)
очной формы обучения*

Москва-2015

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При подготовке к практическому занятию студенты должны:

- уяснить цель и порядок проведения практического занятия;
- изучить материалы, изложенные на лекционных занятиях и в рекомендуемой литературе.

На практическом занятии студент должен иметь данное пособие и тетрадь для решения задач.

Практическое занятие начинается с опроса студентов по знанию теоретических положений практического занятия с использованием контрольных вопросов, а также проверяется понимание решения типовых задач.

Далее студенты решают приведенные в пособии задачи с последующим обсуждением полученных результатов.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Основная литература.

1.1. Боридько С.И., Дементьев Н.В., Тихонов Б.Н., Ходжаев И.А. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах. М.: Горячая линия–Телеком, 2007.

2. Дополнительная литература.

2.1. Под ред. Нефедова В.И. Метрология и радиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 2006.

2.2. Под редакцией В.И. Нефедова. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах. М.: Высшая школа, 2001.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

Погрешности измерений

Цель занятия–закрепление теоретических знаний в области расчета систематических и случайных погрешностей.

Контрольные вопросы

1. Погрешности измерений и их классификация.
2. Систематические погрешности.
3. Методы исключения систематических погрешностей.
4. Описание и оценка случайных погрешностей.
5. Описание и оценка результатов наблюдений.

6. Правила и формы представления результатов измерений.

Задание на практическое занятие

При подготовке к занятию необходимо изучить теоретические материалы и ответить на контрольные вопросы, используя литературу [1.1], с.23-39, 48-51, [2.1] с.66-92, [2.2], с.48-65, а также уяснить методику решения типовых задач.

Примеры решения типовых задач

Задача 1. Измерение сопротивления резистора R осуществляется косвенным методом с помощью источника постоянного тока, вольтметра и амперметра, включенных по схемам, приведенным на рис. 1 (а и б).

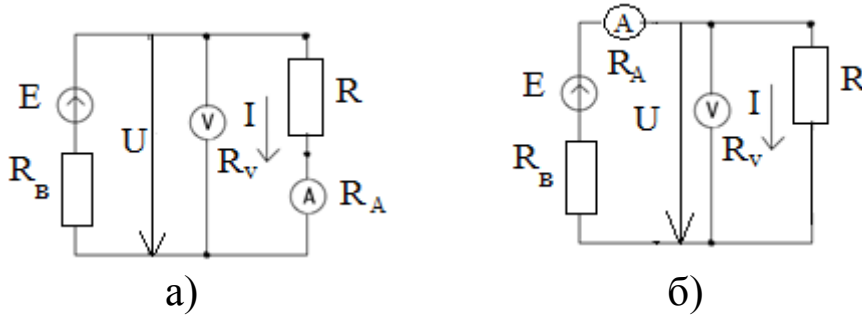


Рис. 1

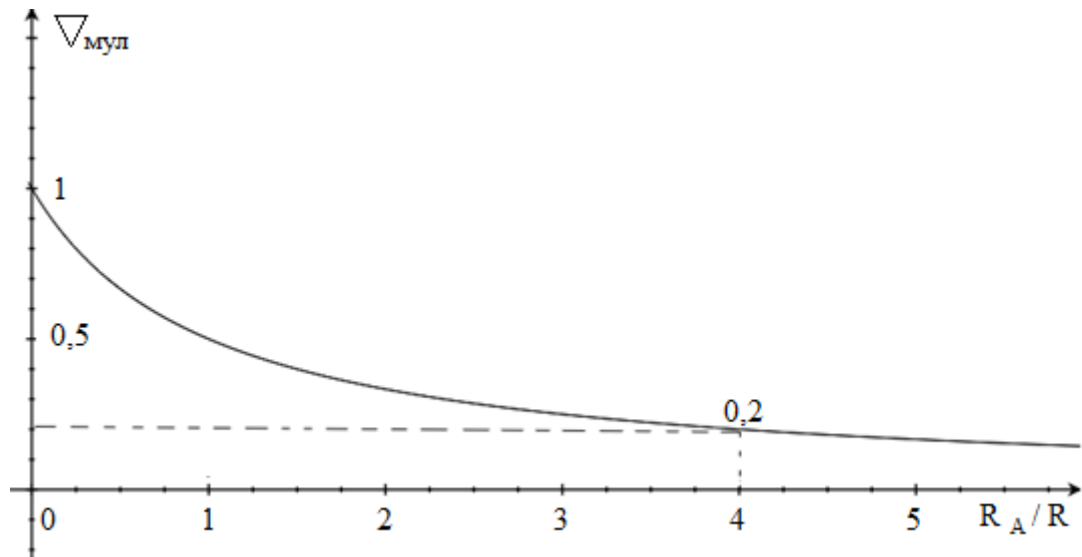
Определить систематическую погрешность измерения сопротивления и поправки при использовании схем а и б.

Решение

$$\begin{aligned} \text{а) } U &= I(R + R_A); & R_A + R &= \frac{U}{I}; & \Delta_C &= R_A - \text{систематическая} \\ & & & & & \text{погрешность;} & \nabla_{\text{ад}} &= -\Delta_C = -R_A - \text{поправка, т.е. } R = \frac{U}{I} + \nabla_{\text{ад}}; \\ R &= \frac{U}{I} \cdot \nabla_{\text{мул}} = \frac{U}{I} - R_A = \frac{U}{I} \left(1 - R_A \frac{I}{U}\right) = \frac{U}{I} \left(1 - \frac{R_A}{R_A + R}\right) = \frac{U}{I} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_A}{R}}, \\ \text{т.е. } \nabla_{\text{мул}} &= \frac{1}{1 + \frac{R_A}{R}} - \text{поправочный коэффициент.} \end{aligned}$$

Выводы: чем R_A меньше по сравнению с R , тем меньше систематическая погрешность. Схема используется для измерения при $R \gg R_A$;

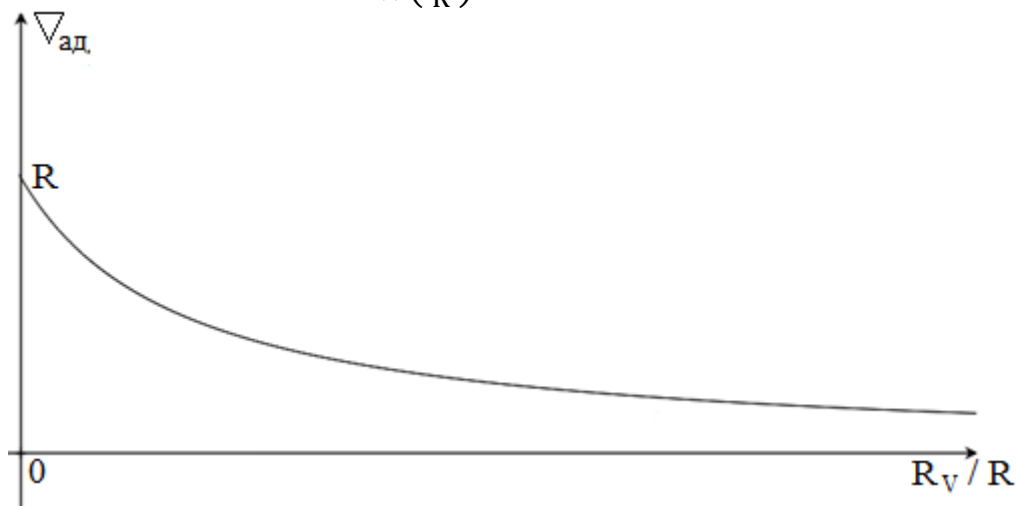
$$\text{Строим зависимость } \nabla_{\text{мул}} \left(\frac{R_A}{R} \right).$$



б) $U = I \frac{RR_V}{R+R_V} = IR - I \frac{R}{1+\frac{R_V}{R}}$; систематическая погрешность $\Delta_C = -\frac{R}{1+\frac{R_V}{R}}$;

поправка $\nabla_{ад} = -\Delta_C = \frac{R}{1+\frac{R_V}{R}}$.

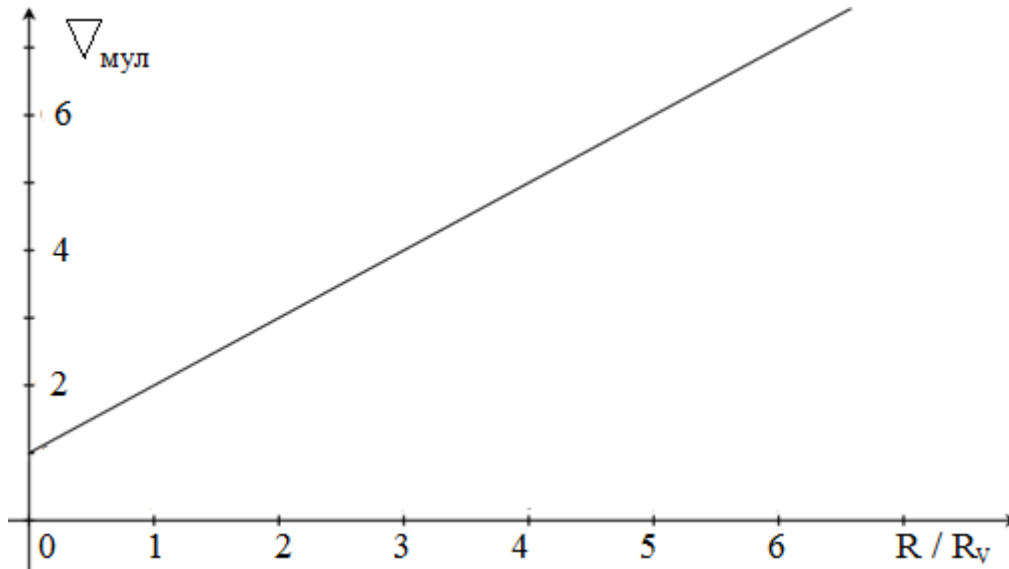
Строим зависимость $\nabla_{ад} \left(\frac{R_V}{R} \right)$.



$$\frac{U}{I} = \frac{R \cdot R_V}{R+R_V} = R \cdot \frac{R_V}{R+R_V} = \frac{R}{\nabla_{мул}}; \quad \nabla_{мул} = \frac{R+R_V}{R_V} = 1 + \frac{R}{R_V}; \quad R = \frac{U}{I} \cdot \nabla_{мул}.$$

Выводы: чем выше R_V по сравнению с R , тем меньше систематическая погрешность. Схема используется для измерения при $R \ll R_V$.

Строим зависимость $\nabla_{мул} \left(\frac{R}{R_V} \right)$.



