

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет**

Кафедра метрологии и управления качеством

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОУСТРОЙСТВ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 27.03.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019**

УДК 006.9:631.171 (073)

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ. Методы и средства измерений частоты электрических сигналов и характеристик радиоустройств: Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *И.И. Сытько, К.В.Гоголинский*. СПб, 2019. 34 с.

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Методы и средства измерений и контроля» разработаны в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Рассмотрен комплекс практических заданий в области применения методов и средств измерения частоты электрических сигналов, характеристик радиоустройств, нелинейных искажений, расчета погрешностей измерений и выбора средств измерений.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 27.03.01 «Стандартизация и метрология».

Научный редактор проф. *И.Е. Ушаков*

Рецензент канд. тех. наук *А.Е. Ивкин* (ООО «Константа»)

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Методы и средства измерений и контроля» разработаны в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования и предназначены для студентов бакалавриата направления 27.03.01 – «Стандартизация и метрология» и изучаются в 6 семестре.

Методические указания включают теоретическое введение, практические задания и указания к их выполнению и включают раздел дисциплины: «Методы и средства измерения частоты электрических сигналов и характеристик радиоустройств».

В соответствии с учебным планом в 5 семестре предусмотрено 8 практических занятий (1 – 8) и 17 практических занятий в 6 семестре, 5 из которых (17 – 21), изложены в настоящем методическом указании. После выполнения практической части заданий студенты защищают свою работу, отвечая преподавателю на вопросы по теме занятия.

Целью практических занятий является закрепление и практическое использование знаний, полученных при изучении теоретического курса дисциплины «Методы и средства измерений и контроля». Уметь решать задачи, связанные с применением методов и средств измерения частотно-временных параметров электрических сигналов, а также характеристик радиоустройств, расчета погрешностей (неопределенности) измерений и основных параметров средств измерений, правильного выбора методов и средств измерений для конкретной измерительной задачи.

Варианты и значения исходных данных практических заданий определяются студентами в соответствии с его собственным шифром.

При выполнении практических заданий условия заданий переписываются полностью. Каждый расчет следует сопровождать необходимым пояснением, приведением необходимого расчетного выражения и полученных результатов вычислений.

Для самоконтроля знаний при подготовке к практическим занятиям после каждого практического занятия приведены кон-

тральные вопросы, на которые студентам необходимо ответить. В конце методических указаний приведен библиографический список, которым студентам необходимо воспользоваться при подготовке к практическим занятиям.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Практическое занятие №17. Расчет коэффициента гармоник и коэффициента нелинейных искажений

Цель занятия – изучить основные технические характеристики измерителей нелинейных искажений, уметь рассчитывать коэффициент гармоник и коэффициент нелинейных искажений.

Основные теоретические положения

Нелинейные искажения модулирующих частот в радиотрактах существенно влияют на качество передачи и воспроизведения информации (речи, музыки и т.д.) в звуковом диапазоне частот [2].

Высшие гармоники, возникающие при нелинейных искажениях, можно измерить с помощью анализаторов спектра. Существует несколько количественных показателей уровня нелинейных искажений. Наибольшее распространение получил показатель – коэффициент нелинейных искажений и коэффициент гармоник. Искажения периодических сигналов, близких к синусоидальным, характеризуются коэффициентом гармоник

$$K_z = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}}, \quad (17.1)$$

где U_1, U_2, \dots, U_n – значения амплитуд основной и высших гармоник сигнала.

Приборы для измерения коэффициента гармоник в отличие от анализаторов спектра предназначены для оценок искажений сигналов в трактах интегральным методом без учета распределений амплитуд высших гармонических составляющих по частотному диапазону.

Для измерения относительного значения напряжения гармоник можно использовать анализатор спектра, если его разрешающая способность позволяет наблюдать отдельно спектральные составляющие. Если детектор анализатора линейный, то в формулу (17.1) вместо напряжений U_1, U_2, \dots, U_n можно подставить

значения амплитуд A_1, A_2, \dots, A_n , выраженных на экране анализатора в миллиметрах.

Для определения уровня нелинейных искажений чаще всего используется метод разделения напряжения основной частоты и суммарного напряжения гармоник. В этом случае исследуемый сигнал подается на частотно-избирательную систему, которая подавляет сигнал основной, но пропускает все высшие гармоники. Раздельно измеряя среднеквадратические значения напряжения высших гармоник и всего исследуемого сигнала, оценивают коэффициент нелинейных искажений [2 – 9, 11].

Структурная схема прибора для измерения коэффициента нелинейных искажений приведена на рис.17.1.

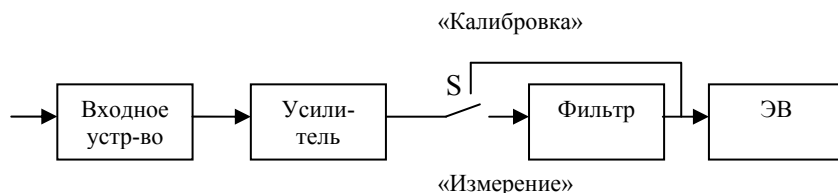


Рис.17.1. Структурная схема измерителя нелинейных искажений

Входная цепь служит для согласования прибора с исследуемым источником сигналов. Перед измерением переключатель S ставят в положение «Калибровка», с помощью усилителя измеряемое напряжение усиливают до такого фиксированного значения, при котором электронный вольтметр будет проградуирован в значениях коэффициента нелинейных искажений. Обычно показание вольтметра равно 1 В. Затем переключатель ставят в положение «Измерение». Настраивая фильтр, подавляют напряжение основной частоты. Полное подавление будет при минимальном показании прибора. В этом случае электронный вольтметр показывает эффективное значение суммы высших гармонических составляющих, отнесенное к эффективному значению напряжению сигнала, которое определяется по формуле:

$$K_n = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U^2}} \cdot 100 \% \quad (17.2)$$

Выражение для K_n не совпадает с выражением для коэффициента гармоник K_z , определяемым формулой (17.1), но связано с ним простым соотношением

$$K_z = \frac{K_n}{\sqrt{1 - K_n}} \cdot 100 \% \quad (17.3)$$

Из (17.3) следует, что шкалу электронных вольтметров можно непосредственно проградуировать в значениях коэффициента нелинейных искажений K_n .

