

Частотные спектры электрических колебаний

Методическое пособие по лабораторной работе

20

Оглавление

Введение.....	29
Литература	30
Основы анализа цепей при негармонических воздействиях	30
Детерминированные и случайные сигналы, виды спектров	30
Измерение амплитудных спектров	32
Представление периодических колебаний рядами Фурье	34
Спектры периодических последовательностей прямоугольных импульсов	35
Преобразование периодических колебаний линейными цепями	37
Модулированные колебания	38
Амплитудно-модулированный сигнал	39
Сигналы с угловой модуляцией	39
Спектральный состав ЧМ-колебания	40
Спектр ЧМ-колебания при малом индексе модуляции	40
Гармоническая частотная модуляция при произвольном индексе m	41
Спектры хаотических (шумовых) колебаний	42
Описание и измерение шумов	42
Преобразование шумового колебания линейной цепью	43
Контрольные вопросы	44
Методические указания к лабораторной работе «Исследование частотных спектров»	45
Краткие сведения об анализаторе спектра	45
О принципе действия анализатора спектра	46
Режимы управления	48
Включение прибора и выполнение измерений	48
Задание по лабораторной работе	49
Дополнительные вопросы.....	51
Приложение 1. Фрагменты инструкции по эксплуатации С4-77.....	52
Приложение 2. Таблица перевода децибел в отношения напряжений	56

Авторы работы: доценты Ю. Н. Новиков, А. О. Фадеев

Введение

В лабораторной работе «**Частотные спектры электрических колебаний**» исследуются спектры периодических колебаний разной формы, а также спектры модулированных сигналов и шумов. В ходе работы анализируется изменение формы колебаний и частотного спектра при прохождении через цепи, обладающие фильтрующими свойствами. При выполнении экспериментов используются следующие приборы: генераторы колебаний, осциллограф, анализатор спектра.

Цель работы: закрепление и углубление знаний, полученных при теоретическом изучении способов спектрального и временного представления колебаний различного вида, а также методики спектрального анализа; овладение навыками измерений амплитудных спектральных диаграмм и спектральных характеристик шумовых процессов.

Программа работы включает исследование частотных спектров периодических колебаний специальной формы (меандра, пилообразного, треугольного), частотно-модулированного колебания, периодической последовательности прямоугольных импульсов, шумового напряжения. Изучается преобразование спектров фильтрами верхних и нижних частот.

Частотные спектры колебаний

Для подготовки к работе следует изучить в полном объеме данное пособие. Более подробные сведения по теме лабораторной работы можно найти в главе «Частотные спектры электрических колебаний, спектральный анализ» книги [1].

Литература

- 1 Ю. Н. Новиков. Электротехника и электроника. Теория цепей и сигналов, методы анализа: Учебное пособие – СПб, Питер, 2005.
2. Э. Ф. Зайцев, К. В. Гузенко. Радиотехнические цепи и сигналы. Флуктуационные колебания: Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2006.
3. Анализатор спектра С4-77. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. (Имеется в лаборатории «Основы радиоэлектроники и радиофизики»: СПбГПУ, каф. радиофизики, а.240 2-ой уч. корпус.)
4. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции/ Пер. с нем.; Под ред. Л. И. Седова — М.: Наука, 1968.

Основы анализа цепей при негармонических воздействиях

При исследовании преобразования сигналов линейными цепями во многих случаях целесообразно пользоваться *частотным описанием сигналов*, а именно: представлять (изображать) сигналы в виде *частотных спектров*, то есть *совокупностью гармонических колебаний* (в кратком изложении — *гармониками*). Переход к частотным спектрам позволяет согласовать способы описания сигнала и цепи, для которой известна *частотная характеристика*, а именно: *комплексный коэффициент передачи*, или *передаточная функция*. Поскольку любое реальное колебание или произвольный сигнал можно представить совокупностью гармонических колебаний, выявление формы сигнала на выходе линейной цепи сводится к анализу прохождения через цепь каждой гармоники по отдельности. Согласно *принципу суперпозиции*, отклик цепи на отдельную гармонику не будет зависеть от присутствия в спектре сигнала остальных гармонических составляющих. Если известна реакция цепи на гармоническое колебание произвольной частоты, суммируя (интегрируя) результат воздействия многих гармоник, можно вернуться к временному представлению сигнала на выходе цепи и таким образом выяснить, как данная цепь изменит заданный сигнал. Эта схема исследования составляет суть *спектрального анализа*. Умение оперировать спектрами позволяет во многих случаях выявлять изменение формы сигналов, не прибегая к сложным вычислениям.

Детерминированные и случайные сигналы, виды спектров

Сигналы, мгновенные значения которых в любой момент времени можно точно предсказать называют *детерминированными*. Таковыми являются, например, периодические колебания известной формы. Поскольку поведение детерминированных сигналов во времени известно, для них уместно (а иногда и более уместно) наряду с термином *сигнал* использовать термин *колебание*. Действительно, с понятием *сигнал* связывают перенос, доставку информации. И поэтому заранее, вообще говоря, неизвестно, какую форму сигнал примет. Однако в обиходе сложилась практика по отношению к *детерминированным сигналам* использовать термины *сигнал* и *колебание* как синонимы.

Для *случайных сигналов* указывают вероятностные характеристики их поведения во времени. Любой сигнал, несущий информацию, является по сути *случайным*. Но случайным (непредсказуемым) поведением характеризуются также процессы в электрических цепях, не связанные с передачей или преобразованием информации. Имеются в виде *хаотические колебания*, или *шумы*, как их принято называть. Такие колебания всегда присутствуют, как помехи, в любом устройстве и в любом опыте или акте измерений. Они могут быть настолько малы по сравнению с информационной составляющей сигнала, что их в расчет не принимают. Но когда имеют дело со слабыми сигналами, шумы начинают играть заметную роль. И для «полезных» случайных сигналов и для хаотических колебаний (шумов) используют вероятностный подход, базирующийся на *теории случайных процессов*.

В зависимости от характера временной функции, описывающей сигналы или колебания, их частотные спектры могут иметь разный вид. Различают колебания с *дискретным* и *непрерывным* спектром частот. Первые представляют конечными или бесконечными суммами (рядами) по тригонометрическим функциям, вторые представляют интегралами.

Для изображения спектров служат *спектральные диаграммы*, или *спектрограммы*: *амплитудные* и *фазовые*. На спектральных диаграммах по осям абсцисс откладывают частоты, а по осям ординат значения амплитуд или начальных фаз гармонических колебаний. В качестве примера на рис. 1, б, сверху показана *амплитудная спектральная диаграмма*, а на рис. 1, б, снизу *фазовая спектральная диаграмма* «одиночной» гармоники, изображенной на рис. 1, а. Наблюдают и измеряют спектральные диаграммы колебаний специальными приборами — *анализаторами спектров*.

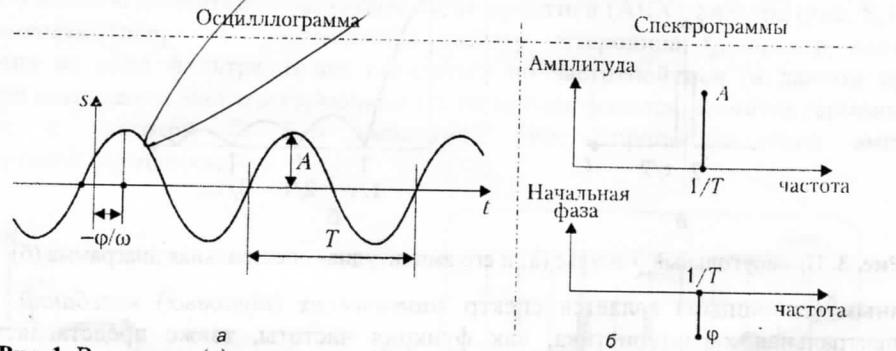


Рис. 1. Временное (а) и частотное (б) представление гармонического колебания

Если колебание *периодическое*, то есть характеризуется интервалом времени *T* (*периодом*) таким, что $s(t+T)=s(t)$, его можно представить суммой гармонических колебаний с определенными амплитудами и начальными фазами. Частоты гармоник кратны *частоте следования* колебаний равной $1/T$. Таким образом, спектр периодического колебания является *дискретным* или *линейчатым*. Для примера на рис. 2 показаны осциллограмма и спектрограммы периодической последовательности прямоугольных импульсов.

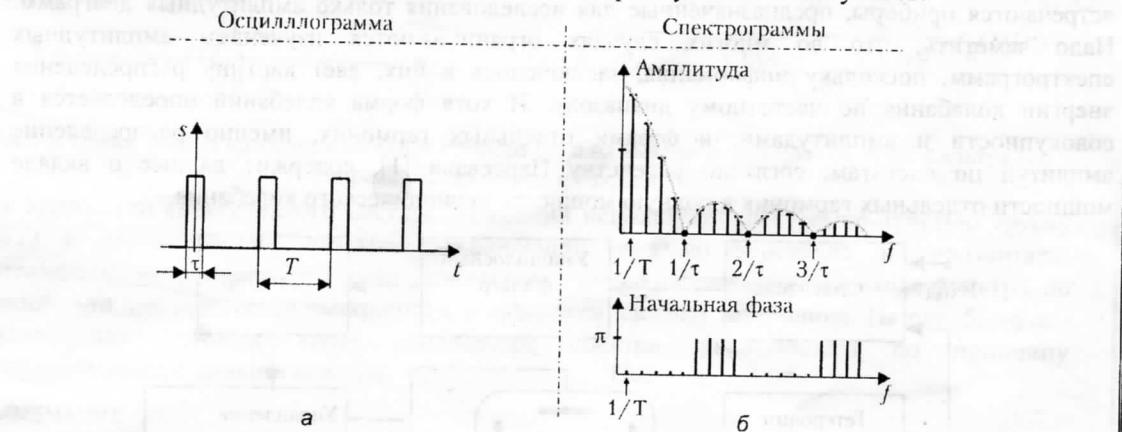


Рис. 2. Периодическая последовательность импульсов (а) и частотный спектр (б) этого колебания

Спектр линейчатого типа присущ также *квазипериодическим* (почти периодическим) колебаниям ([1]). Однако в отличие от периодических колебаний частоты отдельных гармоник, составляющих спектр квазипериодических колебаний, не обязательно находятся в кратном отношении.

Непериодические процессы — таковыми являются *информационные сигналы*, *одиночные импульсы*, *хаотические колебания* (*шумы*) — обладают *сплошным* или *непрерывным* спектром. Интуитивно к такому выводу можно прийти, представляя одиночный импульс частью периодической последовательности, период которой неограниченно увеличивается. Действительно, при увеличении интервала между импульсами гармоники на спектральных



диаграммах периодических последовательностей импульсов сближаются: чем реже следуют импульсы, тем меньше расстояние между соседними гармониками (оно равно $1/T$). Спектр одиночного импульса (предельный случай увеличения периода) становится непрерывным, и вводится он не рядами, а *интегралами Фурье*. Это означает, что в окрестности любой частоты, какой бы малой ни была полоса частот, присутствует энергия электрических колебаний. Пример амплитудной спектральной диаграммы для одиночного импульса показан на рис. 3. По оси ординат спектральной диаграммы отложен модуль *спектральной плотности*, понятие которой разъяснено в [1].