Задача 2. Дана выборка величины \hat{X} объемом $n=25$: 2,0-восемь значений; 2,1-пять значений; 1,9-шесть значений; 1,8-два значения; 2,3-одно значение; 2,2-три значения.

Построить доверительный интервал для математического ожидания при доверительной вероятности $P_d=0,95$.

Решение

Оценка матожидания (среднее значение) измеряемой величины \hat{X} (без систематической погрешности):

$$\hat{m}_{\hat{X}} = \bar{\hat{X}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{X}_i = \frac{2,0 \cdot 8 + 2,1 \cdot 5 + 1,9 \cdot 6 + 1,8 \cdot 2 + 2,3 + 2,2 \cdot 3}{25} = 2,016.$$

Оценка среднеквадратического отклонения (СКО) измеряемой величины \hat{X} :

$$\hat{\sigma}_{\hat{X}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - \bar{\hat{X}})^2} = \sqrt{\frac{(2,0 - 2,02)^2 8 + (2,1 - 2,02)^2 5 + (1,9 - 2,02)^2 6 + (1,8 - 2,02)^2 2 + (2,3 - 2,02)^2 + (2,2 - 2,02)^2 3}{24}} = 0,1120303.$$

Оценка среднеквадратического отклонения (СКО) среднего значения измеряемой величины \hat{X} :

$$\hat{\sigma}_{\bar{\hat{X}}} = \frac{\hat{\sigma}_{\hat{X}}}{\sqrt{n}} = \frac{0,1120303}{\sqrt{24}} \approx 0,023.$$

Погрешность измерения величины \hat{X} :

$$\Delta_r = z \hat{\sigma}_{\bar{\hat{X}}},$$

где z – квантиль нормального распределения, определяемый по таблице этого распределения по доверительной вероятности P_d ($z = 1,96$),

$$\Delta_r = z \hat{\sigma}_{\bar{X}} = 1,96 \cdot 0,023 \approx 0,045.$$

Результат измерения:

$$X_{\text{ист}} = 2,016 \pm 0,045; P_d = 0,95.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. С помощью амперметра с внутренним сопротивлением R_A измерено значение тока, протекающего через резистор R , подключенный к источнику напряжения с внутренним сопротивлением R_B . Определить систематическую погрешность измерения тока, поправку и поправочный коэффициент.

Задача 2. Частота генератора, равная резонансной частоте колебательного контура, измеряется с помощью частотомера, подключенного параллельно контуру. Определить систематическую погрешность измерения частоты генератора, поправку и поправочный коэффициент, вызванные действием входной емкости частотомера.

Задача 3. Определить систематическую погрешность измерения добротности колебательного контура и поправку в аналоговом измерителе добротности.

Задача 4. Произведено пять независимых измерений величины \bar{X} (распределение результатов измерений нормальное): 3,1; 3,0; 2,8; 2,9; 3,2.

Построить доверительный интервал для математического ожидания при доверительной вероятности $P_d=0,99$.

Задача 5. Случайный радиосигнал распределен по нормальному закону. Произведено 25 измерений сигнала, по которым определено значение оценки СКО сигнала $\sigma_{\bar{U}} = 1\text{В}$. Найти погрешность измерения среднего значения сигнала, гарантированную с доверительной вероятностью $P_d=0,95$.

Задача 6. Какое минимальное количество измерений величины нужно произвести, чтобы с доверительной вероятностью $P_d=0,99$ погрешность оценки математического ожидания величины не превысила десятой доли оценки СКО измеряемой величины?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

Обработка результатов измерений

Цель занятия–закрепление теоретических знаний в области обработки результатов измерений.

Контрольные вопросы

1. Обработка результатов прямых однократных измерений.

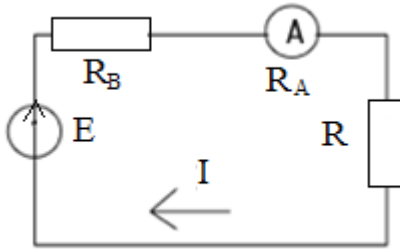
2. Обработка результатов прямых равноточных многократных измерений.
3. Обработка результатов прямых неравноточных многократных измерений.
4. Обработка результатов косвенных измерений.

Задание на практическое занятие

При подготовке к занятию необходимо изучить теоретические материалы и ответить на контрольные вопросы, используя литературу [1.1], с.48-75, [2.1] с.104-129, [2.2], с.66-84, а также уяснить методику решения типовых задач.

Примеры решения типовых задач

Задача 1. Рассчитать случайные погрешности $\dot{\Delta}_{P_{д1}}$ и $\dot{\Delta}_{P_{д2}}$ (при доверительных вероятностях $P_{д1} = 0,9$ и $P_{д2} = 0,95$) результата однократного измерения тока $I=2$ мА в приведенной схеме, если поправка $\nabla_{ад} = \frac{E}{R_B+R} \cdot \frac{1}{1+\frac{R_B+R}{R_A}}$, $E=10$ В, $R_B=1,8$ кОм; $R=3$ кОм; $R_A=200$ Ом. Распределение случайной погрешности измерений нормальное со среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_{\dot{\Delta}} = 0,09$ мА.



Решение

Определяем поправку и вносим ее в результат измерения:

$$\nabla_{ад} = \frac{10}{1,8+3} \cdot \frac{1}{1+\frac{1,8+3}{0,2}} = 0,08 \text{ мА}, \quad \dot{I} = I + \nabla_{ад} = 2 + 0,08 = 2,08 \text{ мА}.$$

Находим погрешности однократных измерений по заданным доверительным вероятностям:

$$\dot{\Delta}_{P_{д1}} = t_{P_{д1}} \sigma_{\dot{\Delta}} = 1,65 \cdot 0,09 \approx 0,15 \text{ мА}, \quad \dot{\Delta}_{P_{д2}} = t_{P_{д2}} \sigma_{\dot{\Delta}} = 1,96 \cdot 0,09 \approx 0,18 \text{ мА},$$

где $t_{P_{д1}}$, $t_{P_{д2}}$ – квантили нормального распределения соответственно для $P_{д1}$ и $P_{д2}$.

Далее записываем результаты однократных измерений при разных доверительных вероятностях:

$$\dot{I} = 2,08 \text{ мА}, \quad \dot{\Delta}_{P_{д1}} = \pm 0,15 \text{ мА}, \quad P_{д1} = 0,9;$$

$$\dot{I} = 2,08 \text{ мА}, \quad \dot{\Delta}_{P_{д2}} = \pm 0,18 \text{ мА}, \quad P_{д2} = 0,95;$$

$$I_{ист} = 2,08 \pm 0,15 \text{ мА}; \quad P_{д1} = 0,9;$$

$$I_{ист} = 2,08 \pm 0,18 \text{ мА}; \quad P_{д2} = 0,95.$$

Задача 2. Измерения образцовой меры длины, выполненные приборами разной точности, дали следующие результаты:

№ измерения	Отклонения от номинального размера, мкм			
	Вертикальный оптиметр. Измеритель №1	Машина типа Цейсс. Измеритель №2	Машина типа СИП. Измеритель №3	Миниметр. Измеритель №4.
1	11,3	10,8	9,8	10,4
2	10,7	11,1	10,7	11,2
3	11,2	10,9	10,3	10,1
4	10,9	11,0	10,9	9,9

Известно, что результаты измерений вертикальным оптиметром подчиняются нормальному закону распределения вероятности с СКО 0,4 мкм, при измерениях машиной типа Цейсс – соответственно 0,8 мкм, машиной типа СИП – 0,7 мкм, миниметром с ценой деления 1 мкм – 0,5 мкм.

Найти доверительный интервал для результата измерения меры длины четырьмя приборами при $P_d=95\%$.

Решение

Заменяя дисперсии их оценками имеем:

$$\bar{l}_0 = \frac{\frac{n}{\sigma_{l_1}^2} \cdot \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{j1} + \frac{n}{\sigma_{l_2}^2} \cdot \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{j2} + \frac{n}{\sigma_{l_3}^2} \cdot \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{j3} + \frac{n}{\sigma_{l_4}^2} \cdot \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{j4}}{\frac{n}{\sigma_{l_1}^2} + \frac{n}{\sigma_{l_2}^2} + \frac{n}{\sigma_{l_3}^2} + \frac{n}{\sigma_{l_4}^2}} =$$

$$= \frac{\frac{1}{0,4^2}(11,3+10,7+11,2+10,9) + \frac{1}{0,8^2}(10,8+11,1+10,9+11,0)}{4\left(\frac{1}{0,4^2} + \frac{1}{0,8^2} + \frac{1}{0,7^2} + \frac{1}{0,5^2}\right)} +$$

$$+ \frac{\frac{1}{0,7^2}(9,8+10,7+10,3+10,9) + \frac{1}{0,5^2}(10,4+11,2+10,1+9,9)}{4\left(\frac{1}{0,4^2} + \frac{1}{0,8^2} + \frac{1}{0,7^2} + \frac{1}{0,5^2}\right)} \approx 10,75 \text{ мкм} - \text{среднее}$$

взвешенное;

$$\sigma_{\bar{l}_0}^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{n}{\sigma_{l_j}^2}} = \frac{1}{4\left(\frac{1}{0,4^2} + \frac{1}{0,8^2} + \frac{1}{0,7^2} + \frac{1}{0,5^2}\right)} \approx 0,018 \text{ мкм}^2 - \text{оценка дисперсии}$$

среднего взвешенного;

$$\sigma_{\bar{l}_0} = \sqrt{0,018} \approx 0,134 \text{ мкм} - \text{оценка СКО среднего взвешенного;}$$

$$k = \frac{[\sum_{j=1}^m \frac{n}{\sigma_{l_j}^2}]^2}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{n_j + 1} \cdot \frac{1}{\sigma_{l_j}^4}} - 2 = \frac{\left[4\left(\frac{1}{0,4^2} + \frac{1}{0,8^2} + \frac{1}{0,7^2} + \frac{1}{0,5^2}\right)\right]^2}{4 + 1\left(\frac{1}{0,4^4} + \frac{1}{0,8^4} + \frac{1}{0,7^4} + \frac{1}{0,5^4}\right)} - 2 \approx 16.$$

При $P_d=95\%$, $k=16$ по таблице распределения Стьюдента получаем $t_{P_d} = 2,12$.