Промышленностью выпускаются измерители нелинейных искажений С6-8 с цифровым отсчетом и С6-11 с аналоговым отсчетом. Диапазон рабочих частот от 0,02 до 200 кГц, пределы измерения коэффициента нелинейных искажений от 0,03 до 30 %, входное напряжение от 0,1 мВ до 100 В, основная погрешность $\pm(0,03 - 0,06) \cdot K_{zn}$, где K_{zn} – предельное значение шкалы измерений.

Как правило, коэффициент гармоник и коэффициент нелинейных искажений нормируются величиной не хуже 10 – 15 %.

Задание 1. Определить коэффициент гармоник синусоидального сигнала частотой 10 МГц с помощью анализатора спектра сигналов по пяти гармоникам. Детектор анализатора линейный. Для выполнения задания, студент выбирает исходные данные из табл.17.1 по последней цифре собственного шифра.

Таблица 17.1

Данные	Последняя цифра шифра		
	0 – 3	4 – 6	7 – 9
A_1 , мм	75	70	68
A_2 , мм	9	10	12
A_3 , мм	5	7	7
A_4 , мм	3	5	6
A_5 , мм	1	2	2

Задание 2. Определить коэффициент гармоник синусоидального сигнала частотой 500 Гц, если показание измерителя нелинейных искажений С6-8 составило K_n .

Для выполнения задания, студент выбирает исходные данные из табл.17.2 по последней цифре собственного шифра.

Таблица 17.2

Данные	Последняя цифра шифра					
	0 – 1	2 – 3	4 – 5	6 – 7	8	9
$K_n, \%$	15	25	30	28	10	22

Задание 3. Для определения среднеквадратического значения напряжения синусоидальной формы U_x частотой 6 кГц используется вольтметр В7-16, показание которого составило $U_{пок}$ и измеритель нелинейных искажений С6-11, показание которого составило K_n . Основные технические характеристики вольтметра: вход – закрытый; тип детектора – средневывпрямленного значения; градуировка шкалы – среднеквадратических значениях напряжения синусоидальной формы.

Для выполнения задания, студент выбирает исходные данные из табл.17.3 по последней цифре собственного шифра.

Таблица 17.3

Данные	Последняя цифра шифра					
	0 – 1	2 – 3	4 – 5	6 – 7	8	9
$K_n, \%$	10	25	15	28	30	24
$U_{пок}, В$	0,7	1,2	3,6	5,8	0,3	3,8

Указания

Основные технические характеристики вольтметра вольтметра В7-16: вход – закрытый; тип детектора – средневывпрямленного значения; градуировка шкалы – среднеквадратических значениях напряжения синусоидальной формы. Поэтому применение данного типа вольтметра возможно при условии внесения поправки в его показания, которая вычисляется по формуле:

$$U = U_{пок} \left(1 - \frac{K_e}{100}\right).$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип действия измерителя коэффициента нелинейных искажений.
2. Поясните назначение основных функциональных элементов измерителя нелинейных искажений.
3. Перечислите основные технические характеристики измерителя нелинейных искажений.
4. Поясните, взаимосвязь коэффициента гармоник и коэффициента нелинейных искажений.
5. Поясните, как можно использовать анализатор спектра для измерения коэффициента гармоник, если его разрешающая способность позволяет наблюдать раздельно спектральные составляющие.

Практическое занятие №18. Порядок выбора рода работы цифрового частотомера при измерении частотно-временных параметров электрических сигналов

Цель занятия – изучить основные технические характеристики частотомеров электронно-счетных, научиться выбирать режим работы прибора в зависимости от частоты электрического сигнала.

Основные теоретические положения

Измерение частоты при помощи цифровых частотомеров основано на преобразовании исследуемого сигнала в последовательность кратковременных импульсов той же частоты и на счете N_f этих импульсов за известный строго определенный интервал времени $\tau_{сч}$ (время счета) [2 – 10]. Структурная схема прибора в режиме измерения частоты приведена на рис. 18.1.

Так как прибор измеряет усредненное значение частоты, точность растет с увеличением частоты и времени счета ($\tau_{сч}$). Чтобы уменьшить погрешность измерения, необходимо увеличить $\tau_{сч}$, что приведет к ухудшению быстродействия прибора. Одновременно нестабильность $\tau_{сч}$ приводит к увеличению погрешности измерения.

При измерении частоты, интервал времени $\tau_{сч}$ формируют из высокостабильных колебаний, создаваемых в приборе. Выбор частоты f_0 образцовых колебаний определяется удобством перевода числа N_f зафиксированного счетчиком, в величину искомой частоты, выраженную в герцах. Приборы допускают использование внешних источников образцовых колебаний с большой стабильностью частоты.

Частотомеры относятся к виду ЧЗ электронных измерительных приборов. Частотомеры – приборы универсальные, кроме частоты они измеряют отношения частот, отклонение частоты от номинала, а также период колебаний и временные интервалы.

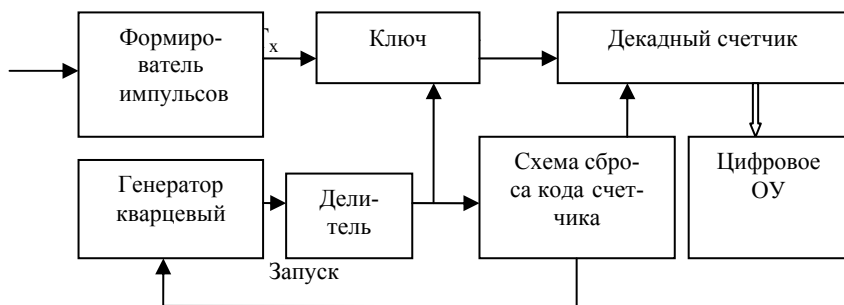


Рис. 18.1. Структурная схема цифрового частотомера в режиме измерения частоты

Верхний предел измеряемых частот ограничен из-за присутствия счетчиков в цифровых частотомерах. Число счетных декад в счетчиках цифровых частотомеров порядка 8 – 9. Результат измерения представлен в счетчиках в виде двоично-десятичного кода.