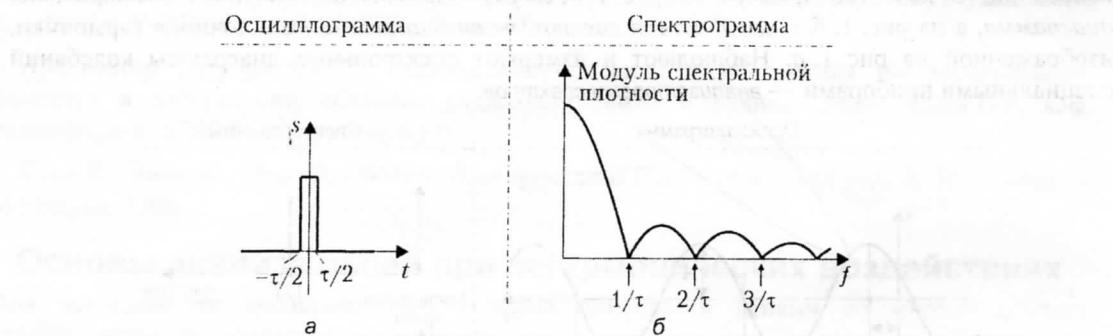


Рис. 3. Прямоугольный импульс (а) и его амплитудная спектральная диаграмма (б)

Непрерывным (сплошным) является спектр хаотических (шумовых) колебаний. В этом случае спектральная характеристика, как функция частоты, также представляет собой хаотический (случайный) процесс, статистические параметры которого определяются спецификой конкретного случайного временного процесса (подробно об этом см. в [2]).

Измерение амплитудных спектров

Для наблюдения и измерения спектров колебаний служат приборы, называемые *анализаторами спектров*. Существуют анализаторы, позволяющие наблюдать как амплитудные, так и фазовые спектральные диаграммы. Чаще в измерительной практике встречаются приборы, предназначенные для исследования только амплитудных диаграмм. Надо заметить, что во многих случаях ограничиваются изучением амплитудных спектрограмм, поскольку информация, заключенная в них, дает картину распределения энергии колебания по частотному диапазону. И хотя форма колебаний определяется в совокупности и амплитудами, и фазами отдельных гармоник, именно распределение амплитуд по частотам, согласно равенству Парсеваля [1], содержит данные о вкладе мощности отдельных гармоник в полную мощность периодического колебания.



Рис. 4. Упрощенная схема наблюдения амплитудных спектрограмм

На рис. 4 приведена упрощенная структурная схема, поясняющая идею прибора, который предназначен для исследования амплитудных спектральных диаграмм. Он построен по принципу *последовательного анализа спектра*.

Исследуемый сигнал (предположим, что его амплитудная спектрограмма $S(f)$ выглядит так, как показано на рис. 5, а) поступает на вход преобразователя частотного спектра — смесителя. На другой вход смесителя подается гармоническое напряжение, источником которого является вспомогательный генератор — гетеродин. На выходе смесителя формируется *смешанное колебание*, спектр которого ($S_\Sigma(f)$ на рис. 5, б) повторяет спектр исследуемого сигнала, но сдвинут по частотной оси на интервал, равный частоте гетеродина f_g . В спектре присутствуют гармоники суммарных и разностных частот: $F_{A''} = f_g + F_A$, $F_{B''} = f_g + F_B$, $F_{C''} = f_g + F_C$, ..., $F_{A'} = f_g - F_A$, $F_{B'} = f_g - F_B$, $F_{C'} = f_g - F_C$, ... Преобразованное колебание после смесителя поступает на узкополосный фильтр, настроенный на частоту f_0 . Фильтр пропускает только колебания, частота которых попадает в узкую окрестность f_0 — центральной частоты амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра (рис. 5, в). Если плавно изменять (например, увеличивать) частоту гетеродина f_g , спектр колебаний, поступающих на вход фильтра, будет сдвигаться по частотной оси (в данном примере вправо). При совпадении частоты гармоники с f_0 на выходе фильтра появится гармоническое напряжение с частотой f_0 . Его амплитуда будет пропорциональна амплитуде соответствующей гармоники.

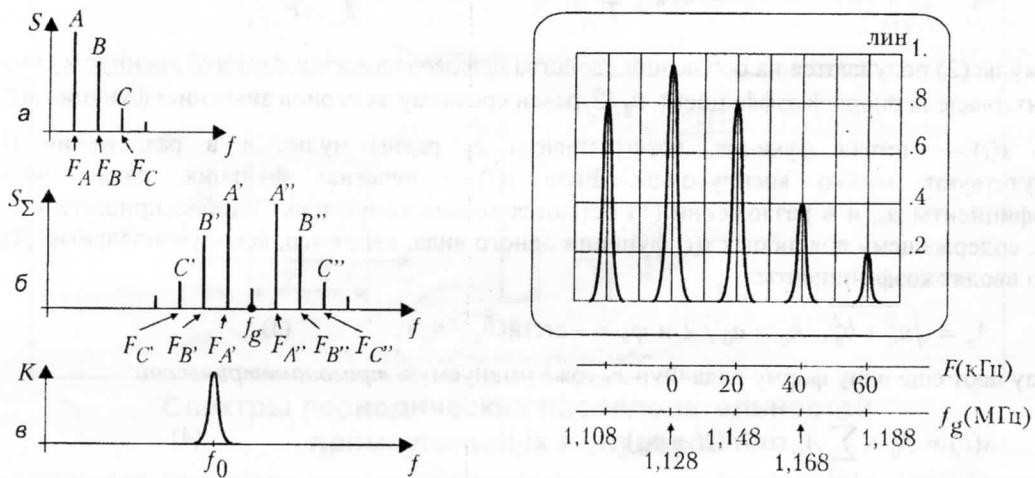


Рис. 5. Слева: спектр колебания на входе прибора (а) и на выходе смесителя (б), АЧХ фильтра (в);
справа: изображение на экране ЭЛТ

Для индикации спектрального состава колебаний используют электронно-лучевую трубку (ЭЛТ) с двумя парами пластин, отклоняющих луч по вертикали и горизонтали. Вертикальное отклонение луча пропорционально уровню напряжения на выходе фильтра, по горизонтали луч смещается синхронно с изменением частоты гетеродина. На рис. 5, справа показан для примера экран анализатора спектра, работающего по принципу последовательного анализа спектра.

ПРИМЕЧАНИЕ

В примере на рис. 5 подразумевается, что на вход анализатора подано колебание, в составе которого существенное значение имеют три гармоники с частотами 20, 40 и 60 кГц. Будем считать, что частота фильтра $f_0 = 1,128$ МГц, а частота гетеродина автоматически изменяется по линейному закону от 1,098 до 1,198 МГц. Луч ЭЛТ синхронно движется слева направо. Вторая отметка слева на рисунке экрана соответствует сигналу начального отклика. Он формируется в анализаторе для фиксации начала отсчета по частотной оси. Обычно в анализаторе можно в широких пределах регулировать диапазон наблюдаемых частот, а также сдвигать изображение спектра по экрану. Последнее означает сдвиг интервала изменения частоты гетеродина. Если в рассмотренном примере частоту гетеродина изменять в полосе от 1,128 до 1,228 МГц, все изображение сдвинется влево, и начальный отклик окажется на левом краю.

Описанный здесь в общих чертах принцип построения анализатора называют *гетеродинным*. Сходным образом функционирует *супергетеродинный приемник*, «сканирующий» эфир посредством перестройки частоты гетеродина. Такое устройство аппаратуры облегчает

реализацию узкополосных фильтров, подключаемых к выходу смесителя, поскольку центральная частота их полосы пропускания фиксирована.

Представление периодических колебаний рядами Фурье

Спектральное описание периодических колебаний базируется на разложении периодических функций в ряды Фурье. Пусть $s(t)$ — периодическое с периодом T колебание: $s(t+T)=s(t)$. Его можно представить суммой гармонических колебаний, совершающихся с частотами кратными $F=1/T$, а именно: F , $2F$, $3F$ и т. д. Частоту F (или $\Omega = 2\pi F = 2\pi/T$) называют *основной частотой*, или *частотой следования*, *частотой повторения*. Гармонику этой частоты именуют *основной* или *первой*, остальные (с кратными частотами) — *высшими гармониками*. Формула *тригонометрического ряда Фурье*, выражающая $s(t)$ суммой гармонических колебаний, выглядит так:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\Omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\Omega t) \quad (1)$$

Амплитуды гармоник этого ряда находят вычислением на интервале периода T интегралов:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{(T)} s(t) \cos(n\Omega t) dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{(T)} s(t) \sin(n\Omega t) dt, \quad \frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{(T)} s(t) dt. \quad (2)$$

Формулы (2) получаются на основании свойства *ортогональности функций* косинус и синус на интервале периода. Коэффициент $a_0/2$ равен среднему за период значению функции $s(t)$.

Если $s(t)$ — четная функция, коэффициенты b_n равны нулю, и в разложении (1) присутствуют только косинусоиды. Если $s(t)$ — нечетная функция, равны нулю коэффициенты a_n , и в разложении (1) остаются только синусоиды. Удобно привести (1) к ряду, содержащему для любых $s(t)$ функции одного вида, например, косинусоидальные. Для этого вводят коэффициенты:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad A_0 = a_0 / 2 \text{ и } \varphi_n = -\operatorname{arctg}(b_n / a_n), \quad (3)$$

и получают еще одну форму ряда Фурье, тоже именуемую *тригонометрической*:

$$s(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\Omega t + \varphi_n). \quad (4)$$

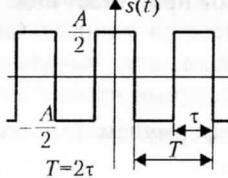
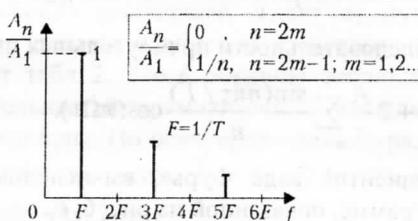
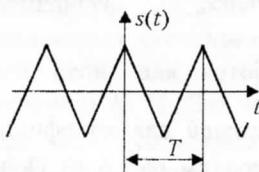
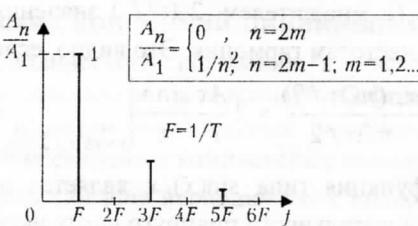
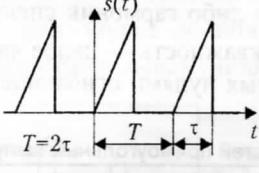
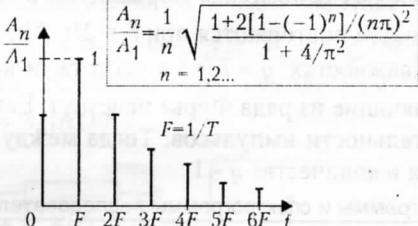
Физический смысл A_n и φ_n — амплитуды и начальные фазы гармоник, составляющих спектр. Совокупность коэффициентов A_n будем называть *амплитудным спектром*, совокупность коэффициентов φ_n — *фазовым спектром* периодического колебания. Их распределение по частотной оси отображают на соответствующих *спектрограммах*.

В табл. 1 приведены осциллограммы и спектрограммы (амплитудные спектральные диаграммы) для периодических колебаний разного вида. Там же представлены выражения для отношения амплитуд высших гармоник к амплитуде гармоники основной частоты.

Прокомментируем некоторые данные этой таблицы. Для прямоугольного симметричного колебания (*меандра*) четные гармоники в разложении отсутствуют. При том выборе начала отсчета времени, который показан на рисунке в таблице 1, ряд Фурье (1) состоит только из косинусоид. Если сдвинуть начало отсчета времени на половину периода, получится нечетная временная функция, и ряд будет состоять только из синусоид.

