

## Раздел 5. Измерение частоты, интервалов времени и фазового сдвига. Спектральный анализ. Измерение коэффициента гармоник

### 5.1. Измерение частотных, временных параметров сигнала и нелинейных искажений

В анализаторах спектра осуществляется сканирование сигнала по диапазону частот и на экране электронно-лучевой трубки строится зависимость амплитуды от частоты, то есть работает в частотной (спектральной) области. Прибор разлагает сигнал на отдельные частотные компоненты и представляет их в виде ряда вертикальных линий. Положение каждой линии на экране соответствует ее частоте, а длина отражает амплитуду сигнала на данной частоте.

Спектры периодических сигналов являются дискретными и образуются равностоящими спектральными линиями, которые называют гармониками. Форма огибающих спектра целиком определяется формой сигнала. Ширина спектра представляет собой интервал частот, где сосредоточена основная часть энергии сигнала.

Осциллограф показывает зависимость амплитуды сигнала от времени, т. е. работает во временной области. Осциллограф показывает, что форма сигнала близка к синусоидальной. На экране анализатора спектра (АС) каждая составляющая спектра видна отдельно, что позволяет более точно измерять искажения.

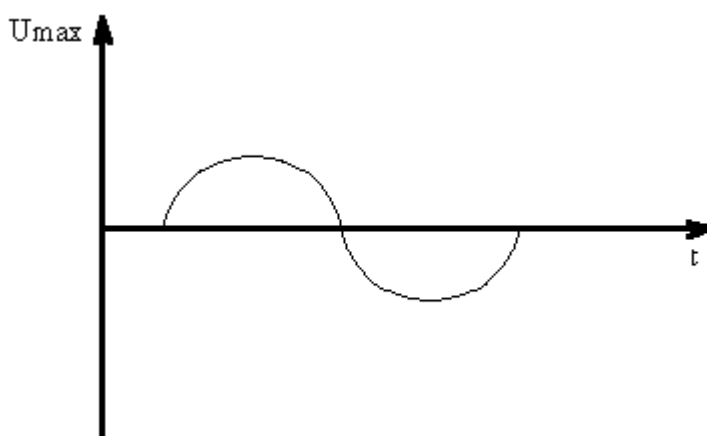


Рисунок 2.5.19 - Зависимость амплитуды сигнала от времени на экране осциллографа



Рисунок 2.5.20 - Зависимость амплитуды сигнала от частоты на экране анализатора спектра

АС электрических сигналов классифицируют по следующим признакам:

1. По способу анализа: последовательные, одновременные, смешанные;
2. По типу индикаторного устройства; осциллографические, с самописцем;
3. По диапазону частот: НЧ, ВЧ, СВЧ, широкодиапазонные.

Большинство анализаторов имеет обозначение С4 –...

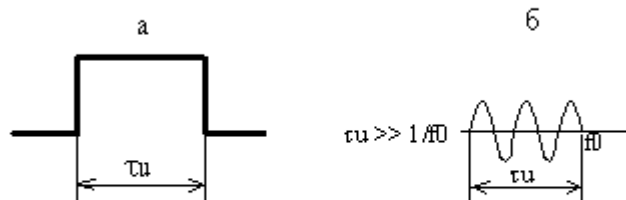
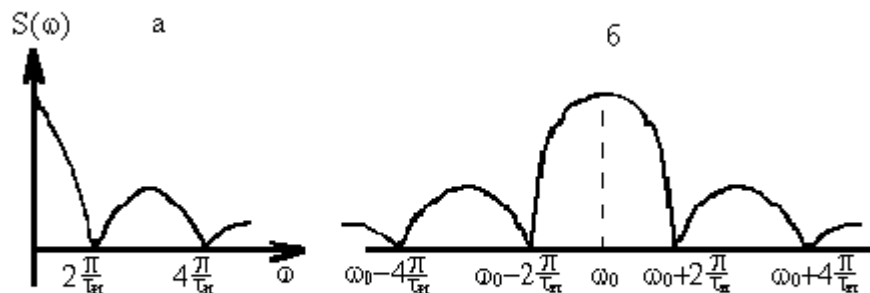


Рисунок 2.5.21 - Спектр одиночного видеоимпульса (а), радиоимпульса (б)



## Рисунок 2.5.22 - Амплитудный спектр видеоимпульса (а), радиоимпульса (б)

Основными характеристиками АС являются:

- 1. Разрешение** – способность различать сигналы соседних частот. Она определяется самой узкой полосой прибора на промежуточной частоте. Пример. Если полоса составляет 1 кГц – это означает минимальное разделение по частотам между двумя сигналами, которые могут быть разрешены.
- 2. Чувствительность** – способность регистрировать слабые сигналы. Она ограничена шумами, которые генерируются внутри прибора.
- 3. Максимальный уровень входного сигнала** (входной сигнал очень высокого уровня может повредить входные цепи анализатора. Сигналы, уровень которых ниже максимального, подвергаются сжатию в АС, амплитуда сигнала на экране ЭЛТ будет не точно отражать действительный уровень входного сигнала).
- 4. Оптимальный уровень входного сигнала** – значение, которое при определенном положении аттенюатора обеспечивает поддержание внутренних искажений ниже заданного уровня.
- 5. Динамический диапазон** – отношение максимального и минимального сигналов, которые могут одновременно наблюдаться на экране без заметных искажений.
- 6. АЧХ** – является мерой линейности амплитуды анализатора во всем его диапазоне частот. Линейность очень важна, т.к. главной задачей АС является сравнение амплитуд на различных частотах.

Современные АС управляются микропроцессорами. В них возможен: автоматический поиск максимума сигнала; цифровое усреднение (позволяет измерять слабые сигналы в присутствии шума, не прибегая к медленному сканированию); электронное управление координатной сеткой на экране; автоматический выбор оптимального разрешения, ширины полосы и скорости сканирования.

Вопросы для самопроверки:

1. Назначение АС.
2. Классификация АС.
3. Основные характеристики АС.
4. Роль микропроцессора в АС.

## § 58. СКАНИРУЮЩИЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА С ПЕРЕСТРОЙКОЙ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ



Используется для измерений на СВЧ. В нем применен фильтр с электронной перестройкой и очень узкой полосой пропускания. Фильтр управляется от генератора развертки, который генерирует пилообразное напряжение. При этом центральная частота фильтра сканирует от минимального до максимального значения. Гармоника входного сигнала проходит через фильтр, только если его полоса пропускания настроена на частоту этой гармоники, так что входная цепь выделяет поочередно каждую из гармоник. Сигнал, прошедший через фильтр, детектируется, усиливается и затем подается на пластины вертикального отклонения ЭЛТ. Частота, соответствующая амплитуде сигнала в определенный момент времени, задается генератором развертки, который подключен к пластинам горизонтального отклонения ЭЛТ. Это позволяет получить на экране зависимость амплитуды входного сигнала от частоты.

Недостатки: низкая чувствительность; низкое разрешение (определяется шириной полосы фильтра и у перестраиваемого фильтра меняется с частотой).

Вопросы для самопроверки:

1. Структурная схема сканирующего АС с перестройкой высокой частоты.
2. Принцип действия АС.

## § 59. ТИПЫ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА

Человеческое ухо очень тонко реагирует на искажения в акустических системах. Хотя искажения вызываются многими приборами, во всех фигурируют усилители.

Типы искажений:

1. **Амплитудно–частотные** (возникают, если усилитель не обеспечивает одинакового усиления на всех частотах, поступающих на его вход).
2. **Фазовые** (возникают, когда сигнал на выходе усилителя оказывается смещенным по фазе по отношению к входному сигналу. Если смещение

одинаково на всех частотах, искажения не будут заметны, но на практике, смещение на одних частотах больше, чем на других).

**3. Гармонические (нелинейные)** искажения обусловлены тем, что усилитель генерирует гармоники основной частоты входного сигнала. Гармоники представляют собой синусоидальные волны с частотами, кратными основной частоте входного сигнала. Гармоники всегда приводят к амплитудным искажениям, например, когда усилитель перевозбужден и ограничивает входной сигнал.

**4. Интермодуляционные** искажения являются следствием взаимодействия между двумя частотами. При этом возникают суммарная и разностная частоты двух исходных частот. Если в линейной цепи смешать сигналы высокой частоты ( $f_1$ ) и низкой частоты ( $f_2$ ), то на выходе сигнал будет содержать только две частоты. При смешивании в нелинейной цепи (например, в усилителе с искажениями), возникает модуляция. Выходной сигнал содержит теперь исходные частоты  $f_1$  и  $f_2$ , а также  $(f_1 + f_2)$  и  $(f_1 - f_2)$ , ряд гармоник суммы и разности их частот.

**5. Искажения типа «ступенька»** возникают в двухтактных усилителях из-за неверной установки уровней смещения.



#### Вопросы для самопроверки

1. Что представляют собой интермодуляционные искажения?
2. Где возникают искажения типа «ступенька»?
3. Нелинейные искажения.
4. Что представляют собой амплитудно-частотные искажения?
5. Фазовые искажения.