Точность цифровых частотомеров в основном ограничивают нестабильность частоты кварцевого генератора и погрешность из-за дискретности счета. Максимально-допустимая относительная нестабильность частоты кварцевого генератора за год $\delta_0=10^{-7}$. С целью уменьшения δ_0 в частотомерах применяют

термостатирование кварцевых генераторов или используют в них схемные элементы с термокомпенсацией. Погрешность дискретности определяется по формуле:

$$\delta_{\delta} = \frac{1}{f \cdot \tau_{сч}} . \quad (18.1)$$

и уменьшается с ростом времени счета. Однако этот путь повышения точности имеет ограничения, так как приводит к снижению быстродействия прибора.

Относительная погрешность измерения частоты определяется по формуле:

$$\delta_f = \sqrt{\delta_0^2 + \left(\frac{1}{f \cdot \tau_{сч}} \right)^2} . \quad (18.2)$$

Для расширения пределов измерений в сторону низких частот в серийно выпускаемых приборах предусматривают возможность измерения периода T колебаний с последующим вычислением частоты. Структурная схема прибора в режиме измерения периода приведена на рис.18.2. К преимуществам измерения периода колебаний следует отнести высокую разрешающую способность и постоянство точностных характеристик в широком диапазоне частот. Высокая точность достигается за счет использования повышенной частоты счетных импульсов T_m (меток времени) и многоразрядных отсчетных устройств.

Частота счетных N_T повышается путем умножения частоты f_0 исходных колебаний кварцевого генератора на 10^m , при этом период повторения меток времени

$$T_m = \frac{1}{10^m \cdot f_0} . \quad (18.3)$$

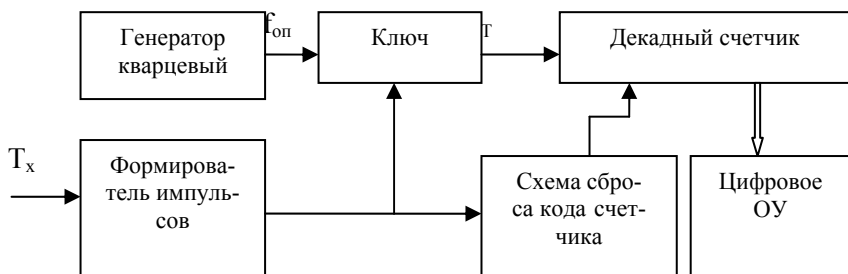


Рис. 18.2. Структурная схема цифрового частотомера в режиме измерения периода

Измерение периода колебаний цифровым частотомером основано на счете количества импульсов кварцевой частоты N_T (меток времени) за время длительности строб-импульса. Длительность строб-импульса при этом равна измеряемому периоду или кратна $n=10^k$ ($k=0-1-2-3-4$).

Относительная погрешность измерения периода гармонических колебаний определяется тремя составляющими: относительной погрешностью из-за нестабильности частоты f_0 кварцевого генератора δ_0 , относительной погрешностью дискретности

$$\delta_D = \frac{1}{N_m} = \frac{T_m}{n \cdot T} \quad (18.4)$$

и относительной погрешностью, обусловленной внешними шумами, поступающими вместе с измеряемым сигналом

$$\delta_{ш} = \frac{0,003}{n} \quad (18.5)$$

Относительная погрешность измерения периода определяется по формуле:

$$\delta_T = \sqrt{\delta_0^2 + \left(\frac{0,003}{n}\right)^2 + \left(\frac{T_m}{n \cdot T}\right)^2} \quad (18.6)$$

Примером универсального цифрового частотомера является ЧЗ-54. Прибор имеет восемь десятичных знаков на цифровом отсчетном устройстве (ЦОУ). Для расширения диапазонов измерений и перечня измеряемых величин предусмотрены сменные вставные блоки.

Прибор обеспечивает непосредственный отсчет результатов измерения в цифровой форме индикацией единиц измерения (МГц, кГц, мС, мкс), переполнения (П) десятичной точки. В режиме ПАМЯТЬ прибор обеспечивает хранение результата измерения на время цикла измерения.

Основные технические характеристики ЧЭС ЧЗ-54 приведены в табл.18.1.

Время счета прибора при измерении частоты по ВХОДУ А – 1, 10^2 , 10^3 , 10^4 мС (переключатель ВРЕМЯ СЧЕТА).

Прибор делит по ВХОДУ Б частоту входного сигнала с коэффициентом деления 1, 10, 10^2 , 10^3 , 10^4 и таким образом изменяет длительность строб-импульса при измерении периода колебаний (переключатель – МНОЖИТЕЛЬ).

Значение T_m определяется положением переключателя МЕТКИ ВРЕМЕНИ и составляет 0,01 мкс; 0,1 мкс; 1 мкс; 10 мкс; 0,1 мс; 1 мс.

Изменяя положение переключателей ВРЕМЯ СЧЕТА – МНОЖИТЕЛЬ и МЕТКИ ВРЕМЕНИ, можно получать числа N_f и N_T с различным числом десятичных разрядов. Если счетчик импульсов переполнен, загорается индикатор П.

Положение этих переключателей определяет место десятичной точки на индикаторе. Вместе с изменением положения ручки РОД РАБОТЫ изменяется буквенное обозначение единиц измерения.

При измерении частотно-временных параметров электрических параметров необходимо определить граничную частоту, при которой точность измерения частоты и периода равны, а также пределы изменения частот, где рационально измерить какой параметр (частоту или период), исходя из требований наибольшей точности измерений.

Таблица 18.1

Диапазон измеряемых частот, Гц	$10 \dots 10^8$
Максимально допустимая относительная погрешность измерения частоты δ_f , не более	$\pm \sqrt{\delta_0^2 + \left(\frac{1}{F_{\text{пок}} \cdot \tau_{\text{сч}}}\right)^2}$
Время счета $\tau_{\text{сч}}$, мс	1; 10; 100; 10^3 ; 10^4
Диапазон измеряемых периодов, с	$10^{-5} \dots 100$
Максимально допустимая относительная погрешность измерения периода δ_T , не более	$\pm \sqrt{\delta_0^2 + \left(\frac{0,003}{n}\right)^2 + \left(\frac{T_M}{n \cdot T_{\text{пок}}}\right)^2}$
Цена метки времени T_M , мкс	0,01; 0,1; 1,0; 10; 10^2 ; 10^3
Максимально допустимая относительная нестабильность частоты δ_0 кварцевого генератора за год, не более	$\pm 10^{-7}$
Множитель периода, n	1; 10; 10^2 ; 10^3 ; 10^4

Граничную частоту определяют по формуле:

$$f_{\text{гр}} = \frac{-0,003 \cdot \tau_{\text{сч}} + \sqrt{9 \cdot 10^{-6} \cdot \tau_{\text{сч}}^2 + 4 \cdot \tau_{\text{сч}} \cdot T_M \cdot n}}{2 \cdot \tau_{\text{сч}} \cdot T_M} \quad (18.7)$$

Задание 1. С помощью частотомера ЧЗ-54 измеряется частота сигнала $f_x \approx 100$ кГц. Определить, в каком режиме работы частотомера («Измерение частоты» или «Измерение периода») обеспечивается более высокая точность измерения. Оценить погрешность измерения. Полагать, что относительная долговременная нестабильность частоты кварцевого генератора $\delta_0 = \pm 10^{-7}$.