Находим случайную погрешность измерения меры длины:

$$\Delta_{P_d} = t_{P_d} \sigma_{\bar{l}_0} = 2,12 \cdot 0,134 \approx 0,28 \text{ мкм.}$$

Записываем результат измерения:

$$l_{\text{ист}} = 10,75 \pm 0,28 \text{ мкм; } P_d=95\%.$$

Задача 3. Резистор составлен из двух параллельно соединенных резисторов сопротивлением $R_1=10 \text{ Ом}$, $R_2=15 \text{ Ом}$, которые определены с погрешностью соответственно $\delta_{R_1} = 5\%$ и $\delta_{R_2} = 4\%$. Найти сопротивление и погрешность составного резистора, считая погрешности резисторов R_1 и R_2 некоррелированными.

Решение

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} = 6 \text{ Ом,}$$

$$\sigma_{R_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_0}{\partial R_1} \sigma_{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_0}{\partial R_2} \sigma_{R_2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_0}{\partial R_1} \delta_{R_1} R_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R_0}{\partial R_2} \delta_{R_2} R_2\right)^2};$$

$$\frac{\partial R_0}{\partial R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} = \frac{R_2^2}{(R_1 + R_2)^2} = \frac{15^2}{(10 + 15)^2} = 0,36;$$

$$\frac{\partial R_0}{\partial R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} = \frac{R_1^2}{(R_1 + R_2)^2} = \frac{10^2}{(10 + 15)^2} = 0,16;$$

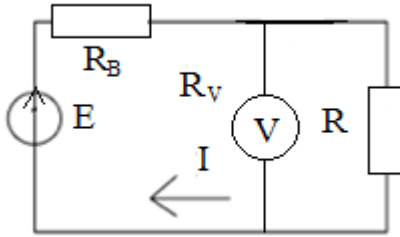
$$\sigma_{R_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_0}{\partial R_1} \delta_{R_1} R_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R_0}{\partial R_2} \delta_{R_2} R_2\right)^2} =$$

$$= \sqrt{(0,36 \cdot 0,05 \cdot 10)^2 + (0,16 \cdot 0,04 \cdot 15)^2} = 0,204 \text{ Ом;}$$

$$\delta_{R_0} = \frac{\sigma_{R_0}}{R_0} = \frac{0,204}{6} \approx 3,4\%.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Найти погрешность Δ_{max} результата однократного измерения напряжения $U=6,4 \text{ В}$ в приведенной схеме, если $E=10 \text{ В}$, $R_B=1,8 \text{ кОм}$; $R=3,3 \text{ кОм}$; $R_V=0,1 \text{ МОм}$, вольтметр цифровой с поразрядным уравниванием, распределение случайной погрешности измерения равномерное с $|\Delta_{\text{max}}|=0,05 \text{ В}$.



Задача 2. Длина линии, измеренная шесть раз с различными среднеквадратическими погрешностями, приведена в таблице:

$l_0, \text{ мм}$	271,729	271,772	271,717	271,732	271,730	271,720
$\hat{\sigma}_\Delta, \text{ мм}$	6,3	8,4	9,1	4,3	5,2	7,5

Определить среднее взвешенное и СКО среднего взвешенного.

Задача 3. Даны результаты двух групп наблюдений:

$$\bar{X}_1 = 8,392; \quad S_{\bar{X}_1} = 0,023; \quad n_1 = 5;$$

$$\bar{X}_2 = 8,364; \quad S_{\bar{X}_2} = 0,032; \quad n_2 = 10; \quad m=2.$$

Найти оценки среднего взвешивания и СКО среднего взвешенного.

Задача 4. Даны результаты двух групп измерений величины Q :

$$Q_{\text{ист}} = 13,348 \pm 0,008; \quad n_1 = 16;$$

$$Q_{\text{ист}} = 13,354 \pm 0,004; \quad n_2 = 8; \quad P_d = 90\%.$$

Проверить справедливость следующих утверждений:

$$S_{\bar{X}_0} < 0,002; \quad P(|Q_{\text{ист}} - \hat{Q}_{\text{ист},0}| < 0,004) < 95\%.$$

Задача 5. Найти погрешность измерения мощности, если сопротивление измерено с погрешностью $\delta_R = 5\%$, а напряжение - с погрешностью $\delta_U = 2,5\%$. Считать приведенные погрешности некоррелированными.

Задача 6. Для измерения затрат энергии в электрической печи за сутки были замерены: напряжение сети $U=215 \text{ В}$ с погрешностью $\delta_U = 2\%$ и ток $I=120 \text{ А}$ с погрешностью $\delta_I = 1\%$. Определить энергию и относительную погрешность ее измерения, если время измерялось с погрешностью $\delta_t = 10^{-3}\%$. Погрешности считать некоррелированными.

Задача 7. Измеряемая величина $Q_{\text{ист}}$ связана с величинами $Q_{1\text{ист}}$,

$$Q_{2\text{ист}}, \quad Q_{3\text{ист}} \quad \text{зависимостью} \quad Q_{\text{ист}} = \frac{Q_{1\text{ист}}^2 Q_{2\text{ист}}}{Q_{3\text{ист}}}. \quad \text{Результаты прямых}$$

изменений аргументов:

$$Q_{1\text{ист}} = 10,00 \pm 0,08; \quad n=5; \quad P_d = 90\%.$$

$$Q_{2\text{ист}} = 2,00 \pm 0,02; \quad n=6;$$

$$Q_{3\text{ист}} = 100 \pm 1; \quad n=7;$$

Проверить справедливость следующих неравенств:

$$\sigma_{\hat{Q}_{\text{ист},0}} > 0,020; \quad P(|Q_{\text{ист}} - \hat{Q}_{\text{ист},0}| < 0,040) > 90\%.$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

Классы точности средств измерений

Цель занятия—закрепление теоретических знаний в области нормирования случайной погрешности, придания средствам измерения определенного класса точности и определения инструментальной погрешности средств измерения по их классу точности.

Контрольные вопросы

1. Метрологические характеристики средств измерения.
2. Нормирование метрологических характеристик средств измерения.
3. Классы точности средств измерения.
4. Определение инструментальной составляющей погрешности измерений по нормированным метрологическим характеристикам средств измерений.
5. Определение инструментальной составляющей погрешности измерений по классу точности средств измерений.

Задание на практическое занятие

При подготовке к занятию необходимо изучить теоретические материалы и ответить на контрольные вопросы, используя литературу [1.1], с.32-45,56-60, [2.1] с.92-99, [2.2], с.84-91, а также уяснить методику решения типовых задач.

Примеры решения типовых задач

Задача 1. Генератор низкой частоты ГЗ-56/1 соответствует классу точности КТ III в диапазоне частот от 200 до 20000 Гц $\Delta_1 = \pm(0,01F + 0,5)$ и классу точности IV в диапазоне частот от 20 до 200 Гц и от 20000 до 200000 Гц $\Delta_2 = \pm(0,02F + 0,5)$ Гц.

Построить зависимости пределов допустимой абсолютной погрешности от частоты в различных поддиапазонах генератора.

Рассчитать пределы допустимых абсолютной и относительной погрешностей на частотах $F_1=10$ кГц и $F_2=100$ кГц.

Решение

Строим зависимости пределов абсолютной погрешности от частоты в различных поддиапазонах генератора (рис.1-3).

Находим пределы допустимой абсолютной и относительной погрешностей на частотах $F_1=10$ кГц и $F_2=100$ кГц:

$$\Delta_{F_1} = \pm(0,01 \cdot 10 \cdot 10^3 + 0,5) = \pm 100,5 \text{ Гц} \approx \pm 100 \text{ Гц},$$

$$\Delta_{F_2} = \pm(0,02 \cdot 100 \cdot 10^3 + 0,5) = \pm 2000,5 \text{ Гц} \approx \pm 2000 \text{ Гц},$$

$$\delta = \frac{\Delta}{F}, \quad \delta_{F_1} = \pm \left(0,01 + \frac{0,5}{F}\right) \cdot 100\% = \pm \left(0,01 + \frac{0,5}{10^4}\right) \cdot 100\% \approx \pm 1,0 \%,$$

$$\delta_{F_2} = \pm \left(0,02 + \frac{0,5}{F}\right) \cdot 100\% = \pm \left(0,02 + \frac{0,5}{10^5}\right) \cdot 100\% \approx \pm 2,0 \%.$$