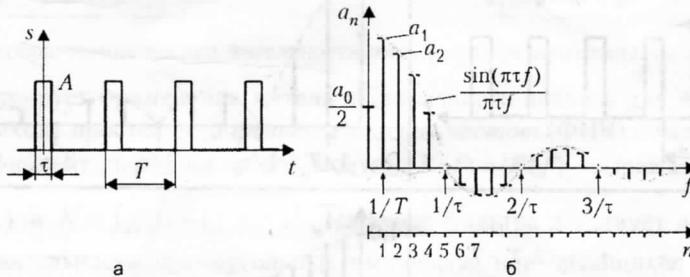
Оценим скорость убывания амплитуд высших гармоник по мере увеличения их номера. Из формул, приведенных в таблице, видно, что амплитуды гармоник ряда Фурье прямоугольного колебания убывают с ростом номера весьма медленно: как $1/n$. Медленная сходимость ряда — следствие скачков функции $s(t)$. Можно заметить, что коэффициенты ряда Фурье для треугольного колебания убывают значительно быстрее: как $1/n^2$. И это неудивительно, поскольку «треугольная функция» непрерывна.

Таблица 1. Осциллограммы и спектрограммы периодических колебаний разного вида

Осциллограммы	Спектрограммы
	
	
	

Спектры периодических последовательностей прямоугольных импульсов

В электронной аппаратуре различного применения широко используются периодические последовательности прямоугольных импульсов. При этом соотношения длительности импульса τ и периода колебания T могут сильно отличаться. Например, колебания, которые вырабатывают тактовые генераторы, задающие «тепм» работы компьютеров, характеризуются соизмеримыми значениями τ и T , а импульсы, применяемые в радиолокации, могут быть в сотни раз короче периода. Отношение T/τ называют скважностью импульса, а обратную величину (τ/T) — коэффициентом заполнения.



Частотные спектры колебаний

Рис. 6. Последовательность прямоугольных импульсов (а) и коэффициенты ряда Фурье (б)

Рассмотрим последовательность прямоугольных импульсов, имеющих амплитуду A , длительность τ и следующих с периодом T (рис. 6, а). Выберем начало отсчета времени так, как показано на рисунке, то есть, чтобы импульс был симметричен относительно нулевой отметки, и вычислим коэффициенты ряда Фурье (1). Поскольку функция $s(t)$ при таком положении осей оказывается четной, все b_n равны нулю, а для a_n получаем:

$$a_0 = 2A\tau/T; \quad a_n = 4 \frac{A}{T} \int_0^{\tau/2} \cos(n\Omega t) dt = \frac{2A}{n\pi} \sin(n\pi\tau/T). \quad (5)$$

Ряд Фурье для последовательности прямоугольных импульсов принимает вид:

$$s(t) = A \frac{\tau}{T} + 2 \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{n} \cos(n\Omega t).$$

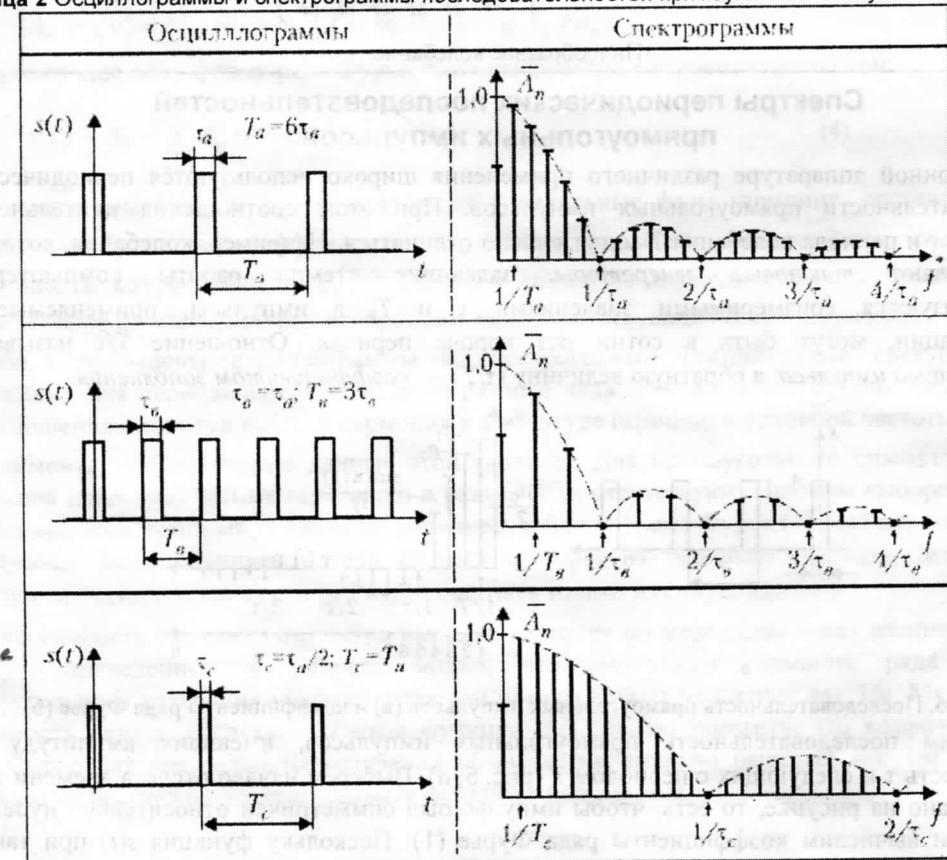
Значения коэффициентов ряда Фурье, вычисленные по формулам (5), изображены на спектральной диаграмме, показанной на рис. 6, б.

Коэффициенты a_n можно связать с функцией $\sin(x)/x$. Действительно, они будут пропорциональны (с множителем $2A\tau/T$) значениям функции $\sin(x)/x$ при аргументах, соответствующих частотам гармоник. Это видно, если выразить (5) переписать так:

$$a_n = 2 \frac{A\tau}{T} \frac{\sin(n\pi\tau/2)}{n\pi\tau/2} = 2 \frac{A\tau}{T} \frac{\sin x}{x} \Big|_{x=n\pi\tau/2}$$

Таким образом, функция типа $\sin(x)/x$ является *огибающей* для коэффициентов *Фурье-разложения* последовательности прямоугольных импульсов (см. рис. 6, б). Положение нулей огибающей на частотной оси f можно найти из условия $|\sin(\pi f)|=0$ или $\pi f = n\pi$, где $n = 1, 2, 3, \dots$. Первый раз огибающая обращается в нуль при частоте $f = 1/\tau$ (или $\omega = 2\pi/\tau$). Далее нули огибающей повторяются при $f = 2/\tau, 3/\tau, \dots$ и т. д. Эти частоты могут совпасть (при целочисленных скважностях $q = T/\tau$) с частотами каких-либо гармоник спектра, и данные частотные составляющие из ряда Фурье исчезнут. Если скважность — целое число, период T точно кратен длительности импульсов. Тогда между двумя нулями огибающей разместятся гармоники спектра в количестве $q - 1$.

Таблица 2 Осциллограммы и спектрограммы последовательностей прямоугольных импульсов



С увеличением периода T гармоники на спектральной диаграмме сближаются (спектр становится «гуще»). Однако изменение только периода не приводит к изменению формы огибающей амплитудного спектра. Эволюция огибающей (сдвиг ее нулей) зависит от длительности импульсов. Таким образом связаны параметры импульсов во временном и частотном представлениях иллюстрирует табл. 2. Здесь показана эволюция амплитудных спектральных диаграмм для последовательностей прямоугольных импульсов, у которых изменяются длительности импульсов и периоды. По осям ординат спектральных диаграмм отложены относительные значения амплитуд гармоник: $\tilde{A}_n = A_n / (2A\tau/T)$. Они рассчитаны по формулам: $A_0 = A\tau/T$; $A_n = |a_n| = 2A \frac{\tau |\sin(n\pi\tau/T)|}{n\pi\tau/T}$.

Преобразование периодических колебаний линейными цепями

Переход от временного описания периодического колебания к частотному спектру позволяет воспользоваться методом спектрального анализа и выяснить форму колебания на выходе линейной цепи, для которой известен комплексный коэффициент передачи (передаточная функция) $K(f)$. Эта величина связывает комплексные амплитуды колебаний на входе и выходе цепи. Рассмотрим преобразование периодических колебаний линейным четырехполюсником, коэффициент передачи которого: $K(f)$. Пусть на входе этой цепи действует периодическое колебание $s(t)$ с периодом T . Спектр $s(t)$ состоит из гармоник на частотах $nF = n/T$ с комплексными амплитудами S_n . Комплексные амплитуды V_n гармоник колебания $v(t)$ на выходе цепи найдем по формуле $V_n = S_n K(nF)$. Далее можно просуммировать ряд Фурье и получить колебание $v(t)$. Амплитуды гармоник этого колебания удовлетворяют выражению $V_n = S_n |K(nF)|$.

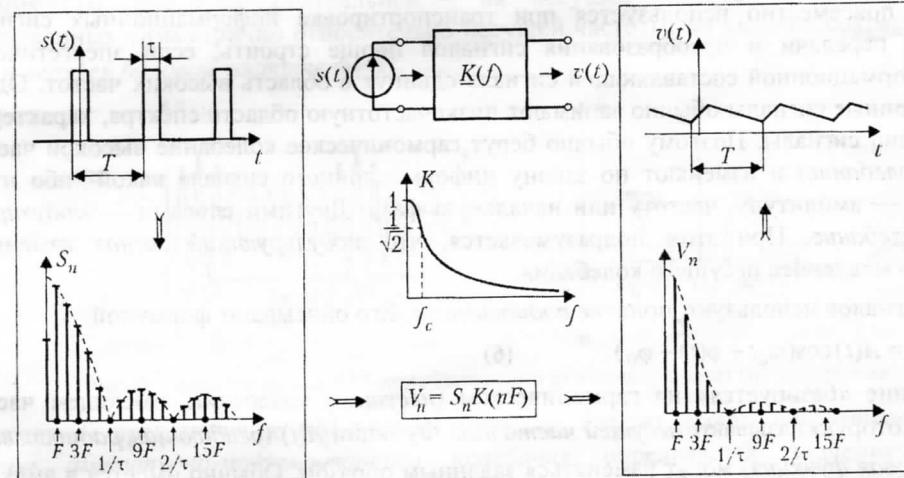


Рис. 7. Преобразование последовательности импульсов при прохождении через ФНЧ

Рисунок 7 иллюстрирует применение метода спектрального анализа для выяснения формы напряжения на выходе простейшего фильтра нижних частот (ФНЧ) с частотой среза АЧХ равной f_c . Коэффициент передачи и его модуль $K(f) = |K(f)|$ выражаются формулами:

$K = 1/(1 + jf/f_c)$ и $K = 1/\sqrt{1 + (f/f_c)^2}$. На входе фильтра действует источник ЭДС $s(t)$ в форме последовательности прямоугольных импульсов, повторяющихся с периодом T (с частотой повторения $F = 1/T$). Рисунок иллюстрирует случай $f_c < F$, $f_c \ll 1/\tau$, при этом практически все гармоники входного напряжения попадают в полосу заграждения ФНЧ, в которой $K(f) \approx f_c/f$. Следовательно: $V_n \approx S_n f_c / (nF)$. В методе комплексных амплитуд делению на частоту соответствует операция интегрирования. Таким образом, по отношению к данному входному колебанию рассматриваемая цепь ведет себя как интегрирующая. Это, впрочем, видно из рисунка.