## § 60. НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

В технике звуковых и высоких частот приходится встречаться с несинусоидальными колебаниями, которые получаются в результате нелинейных искажений синусоидальных колебаний электрическими цепями, содержащими нелинейные элементы (диоды, транзисторы).

Под нелинейными искажениями понимают любое изменение формы сигнала, обусловленное нелинейностью тракта передачи. На практике

наиболее часто для оценки нелинейных сигналов используют коэффициент гармоник ( $K_G$ ), который характеризует отношение среднеквадратического значения напряжения возникающих гармонических составляющих к среднеквадратическому значению напряжения основной частоты:

$$K_G = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_i^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}$$

где  $U_1$   $U_2$   $U_3$  – амплитуды гармоник

Коэффициент гармоник является количественной характеристикой нелинейных искажений. Он характеризует отличие формы данного периодического сигнала от гармонической.

Значение коэффициента  $K_G$  может изменяться в пределах от 0 до  $\infty$ , что с практической точки зрения не совсем удобно. Поэтому на практике пользуются видоизмененным коэффициентом гармоник  $K_G'$ , представляющим собой отношение среднеквадратического значения напряжения высших гармонических составляющих к среднеквадратическому значению искаженного сигнала:

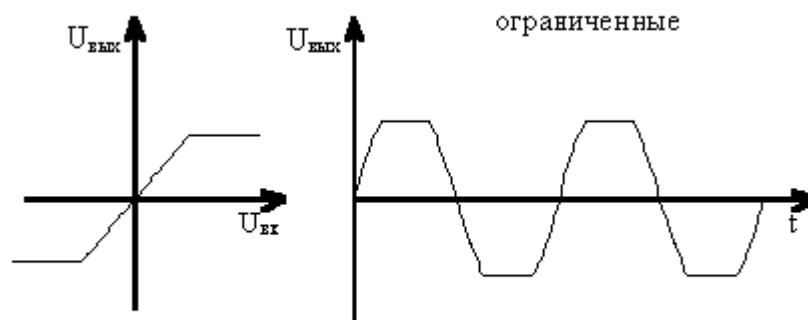
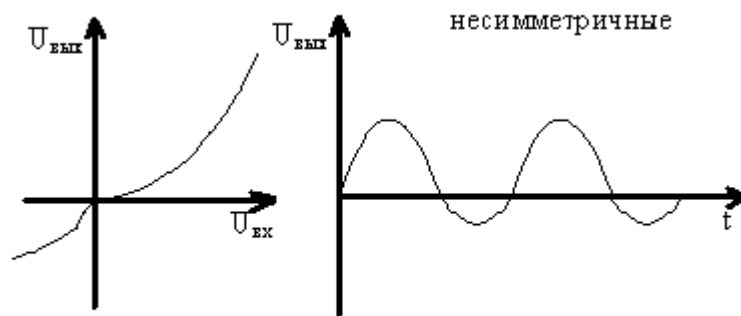
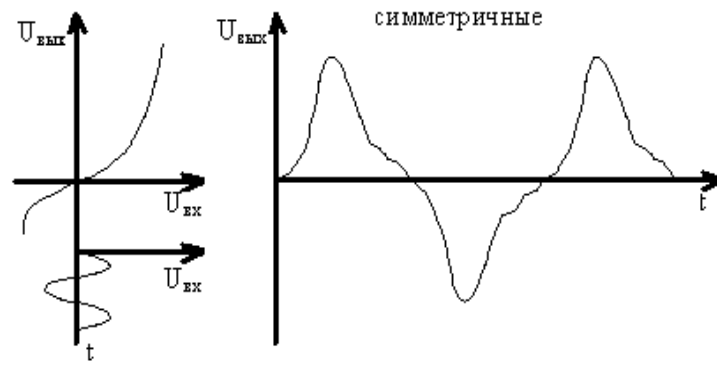
$$K_G' = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_i^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_i^2 + \dots + U_n^2}}$$

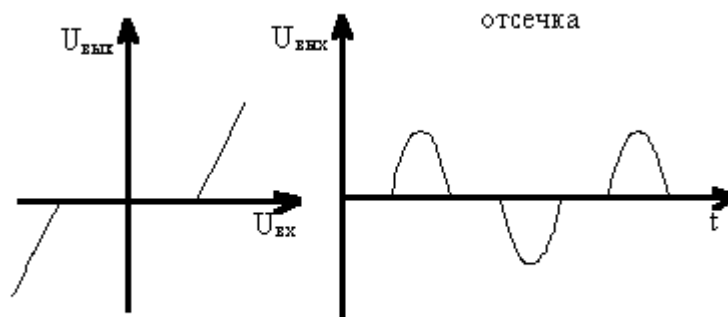
Значение коэффициента  $K_G'$  изменяются уже в диапазоне от 0 до 1.