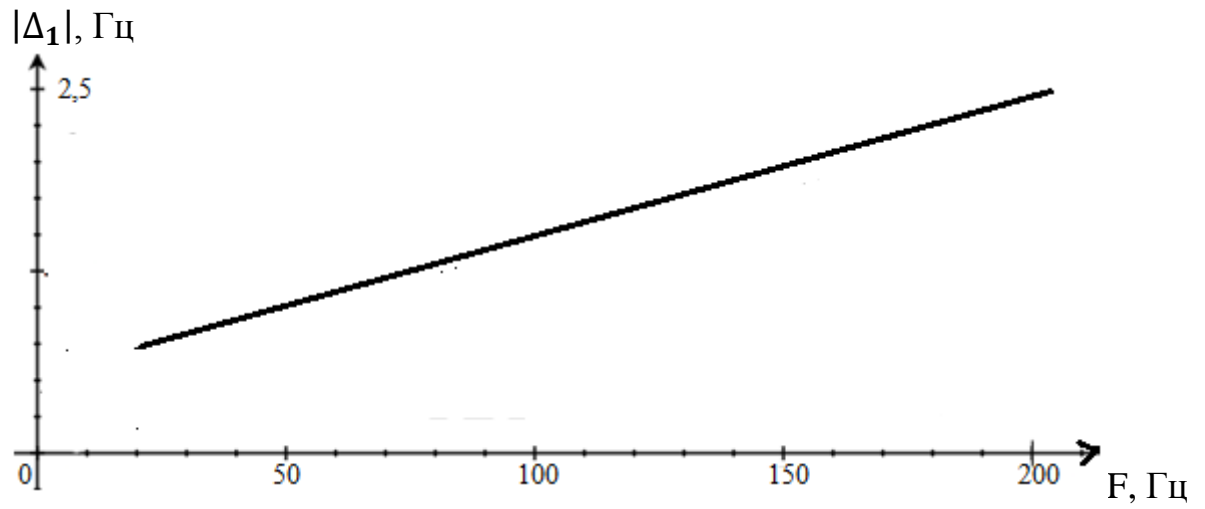


Рис. 1

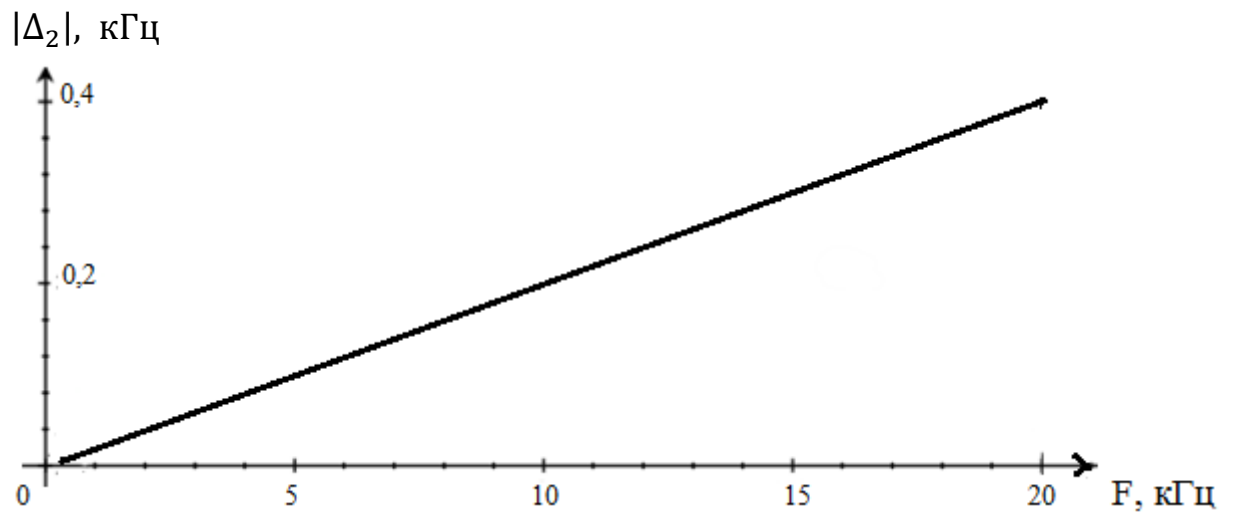


Рис. 2

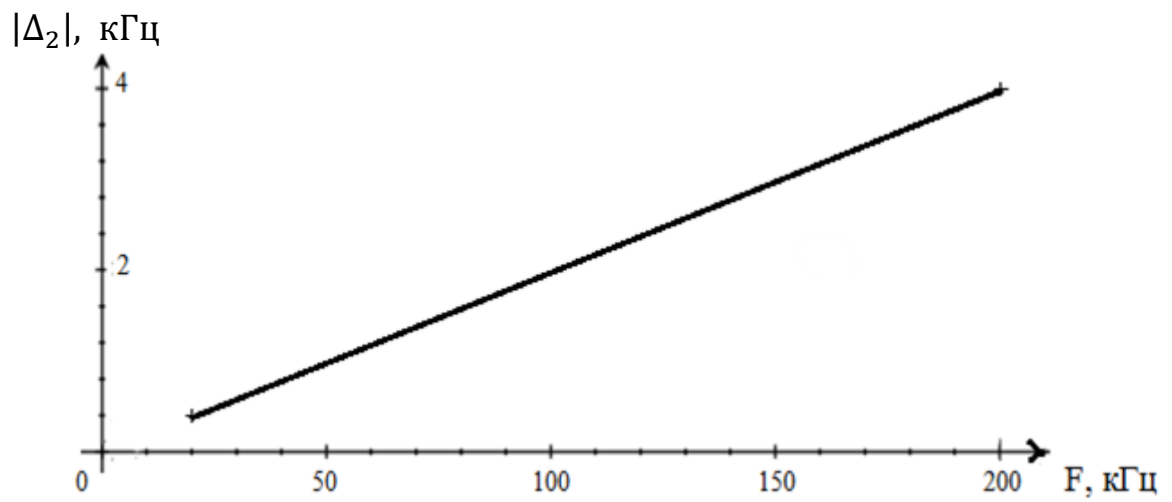


Рис. 3

Задача 2. Измерение постоянного напряжения осуществляется комбинированным прибором Ц4315 с классом точности КТ 2,5 (приведенная допустимая относительная погрешность прибора $\gamma = 2,5\%$). Отсчет по шкале прибора с пределами 0-5 В и равномерной шкалой составил $U_1 = 4$ В. Найти пределы допустимой абсолютной погрешности этого отсчета и результат измерения. Найти пределы допустимой относительной погрешности и результат измерения, если по шкале с пределами 0-10 В отсчет также составил $U_2 = 4$ В. Сравнить точность измерения напряжения на разных пределах измерения.

Решение

Находим пределы допустимой относительной и абсолютной погрешностей при пределе шкалы $U_{k1} = 5$ В:

$$\delta_1 = \gamma \frac{U_{k1}}{U} = \pm 2,5 \cdot \frac{5}{4} = \pm 3,125\% \approx \pm 3,13\%;$$

$$\Delta_1 = \delta_1 U = \pm \frac{3,13 \cdot 4}{100} = \pm 0,1252 \text{ В} \approx \pm 0,13 \text{ В}.$$

Записываем результат измерения:

$$U_1 = 4 \pm 0,13 \text{ В}, \quad 3,87 \text{ В} \leq U_1 \leq 4,13 \text{ В}.$$

Находим пределы допустимой относительной и абсолютной погрешностей при пределе шкалы $U_{k2} = 10$ В:

$$\delta_2 = \gamma \frac{U_{k2}}{U} = \pm 2,5 \cdot \frac{10}{4} = \pm 6,3\%;$$

$$\Delta_2 = \delta_2 U = \pm \frac{6,3 \cdot 4}{100} = \pm 0,252 \text{ В} \approx \pm 0,25 \text{ В}.$$

Записываем результат измерения:

$$U_2 = 4 \pm 0,25 \text{ В}; \quad 3,75 \text{ В} \leq U_2 \leq 4,25 \text{ В}.$$

Первое измерение точнее, так как $\delta_1 < \delta_2$.

Задача 3. Измерение сопротивления резистора осуществляется комбинированным прибором Ц4315 с классом точности КТ 2,5 (приведенная допустимая относительная погрешность прибора $\gamma = 2,5\%$), при этом длина рабочей части шкалы составляет $l_p = 90$ мм. Отсчет по шкале прибора с пределами 0-5 кОм составил 1 кОм, что соответствует $l_0 = 56$ мм. Чему равно измеряемое сопротивление?

Решение

Находим пределы допустимой относительной и абсолютной погрешностей при заданных l_p и l_0 :

$$\delta = \gamma \frac{l_p}{l_0} = \pm 2,5 \frac{90}{56} \approx \pm 4,0\%; \quad \Delta = \delta \cdot R = \pm \frac{4,0 \cdot 1}{100} = \pm 0,04 \text{ кОм}.$$

Записываем результат измерения:

$$R = 1 \pm 0,04 \text{ кОм}; \quad 0,96 \text{ кОм} \leq R \leq 1,04 \text{ кОм}.$$

Задача 4. Показание однофазного счетчика СО-5 с классом точности КТ 2,5 (допустимая относительная погрешность прибора $\delta = 2,5\%$) составило $\mathcal{E}_1 = 50$ кВт·ч. Чему равна измеряемая энергия? Найти то же самое, если показание составило $\mathcal{E}_2 = 100$ кВт·ч.

Решение

Находим пределы допустимой абсолютной погрешностей при первом измерении:

$$\delta = \frac{\Delta}{\mathcal{E}}; \quad \Delta_1 = \delta \cdot \mathcal{E}_1 = \pm \frac{2,5 \cdot 50}{100} = \pm 1,25 \text{ кВт-ч.} \approx \pm 1,3 \text{ кВт-ч.}$$

Записываем результат измерения:

$$\mathcal{E}_1 = 50 \pm 1,3 \text{ кВт-ч.; } 48,7 \text{ кВт-ч.} \leq \mathcal{E}_1 \leq 51,3 \text{ кВт-ч.}$$

Находим пределы допустимой абсолютной погрешностей при втором измерении:

$$\Delta_2 = \delta \cdot \mathcal{E}_2 = \pm \frac{2,5 \cdot 100}{100} = \pm 2,5 \text{ кВт-ч.}$$

Записываем результат измерения:

$$\mathcal{E}_2 = 100 \pm 2,5 \text{ кВт-ч.; } 97,5 \text{ кВт-ч.} \leq \mathcal{E}_2 \leq 102,5 \text{ кВт-ч.}$$

Задача 5. Вольтметр В7-52 с классом точности КТ 2,5/0,5. Отсчет по шкале с пределами 0-100В составил $U = 10,0$ В. Найти измеряемое напряжение. Сделать то же самое, если тот же отсчет был получен по шкале с пределами 0-20 В. Сравнить точность измерения напряжения на разных пределах измерения.

Решение

Находим пределы допустимой относительной и абсолютной погрешностей при пределах шкалы $U_{k1} = 100$ В и $U_{k2} = 20$ В:

$$\delta = \pm \left[2,5 + 0,5 \left(\frac{U_k}{U} - 1 \right) \right] \%;$$

$$\delta_1 = \pm \left[2,5 + 0,5 \left(\frac{100}{10,0} - 1 \right) \right] = \pm 7\%; \quad \Delta_1 = \delta_1 \cdot U = \pm \frac{7 \cdot 10,0}{100} = \pm 0,7 \text{ В;}$$

$$\delta_2 = \pm \left[2,5 + 0,5 \left(\frac{20}{10,0} - 1 \right) \right] = \pm 3\%; \quad \Delta_2 = \delta_2 \cdot U = \pm \frac{3 \cdot 10,0}{100} = \pm 0,3 \text{ В;}$$

Записываем результаты измерения:

$$U_1 = 10,0 \pm 0,7 \text{ В, } \quad 9,3 \text{ В} \leq U_1 \leq 10,7 \text{ В;}$$

$$U_2 = 10,0 \pm 0,3 \text{ В; } \quad 9,7 \text{ В} \leq U_2 \leq 10,3 \text{ В.}$$

Второе измерение точнее, так как $\delta_2 < \delta_1$.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Измерение частоты гармонического напряжения осуществляется электронно-счетным частотомером ЧЗ-34 с классом точности КТ II. Отсчет при времени счета $t_{сч} = 0,1$ с составил 1,98 кГц. Найти измеряемую частоту.

Задача 2. При поверке амперметра с пределом измерения $I_k = 5$ А в точках шкалы 1, 2, 3, 4 и 5 А получены следующие показания образцового прибора 0,95; 2,06; 3,05; 4,07 и 4,95 А. Определить класс точности КТ амперметра.

Задача 3. Для измерения напряжения используются два вольтметра:

-класс точности КТ 2,5 и предел измерения $U_{k1} = 30$ В;

-класс точности КТ 1,0 и предел измерения $U_{k2} = 150$ В.

Определить, какой вольтметр измеряет напряжение точнее, если первый показал $U_1 = 29,5$ В, а другой $U_2 = 30$ В.