Частотные спектры колебаний

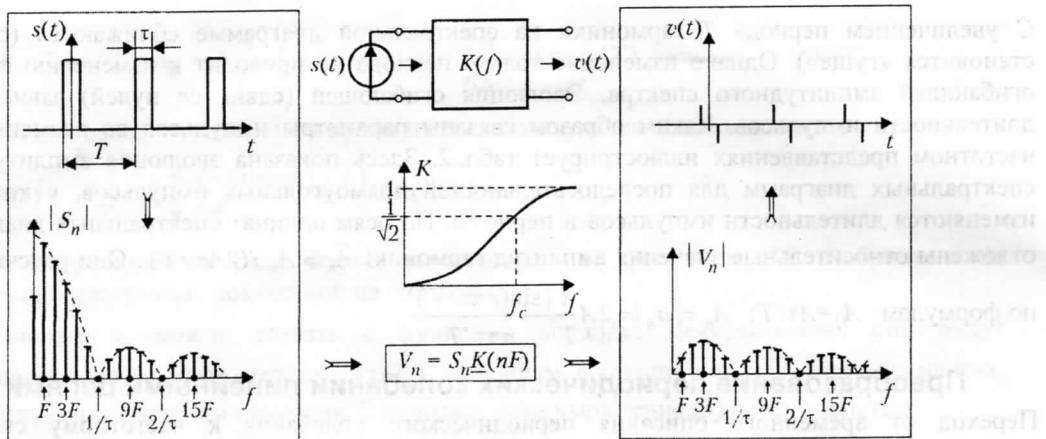


Рис. 8. Преобразование последовательности импульсов при прохождении через ФВЧ

Для фильтра верхних частот (ФВЧ) с частотой среза f_c коэффициент передачи: $K = 1/[1 - j(f_c/f)]$, $K = 1/\sqrt{1 + (f_c/f)^2}$. При $(1/\tau) \ll f_c$ (именно такой случай и показан на рис. 8) наиболее существенные для воспроизведения колебания гармоники попадают в полосу заграждения ФВЧ. В этой полосе $K(f) \approx f/f_c$. Следовательно, гармоники выходного напряжения вычисляются умножением на «свою» частоту. Известно, что такой операции соответствует дифференцирование. Таким образом, по отношению к данному входному колебанию рассматриваемая цепь ведет себя как дифференцирующая.

Модулированные колебания

Модуляция повсеместно используется при транспортировке информационных сигналов. Устройства передачи и преобразования сигналов проще строить, если энергетический спектр информационной составляющей сигнала сдвинут в область высоких частот. Однако информационные сигналы обычно занимают низкочастотную область спектра, характерный пример: аудио сигналы. Поэтому обычно берут гармоническое колебание высокой частоты (*несущее колебание*) и изменяют по закону информационного сигнала какой-либо из его параметров — амплитуду, частоту или начальную фазу. Другими словами — *модулируют несущее колебание*. При этом подразумевается, что *модулирующий сигнал* изменяется значительно медленнее несущего колебания.

В теории сигналов используют понятие *радиосигнала*. Его описывают формулой:

$$a(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \phi(t) + \phi_0). \quad (6)$$

Это колебание «базируется» на гармоническом (*несущем*) колебании, имеющем частоту $\omega_0 = 2\pi f_0$, которую называют *несущей частотой*. Функции $A(t)$ (*огибающая радиосигнала*), и $\phi(t)$ (*фазовая функция*) могут изменяться заданным образом. Обычно имеется в виду, что эти изменения происходят медленно по сравнению с несущей частотой, то есть за период несущей частоты $T_0 = 2\pi/\omega_0$ функции $A(t)$ и $\phi(t)$ меняются слабо.

Радиосигнал можно представить также через функцию $\psi(t)$, которую называют *полной фазой радиосигнала*: $a(t) = A(t) \cos(\psi(t))$. Производную полной фазы радиосигнала называют *мгновенной частотой* $\omega(t)$: $\omega(t) = \frac{d}{dt} \psi(t) = \omega_0 + \frac{d}{dt} \phi(t)$. Соответственно $\psi(t)$ можно выразить через интеграл мгновенной частоты:

$$\psi(t) = \int \omega(t) dt = \omega_0 t + \phi(t) + \phi_0. \quad (7)$$

Видно, что $\psi(t)$ содержит линейную часть $\omega_0 t$, фазовую функцию $\phi(t)$ и постоянную ϕ_0 .

Возможны разные варианты модуляции. Если полная фаза $\psi(t) = \omega_0 t + \phi_0$ (то есть является линейной функцией времени), а огибающая $A(t)$ изменяется по закону информационного

сигнала, имеем случай *амплитудной модуляции* (используют аббревиатуру АМ). Такой сигнал называют *амплитудно-модулированным* или *АМ-сигналом*. Если амплитуда постоянна, а информационный сигнал входит в состав полной фазы, имеем случай *угловой модуляции*. Ее можно реализовать в виде *фазовой модуляции* (ФМ) или *частотной модуляции* (ЧМ). Соответствующие сигналы становятся *ФМ-сигналом* или *ЧМ-сигналом*.

Амплитудно-модулированный сигнал

В общем случае АМ-сигнал можно представить в виде: $a_{AM}(t) = A_0[1 + s(t)]\cos(\omega_0 t + \phi_0)$. Здесь A_0 — амплитуда несущего колебания, а $s(t)$ — информационный сигнал. Для выявления основных свойств амплитудной модуляции упростим ситуацию. Рассмотрим простейший, но весьма показательный случай — гармоническую (или однотоновую, тональную) амплитудную модуляцию. При гармонической амплитудной модуляции огибающая АМ-сигнала изменяется по закону гармонического колебания с частотой Ω (считаем, что $\Omega \ll \omega_0$) и начальной фазой ϕ :

$$a_{AM} = A_0[1 + m \cos(\Omega t + \phi)]\cos(\omega_0 t). \quad (8)$$

Здесь m — постоянный параметр: $0 \leq m \leq 1$. Его называют *коэффициентом амплитудной модуляции*. Начальную фазу несущего колебания считаем нулевой. Осциллограмма АМ-колебания с гармонической модуляцией показана на рис. 9, а. Глубину модуляции (значение коэффициента m) несложно оценить, измерив максимальный ($2U_M$) и минимальный ($2U_m$) размах колебания: $m = (U_M - U_m) / (U_M + U_m)$.

Воспользовавшись известными тригонометрическими соотношениями, сведем (8) к сумме:

$$a_{AM} = A_0 \cos(\omega_0 t) + 0,5A_0 m \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \phi] + 0,5A_0 m \cos[(\omega_0 - \Omega)t - \phi]. \quad (9)$$

Видим, что спектр АМ-колебания в случае гармонической модуляции состоит из трех гармоник (см. рис. 9, б): центральной — на несущей частоте ω_0 , и двух других, расположенных симметрично относительно несущей частоты: на *нижней боковой частоте* $\omega_0 - \Omega$, и *верхней боковой частоте* $\omega_0 + \Omega$.

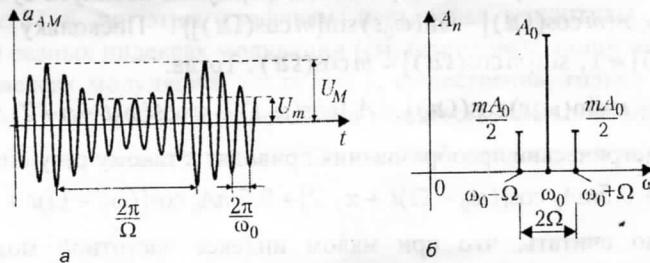


Рис. 9. Гармоническое АМ-колебание (а) и его спектральная (б) диаграмма

Спектральное представление АМ-сигнала позволяет сделать вывод: *эффективная ширина спектра амплитудно-модулированного колебания определяется значением частоты модулирующего колебания*. В рассматриваемом случае АМ-колебание занимает полосу частот 2Ω . Этот результат распространяется на случай сложного модулирующего сигнала. Если его спектр дискретен (выполняется модуляция периодическим колебанием), тогда каждая гармоника исходного спектра породит в амплитудно-модулированном колебании две гармоники: с нижней и верхней боковыми частотами. В частности, для k -ой гармоники это будут частоты: $\omega_0 - k\Omega$, и $\omega_0 + k\Omega$. Представим, что ширина спектра модулирующего сигнала ограничена n -ой гармоникой, тогда ширина спектра АМ-колебания окажется равной $2n\Omega$.

Сигналы с угловой модуляцией

Положив в формуле радиосигнала (6) амплитуду неизменной (равной A_0), получим *сигнал с угловой модуляцией*: $a_{UM}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \phi(t) + \phi_0) = A_0 \cos(\psi(t))$. Если угловую модуляцию реализуют так, чтобы информационному (модулирующему) сигналу была пропорциональна фазовая функция, то есть $\phi(t) \sim s(t)$, имеем случай *фазовой модуляции*. Соответствующий сигнал называют *фазомодулированным*, или *ФМ-сигналом*. Информационный сигнал можно

Частотные спектры колебаний

связать с приращением мгновенной частоты $\Delta\omega(t)$: $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t)$. Получаем другой вид угловой модуляции — **частотную модуляцию** и, соответственно, **частотно-модулированный сигнал**, или **ЧМ-сигнал**.

При модуляции гармоническим колебанием частоты Ω имеем **гармоническую угловую модуляцию**. Рассмотрим случай малой (по сравнению с несущей) частоты модуляции: $\Omega \ll \omega_0$. Для **ФМ-колебания** полагаем: $a_{\text{ФМ}}(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \Delta\phi \cos(\Omega t)]$. Амплитуду изменения фазовой функции $\Delta\phi$ называют **девиацией фазы**. Мгновенную частоту $\omega(t)$ ЧМ-колебания $a_{\text{ЧМ}}(t)$ запишем в виде $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos(\Omega t)$. Амплитуду приращения мгновенной частоты $\Delta\omega$ называют **девиацией частоты**. Согласно (7) полная фаза $\psi(t) = \omega_0 t + (\Delta\omega / \Omega) \sin(\Omega t) + \phi_0$, и следовательно: $a_{\text{ЧМ}}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + (\Delta\omega / \Omega) \sin(\Omega t) + \phi_0)$. Отношение $\Delta\omega / \Omega$ называют **индексом модуляции** и обозначают символом m : $m = \Delta\omega / \Omega$.

Сравнение выражений для ФМ- и ЧМ-колебаний демонстрирует, что при модуляции гармоническим сигналом фазовую модуляцию от частотной практически не отличить. Сделать это можно, только сопоставляя характеры изменения полной фазы модулированных колебаний при эволюции параметров модулирующего колебания. Далее при описании спектрального состава колебания, подверженного гармонической угловой модуляции, будем условно полагать, что имеем дело с ЧМ-колебанием.

Спектральный состав ЧМ-колебания

Характерная особенность частотной модуляции такова: даже при модуляции гармоническим колебанием спектр ЧМ-колебания состоит из бесконечного числа гармоник. Как в этой связи определить полосу частот, в пределах которой в основном содержится энергия ЧМ-сигнала?

Спектр ЧМ-колебания при малом индексе модуляции

Рассмотрим случай **малых индексов модуляции**. Пусть $m \ll 1$. При этом условии форма колебания $a_{\text{ЧМ}}(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + m \cos(\Omega t)]$ показана на рис. 10, а. Преобразуем исходное выражение, воспользовавшись тригонометрической формулой косинуса суммы двух углов: $a_{\text{ЧМ}}(t) = A_0 \{\cos(\omega_0 t) \cos[m \cos(\Omega t)] - \sin(\omega_0 t) \sin[m \cos(\Omega t)]\}$. Поскольку $m \ll 1$, можем считать: $\cos[m \cos(\Omega t)] \approx 1$, $\sin[m \cos(\Omega t)] \approx m \cos(\Omega t)$. Тогда:

$$a_{\text{ЧМ}}(t) \approx A_0 [\cos(\omega_0 t) - m \sin(\omega_0 t) \cos(\Omega t)] = A_0 [\cos(\omega_0 t) + m \cos(\omega_0 t + \pi/2) \cos(\Omega t)].$$

Дальнейшие тригонометрические преобразования приводят к такому результату:

$$a_{\text{ЧМ}}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t) + 0,5mA_0 \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \pi/2] + 0,5mA_0 \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \pi/2].$$

Следовательно, можно считать, что при малом индексе частотной модуляции спектр ЧМ-колебания состоит из трех гармоник: центральной — на несущей частоте ω_0 , и двух других, расположившихся симметрично относительно несущей частоты: **на нижней боковой частоте** $\omega_0 - \Omega$, и **верхней боковой частоте** $\omega_0 + \Omega$ (рис. 10, б). Резонно заключить, что при $m \ll 1$ эффективная ширина спектра частотно-модулированного колебания практически не зависит от индекса модуляции и оказывается равной 2Ω . Такой случай принято называть **узкополосной частотной модуляцией**.