Задание 2. Определить количество периодов колебаний N_f сигнала, которое сосчитал счетчик цифрового частотомера, если при измерении частоты сигнала показание прибора составило

$f_{\text{нок}} = 25,5093$ кГц. Положение переключателя ВРЕМЯ СЧЕТА – 10 с.

Задание 3. Определить количество N_T счетных импульсов, следующих с периодом T_m (период следования меток времени), которое сосчитал счетчик цифрового частотомера, если показание прибора $T_{\text{нок}} = 1,234567$ мс. Положение переключателя МНОЖИТЕЛЬ – 10^4 , а переключателя МЕТКИ ВРЕМЕНИ – 1 мкс?

Задание 4. Для условия задания №3 определить время измерения периода сигнала.

Задание 5. Определить показание цифрового частотомера, если $N_{\text{max}} = 99999999$ (максимальное количество периодов колебаний N_f сигнала, которое может сосчитать счетчик цифрового частотомера) время счета $\tau_{\text{сч}} = 100$ мс, измеряемая частота $f_x = 6307341,52$ Гц.

Задание 6. Необходимо измерить частоту или период сигнала переменного тока синусоидальной формы при помощи цифрового частотомера.

Определить для значения показания частотомера $F_{\text{нок}}$ приведенного в табл.18.2 какой параметр (частоту или период) рационально измерить, исходя из требований наибольшей точности измерений. Определить пределы, в которых находится измеряемая физическая величина (частота или период).

Для выполнения задания, студент выбирает исходные данные из табл.18.2 по последней цифре собственного шифра.

Таблица 18.2

Параметры	Последняя цифра				
	0 – 1	2 – 3	4 – 5	6 – 7	8 – 9
$F_{\text{нок}}$ кГц	0,1	5	10	100	500

Указания

Необходимо использовать технические характеристики прибора, обратив внимание на точность показания цифрового частотомера при измерении частоты или периода. Сравнение δ_f и δ_T позволит сделать требуемый вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните назначение основных функциональных элементов ЧЭС.

2. Перечислите основные технические характеристики ЧЭС.

3. Пояснить сущность цифрового метода измерения частоты. Каковы источники погрешностей измерения. Чем ограничивается частотный диапазон ЧЭС «сверху» и «снизу».

4. Пояснить сущность цифрового метода измерения периода. По какой причине применяют режим измерения периода, а не измерение частоты? Каковы источники погрешности.

5. Как рассчитывается погрешность измерения частоты и периода частотомером ЧЗ-54. Как выбираются положения переключателей ВРЕМЯ СЧЕТА-МНОЖИТЕЛЬ И МЕТКИ ВРЕМЕНИ.

Практическое занятие №19. Изучение приборов и методов для наблюдения амплитудно-частотных характеристик

Цель занятия – изучить основные технические характеристики измерителей амплитудно-частотных характеристик, принцип действия, методы измерения.

Основные теоретические положения

Приборы, предназначенные для наблюдения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), называются измерителями АЧХ [1, 2, 7] и относятся к виду электронных измерительных приборов Х1 – приборы для наблюдения амплитудно-частотных характеристик.

Основным назначением измерителей АЧХ при настройке и контроле приемных устройств, каналов связи, а также радиотехнических блоков является измерение параметров частотной избирательности, к которым относятся:

- амплитудно-частотная характеристика;
- полоса пропускания;
- неравномерность АЧХ.

Простейшая структурная схема для измерения АЧХ по точкам приведена на рис.19.1.

Методика измерения в этой схеме сводится к следующему. Изменяя частоту выходного напряжения генератора стандартных сигналов (независимая переменная) в заданном диапазоне частот и поддерживая неизменной амплитуду на входе $U_{вх}$ исследуемого объекта, на каждой частоте f измеряют напряжение $U_{вых}$ электронным вольтметром на выходе измеряемого объекта (зависимая переменная).

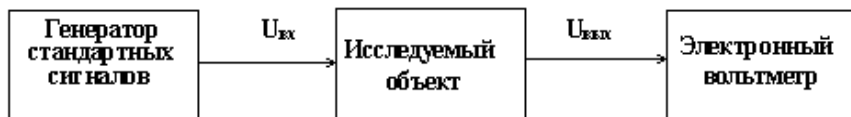


Рис.19.1. Структурная схема измерения АЧХ по точкам

Каждая пара таких величин дает точку на плоскости в прямоугольной системе координат $U_{вых}$ и f (рис.19.2). Огибающая, проведенная по этим точкам, воспроизводит амплитудно-частотную характеристику, так как при $U_{вх} = const$ напряжение $U_{вых}$ пропорционально модулю коэффициента передачи исследуемого объекта

$$K(f) = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}. \quad (19.1)$$

Таким образом, кривая АЧХ получается графическим интерполированием, т.е. плавным соединением рассчитанных точек.

Данный способ измерения обладает целым рядом недостатков:

- снятие кривой по точкам, число которых прямо зависит от требуемой точности, занимает длительное время;
- ввиду того, что кривая воспроизводится по точкам, возможны пропуски резких изменений кривой в промежутках между ними;
- на АЧХ измеряемого объекта могут влиять колебания окружающей температуры и питающего напряжения, что в свою очередь при длительном времени снятия характеристики может при-

вести к ошибкам. В этом случае АЧХ необходимо измерить несколько раз, а затем обработать их результаты.