Задача 4. В цепь с током $I=15$ А включили три амперметра со следующими параметрами: классом точности КТ 1,0 и пределом измерения $I_{k1}=50$ А; классом точности КТ 1,5 и пределом измерения $I_{k2}=30$ А; классом точности КТ 2,5 и пределом измерения $I_{k3}=20$ А. Какой из амперметров обеспечит большую точность измерения тока в цепи?

Задача 5. Имеются три вольтметра с классом точности КТ 1,0 и пределом измерения $U_{k1}=300$ В; классом точности КТ 1,5 и пределом измерения $U_{k2}=250$ В; классом точности КТ 2,5 и пределом измерения $U_{k3}=150$ В. Какой из вольтметров точнее измерит напряжение $U=130$ В?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

Электронные вольтметры

Цель занятия–закрепление теоретических знаний в области назначения составных элементов электронных вольтметров.

Контрольные вопросы

1. Основные структурные схемы электронных вольтметров: принцип действия, области применения, достоинства и недостатки.
2. Измерительные преобразователи среднеквадратического (действующего, эффективного) значения: схема, принцип действия.
3. Измерительные преобразователи средневыпрямленного значения: схема, принцип действия.
4. Измерительные преобразователи амплитудного (пикового) значения: схема, принцип действия.
5. Цифровой вольтметр с однократным интегрированием: схема, принцип действия, погрешности.
6. Цифровой вольтметр с двойным интегрированием: схема, принцип действия, погрешности.
7. Цифровой вольтметр поразрядного уравнивания: схема, принцип действия, погрешности.
8. Цифровой мультиметр.

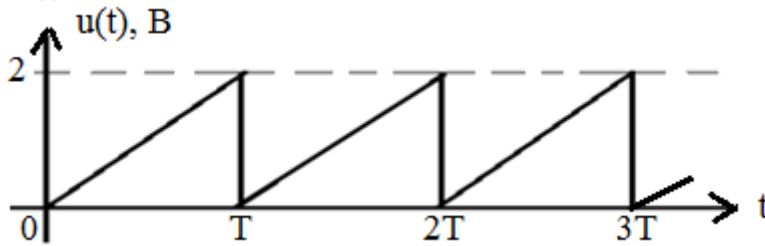
Задание на практическое занятие

При подготовке к занятию необходимо изучить теоретические материалы и ответить на контрольные вопросы, используя литературу [1.1], с.146-161, [2.1] с.176-214, [2.2], с.124-150, а также уяснить методику решения типовой задачи.

Пример решения типовой задачи

Задача. Найти показание электронного вольтметра (ЭВ), у которого шкала проградуирована в среднеквадратических значениях (СКЗ)

синусоидального напряжения, измерительный преобразователь пиковый с открытым входом, если на его вход подается напряжение вида



Решение

Напряжение, показываемое вольтметром: $U_{\text{пок}} = K_{\text{гр}} U_{\text{по}}$,

где $K_{\text{гр}}$ – градуировочный коэффициент (ГК) вольтметра, $U_{\text{по}}$ – постоянное напряжение на выходе пикового измерительного преобразователя с открытым входом, которое примерно равно амплитудному значению входного напряжения.

Так как рассматриваемый ЭВ предназначен для измерения СКЗ синусоидального значения, то его ГК определяется следующим образом:

$$K_{\text{гр}} = \frac{U_{\text{син}}}{U_{\text{мсин}}},$$

где $U_{\text{син}}$ и $U_{\text{мсин}}$ – соответственно среднеквадратическое и амплитудное значения синусоидального напряжения.

Известно, что $U_{\text{мсин}} = \sqrt{2} U_{\text{син}}$, то есть $K_{\text{гр}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707$.

Тогда $U_{\text{пок}} = K_{\text{гр}} U_{\text{мпил}}$,

где $U_{\text{мпил}}$ – амплитудное значение входного напряжения ($U_{\text{мпил}} = 2 \text{ В}$),

$$U_{\text{пок}} = 0,707 \cdot 2 = 1,414 \text{ В}.$$

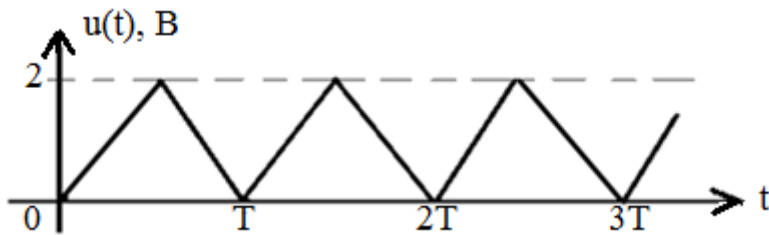
Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Определить показание электронного вольтметра, который имеет измерительный преобразователь средневыпрямленного значения с открытым входом и шкалу, проградуированную в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения, если на его вход подается напряжение вида

$$u(t) = \begin{cases} 2 \sin \omega t, \text{ В}, & 0 \leq t \leq T/2, \\ 0, & T/2 \leq t \leq T, \end{cases}$$

где $T = 2\pi/\omega$ – период повторения.

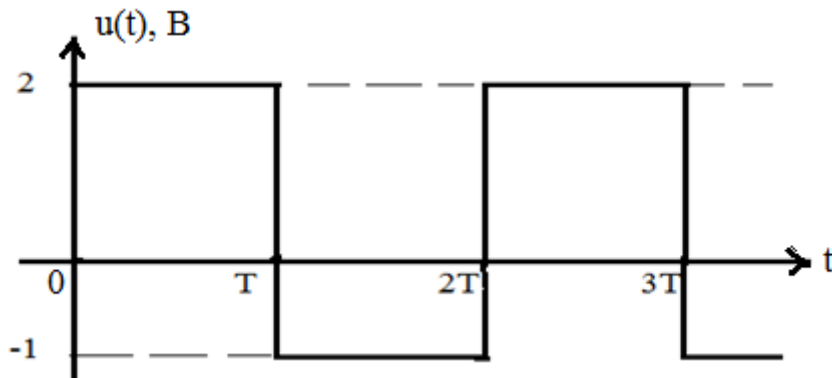
Задача 2. Определить показание электронного вольтметра, который имеет измерительный преобразователь средневыпрямленного значения с закрытым входом и шкалу, проградуированную в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения, если на его вход подается напряжение вида



Задача 3. Показание электронного вольтметра, который имеет измерительный преобразователь средневыпрямленного значения с открытым входом и шкалу, проградуированную в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения, при подаче на его вход напряжения в виде последовательности прямоугольных однополярных видеоимпульсов с амплитудой 10 В, составило 2 В. Определить скважность этой последовательности.

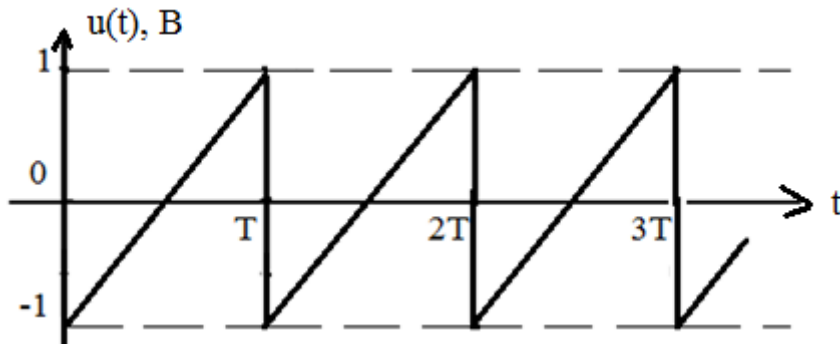
Задача 4. Найти показание электронного вольтметра, у которого шкала проградуирована в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения, измерительный преобразователь средневыпрямленного значения с закрытым входом, если на его вход подается последовательность прямоугольных положительных видеоимпульсов с амплитудой 10 В и скважностью 5.

Задача 5. Найти показание электронного вольтметра, у которого шкала проградуирована в среднеквадратических значениях, измерительный преобразователь среднеквадратических значений с открытым входом, если на его вход подается напряжение вида



Задача 6. Определить показание электронного вольтметра, который имеет измерительный преобразователь пикового значения с закрытым входом и шкалу, проградуированную в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения, если к его входу приложено напряжение в виде последовательности прямоугольных положительных видеоимпульсов с амплитудой $U_m=10$ В и скважностью $q=10$.

Задача 7. Найти показание электронного вольтметра, у которого шкала проградуирована в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения, измерительный преобразователь средневыпрямленных значений с открытым входом, если на его вход подается напряжение вида

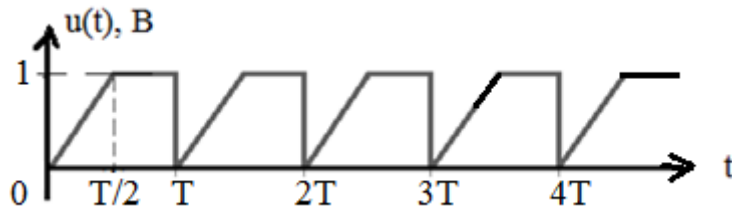


Задача 8. Найти показание электронного вольтметра, у которого шкала проградуирована в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения, измерительный преобразователь средневыпрямленных значений с открытым входом, если на его вход подается напряжение вида

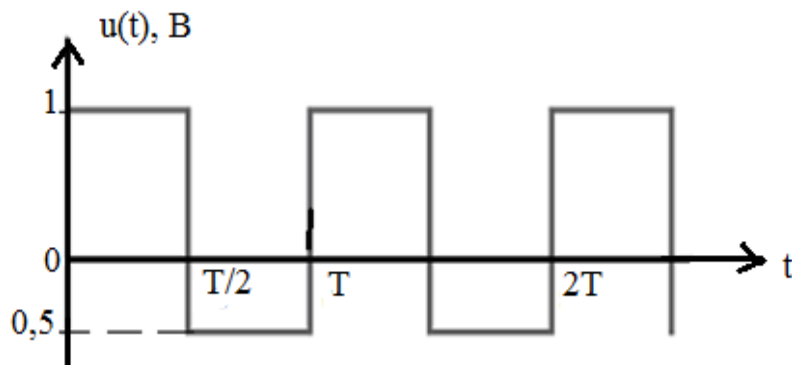
$$u(t) = \begin{cases} \cos \omega t, \text{ В,} & 0 \leq t \leq T/4, \quad 3T/4 \leq t \leq T, \\ 0, & T/4 \leq t \leq 3T/4, \end{cases}$$

где $T = 2\pi/\omega$ – период повторения.