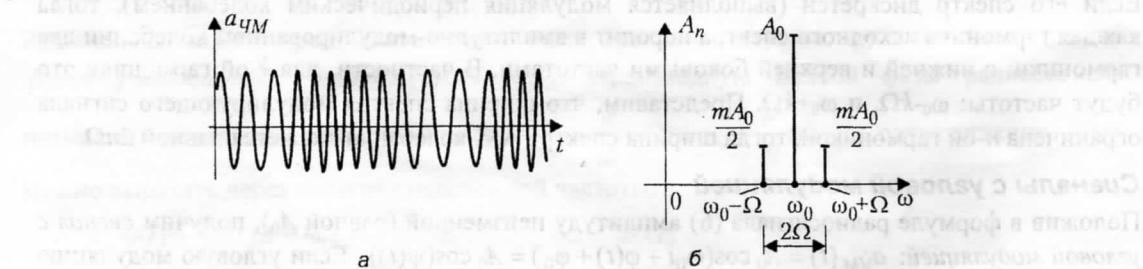


Рис. 10. Тональное ЧМ-колебание (а) и его спектральная (б) диаграмма

ПРИМЕЧАНИЕ

Отметим, что спектрограммы ЧМ- и АМ-колебания, полученные на амплитудном анализаторе спектра в случае гармонической модуляции и при одинаковых $m < 1$, будут практически неразличимы. В спектральном представлении отличие этих сигналов проявляется в фазовых диаграммах.

Гармоническая частотная модуляция при произвольном индексе m

Вновь обратимся к частотно-модулированному колебанию:

$$a_{CM}(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + m \cos(\Omega t)], \quad (10)$$

однако не будем ограничивать значение индекса модуляции m . Данную формулу можно свести к сумме гармонических составляющих. Для этого пользуются известными разложениями функций $\cos[m \cos(\Omega t)]$ и $\sin[m \cos(\Omega t)]$ в ряды по $J_k(m)$ — функциям Бесселя первого рода k -го порядка, зависящим от аргумента m [4]:

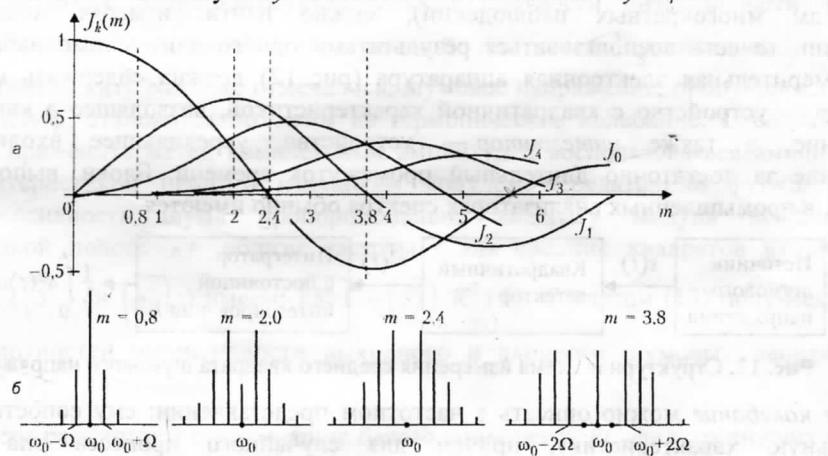
$$\cos[m \cos(\Omega t)] = J_0(m) - 2J_2(m) \cos(2\Omega t) + \dots$$

$$\sin[m \cos(\Omega t)] = 2J_1(m) \cos(\Omega t) - 2J_3(m) \cos(3\Omega t) + \dots$$

После несложных преобразований формула (10) принимает вид тригонометрического ряда:

$$a_{CM}(t) = A_0 \{ J_0(m) \cos \omega_0 t + J_1(m) \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \pi/2] + J_1(m) \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \pi/2] + \\ - J_2(m) \cos[(\omega_0 + 2\Omega)t] - J_2(m) \cos[(\omega_0 - 2\Omega)t] + \dots \}. \quad (11)$$

Согласно (11) спектр ЧМ-колебания состоит из гармоник на несущей частоте ω_0 и на боковых частотах $\omega_{\pm k}$, выстраивающихся парами: $\omega_{\pm k} = \omega_0 \pm k\Omega$ ($k = 1, 2, 3, \dots$). Число таких пар не ограничено. Амплитуды гармоник равны значениям функций Бесселя первого рода k -порядка: $J_0(m), J_1(m), J_2(m), \dots, J_k(m)$. Аргументом функций Бесселя является индекс модуляции, а порядок k равен номеру боковой частоты. Таким образом, значения амплитуд гармоник в спектре определяются характером поведения функций Бесселя различного порядка в зависимости от аргумента (от индекса модуляции). Графики функций Бесселя, главным образом влияющих на формирование спектра ЧМ-колебания, показаны на рис. 11, а. На рис. 11, б по этим графикам построены амплитудные спектры гармоник спектра ЧМ-колебаний при разных индексах модуляции (см. штриховые линии на рис. 11, а). Видно, что при малых индексах модуляции, когда $m < 1$, существенны только три гармоники: на частотах: $\omega_0 - \Omega$, ω_0 и $\omega_0 + \Omega$. Следовательно, мощность ЧМ-колебания сосредоточена в основном в полосе 2Ω — имеем случай узкополосной частотной модуляции.



Частотные спектры колебаний

Рис. 11. Графики функций Бесселя 1-го рода различных порядков (а) и амплитудные спектры ЧМ-колебаний при разных индексах модуляции (б)

Альтернативная ситуация — широкополосная частотная модуляция — реализуется при значениях индекса m , превышающих единицу. В этом случае спектральный состав богаче. Чем больше индекс модуляции, тем большее число гармоник приходится учитывать, определяя полосу ЧМ-сигналов. При $k > m$ значения модулей функций Бесселя быстро убывают с ростом k (см. рис. 11, а). Обычно учитывают только те гармоники, для которых k

(номер пары боковых частот) меньше индекса модуляции m , точнее: $k \leq m + 1$. Остальными пренебрегают. Таким образом, полосу частот, в которой в основном сосредоточен спектр ЧМ-колебания при широкополосной частотной модуляции вычисляют по формуле $2\Omega(m+1)$. Эта величина примерно равна $2m\Omega = 2\Delta\omega$ — удвоенной девиации частоты.

Стоит отметить, что при значениях индекса модуляции m равных 2,405; 5,55 (см. рис. 11, а) функция Бесселя нулевого порядка обращается в нуль. И это означает, что в спектре ЧМ-колебания отсутствует гармоника на несущей частоте ω_0 , то есть вся энергия колебания аккумулируется в составляющих, порожденных информационным сигналом. Этим можно воспользоваться: сформировать ЧМ-сигнал так, чтобы доля энергии, приходящаяся на несущее колебание, была небольшой.

Спектры хаотических (шумовых) колебаний

Хаотическое колебание $s(t)$ — это случайный процесс. Каждая его реализация в неизменных условиях не повторяется, является уникальной. В электронике хаотические колебания связаны с шумами — колебаниями токов и напряжений, изменяющихся случайным образом вследствие беспорядочного движения носителей зарядов. В данном контексте хаотические и шумовые колебания считаются синонимами.

Описание и измерение шумов

Важной статистической характеристикой случайного процесса является *средний квадрат* \bar{s}^2 — усреднение по множеству всех реализаций (результатов многократных наблюдений) случайного колебания $s(t)$, возведенного в квадрат. Величина \bar{s}^2 всегда положительна и служит мерой *интенсивности (мощности) случайного процесса*. Относительно шумовых колебаний, которые обычно проявляются в электронных устройствах, можно считать, что они являются *стационарными и эргодическими процессами*. Первое означает, что \bar{s}^2 не зависит от времени, а второе — что результат усреднения по одной наблюдаемой реализации за достаточно длительный промежуток времени λ совпадает с результатом усреднения этой же величины по множеству всех возможных реализаций, то есть:

$$\frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda s^2(t) dt \rightarrow \bar{s}^2 \text{ при } \lambda \rightarrow \infty. \quad (12)$$

На основании (12) интенсивность шума, усредненную по множеству реализаций (по результатам многократных наблюдений), можно найти, измеряя мощность одной реализации, то есть воспользоваться результатами одного длительного наблюдения. Для этого измерительная электронная аппаратура (рис. 12) должна содержать *квадратичный детектор* — устройство с квадратичной характеристикой, возводящее в квадрат входное напряжение, а также *интегратор* — устройство, усредняющее входное шумовое напряжение за достаточно длительный промежуток времени. Блоки, выполняющие эти функции, в промышленных анализаторах спектра обычно имеются.

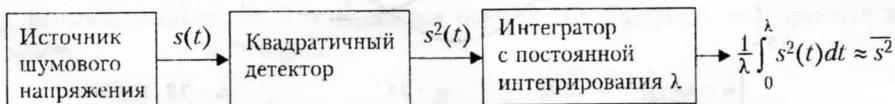


Рис. 12. Структурная схема измерения среднего квадрата шумового напряжения

Шумовое колебание можно описать в частотном представлении: ему сопоставляют некую спектральную характеристику, причем для случайного процесса она непрерывна. Теоретические основы спектрального разложения хаотических колебаний изложены в [2]. Не погружаясь в строгую теорию, объясним методику экспериментального исследования статистических параметров *шумового напряжения $s(t)$* по схеме, показанной на рис. 13.

Пропустим шумовое напряжение $s(t)$ через фильтр, выделяющий энергию колебаний в узкой полосе Δf вблизи частоты f . При соблюдении условия $\Delta f \ll f$ колебание на выходе фильтра S_f будет напоминать синусоиду с частотой f . Однако амплитуда и фаза этой

синусоиды подвержены хаотическим изменениям. С уменьшением полосы пропускания фильтра Δf форма выходного колебания все более приближается к синусоиде. Амплитуда ее уменьшается, но отношение среднего квадрата напряжения, прошедшего через фильтр (\bar{S}_f^2), к ширине полосы Δf остается конечным и при последовательном уменьшении полосы стремится к определенному пределу $W(f)$: $\bar{S}_f^2 / \Delta f \rightarrow W(f)$ при $\Delta f \rightarrow 0$. (13)



Рис. 13. Схема измерения спектральной плотности интенсивности шумового напряжения

Предельную величину $W(f)$ называют *спектральной плотностью интенсивности* процесса $s(t)$. Она равна средней интенсивности гармонических составляющих, приходящихся на единичный интервал оси частот. При измерении $W(f)$ используют узкополосный перестраиваемый фильтр, который можно настроить на любую частоту в заданном диапазоне измерений. Шумовое напряжение, прошедшее сквозь фильтр, подвергают квадратичному детектированию и усредняют (интегрируют). В результате получают средний квадрат: \bar{S}_f^2 . Далее по известной полосе фильтра Δf вычисляют $W(f)$. Полную интенсивность процесса — средний квадрат \bar{s}^2 — находят интегрированием спектральных составляющих шума по всем частотам: $\bar{s}^2 = \int_0^\infty W(f) df$.