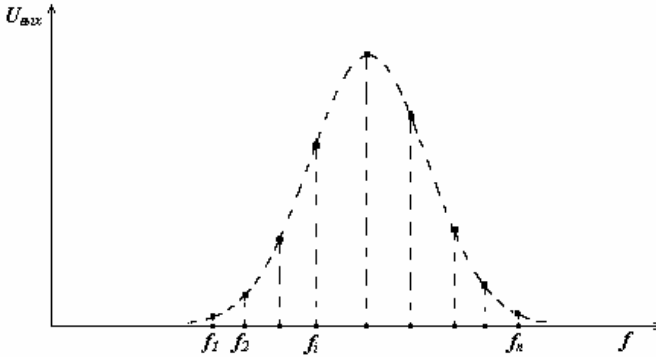


Рис.19.2. Измерение АЧХ по точкам

Способ измерения АЧХ с использованием преобразования Фурье. Для линейных четырехполюсников с постоянными параметрами (когда моделью четырехполюсника служит линейное динамическое звено) АЧХ может быть получена путем использования преобразования Фурье от импульсной характеристики. Частотный коэффициент передачи и импульсная характеристика связаны между собой следующим соотношением

$$K(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (19.2)$$

преобразование Фурье отклика измеряемого объекта на входное воздействие в виде короткого импульса единичной площади есть комплексный коэффициент преобразования.

При экспериментальном определении АЧХ приходится считаться с тем, что реальные испытательные сигналы несколько отличаются от их теоретических моделей. Поэтому определение параметров испытательного сигнала – важнейший этап подготовки к определению АЧХ исследуемых объектов.

Данный способ реализуется в измерителях с цифровой обработкой сигналов и применением быстрого преобразования Фурье.

Способ измерения АЧХ с использованием генератора качающейся частоты и осциллографического индикатора. Измерение АЧХ сможет быть осуществлено за короткое время, если для изменения частоты напряжения, подаваемого на вход измеряемого объекта, использовать генератор качающейся частоты (или генератор в котором предусмотрена внутренняя или внешняя частотная модуляция), а на выходе детектор и осциллограф. Структурная схема, реализующая данный способ измерения, приведена на рис.19.3

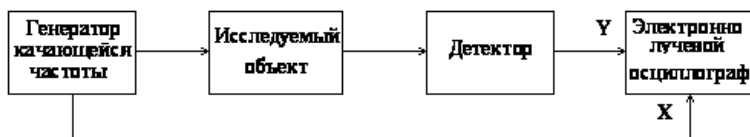


Рис.19.3. Структурная схема измерения АЧХ с использованием генератора качающейся частоты и электронно-лучевого осциллографа

На вход измеряемого объекта подается напряжение с выхода генератора качающейся частоты. С приближением частоты к резонансной напряжение на нагрузке растет и соответственно изменяется напряжение на нагрузке детектора. Напряжение с детектора подводится к входу Y осциллографа. Одновременно со смещением по вертикали пятно под влиянием развертки осциллографа смещается и по горизонтали, в результате чего на экране получается кривая, соответствующая частотной характеристике измеряемого объекта. Модуляция частоты генератора может производиться напряжением развертки осциллографа. При внутренней частотной модуляции развертка осциллографа синхронизируется частотой качания генератора.

Данный способ измерения существенно уменьшает время измерения параметров АЧХ, повышает качество настройки радиоаппаратуры.

На его использовании построены измерители АЧХ, принципы, техническая реализация и применение которых будут рассмотрены далее.

Таким образом, по АЧХ исследуемого устройства измеряют параметры частотной избирательности – полосу пропускания и неравномерность АЧХ. Для средств измерения с цифровой обработкой сигналов целесообразно использовать способ измерения АЧХ путем БПФ. В основу построения приборов для измерения АЧХ положены принципы линейного изменения частоты и постоянства амплитуды на входе исследуемого устройства.

Задание 1. Используя генератор высокочастотный Г4-102 и электронный вольтметр ВЗ-57 построить АЧХ четырехполюсника по точкам. По АЧХ измерить полосу пропускания.

Исходные данные для выполнения задания приведены в табл.19.1.

Таблица 19.1

f , МГц	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
U , мВ	5	10	25	45	55	58	47	52	57
f , кГц	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
U , мВ	45	59	38	47	53	48	35	22	6

Задание 2. Изучить назначение и основные технические характеристики одного из типовых приборов для измерения АЧХ.

Для выполнения задания, студент выбирает исходные данные из табл.19.2 по последней цифре собственного шифра. В качестве источника информации для отработки данного задания студент может воспользоваться интернет ресурсами, ЭБС или библиотекой Университета.

Таблица 19.2

Условное обозначение прибора	Последняя цифра				
	0 – 1	2 – 3	4 – 5	6 – 7	8 – 9
X1-53	+		+		+
X1-54		+		+	

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите особенности измерения АЧХ.
2. Перечислите параметры частотной избирательности радиотехнических блоков.
3. Перечислите способы измерения АЧХ.
4. Перечислите достоинство и недостатки измерения АЧХ по точкам.
5. Поясните порядок измерения неравномерности и ширины полосы пропускания АЧХ.
6. Поясните сущность способа измерения АЧХ с использованием преобразования Фурье.
7. Поясните сущность способа измерения АЧХ с использованием генератора качающейся частоты и осциллографического индикатора.

Практическое занятие №20. Определение полосы пропускания и неравномерности амплитудно-частотных характеристик

Цель занятия – научиться измерять полосу пропускания, неравномерность амплитудно-частотных характеристик, производить оценку искажений и динамических погрешностей измерений.

Основные теоретические положения

По построенной АЧХ (рис.20.1) можно измерить ширину полосы пропускания

$$\Delta F = f_2 - f_1 \quad (20.1)$$

и определить неравномерность частотной характеристики.

Снятая частотная характеристика показывает, насколько равномерно усиливаются частоты, подаваемые на вход исследуемого объекта с генератора стандартных сигналов.

Степень частотных искажений, определяемая по частотной характеристике, обычно оценивается частотной неравномерностью, представляющей собой отношение наибольшего или наи-

меньшего выходного напряжения в определенном техническими условиями диапазоне частот к напряжению на средней частоте.