Задача 9. Найти показание электронного вольтметра, у которого шкала проградуирована в среднеквадратических значениях, измерительный преобразователь среднеквадратических значений с открытым входом, если на его вход подается напряжение вида



Задача 10. Найти показание электронного вольтметра, у которого шкала проградуирована в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения, измерительный преобразователь пикового значения с закрытым входом, если на его вход подается напряжение вида



ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

Измерение мощности

Цель занятия-закрепление теоретических знаний в области измерения мощности ВЧ- и СВЧ-сигналов.

Контрольные вопросы

1. Методы измерения поглощаемой мощности (метод вольтметра): схема, характеристика, достоинства и недостатки, погрешности.
2. Методы измерения поглощаемой мощности (тепловые методы): схемы, характеристика, достоинства и недостатки, погрешности.
3. Методы измерения проходящей мощности (на основе направленных ответвителей): схема, характеристика, достоинства и недостатки, погрешности.
4. Методы измерения проходящей мощности (пондеромоторный метод, метод на основе эффекта Холла): схемы, характеристика, достоинства и недостатки, погрешности.
5. Косвенный метод измерения импульсной мощности на высоких и сверхвысоких частотах, погрешности.
6. Прямой метод измерения импульсной мощности на высоких и сверхвысоких частотах с использованием болометра, погрешности.
7. Электронный метод измерения импульсной мощности на высоких и сверхвысоких частотах, погрешности.
8. Цифровой ваттметр: схема, принцип действия, погрешности.

Задание на практическое занятие

При подготовке к занятию необходимо изучить теоретические материалы и ответить на контрольные вопросы, используя литературу [1.1], с.262-280, с.327-328, [2.1], с.312-329, [2.2], с.233-245, а также уяснить методику решения типовой задачи.

Пример решения типовой задачи

Задача 1. Найти среднюю и импульсную мощности генератора прямоугольных радиоимпульсов, если показания измерителя средней мощности составили $P_{\text{пок}}=1$ Вт; ослабление аттенюатора, включаемого между генератором и ваттметром $\Delta_{\text{дБ}}=-40$ дБ; длительность радиоимпульсов $t_{\text{и}}=1$ мкс, период их повторения $T_{\text{п}} = 1$ мс.

Решение

Ослабление аттенюатора:

$$\Delta_{\text{дБ}} = 10 \lg \frac{P_{\text{пок}}}{P_{\text{ср}}},$$

где $P_{\text{ср}}$ —средняя мощность генератора.

Тогда

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{пок}}}{10^{\frac{\Delta_{\text{дб}}}{10}}} = \frac{1}{10^{\frac{-40}{10}}} = 10^4 \text{ Вт.}$$

Импульсная мощность генератора:

$$P_{\text{и}} = P_{\text{ср}} q,$$

где q -скважность радиоимпульсов, $q = \frac{T_{\text{п}}}{t_{\text{и}}}$.

Тогда

$$P_{\text{и}} = P_{\text{ср}} \frac{T_{\text{п}}}{t_{\text{и}}} = 10^4 \frac{10^{-3}}{10^{-6}} = 10^7 \text{ Вт} = 10 \text{ МВт.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Найти показание ваттметра, измеряющего среднюю мощность сигнала и подключенного через аттенюатор с ослаблением 20 дБ к генератору прямоугольных радиоимпульсов, если импульсная мощность генератора 100 Вт, длительность импульсов 5 мкс, частота повторения 1 кГц.

Задача 2. К генератору прямоугольных радиоимпульсов через аттенюатор подключен ваттметр, измеряющий импульсную мощность. Рассчитать необходимое ослабление аттенюатора, если максимальный предел измерения ваттметра 1 Вт, средняя мощность генератора 1 Вт, длительность импульсов 1 мкс, период повторения 1 мс.

Задача 3. Средняя мощность генератора прямоугольных радиоимпульсов 10 Вт, скважность 100. Найти показание ваттметра, измеряющего импульсную мощность, который подключен к генератору через аттенюатор с ослаблением 40 дБ.

Задача 4. Импульсная мощность генератора прямоугольных радиоимпульсов измеряется косвенным методом ($P_{\text{и}} = P_{\text{ср}} T_{\text{п}} / t_{\text{и}}$). Рассчитать случайную погрешность измерения мощности $\delta_{P_{\text{и}}}$, если случайные погрешности измерения средней мощности, периода повторения и длительности импульсов соответственно равны $\delta_{P_{\text{ср}}} = 2\%$, $\delta_{T_{\text{п}}} = \delta_{t_{\text{и}}} = 1\%$. Погрешности $\delta_{T_{\text{п}}}$ и $\delta_{t_{\text{и}}}$ не коррелированы.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

Электронно-лучевые осциллографы

Цель занятия-закрепление теоретических знаний в области наблюдения и измерения сигналов с использованием электронно-лучевых осциллографов.

Контрольные вопросы

1. Универсальный электронно-лучевой осциллограф: схема, принцип действия.

2. Характеристика основных видов разверток и синхронизаций в универсальном электронно-лучевом осциллографе.
3. Цифровой осциллограф: схема, принцип действия.
4. Двухканальный осциллограф: схема, принцип действия.
5. Суть стробоскопического метода осциллографирования.
6. Стробоскопический осциллограф: схема и принцип действия стробоскопического преобразователя.
7. Стробоскопический осциллограф: принцип действия схемы автоматического сдвига импульсов.
8. Скоростной осциллограф: принцип действия.

Задание на практическое занятие

При подготовке к занятию необходимо изучить теоретические материалы и ответить на контрольные вопросы, используя литературу [1.1], с.162-185, [2.1], с.244-272, [2.2], с. 174-198, а также уяснить методику решения типовой задачи.

Пример решения типовой задачи

Задача 1. Усилитель вертикального отклонения (УВО) стробоскопического осциллографа имеет полосу пропускания $\Delta f_{\text{пуво}}=1$ МГц. Рассчитать полосу пропускания стробоскопического осциллографа при коэффициенте трансформации масштаба времени $k_{\text{тр}}=10^3$.

Решение

Полоса пропускания стробоскопического осциллографа:

$$\Delta f_{\text{п}} = \Delta f_{\text{пуво}} k_{\text{тр}} = 10^6 \cdot 10^3 = 10^9 \text{ Гц} = 1 \text{ ГГц.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. На вход Y универсального осциллографа подается последовательность положительных прямоугольных видеоимпульсов с амплитудой 2В, длительностью импульсов 0,1 мс и скважностью 4. Изобразить осциллограмму этой последовательности, если коэффициент отклонения 0,5 В/дел. и коэффициент развертки 0,2 мс/дел., размер градуировочной сетки 6 дел.х10 дел.

Задача 2. На вход Y универсального осциллографа подается гармоническое напряжение с амплитудой 1 В и частотой 10 кГц. Изобразить осциллограмму этого напряжения, если коэффициент отклонения 0,5 В/дел. и коэффициент развертки 50 мкс/дел., размер градуировочной сетки 6 дел.х10 дел.

Задача 3. Задача №1. Рассчитать необходимую полосу пропускания усилителя вертикального отклонения стробоскопического осциллографа, чтобы при шаге стробирования 0,01 нс, эквивалентная полоса пропускания была не менее 1 ГГц.

Задача 4. Для осциллографирования импульсного сигнала с периодом повторения 1 нс в универсальном осциллографе потребовалась бы скорость развертки 10^8 м/с. Рассчитать скорость развертки стробоскопического осциллографа, необходимую для наблюдения вышеназванного сигнала, если шаг стробирования равен 0,01 нс.

Задача 5. Усилитель вертикального отклонения стробоскопического осциллографа имеет полосу пропускания $\Delta f_{\text{п}}=10$ МГц. Рассчитать шаг стробирования в этом осциллографе, обеспечивающий осциллографирование синусоидального напряжения с частотой $f=1$ ГГц.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7

Электронно-счетные частотомеры

Цель занятия-закрепление теоретических знаний в области измерения частоты и временных интервалов сигналов с использованием электронно-счетных частотомеров.

Контрольные вопросы

1. Электронно-счетные частотомеры (ЭСЧ) в режиме измерения частоты: схема, принцип действия, погрешности.
2. ЭСЧ в режиме измерения временного интервала: схема, принцип действия, погрешности.
3. ЭСЧ при измерении частоты СВЧ сигналов: схема, принцип действия, погрешности.
4. Измерение временных интервалов нониусным методом.

Задание на практическое занятие

При подготовке к занятию необходимо изучить теоретические материалы и ответить на контрольные вопросы, используя литературу [1.1], с.195-203, [2.1], с.280-289, [2.2], с.198-213, а также уяснить методику решения типовых задач.

Примеры решения типовых задач

Задача 1. Измерение частоты периодического сигнала осуществляется цифровым частотомером. Рассчитать максимальное значение относительной погрешности дискретности, если частота кварцевого генератора $f_{\text{кв.}}=1$ МГц, коэффициент деления делителя частоты в канале формирования стробирующего импульса $k_{\text{д}}=10^2$, измеряемая частота $f_{\text{и}}=50$ МГц.

Решение

Максимальная абсолютная погрешность дискретности:

$$\Delta_{\text{дmax}f} = \pm \frac{f_{\text{кв.}}}{k_{\text{д}}} = \pm \frac{10^6}{10^2} = \pm 10^4 \text{ Гц.}$$

Максимальная относительная погрешность дискретности:

$$\delta_{\text{дmaxf}} = \pm \frac{\Delta_{\text{дmaxf}}}{f_{\text{и}}} = \pm \frac{10^4}{50 \cdot 10^6} \pm 0,0002.$$

Задача 2. Измерение периода гармонического напряжения осуществляется цифровым частотомером. Рассчитать максимальное значение относительной погрешности дискретности, если в канале формирования счетных импульсов частота кварцевого генератора $f_{\text{кв.}} = 5$ МГц, коэффициент умножения умножителя частоты $K_{\text{у}} = 10$, измеряемый период $T_{\text{и}} = 100$ мкс.

Решение

Максимальная абсолютная погрешность дискретности: $\Delta_{\text{дmaxT}} = \pm T_{\text{сч}}$, где $T_{\text{сч}}$ – период счетных импульсов;

$$\Delta_{\text{дmaxT}} = \pm \frac{1}{f_{\text{кв.}} \cdot K_{\text{у}}} = \pm \frac{1}{5 \cdot 10^6 \cdot 10} = \pm 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Максимальная относительная погрешность дискретности:

$$\delta_{\text{дmaxT}} = \pm \frac{\Delta_{\text{дmaxT}}}{T_{\text{и}}} = \pm \frac{0,2 \cdot 10^{-7}}{100 \cdot 10^{-6}} = \pm 0,0002.$$

Задача 3. Измерение частоты СВЧ-колебаний осуществлялось цифровым частотомером, имеющим гетеродинный преобразователь частоты. При измерении были получены два значения частоты гетеродина $f_{\text{г1}} = 50,1$ МГц, $f_{\text{г2}} = 50,0$ МГц. Найти значение частоты СВЧ-колебаний.