Преобразование шумового колебания линейной цепью

Спектр шума, пропущенного через частотно-избирательную цепь, изменяется. Подадим на вход линейной цепи с передаточной функцией $K(f)$ шумовое напряжение $s_1(t)$. Пусть для него известна частотная зависимость спектральной плотности интенсивности $W_1(f)$. Выясним распределение по частоте спектральной плотности интенсивности $W_2(f)$ выходного напряжения $s_2(t)$. Как уже отмечалось, шумовое напряжение, пропущенное через узкополосный фильтр, становится похожим на гармоническое колебание. Следовательно, для него можно применить метод комплексных амплитуд и воспользоваться амплитудно-частотной характеристикой цепи, а именно — модулем передаточной функции $K(f)$. Поскольку интенсивность шума пропорциональна квадрату модуля комплексной амплитуды, в узкой полосе Δf вблизи частоты f для средних квадратов входного и выходного шума ($(\bar{S}_f^2)_1$ и $(\bar{S}_f^2)_2$) имеем: $(\bar{S}_f^2)_2 = (\bar{S}_f^2)_1 K^2(f)$. С учетом (13) получаем связь спектральных плотностей интенсивности выходного и входного шумовых напряжений: $W_2(f) = W_1(f) K^2(f)$.

В качестве примера рассмотрим прохождение *белого шума* через *RC-фильтр* низких частот (рис. 14). *Белым шумом* называют шумовое колебание, спектральная плотность интенсивности которого одинакова на всех частотах в пределах изучаемого диапазона. Полагая $W_1(f) = \text{const}$, находим спектральную плотность интенсивности колебания на выходе *RC-цепи*: $W_2(f) = W_1(f) K^2(f) = \text{const} / [1 + (f/f_c)^2]$, $f_c = 1/(2\pi RC)$.

Частотные спектры колебаний

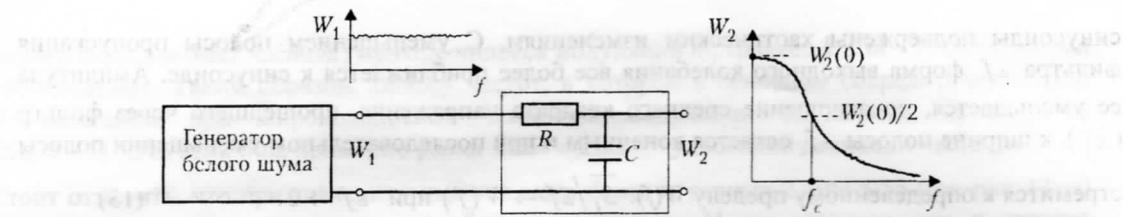


Рис. 14. Прохождение белого шума через ФНЧ

Таким образом, частотная зависимость спектральной плотности интенсивности на выходе RC-цепи в данном случае «рисует» ее амплитудно-частотную характеристику, введенную в квадрат (см. рис. 14).

Контрольные вопросы

- Прямоугольные импульсы длительностью $\tau = T/3$ следуют с периодом $T = 0,5$ мс (рис. 15, а). Их пропускают через перестраиваемый полосовой фильтр с очень узкой полосой пропускания (ширина, например, 10 Гц) и с коэффициентом передачи равным единице на центральной частоте полосы пропускания. Как выглядят колебание на выходе фильтра при настройке его на частоты: 1 кГц; 2 кГц; 4 кГц; 6 кГц; 8 кГц; 12 кГц?

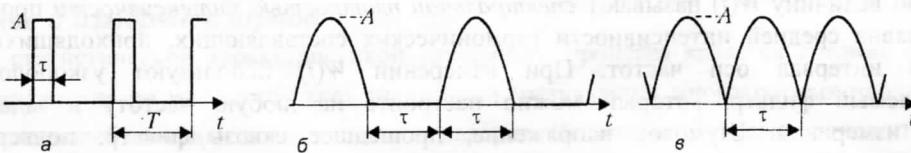


Рис. 15. Рисунки к контрольным вопросам

- В чем сходство и отличие амплитудных спектральных диаграмм колебаний (рис. 15, б, в), сформированных цепями, «выпрямляющими» гармоническое колебание?
- Треугольное колебание, осциллограмма которого приведена в табл. 1, инвертируется («переворачивается»), как это преобразование скажется на спектограмме, приведенной в табл. 1 справа?
- Какие факторы влияют на ширину линий спектральных диаграмм (см. рис. 5, справа) при наблюдении спектров периодических колебаний на анализаторе спектра, построенным по принципу последовательного анализа?
- В какой полосе частот сосредоточена в основном энергия ЧМ-колебания с несущей частотой 100 кГц, если максимальное приращение частоты составляет 1 кГц, а частота модуляции равна: (а) 100 Гц, (б) 5 кГц?
- На вход анализатора спектра подается шумовое колебание и в некоторой полосе частот наблюдается кривая, пропорциональная спектральной плотности интенсивности (подобная показанной на рис. 14). Как изменится изображение при увеличении полосы пропускания узкополосного фильтра прибора?

Методические указания к лабораторной работе «Исследование частотных спектров»

В лабораторной работе для выполнения экспериментов используют генераторы колебаний разного вида. Форму колебаний наблюдают на экране осциллографа, а их амплитудные спектральные диаграммы — на экране анализатора спектра. Для подключения приборов служит специальная соединительная плата. На этой же плате собирают электрические цепи, преобразующие колебания. В лаборатории имеются инструкции по эксплуатации измерительных приборов.

В ходе выполнения лабораторной работы на экранах приборов получают осциллограммы и спектрограммы. Их следует воспроизвести в протоколе (перерисовать с соблюдением масштаба или сфотографировать). Можно также скопировать содержимое экранов на кальку, указав на ней масштабы измерения по обеим осям. Все кальки должны быть озаглавлены. Их надлежит вклейте в итоговый отчет.

В отчете необходимо привести схемы измерений, осциллограммы напряжений и соответствующие им спектральные диаграммы, полученные по ходу выполнения задания. Расчетные данные для удобства сопоставления с экспериментом следует перенести на спектрограммы, снятые в ходе опытов. В конце отчета в разделе «Выводы» необходимо сопоставить и прокомментировать данные теории и эксперимента, проанализировать взаимосвязь спектрального и временного представления колебаний, а также указать предполагаемые причины отклонения наблюдаемых явлений от предсказаний теории.

Краткие сведения об анализаторе спектра

В состав лабораторной установки входит анализатор спектра С4-77. Описание прибора имеется в документе [3]: «Анализатор спектра. Техническое описание и инструкция по эксплуатации». Его фрагменты приведены в Приложении. На рис. 16 показана передняя панель С4-77 (см. также рис. 17). Для включения различных режимов и выбора параметров используют клавиши. Активизированные клавиши подсвечиваются. Прибор позволяет наблюдать и измерять амплитудные спектры периодических и шумовых колебаний в диапазоне частот от 20 Гц до 600 кГц. Центральную частоту обзора устанавливают ручками ЧАСТОТА, а подходящую для опыта полосу обзора выбирают клавишами панели ПОЛОСА ОБЗОРА из определенного перечня: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200 кГц.



Рис. 16. Передняя панель анализатора спектра С4-77

ПРИМЕЧАНИЕ

Возможна комплектация лабораторной установки анализатором спектра С4-25 аналогичного принципа действия. На методике работы эта замена не сказывается, но меняются исходные данные для исследуемых колебаний и параметры элементов цепей. При использовании в работе анализатора С4-25 руководствуйтесь методическими указаниями, имеющимися в лаборатории.

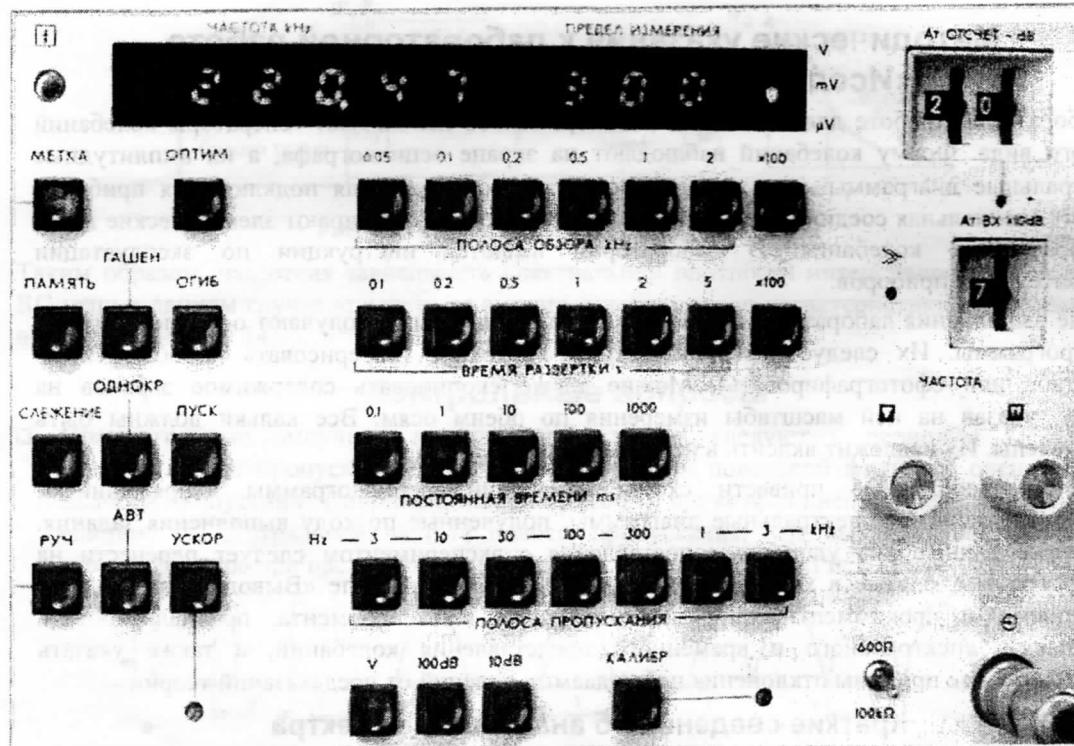


Рис. 17. Панель управления анализатора спектра С4-77

О принципе действия анализатора спектра

Прибор С4-77 построен по принципу последовательного анализа спектра. Об этом речь уже шла ранее (см. рис. 4, 6), здесь напомним основное, сопроводив изложение структурной схемой С4-77 (рис. 18), взятой из [3].

Исследуемый сигнал через входной аттенюатор и усилитель с регулируемым коэффициентом передачи (регулируется переключателем $AtBx \times 10 \text{ dB}$) поступает на фильтр низких частот и далее приходит на один из входов смесителя. На другой его вход подается гармоническое напряжение, которое вырабатывает гетеродин. Спектр колебания на выходе смесителя (см. рис. 5, б) повторяет спектр исследуемого сигнала, но сдвинут по частотной оси на интервал, равный частоте гетеродина f_g . Преобразованное колебание после смесителя поступает на узкополосный фильтр, настроенный на частоту f_0 равную 1,128 МГц. При изменении частоты гетеродина f_g спектр колебаний на входе фильтра сдвигается по частотной оси. (Обычно частоту гетеродина перестраивают автоматически по линейному закону от 1,128 МГц до 1,728 МГц, но можно ею управлять вручную. Этот режим включают клавишей РУЧ.) При совпадении частоты гармоники с f_0 на выходе фильтра появляется гармоническое напряжение с частотой f_0 и амплитудой пропорциональной амплитуде данной гармоники.

Для повышения качества фильтрации (селекции) гармоник на выходе смесителя в анализаторе С4-77 используют двойное преобразование частоты. После первого смешивания частоты сигнал пропускается через полосовой фильтр с центральной частотой 1,128 МГц (*первая промежуточная частота*) и снова смешивается. На этот раз с синусоидальным напряжением фиксированной частоты: 1 МГц. Его вырабатывает кварцевый генератор. Смешанное колебание поступает на полосовой фильтр с центральной частотой 128 кГц (*вторая промежуточная частота*). Через фильтр на выход проходит гармоника, соответствующая разностной частоте. Полосу пропускания фильтра можно регулировать клавиатурой ПОЛОСА ПРОПУСКАНИЯ. Для формирования полосы пропускания шириной 3, 10, 30, 100 или 300 Гц в приборе С4-77 используется кварцевый фильтр. Полоса пропускания шириной 1 или 3 кГц формируется LC-фильтром.