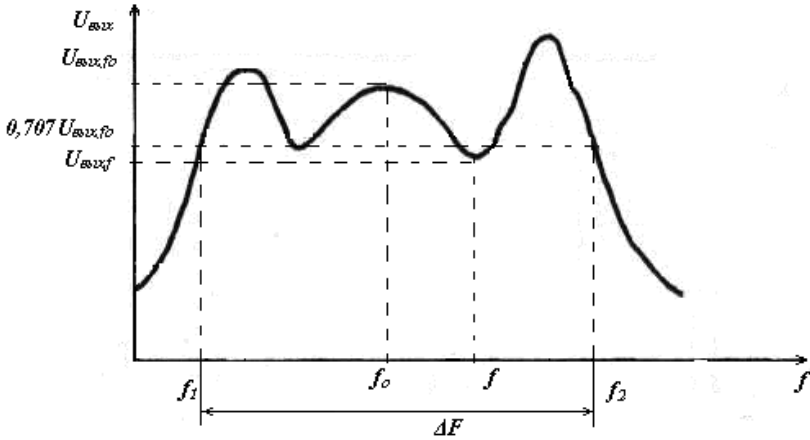


Рис.20.1. Определение полосы пропускания и неравномерности частотной характеристики

Неравномерность частотной характеристики измеряется в децибелах и рассчитывается по формуле:

$$A = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}f}}{U_{\text{вых}f_0}} \text{ дБ}, \quad (20.2)$$

где $U_{\text{вых}f}$ — выходное напряжение на заданной частоте f ;

$U_{\text{вых}f_0}$ — выходное напряжение на средней частоте.

Таким образом, частотная неравномерность зависит от вида частотной характеристики исследуемого объекта и приводит к нелинейным искажениям сигнала.

Динамические погрешности измерения. При измерении АЧХ по отдельным точкам характеристики, как правило, измерение в любой из них проводится довольно продолжительное время, и переходные процессы в исследуемом устройстве, связанные с

перестройкой частоты от одной точки к другой почти не влияют на форму АЧХ, так как время измерения практически всегда значительно больше времени установления системы. Поэтому в статическом режиме измеряют истинные АЧХ.

В измерителях АЧХ частота изменяется значительно быстрее, чем при измерении по отдельным точкам. Поэтому получаемая частотная характеристика из-за переходных процессов в исследуемом устройстве может значительно отличаться от истинно статической. В целом это отличие тем больше, чем больше скорость изменения частоты. Полученная таким образом характеристика называется динамической АЧХ.

Параметр, который характеризует динамические искажения исследуемой АЧХ, определяется выражением

$$\mu = \frac{V_{\text{гкч}}}{\Delta F}, \quad (20.3)$$

где $V_{\text{гкч}} = \frac{\Delta f_{\text{кач}}}{T_p}$ – скорость изменения частоты генератора

качающейся частоты;

ΔF – полоса пропускания амплитудно-частотной характеристики измеряемого объекта;

$\Delta f_{\text{кач}}$ – полоса качания генератора качающейся частоты;

T_p – период развертки.

В динамическом режиме имеют место уменьшение максимума резонансной кривой, смещение ее по оси частот и увеличение полосы пропускания. Указанные эффекты возрастают с увеличением скорости изменения частоты ГКЧ. При больших значениях μ наблюдаются также осцилляции кривых, что объясняется сложением вынужденных колебаний с собственными колебаниями контура.

Динамические погрешности определяются схемой исследуемого устройства (типом колебательной системы) и значением параметра μ . При этом время анализа АЧХ определяется выражением:

$$T_a \geq (10 \dots 20) \frac{\Delta f_{\text{кач}}}{\Delta F^2} \quad (20.4)$$

На практике при выборе скорости изменения частоты ГКЧ используют способ контроля динамических погрешностей путем уменьшения полосы качания ГКЧ или частоты развертки. Если при этом не наблюдается увеличения максимума амплитудно-частотной характеристики или смещения его по оси частот, то можно считать, что динамические искажения малы.

Задание 1. Для условия задания 1 (практическое занятие 19) определить неравномерность АЧХ четырехполосника.

Задание 2. Определить параметр μ , который характеризует динамические искажения исследуемой АЧХ, если полоса пропускания амплитудно-частотной характеристики измеряемого четырехполосника составляет ΔF , полоса качания генератора качающейся частоты $\Delta f_{\text{кач}}$, а период развертки T_p .

Для выполнения задания, студент выбирает исходные данные из табл.20.1 по последней цифре собственного шифра.

Таблица 20.1

Параметры	Последняя цифра				
	0 – 1	2 – 3	4 – 5	6 – 7	8 – 9
ΔF , кГц	150	250	400	600	800
$\Delta f_{\text{кач}}$, МГц	0,8	1,2	1,8	2,5	3
T_p , мс	40	50	60	70	80

Указания

Необходимо воспользоваться формулой для определения параметр μ , который характеризует динамические искажения исследуемой АЧХ, которая имеет вид

$$\mu = \frac{V_{\text{ГКЧ}}}{\Delta F^2}.$$

Задание 3. Измеритель амплитудно-частотных характеристик имеет следующие положения переключателя РАЗВЕРТКА СКОРОСТЬ «мс/дел», определяющего масштаб по горизонтали (время прямого хода развертки): 10; 20; 50; 100; 200; 500.

Экран электронно-лучевой трубки измерителя по горизонтали имеет $L=10$ делений.

Выбрать положение переключателя РАЗВЕРТКА СКОРОСТЬ «мс/дел», при котором время анализа измеряемой АЧХ четырехполосника обеспечивает наименьшие динамические погрешности.

Для выполнения задания, студент выбирает исходные данные из табл.20.2 по последней цифре собственного шифра.

Таблица 20.2

Параметры	Последняя цифра				
	0 – 1	2 – 3	4 – 5	6 – 7	8 – 9
ΔF , кГц	200	400	600	800	1000
$\Delta f_{\text{кач}}$, МГц	0,5	1	1,5	2,5	4,5

Указания

Необходимо воспользоваться формулой для определения времени анализа T_a измеряемой АЧХ, которая имеет вид

$$T_a \geq (10 \dots 20) \frac{\Delta f_{\text{кач}}}{\Delta F^2},$$

где ΔF – полоса пропускания амплитудно-частотной характеристики измеряемого четырехполосника;

$\Delta f_{\text{кач}}$ – полоса качания генератора качающейся частоты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные требования к генератору качающейся частоты измерителя АЧХ.