Решение

Так как $f_{\text{г2}} < f_{\text{г1}}$, то имеют место следующие соотношения:

$$f_{\text{и}} = n f_{\text{г1}}, f_{\text{и}} = (n+1) f_{\text{г2}},$$

где $f_{\text{и}}$ – измеряемая частота СВЧ-колебаний.

Тогда номер гармоники напряжения гетеродина с частотой первой гармоники $f_{\text{г1}}$ будет равен:

$$n = \frac{f_{\text{г2}}}{f_{\text{г1}} - f_{\text{г2}}} = \frac{50,0 \cdot 10^6}{50,1 \cdot 10^6 - 50,0 \cdot 10^6} = 500.$$

Значение измеряемой частоты СВЧ-колебания:

$$f_{\text{и}} = n f_{\text{г1}} = 500 \cdot 50,1 \cdot 10^6 = 25,05 \text{ ГГц.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Измерение частоты периодического сигнала осуществляется цифровым частотомером. Рассчитать коэффициент деления делителя частоты в канале формирования стробирующего импульса, чтобы при измерении частоты $f_{\text{и}} = 10$ МГц относительная погрешность дискретности не превысила значения $\delta_{\text{дmaxf}} = 10^{-6}$. Частоту кварцевого генератора принять равной $f_{\text{кв}} = 5$ МГц.

Задача 2. Измерение периода гармонического напряжения осуществляется цифровым частотомером. Рассчитать коэффициент умножения частоты в канале формирования счетных импульсов, чтобы абсолютная

погрешность дискретности не превысила значения $\Delta_{\text{дmaxT}}=10$ нс. Частоту кварцевого генератора принять равной $f_{\text{кв}}=5$ МГц.

Задача 3. Измерение частоты СВЧ-колебаний осуществлялось цифровым частотомером, имеющим гетеродинный преобразователь частоты. При измерении были получены два значения частоты гетеродина $f_{\text{г1}}=102,0$ МГц, $f_{\text{г2}}=100,0$ МГц. Рассчитать значение частоты СВЧ-колебания.

Задача 4. Измерение частоты периодического сигнала осуществляется методом дискретного счета. Каково должно быть время счета (время измерения) при измерении частоты $f_{\text{и}}=1$ МГц, чтобы относительная погрешность дискретности не превысила значения $\delta_{\text{дmaxf}}=10^{-4}$ %?

Задача 5. Измерение периода гармонического напряжения осуществляется методом дискретного счета. Какова должна быть частота счетных импульсов при измерении периода $T_{\text{и}}=100$ мкс, чтобы относительная погрешность дискретности не превысила значения $\delta_{\text{дmaxT}}=10^{-3}$ %?

Задача 6. В процессе измерения частоты СВЧ-колебаний цифровым частотомером, имеющим гетеродинный преобразователь частоты, были получены результаты: значение частоты входного колебания $f_{\text{и}}=2$ ГГц, значение частоты гетеродина $f_{\text{г2}}=50$ МГц. Определить номера гармоник напряжения гетеродина, которые были использованы при измерении частоты СВЧ-колебаний.

Задача 7. Измерение частоты гармонического сигнала осуществляется цифровым частотомером. Рассчитать коэффициент умножения частоты гармонического сигнала, чтобы уменьшить относительную погрешность дискретности в пять раз.

Задача 8. Измерение периода гармонического напряжения осуществляется цифровым частотомером. Рассчитать коэффициент деления делителя частоты гармонического напряжения, чтобы уменьшить относительную погрешность дискретности в 10 раз.

Задача 9. Измерение частоты гармонического сигнала осуществляется цифровым частотомером. Рассчитать относительную погрешность дискретности, если коэффициент умножения частоты гармонического сигнала $K_{\text{у}}=2$, коэффициент деления делителя частоты в канале формирования стробирующего импульса $K_{\text{д}}=10^3$, измеряемая частота $f_{\text{и}}=1$ МГц, частота кварцевого генератора $f_{\text{кв}}=5$ МГц.

Задача 10. Измерение периода гармонического напряжения осуществляется цифровым частотомером. Рассчитать относительную погрешность дискретности, если коэффициент деления делителя частоты гармонического напряжения $K_{\text{д}}=10$, коэффициент умножения частоты в канале формирования счетных импульсов $K_{\text{у}}=5$, измеряемый период $T_{\text{и}}=10$ мкс, частота кварцевого генератора $f_{\text{кв}}=5$ МГц.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8

Цифровые фазометры

Цель занятия-закрепление теоретических знаний в области измерения фазового сдвига между сигналами с использованием цифровых фазометров.

Контрольные вопросы

1. Использование метода дискретного счета при измерении фазового сдвига.
2. Цифровой фазометр: схема, принцип действия, погрешности.
3. Цифровой фазометр среднего значения: схема, принцип действия, погрешности.
4. Микропроцессорный фазометр: схема, принцип действия, погрешности.

Задание на практическое занятие

При подготовке к занятию необходимо изучить теоретические материалы и ответить на контрольные вопросы, используя литературу [1.1], с.291-293, [2.1], с.300-308, [2.2], с.216-228, а также уяснить методику решения типовой задачи.

Пример решения типовой задачи

Задача 1. При измерении фазового сдвига между синусоидальными напряжениями с частотой $f = 1$ кГц используется метод дискретного счета. Рассчитать максимальную относительную погрешность дискретности, если частота счетных импульсов $f_{сч} = 2$ МГц, измеряемый фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{и} = 60^\circ$.

Решение

Абсолютная максимальная погрешность дискретности:

$$\Delta_{д\max\Delta\varphi_{и}} = \pm 360^\circ \frac{f}{f_{сч}}$$

Относительная максимальная погрешность дискретности:

$$\delta_{д\max\Delta\varphi} = \pm \frac{\Delta_{д\max\Delta\varphi}}{\Delta\varphi_{и}} = \pm 360^\circ \frac{f}{f_{сч} \Delta\varphi_{и}} = \pm 360^\circ \frac{10^3}{2 \cdot 10^6 \cdot 60^\circ} = \pm 0,003.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. При измерении фазового сдвига между синусоидальными напряжениями с частотой $f=10,0$ кГц используется метод дискретного счета. Рассчитать период счетных импульсов, если допустимая абсолютная погрешность дискретности измерения фазового сдвига $\Delta_{д\max\Delta\varphi_{и}}=0,09^\circ$.

Задача 2. При измерении фазового сдвига между синусоидальными напряжениями используется метод дискретного счета. Какова должна быть частота счетных импульсов, если частота синусоидальных напряжений $f=5$ кГц,

а допустимая относительная погрешность дискретности $\delta_{\text{дmax}\Delta\varphi_{\text{и}}}=10^{-3}$ и измеряемый фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{\text{и}}=30^{\circ}$?

Задача 3. При измерении фазового сдвига между гармоническими напряжениями используется метод дискретного счета. При каком соотношении между частотами гармонического напряжения и счетных импульсов абсолютная погрешность дискретности измерения фазового сдвига не превысит значения $\Delta_{\text{дmax}\Delta\varphi_{\text{и}}}=0,1^{\circ}$?

Задача 4. При измерении фазового сдвига между гармоническими напряжениями используется метод дискретного счета. Рассчитать относительную погрешность дискретности $\delta_{\text{дmax}\Delta\varphi_{\text{и}}}$, если частота счетных импульсов больше частоты гармонических напряжений в 1000 раз и измеряемый фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{\text{и}}=60^{\circ}$.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №9

Измерители L, C, R

Цель занятия-закрепление теоретических знаний в области измерения L, C, R в цепях с сосредоточенными параметрами.

Контрольные вопросы

1. Омметр, мегаомметр, миллиомметр: схемы, принцип действия, погрешности.
2. Измерители индуктивности и емкости, в которых используются резонансный и генераторный методы: схемы, принцип действия, погрешности.
3. Аналоговый измеритель добротности колебательного контура: схема, принцип действия, погрешности.
4. Панорамный измеритель АЧХ: схема, принцип действия, погрешности.
5. Цифровой измеритель сопротивления с использованием метода дискретного счета: схема, принцип действия, погрешности.
6. Цифровой измеритель емкости с использованием метода уравнивающего преобразования: схема, принцип действия, погрешности.
7. Цифровой измеритель сопротивления, емкости, индуктивности с использованием метода развертывающего преобразования: схема, принцип действия, погрешности.
8. Цифровой измеритель сопротивления, емкости, индуктивности с микропроцессором: схема, принцип действия, погрешности.

Задание на практическое занятие

При подготовке к занятию необходимо изучить теоретические материалы и ответить на контрольные вопросы, используя литературу [1.1], с.211-229,

[2.1], с.352-370; [2.2], с.264-274,280-287, а также уяснить методику решения типовых задач.

Примеры решения типовых задач

Задача 1. Добротность контура определяется методом вариации частоты и рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{f_1 + f_2}{2(f_2 - f_1)}.$$

Рассчитать случайную относительную погрешность косвенного измерения добротности контура, если среднеквадратические отклонения случайной относительной погрешности измерения частот f_1 и f_2 равны $\delta_{f_1} = \delta_{f_2} = 0,001$, а сами частоты $f_1 = 490$ кГц и $f_2 = 510$ кГц, коэффициент корреляции между случайными погрешностями измерения частот равен нулю.