Напряжение, прошедшее через фильтр частоты 128 кГц, усиливается (линейным или логарифмическим усилителем) и детектируется. Коэффициент усиления устанавливается аттенюаторами в диапазоне от 0 до 99 dB (переключатель Ат ОТСЧЕТ - dB). Детектированный сигнал сглаживается интегрирующей цепью, ее постоянную времени задают клавишами ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ в диапазоне от 0,1 мс до 1 с. Увеличивая этот параметр, сглаживают флуктуации изображения, не изменяя среднее значение отклика.

После детектора и интегратора сигнал поступает в устройство формирования изображения, где подвергается аналого-цифровому преобразованию, записывается в память, и далее преобразуется в импульсы, отклоняющие луч ЭЛТ по вертикали. Движением луча по горизонтали управляет генератор пилообразного напряжения, который синхронно изменяет частоту гетеродина.

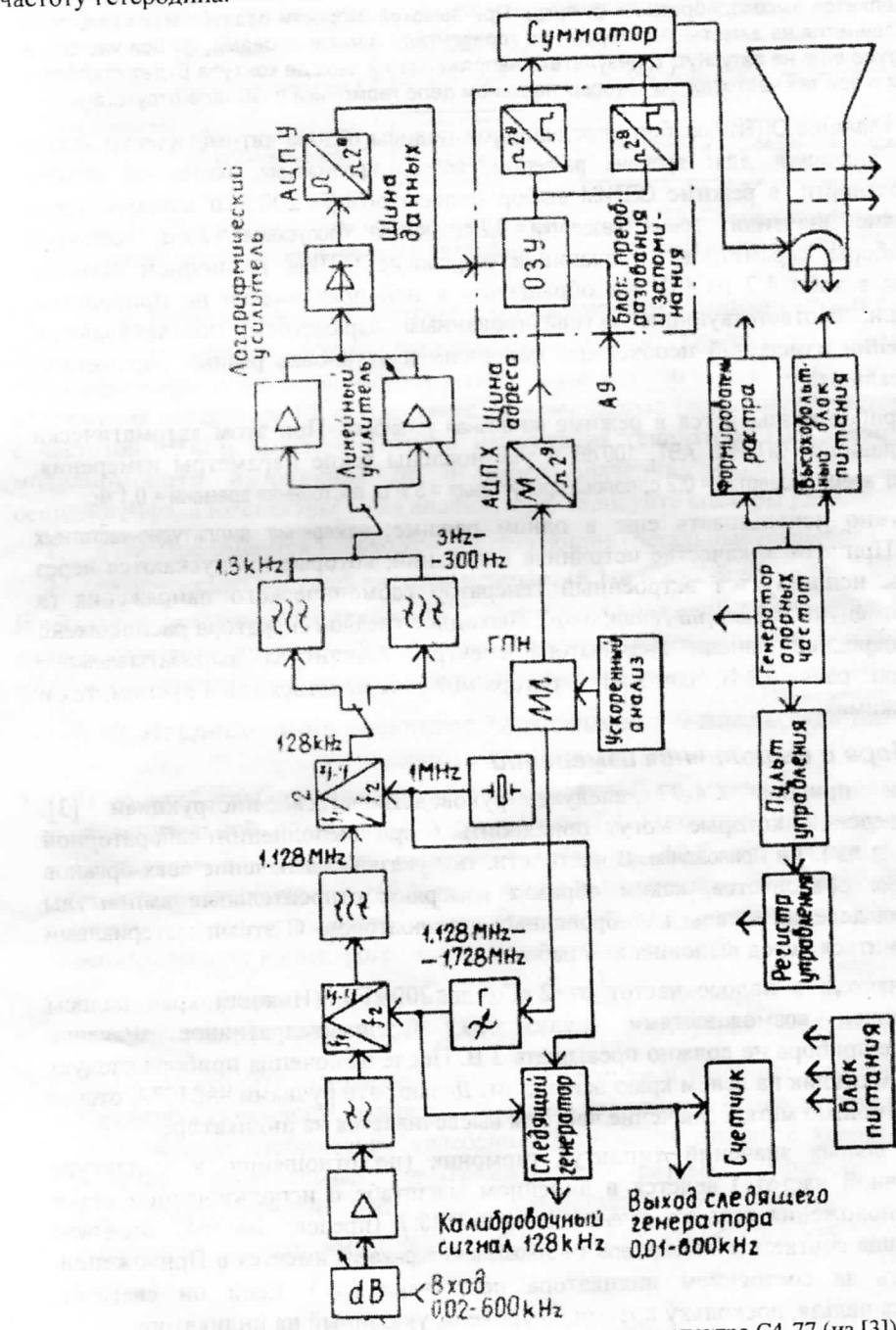


Рис. 18. Структурная схема анализатора спектра С4-77 (из [3])

Частотные спектры колебаний

Режимы управления

В приборе С4-77 предусмотрен режим управления, который подразумевает автоматическую установку параметров измерения. Его включают клавишей ОПТИМ. Данный режим устанавливает согласованные значения параметров измерения, уменьшая тем самым динамические искажения изображения.

ПРИМЕЧАНИЕ

Представим для примера, что установлена очень узкая полоса пропускания и малое время развертки (что одновременно означает высокую скорость изменения частоты гетеродина). При совпадении частоты гармоники с частотой настройки фильтра в его цепях возникает колебательный процесс. Вследствие сканирования частота гармоники выходит за пределы полосы пропускания фильтра, но колебания тока в фильтре не могут быстро затухнуть. Затухание длится тем дольше, чем уже полоса пропускания фильтра (чем выше эквивалентная добротность колебательной системы, к которой является высокодобротный фильтр). При высокой скорости развертки отметка луча на экране уже сдвинется на заметный интервал по горизонтали (иными словами, по оси частот), а колебания в контуре еще не затухнут. В результате напряжение на выходе контура будет отклонять луч по вертикали и при тех частотах, на которых на самом деле гармоники в сигнале отсутствуют.

При включенном клавише ОПТИМ выбор определенной полосы обзора автоматически задает соответствующие значения для: времени развертки, полосы пропускания, постоянной времени видеофильтра. В частности, в режиме ОПТИМ выбор полосы обзора 200 кГц автоматически устанавливает такие значения: время развертки = 0,2 с; полоса пропускания = 3 кГц, постоянная времени = 0,1 мс. Наборы параметров, отвечающие в режиме ОПТИМ различным полосам обзора, приведены в табл. 4.7 из [3]. Но обращаться к ней практически не приходится, поскольку клавиши, соответствующие активизированным параметрам, подсвечиваются. Если при выполнении измерений необходима независимая установка разных параметров, клавишу ОПТИМ выключают.

При включении прибор оказывается в режиме начальная установка. При этом автоматически активизированы клавиши: ОПТИМ, АВТ, 100 dB и установлены такие параметры измерения: полоса обзора = 200 кГц; время развертки = 0,2 с; полоса пропускания = 3 кГц, постоянная времени = 0,1 мс.

Прибор С4-77 можно использовать еще в одном режиме: измерение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). При этом в качестве источника колебаний, которые пропускаются через исследуемую цепь, используется встроенный генератор гармонического напряжения (в документации его именуют *следящий генератор*). Выходное гнездо генератора расположено внизу слева на передней панели анализатора спектра. Амплитуда вырабатываемого напряжения примерно равна 0,3 В. Частота генератора может изменяться как в ручном, так и автоматическом режимах.

Включение прибора и выполнение измерений

При эксплуатации прибора С4-77 следует руководствоваться инструкцией [3]. Первоочередные сведения, которые могут понадобиться при выполнении лабораторной работы, скопированы из [3] в Приложение. В частности, там указано назначение всех органов управления, а также объясняется, каким образом измеряют относительные амплитуды гармоник, используя деления шкалы калиброванных аттенюаторов. С этими материалами необходимо ознакомиться перед выполнением работы.

Все опыты выполняются в полосе частот от 2 кГц до 200 кГц. (Нижний край полосы наблюдения ограничен возможностями анализатора.) Среднеквадратичное значение напряжения на входе прибора не должно превышать 3 В. После включения прибора следует поместить начальный отклик на левом краю оси частот. Делают это ручками ЧАСТОТА, отсчет частоты ведется с помощью метки. Значение частоты высвечивается на индикаторе.

Измерение относительных значений амплитуд гармоник (по отношению к амплитуде гармоники на основной частоте) ведется в линейном масштабе с использованием сетки экрана. Исходные положения входного аттенюатора AtBx H 10:7 (предел: 300 мВ), отсчетного аттенюатора: 20. Таблица соответствия децибелы ↔ отношения напряжения имеется в Приложении. Необходимо следить за состоянием индикатора перегрузки (>). Если он светится, измерения выполнять нельзя, поскольку превышен уровень, указанный на индикаторе.

Задание по лабораторной работе

1. Исследование спектров периодических колебаний специальной формы (меандра, треугольного, пилообразного)

Соедините генератор колебаний специальной формы, осциллограф и анализатор спектра по схеме, приведенной на рис. 19. Установите частоту периодических колебаний, вырабатываемых генератором, равной 20 кГц. Поочередно изменяя вид генерируемых колебаний, зарисуйте осциллограммы прямоугольного, треугольного и пилообразного напряжений, а также соответствующие им спектры. Для каждого вида колебаний произведите измерения относительного значения (по отношению к амплитуде гармоники на основной частоте) амплитуд гармоник, наблюдаемых на экране анализатора. Сопоставьте данные опыта с рассчитанными по формулам, приведенным в табл. 1.



Рис. 19. Схема соединения приборов для исследования спектров периодических колебаний



Рис. 20. Схема соединения приборов для исследования спектров ЧМ колебаний

2. Наблюдение спектров частотно-модулированного сигнала

Включите приборы по схеме, приведенной на рис. 20. Генератор Г1 установите в режим синусоидальных колебаний, частоту выберите равной 100 кГц. С помощью синусоидального напряжения генератора Г2 осуществите гармоническую (тональную) частотную модуляцию с частотой 10 кГц высокочастотного напряжения генератора Г1. Увеличивая амплитуду модулирующего напряжения от нулевого значения, наблюдайте ЧМ-колебания на осциллографе, а их спектры — на анализаторе. Зарисуйте спектры для следующих случаев:

1. в спектре имеются только три составляющие (остальные пренебрежимо малы);
2. гармоника на несущей частоты исчезает (в 1-й и во 2-й раз).

Измерьте с помощью осциллографа амплитуды напряжения генератора Г2, при которых данные случаи реализуются. Вычислите девиацию частоты и индексы модуляции (считайте, что для генератора Г1 крутизна изменения частоты составляет 100 Гц/мВ).

3. Исследование спектров периодической последовательности прямоугольных импульсов.

- 3.1. Включите приборы по схеме, приведенной на рис. 19, подключив на вход соединительной платы вместо генератора Г1 генератор прямоугольных импульсов. Установите длительность импульсов τ равной 12,5 мкс, рассчитайте и установите частоту повторения $F = 1/T$ такой, чтобы скважность q равнялась 10. Убедитесь, что между нулями огибающей содержится соответствующее число гармоник. Зарисуйте осциллограмму и спектрограмму напряжения генератора.
- 3.2. Изменяя частоту следования F , получите последовательности импульсов со скважностями q равными 8; 15. Зарисуйте соответствующие им спектры.
- 3.3. Вновь установите исходную частоту повторения и измените длительность импульса τ так, чтобы скважность равнялась 5. Зарисуйте спектр. В отчете приведите временное и спектральное изображение колебаний. В выводах опишите характерные сходства и отличия спектральных диаграмм для разных параметров периодических последовательностей импульсов. Сопоставьте форму огибающей амплитудной спектральной диаграммы с функцией $|\sin(x)/x|$, $x = \omega\tau/2 = \pi f\tau$.