2. Перечислите основные требования к детекторным головкам измерителя АЧХ.

3. Поясните принцип формирования частотных меток измерителя АЧХ из «нулевых биений».

4. Перечислите причины появления искажений АЧХ и возникновения динамических погрешностей при измерении измерителем АЧХ.

5. Поясните порядок измерения ширины полосы пропускания и неравномерности АЧХ.

6. К какой подгруппе и виду электронных измерительных приборов относятся измерители АЧХ.

Практическое занятие №21. Изучение приборов для исследования вероятностных характеристик случайных процессов

Цель занятия – научиться измерять основные характеристики стационарных случайных процессов, а также изучить основные технические характеристики измерителей вероятностных характеристик.

Основные теоретические положения

Приборы для измерения характеристик случайных процессов относятся к виду Х6 – приборы для исследования вероятностных характеристик случайных процессов и могут измерять:

- функцию распределения вероятности;
- плотность распределения вероятности;
- числовые характеристики законов распределения вероятности случайных процессов.

При измерении характеристик случайных процессов возникают и ряд проблем, к которым следует отнести проблемы: стационарности и не стационарности, эргодичности и не эргодичности.

Стационарный случайный процесс характеризуется тем, что плотность вероятности не зависит от времени.

Нестационарный случайный процесс характеризуется тем, что плотность вероятности изменяется при сдвиге начала отсчета времени.

Эргодические случайные процессы – это стационарные случайные процессы, которые обладают свойством, заключающимся в том, что статистическую динамику можно проанализировать путем измерения только одной типовой реализации достаточно протяженной по времени. Для эргодических случайных процессов вероятностные характеристики могут быть определены как усреднением по времени, так и усреднением по ансамблю реализаций. Это позволяет при измерениях обходиться одной реализацией стационарного случайного процесса [2, 8, 11].

Условие эргодичности выполняется только для стационарного процесса. Таким образом, эргодические случайные процессы являются также стационарными. Все нестационарные процессы *неэргодические*, однако, *неэргодическими* могут быть и стационарные случайные процессы.

Измерение среднего значения стационарного случайного процесса. При аналоговом измерении получение оценки среднего значения сводится к усреднению сигнала за время анализа T

$$\bar{X} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt. \quad (21.1)$$

Структурная схема аналогового измерителя среднего значения приведена на рис.21.1.



Рис.21.1. Структурная схема аналогового измерителя среднего значения

Его основным узлом является усреднитель, характеристики которого определяют характеристики прибора в целом. Усреднитель выполняется всевозможными фильтрами нижних частот. Например, интегрирующими RC – цепочками или интегрирующими звеньями, построенными на основе использования усилителей постоянного тока с глубокой отрицательной обратной связью [5, 22].

Измерение средней мощности стационарного случайного процесса. Для получения оценки средней мощности стационарного случайного процесса

$$\hat{X}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt \tag{21.2}$$

обычно используется квадратическое детектирование сигнала с последующим усреднением за время измерения T . Среднее значение выходного напряжения после квадратического преобразователя можно измерить магнитоэлектрическим прибором (рис.21.2).

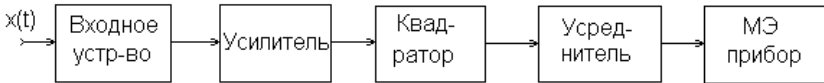


Рис.21.2. Структурная схема измерителя средней мощности

Среднюю мощность стационарного случайного процесса можно измерить с помощью вольтметров среднеквадратического значения, имеющих открытый вход. Показания такого вольтметра равно $\sqrt{\hat{X}^2}$ и не зависит от формы измеряемого напряжения.

Измерение дисперсии стационарного случайного процесса. Для получения оценки дисперсии стационарного случайного процесса, которая характеризует среднюю мощность переменной составляющей (флуктуаций) сигнала

$$S_x^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (X(t) - \hat{X})^2 dt \tag{21.3}$$

могут быть использованы устройства, приведенные на рис.21.3. Однако, входное устройство, должно содержать разделительную цепочку или фильтр верхних частот, посредством которых производится операция центрирования реализации исследуемого процесса.

Дисперсия стационарного случайного процесса может быть измерена также с помощью вольтметра среднеквадратического

значения, но с закрытым входом. Показания такого вольтметра будут соответствовать среднеквадратическому значению $S_x = \sqrt{S_x^2}$.

Особенности вольтметров:

- большая протяженность квадратичного участка характеристики детектора;
- применение на входе калиброванного аттенюатора;
- высокая чувствительность;
- широкополосное додетекторное усиление.

Таким образом, основным элементом устройств при измерении числовых характеристик является усреднитель.

Точность измерения числовых характеристик зависит как от протяженности интервала времени измерения, так и от точностных характеристик структурных элементов. Чем больше время усреднения, тем точнее измерения.

Задание 1. Выборки $u(i)$ реализации $u(t)$ стационарного случайного процесса $U(t)$ наблюдаются в моменты времени, разделенные интервалами длительностью 0,01 с. Значения выборок приведены в табл.21.1.

Требуется:

- а) оценить математическое ожидание этого процесса;
- б) определить дисперсию вашей оценки математического ожидания при условии, что истинная дисперсия равна 1,0.

Таблица 21.1

i	$u(i), B$	i	$u(i), B$	i	$u(i), B$
0	0,19	7	-1,24	14	1,45
1	0,29	8	-1,88	15	-0,82
2	1,44	9	-0,31	16	-0,25
3	0,83	10	1,18	17	0,23
4	-0,01	11	1,70	18	-0,91
5	-1,23	12	0,57	19	-0,19
6	-1,47	13	0,95	20	0,24

Задание 2. Случайный процесс определен выражением

$$X(t) = A + B \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \theta),$$

где A – случайная величина, равномерно распределенная в интервале $[a1, b1]$;

B – гауссовская случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной d ;

Θ – случайная величина, равномерно распределенная в интервале $[a2, b2]$;

f – постоянная.

Величины A , B и Θ статистически независимы. Вычислить математическое ожидание и дисперсию этого процесса.

Для выполнения задания, студент выбирает исходные данные из табл.21.2 по последней цифре собственного шифра.