Решение

Находим абсолютную случайную погрешность косвенного измерения добротности контура:

$$\sigma_Q = \sqrt{\left(\frac{dQ}{df_1}\right)^2 \sigma_{f_1}^2 + \left(\frac{dQ}{df_2}\right)^2 \sigma_{f_2}^2},$$

где $\frac{dQ}{df_1}$ и $\frac{dQ}{df_2}$ — частные производные от выражения $Q = \frac{f_1 + f_2}{2(f_2 - f_1)}$ по аргументам соответственно f_1 и f_2 ;

σ_{f_1} и σ_{f_2} — абсолютные случайные погрешности косвенного измерения соответственно частот f_1 и f_2 :

$$\sigma_{f_1} = \delta_{f_1} f_1, \quad \sigma_{f_2} = \delta_{f_2} f_2,$$

где δ_{f_1} и δ_{f_2} — относительные случайные погрешности косвенного измерения соответственно частот f_1 и f_2 ;

$$\frac{dQ}{df_1} = \frac{f_2}{(f_2 - f_1)^2}, \quad \frac{dQ}{df_2} = -\frac{f_1}{(f_2 - f_1)^2}.$$

Тогда

$$\sigma_Q = \sqrt{\left[\frac{f_2}{(f_2 - f_1)^2} \delta_{f_1} f_1\right]^2 + \left[\frac{f_1}{(f_2 - f_1)^2} \delta_{f_2} f_2\right]^2} = \frac{f_1 f_2}{(f_2 - f_1)^2} \sqrt{\delta_{f_1}^2 + \delta_{f_2}^2}.$$

Далее находим случайную относительную погрешность косвенного измерения добротности контура:

$$\delta_Q = \frac{\sigma_Q}{Q} = \frac{2f_1 f_2}{f_2^2 - f_1^2} \sqrt{\delta_{f_1}^2 + \delta_{f_2}^2} = \frac{2 \cdot 490 \cdot 10^3 \cdot 510 \cdot 10^3}{(510 \cdot 10^3)^2 - (490 \cdot 10^3)^2} \times \sqrt{0,001^2 + 0,001^2} \approx 0,035.$$

Задача 2. При измерении индуктивности катушки используется метод дискретного счета. Рассчитать максимальное значение относительной погрешности дискретности, если частота счетных импульсов $f_{сч.} = 25$ МГц, сопротивление образцового резистора $R_0 = 1$ кОм, измеряемая индуктивность $L_{и} = 4$ мГн.

Решение

Относительная максимальная погрешность дискретности:

$$\delta_{\text{дmaxL}} = \pm \frac{R_o}{f_{\text{сч}} L_{\text{и}}} = \pm \frac{10^3}{25 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^3} = \pm 0,01 = \pm 1\%.$$

Задача 3. При измерении емкости конденсатора используется метод дискретного счета. Рассчитать максимальное значение относительной погрешности дискретности, если период счетных импульсов $T_{\text{сч.}} = 1$ мкс, сопротивление образцового резистора $R_o = 10$ кОм, измеряемая емкость $C_{\text{и}} = 10$ нФ.

Решение

Относительная максимальная погрешность дискретности:

$$\delta_{\text{дmaxC}} = \pm \frac{T_{\text{сч}}}{R_o C_{\text{и}}} = \pm \frac{10^{-6}}{10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = \pm 0,01 = \pm 1\%.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Измерение емкости конденсатора осуществляется контурным методом. Рассчитать случайную погрешность косвенного измерения емкости, если значения случайной погрешности измерения частоты и индуктивности соответственно равны $\delta_f = 1\%$, $\delta_L = 2\%$, δ_f и δ_L не коррелированы.

Задача 2. Измерение индуктивности катушки осуществляется контурным методом. Рассчитать случайную погрешность косвенного измерения индуктивности, если значения случайной погрешности измерения частоты и емкости соответственно равны $\delta_f = 1\%$, $\delta_C = 2\%$, δ_f и δ_C не коррелированы.

Задача 3. Сопротивление резистора измеряется с помощью электронного вольтметра и амперметра. Рассчитать случайную погрешность измерения сопротивления δ_R , если случайные погрешности измерения напряжения и тока соответственно равны $\delta_U = 2\%$, $\delta_I = 3\%$. Считать, что δ_U и δ_I не коррелированы.

Задача 4. Измерение индуктивности катушки осуществляется контурным методом. Рассчитать максимально допустимую случайную погрешность измерения емкости, если случайная погрешность измерения частоты $\delta_f = 1\%$, а максимально допустимая случайная погрешность измерения индуктивности $\delta_L = 3\%$, δ_f и δ_L не коррелированы.

Задача 5. Измерение емкости конденсатора осуществляется контурным методом. Рассчитать максимально допустимую случайную погрешность измерения индуктивности, если случайная погрешность измерения частоты $\delta_f = 0,5\%$, а максимально допустимая случайная погрешность измерения емкости $\delta_C = 1,5\%$, δ_f и δ_C не коррелированы.

Задача 6. При измерении индуктивности катушки используется метод дискретного счета. Рассчитать максимальное значение абсолютной погрешности дискретности, если частота счетных импульсов 1 МГц, а сопротивление образцового резистора 1 кОм.

Задача 7. При измерении емкости конденсатора используется метод дискретного счета. Рассчитать период счетных импульсов, если допустимая относительная погрешность дискретности 1%, сопротивление образцового резистора 1 кОм и измеряемая емкость 0,1 мкФ.

Задача 8. При измерении индуктивности катушки используется метод дискретного счета. Рассчитать максимальное значение относительной погрешности дискретности $\delta_{\text{дmaxL}}$, если период счетных импульсов $T_{\text{сч}}=0,1$ мкс сопротивление образцового резистора $R_0=1$ кОм, измеряемая индуктивность $L_{\text{и}}=10$ мГн.

Задача 9. При измерении емкости конденсатора используется метод дискретного счета. Рассчитать частоту счетных импульсов, если допустимая абсолютная погрешность дискретности $\Delta_{\text{дmaxC}}=10$ пФ, а сопротивление образцового резистора $R_0=10$ кОм.

Задача 10. При измерении емкости конденсатора используется метод дискретного счета. Рассчитать частоту счетных импульсов, если допустимая относительная погрешность дискретности $\delta_{\text{дmaxC}}=1\%$, сопротивление образцового резистора $R_0=1$ кОм и измеряемая емкость $C_{\text{и}}=0,1$ мкФ.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №10

Измерительные линии

Цель занятия-закрепление теоретических знаний в области измерения в цепях с распределенными параметрами.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия измерительной линии.
2. Измерение комплексного сопротивления с помощью измерительной линии.

Задание на практическое занятие

При подготовке к занятию необходимо изучить теоретические материалы и ответить на контрольные вопросы, используя литературу [1.1], с.374-385, [2.1], с.374-385, [2.2], с.274-280, а также уяснить методику решения типовой задачи.

Пример решения типовой задачи

Задача 1. На измерительной линии с волновым сопротивлением $W = 75$ Ом с подключенной к ней нагрузкой получены следующие результаты измерений: максимальное показание индикатора $U_{\text{max}}=90$ делений, минимальное показание индикатора $U_{\text{min}}=10$ делений, расстояние между соседними минимальными показаниями индикатора $l_{\text{min min}}=5$ см, расстояние от нагрузки до ближайшего

к ней максимального показания индикатора $I_{н\max}=2$ см. Определить сопротивление нагрузки, считая, что индикатор имеет измерительный преобразователь среднеквадратического значения.

Решение

Комплексное сопротивление нагрузки измерительной линии:

$$\dot{Z}_H = W \frac{1 + \dot{\rho}_H}{1 - \dot{\rho}_H},$$

где $\dot{\rho}_H = \rho_H e^{i\varphi_{\rho_H}}$ – комплексный коэффициент отражения напряжения в сечении линии, где включена нагрузка;

$\rho_H = \frac{КСВ-1}{КСВ+1}$ – модуль комплексного коэффициента отражения ($КСВ = \sqrt{\frac{U_{\max}}{U_{\min}}}$ – коэффициент стоячей волны в линии);

$\varphi_{\rho_H} = \frac{4\pi}{\lambda} l_{H\min} - \pi$ – аргумент комплексного коэффициента отражения,

$l_{H\min}$ – расстояние от нагрузки до ближайшего к ней минимума,

λ – длина волны в линии.

$$КСВ \text{ в линии: } КСВ = \sqrt{\frac{90}{10}} = 3.$$

Модуль комплексного коэффициента отражения:

$$\rho_H = \frac{3-1}{3+1} = 0,5.$$

Расстояние от нагрузки до ближайшего к ней минимума:

$$l_{H\min} = l_{H\max} + \frac{l_{\min\min}}{2} = 2 + \frac{5}{2} = 4,5 \text{ см.}$$

Длина волны в линии:

$$\lambda = 2 l_{\min\min} = 2 \cdot 5 = 10 \text{ см.}$$

Аргумент комплексного коэффициента отражения:

$$\varphi_{\rho_H} = \frac{4\pi}{10} 4,5 - \pi = 0,8 \pi.$$

Комплексное сопротивление нагрузки:

$$\dot{Z}_H = 75 \frac{1 + 0,5e^{i0,8\pi}}{1 - 0,5e^{i0,8\pi}} = 27 + i21 \text{ Ом.}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. На измерительной линии с волновым сопротивлением $W=75$ Ом с подключенной к ней нагрузкой получены следующие результаты измерений: максимальное показание индикатора – 75 делений, минимальное – 3 деления, расстояние между соседними максимальным и минимальным показаниями – 7,5 см, расстояние от нагрузки до ближайшего к ней минимального показания индикатора – 6 см. Определить сопротивление нагрузки, считая, что индикатор имеет измерительный преобразователь среднеквадратического значения.

Задача 2. На измерительной линии с волновым сопротивлением $W=75$ Ом с подключенной к ней нагрузкой получены следующие результаты

измерений: максимальное показание индикатора–40 делений, минимальное–10 делений, расстояние между соседними минимальными показаниями–10 см, расстояние от нагрузки до ближайшего к ней максимального показания индикатора–2,5 см. Определить сопротивление нагрузки, считая, что индикатор имеет измерительный преобразователь среднеквадратического значения.

Задача 3. На измерительной линии с волновым сопротивлением $W=75$ Ом с подключенной к ней нагрузкой получены следующие результаты измерений: максимальное показание индикатора–90 делений, минимальное–10 делений, расстояние между соседними максимальными показаниями–4 см, расстояние от нагрузки до ближайшего к ней минимального показания индикатора–1 см. Определить сопротивление нагрузки, считая, что индикатор имеет измерительный преобразователь среднеквадратического значения.

Задача 4. На измерительной линии с волновым сопротивлением $W=75$ Ом с подключенной к ней нагрузкой получены следующие результаты измерений: максимальное показание индикатора–60 делений, минимальное–15 деления, расстояние между соседними максимальным и минимальным показаниями–4 см, расстояние от нагрузки до ближайшего к ней максимального показания индикатора–6 см. Определить сопротивление нагрузки, считая, что индикатор имеет измерительный преобразователь среднеквадратического значения.

Содержание

Практическое занятие №1. Погрешности измерений.....	3
Практическое занятие №2. Обработка результатов измерений.....	7
Практическое занятие №3. Классы точности средств измерений.....	12
Практическое занятие №4. Электронные вольтметры.....	16
Практическое занятие №5. Измерение мощности.....	20
Практическое занятие №6. Электронно-лучевые осциллографы.....	21
Практическое занятие №7. Электронно-счетные частотомеры.....	23
Практическое занятие №8. Цифровые фазометры.....	26
Практическое занятие №9. Измерители L, C, R.....	27
Практическое занятие №10. Измерительные линии.....	30