Если на вход **линейной цепи** подать синусоидальное напряжение с частотой  $f$ , то на выходе этой цепи, наряду с основной частотой образуется ряд гармонических составляющих частот  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ , ...,  $nf$ , которые будут исказить исходный сигнал.

Если на выход **нелинейной цепи** подавать два синусоидальных напряжения с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , то на выходе такой цепи напряжение будет еще сложнее, так как в его составе кроме высших гармонических частот, кратных  $f_1$  и  $f_2$  ( $2f_1$ ,  $2f_2$ ,  $3f_1$ ,  $3f_2$ , ...) появится ряд комбинационных частот, не находящихся в кратном отношении с основными частотами  $f_1$  и  $f_2$ . Таким образом, сигнал на выходе нелинейного устройства сложен по составу вследствие нелинейных искажений.

Виды нелинейных искажений:





#### Вопросы для самопроверки

1. Причины возникновения нелинейных искажений.
2. Что представляют собой нелинейные искажения?
3. Что характеризует коэффициент гармоник?
4. Как зависит вид нелинейных искажений от характеристики цепи?

### § 61. ИЗМЕРИТЕЛЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Практически во всех измерителях НИ сигналов реализуется так называемый метод подавления основной частоты. Он заключается в раздельном измерении среднеквадратического значения напряжения искаженного сигнала и среднеквадратического значения напряжения высших гармоник (без первой) этого же сигнала, т.е. реализуется измерение коэффициента  $K_{\Gamma}$ . Упрощенная схема измерителя, реализующего данный метод, показана на рисунке 2.5.23.

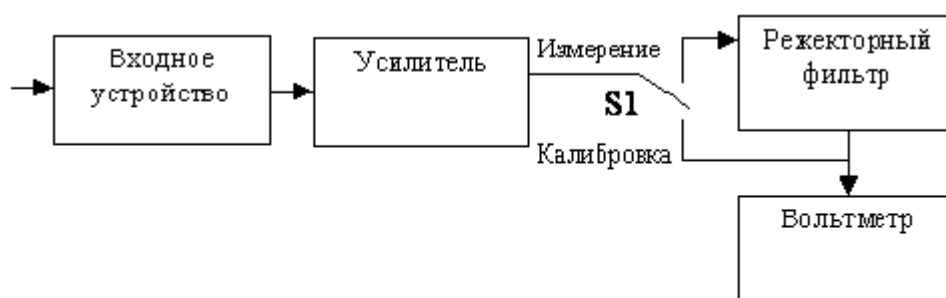


Рисунок 2.5.23 – Упрощенная схема измерителя нелинейных искажений

Измерению  $K_{\Gamma}$  предшествует режим калибровки измерителя, в результате которого показания вольтметра соответствуют среднеквадратическому значению напряжения искаженного сигнала, равного

условной единице (100%). Тогда при подавлении сигнала основной частоты с помощью режекторного (заграждающего) фильтра измеренное среднеквадратическое значение высших гармоник будет пропорционально коэффициенту  $K_{Г}$ .

Основными источниками погрешностей измерения коэффициента гармоник являются характеристики вольтметра, а также неточность настройки режекторного фильтра на частоту основной гармоники и компенсации ослабления высших гармоник.

Показания прибора равны:

$$K_{Г2} = \frac{U_{В.Г.}}{U_{и.с.}} \cdot 100\% ,$$

где  $U_{В.Г.}$  – среднеквадратическое значение напряжения высших гармоник;

$U_{и.с.}$  – среднеквадратическое значение напряжения исследуемого сигнала.

Действительное значение коэффициента гармоник равно:

$$K_{Г1} = \frac{U_{В.Г.}}{U_1} \cdot 100\% ,$$

где  $U_1$  – среднеквадратическое значение напряжения первой гармоники.

При показаниях прибора до 10% разница между значениями  $K_{Г1}$  и  $K_{Г2}$  незначительна, и отсчет коэффициента гармоник следует производить непосредственно по показаниям прибора Сб-5.

При показаниях прибора более 10% для определения действительного значения коэффициента гармоник необходимо воспользоваться формулой:

$$K_{Г1} = \frac{K_{Г2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{K_{Г2}}{100}\right)^2}} ,$$

где  $K_{Г2}$  – показания прибора, %.

#### Вопросы для самопроверки

1. Суть метода подавления основной частоты.
2. Структурная схема измерителя нелинейных искажений.
3. Для чего производят калибровку измерителя?
4. Источники погрешностей измерения  $K_{Г}$ .