Таблица 21.2

Данные	Последняя цифра шифра	
	0 - 4	5 - 9
$[a1, b1]$	$[-5, 5]$	$[-10, 10]$
d	25	16
$[a2, b2]$	$[-\pi/2, 3\pi/2]$	$[-\pi, \pi]$
f , Гц	2	4

Задание 3. Гауссовский стационарный случайный процесс (рис.21.3), имеет математическое ожидание, равное U_0 , и дисперсию, равную σ^2 . Необходимо, используя аналоговые электронные вольтметры (вид В3) с открытым и закрытым входом и детектором СКЗ измерить среднее значение случайного процесса. Показание вольтметра с закрытым входом составило $U_{нок1}$, а с открытым входом $U_{нок2}$.

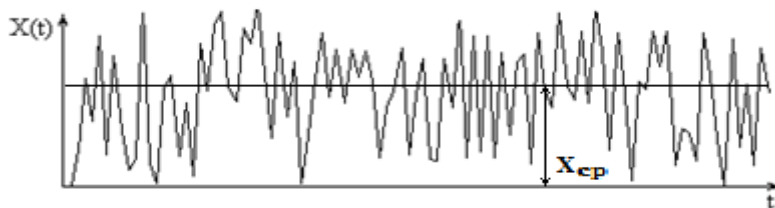


Рис.21.3. Реализация нормального стационарного случайного процесса

Для выполнения задания, студент выбирает исходные данные из табл.21.3 по последней цифре собственного шифра.

Таблица 21.3

Данные	Последняя цифра шифра	
	0 - 4	5 - 9
$U_{пок1}, мВ$	6	25
$U_{пр1}, мВ$	10	30
$KлT1$	1,0	1,5
$U_{пок2}, мВ$	80	250
$U_{пр2}, мВ$	100	300
$KлT2$	1,5	2,0

Указания

Необходимо вспомнить, что дисперсия стационарного случайного процесса может быть измерена также с помощью вольтметра среднеквадратического значения, но с закрытым входом. Показания такого вольтметра будут соответствовать среднеквадратическому значению $S_x = \sqrt{S_x^2}$.

Среднюю мощность стационарного случайного процесса можно измерить с помощью вольтметров среднеквадратического значения, имеющих открытый вход. Показания такого вольтметра равно $\sqrt{\hat{X}^2}$ и не зависит от формы измеряемого напряжения.

Следовательно, среднее значение стационарного случайного процесса может быть измерено по показаниям двух аналоговых электронных вольтметров (ВЗ) с закрытым входом и детектором СКЗ и открытым входом и детектором СКЗ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните основное назначение измерителей вероятностных характеристик.
2. Перечислите основные проблемы при измерении случайных процессов.
3. Поясните, от чего зависит точность измерения числовых характеристик стационарных случайных процессов.

4. Поясните, почему при измерении приборами для исследования вероятностных характеристик принимают эргодическую модель.

5. Перечислите основные особенности приборов для измерения характеристик случайных процессов.

6. Перечислите основные особенности электронных вольтметров пригодных для измерения средней мощности и дисперсии стационарного случайного процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В методических указаниях приводятся 5 практических занятий, которые построены по алгоритму: тема и цель занятия; основные теоретические положения, включая справочный материал; 2 – 3 практических задания и указания к их выполнению; контрольные вопросы, необходимые для самопроверки студентов при подготовке к занятию.

Для понимания основных вопросов, связанных с устройством и принципом действия средств измерений частоты электрических сигналов, характеристик радиоустройств и нелинейных искажений студентам необходимо знать основные положения лекционного материала, а также ряда ранее изученных дисциплин.

Методические указания «Методы и средства измерений и контроля» позволит студентам определить роль и место курса в процессе метрологического обеспечения производства, правильно выбирать и применять средства измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Адоменас П.* Измерители АЧХ и их применение/ П. Адоменас, Я. Аронсон, Е. Бирманас. – М.: Связь, 1968. – 243 с.
2. *Винокуров В.И.* Электрорадиоизмерения: учебное пособие для радиотехнич. спец. вузов/В.И. Винокуров, С.И. Каплин, И.Г. Петелин//Под ред. В.И. Винокурова. – 2-ое изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 351 с.
3. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 25 с.
4. *Куликовский К.Л.* Методы и средства измерений: учебное пособие для вузов/К.Л. Куликовский, В.Я. Купер. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
5. *Куликов Е.И.* Методы измерения случайных процессов/Е.И. Куликов. – М.: Радио и связь, 1986. – 351 с.
6. *Кукуш В.Д.* Электрорадиоизмерения: учеб. пособие для вузов /В.Д. Кукуш. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
7. *Кушнир Ф.В.* Электрорадиоизмерения: учебное пособие для вузов/Ф.В. Кушнир. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 383 с.
8. *Мирский Г.Я.* Радиоэлектронные измерения/Г.Я. Мирский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 600 с.
9. *Медякова Э.И.* Методы, средства и автоматизация измерений: учеб.пособие / Э.И. Медякова. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009. – 68 с.
10. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 № 102-ФЗ.
11. *Шишкин И.Ф.* Теоретическая метрология: учеб. для вузов/И.Ф. Шишкин. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 492 с.

Содержание

Введение.....	3
Практические занятия.....	5
Практическое занятие № 17. Расчет коэффициента гармоник и нелинейных искажений.....	5
Практическое занятие № 18. Порядок выбора рода работы цифрового частотомера при измерении частотно-временных параметров электрических сигналов.....	9
Практическое занятие № 19. Изучение приборов и методов для наблюдения амплитудно-частотных характеристик.....	16
Практическое занятие № 20. Определение полосы пропускания и неравномерности амплитудно-частотных характеристик.....	21
Практическое занятие № 21. Изучение приборов для исследования вероятностных характеристик случайных процессов.....	26
Заключение.....	32
Библиографический список.....	33

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
И ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОУСТРОЙСТВ**

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 27.03.01*

Сост.: *И.И. Сытько, К.В. Гоголинский*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
метрологии и управления качеством

Ответственный за выпуск *И.И. Сытько*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 29.01.2019. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 2,0. Усл.кр.-отт. 2,0. Уч.-изд.л. 1,6. Тираж 75 экз. Заказ 53. С 25.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2