4. Исследование преобразования спектров последовательности прямоугольных импульсов линейными цепями

- 4.1. Соберите на соединительной плате фильтр верхних частот (ФВЧ), выбрав $C = 620 \text{ пФ}$ и $R = 1 \text{ кОм}$. Включите приборы по схеме, приведенной на рис. 21, а. Подайте на вход цепи периодическую последовательность прямоугольных импульсов длительностью $\tau = 20 \text{ мкс}$, следующих с частотой, обеспечивающей скважность $q = 5$. Зарисуйте осциллограммы напряжения и соответствующие им спектры на входе и на выходе цепи.

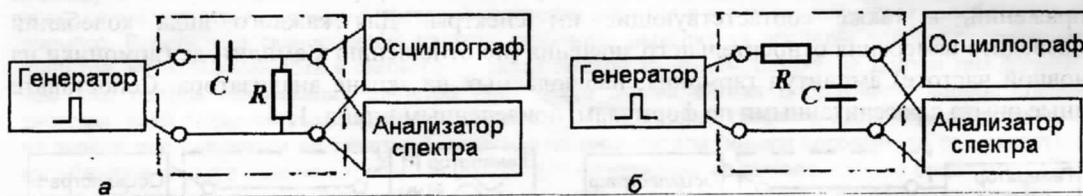


Рис. 21. Схемы исследования преобразования спектров фильтрами верхних (а) и нижних (б) частот

- 4.2. По известным значениям C и R вычислите частоту среза f_c ФВЧ и рассчитайте форму огибающей амплитудной спектральной диаграммы выходного напряжения для полосы частот, попадающей в полосу наблюдения спектра ($2 \text{ кГц} - 200 \text{ кГц}$). Сопоставьте измеренную спектральную диаграмму выходного напряжения с вычисленной по приближенным формулам.

ПРИМЕЧАНИЕ

Если полоса частот спектра, наблюдаемого на экране анализатора, попадает в полосу заграждения ФВЧ, можно считать, что модуль коэффициента передачи фильтра $K(f) \approx f / f_c$.

- 4.3. Повторите такой же опыт для RC -фильтра нижних частот (рис. 21, б), выбрав $C = 15 \text{ нФ}$ и $R = 1 \text{ кОм}$. Подайте на вход фильтра периодическую последовательность прямоугольных импульсов длительностью $\tau = 20 \text{ мкс}$ при скважности $q = 5$. Зарисуйте осциллограммы напряжения и соответствующие им спектры на входе и на выходе цепи.
- 4.4. По известным значениям C и R вычислите частоту среза ФНЧ и выясните, какое количество гармоник попадает в полосу прозрачности фильтра.

5. Исследование спектра шумового напряжения

- 5.1. Соберите схему для наблюдения спектра шумового напряжения (см. рис. 19), подключив на вход соединительной платы генератор шума. Полосу выходного напряжения генератора шума установите равной 600 кГц . Добейтесь сравнительно тонкой линии спектра шумового сигнала от генератора шума, и подберите усиление анализатора так, чтобы кривая на экране располагалась примерно посередине. Убедитесь по осциллограмме и спектрограмме, что генератор вырабатывает шумовое напряжение, которое в полосе наблюдения можно считать белым шумом.

ПОДСКАЗКА

Отключите режим ОПТИМ, активизируйте кнопки 10 мс (Постоянная времени) и 3 кГц (Полоса пропускания), отсчетный аттенюатор установите в положение 40 дБ .

- 5.2. Соберите схему для исследования преобразования шумового напряжения фильтром верхних частот (рис. 22, а) с элементами: $C = 620 \text{ пФ}$, $R = 1 \text{ кОм}$. Зарисуйте спектральную диаграмму выходного напряжения. Убедитесь, что изображение на экране анализатора примерно повторяет амплитудно-частотную характеристику ФВЧ.
- 5.3. Соберите схему (рис. 22, б) для исследования преобразования шумового напряжения фильтром нижних частот, выбрав $C = 15 \text{ нФ}$ и $R = 1 \text{ кОм}$. Зарисуйте спектральную диаграмму выходного напряжения. Оцените по диаграмме частоту среза ФНЧ. В полосе заграждения оцените скорость падения АЧХ с ростом частоты.

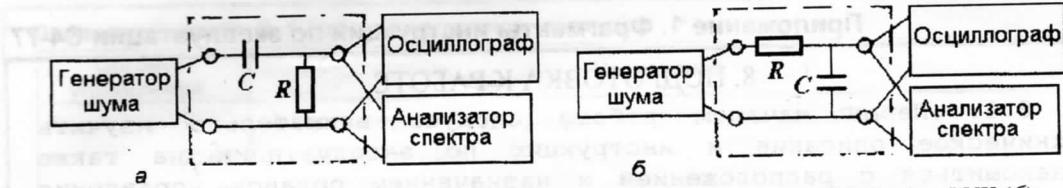


Рис. 22. Схема исследования преобразования шумового напряжения ФВЧ (а) и ФНЧ (б)

- 5.4. Соберите схему для снятия амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) полосового LC -фильтра посредством измерения спектра шумового напряжения (рис. 23, а). Фильтр строится на основе параллельного колебательного контура: из резистора $R_0 = 470$ кОм, конденсатора $C = 1300$ пФ и катушки индуктивности (параметры катушки указаны на ней). Зарисуйте спектральную диаграмму выходного напряжения. Убедитесь, что вид диаграммы соответствует АЧХ колебательного контура. Определите резонансную частоту колебательного контура. Измерьте полосу пропускания АЧХ и оцените добротность колебательного контура. Сопоставьте измеренные и рассчитанные значения (параметры катушки указаны на элементе).

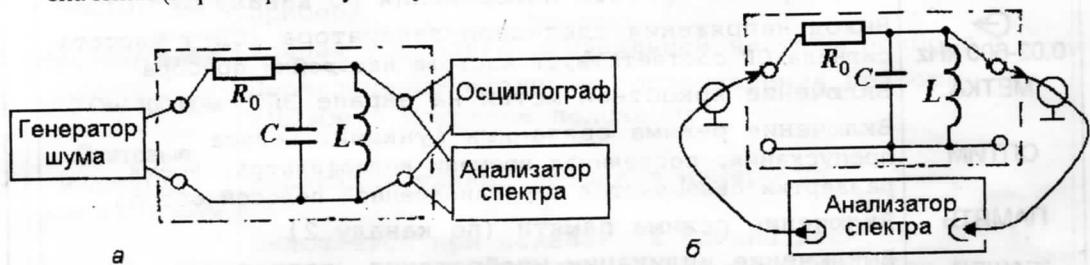


Рис. 23. Схема снятия АЧХ LC -фильтра на основе измерения спектральной плотности интенсивности шума (а) и при использовании анализатора спектра в режиме измерения частотных характеристик (б)

- 5.5. Снимите АЧХ этого же полосового LC -фильтра, используя анализатор спектра в качестве измерителя частотных характеристик (рис. 23, б). Сравните полученные здесь результаты с аналогичными, измеренными и рассчитанными в предыдущем пункте.

На этом экспериментальная часть лабораторной работы заканчивается.

Дополнительные вопросы

Анализируя в отчете результаты выполненных исследований, попытайтесь дополнительно ответить на следующие вопросы.

- На амплитудной спектральной диаграмме гармоническому колебанию соответствует линия с координатой по частотной оси равной частоте гармоники. При наблюдении, длящемся ограниченное время, линия оказывается «размытой». Оцените предельно достижимый минимум ширины наблюданной спектральной линии (ошибку в измерении частоты) для опыта, в процессе которого анализатор спектра подключается к генератору колебаний на время равное 10 с. Период колебаний примерно равен 0,5 с.
- Через простейший фильтр нижних частот с частотой среза 20 кГц пропускается симметричное периодическое колебание с периодом $T = 100$ мкс. Какое колебание будет искажено сильнее: треугольное или прямоугольное, и почему?
- К выходу фильтра нижних частот (см. рис. 14) с параметрами $R = 1$ кОм и $C = 15$ нФ подключен анализатор спектра, имеющий входное сопротивление 100 кОм. Стоит ли учитывать влияние входного сопротивления прибора на параметры фильтра (частоту среза, постоянную времени) при наблюдениях спектра в диапазоне частот от 2 кГц до 200 кГц. Как изменится частота среза фильтра при переключении входного сопротивления анализатора в положение 600 Ом.
- Оцените добротность избирательного LC -контура, установленного в анализаторе спектра С4-77 на выходе второго смесителя, если выбрана полоса пропускания 1 кГц.

Частотные спектры электрических колебаний

Приложение 1. Фрагменты инструкции по эксплуатации С4-77

8. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

8.1. Перед началом работы следует внимательно изучить техническое описание и инструкцию по эксплуатации, а также ознакомиться с расположением и назначением органов управления (табл. 8.1).

Установка клавиш в исходные положения осуществляется автоматически при включении прибора. Включение клавиш (нажатие) регистрируется подсветом, клавиша ПУСК не подсвечивается.

Таблица 8.1. Назначение органов управления

Органы управления	Назначение
СЕТЬ I	Включение прибора
☀ ручка шлиц	Регулировка яркости изображения на экране ЭЛТ
0,02-600 kHz	Регулировка яркости изображения по каналу I
МЕТКА	Выход напряжения следящего генератора (СГ). Частота сигнала СГ соответствует частоте настройки прибора
ОПТИМ	Включение яркостной метки на экране ЭЛТ
ПАМЯТЬ	Включение режима связанных функций. Полоса пропускания, постоянная времени видеофильтра, время развертки связываются с установленной полосой обзора
ГАШЕН	Включение режима памяти (по каналу 2)
СЛЕЖ	Выключение индикации изображения, записанного по каналу 2 (в памяти)
ОГИБ	Включение режима, обеспечивающего автоматическую настройку прибора на максимум отклика сигнала в ручном режиме
ОДНОКР	Включение индикации по каналу 2 в виде точек
ПУСК	Включение однократной развертки
РУЧ- клавиша	Запуск однократной развертки; стирание информации по каналу I с экрана ЭЛТ; очистка экрана и запуск развертки сначала
РУЧ- ручка	Включение режима ручной развертки
АВТ	Ручная перестройка прибора в пределах полосы обзора; перемещение яркостной линии (метки) по экрану ЭЛТ
УСКОР- клавиша	Включение периодической развертки
«f»	Включение ускоренного режима анализа
ПОЛОСА ОБЗОРА, kHz	Включение частотомера
ВРЕМЯ РАЗВЕРТКИ	Установка полос обзора
ПОСТОЯН. ВРЕМЕНИ	Установка времени развертки, S
ПОЛОСА ПРОПУСК.	Установка постоянной времени видеофильтра, ms
«V»	Установка полос пропускания
	Включение линейного масштаба

Продолжение табл. 8. 1. Назначение органов управления

Органы управления	Назначение
100 dB 10 dB	Включение логарифмического масштаба, 10 dB/деление 1 dB/деление
КАЛИБР- клавиша	Включение режима калибровки прибора. При этом на вход прибора подается сигнал частотой 128 kHz, напряжением 30 mV от внутреннего калибратора
КАЛИБР- лицо	Калибровка чувствительности прибора
Ат ОТСЧЕТ - dB	Дискретное изменение пределов измерения прибора в масштабах "V" и "10dB"
Ат ВХ × 10 dB	Дискретное изменение пределов измерения прибора только от 0 до 70dB
ЧАСТОТА 	Установка центральной частоты во всем диапазоне прибора
ЧАСТОТА 	Точная установка центральной частоты прибора
600 Ом/ 100 кОм	Переключение входного сопротивления прибора (100 кОм – исходное положение)
Световые индикаторы: «V», «mV», «μV»	Индикация единиц пределов измерения
Световой индикатор «+»	Включается при показаниях единиц децибел аттенюатора Ат ОТСЧЕТ отличных от "0", При этом к показаниям индикатора ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ добавляется показание единиц децибел аттенюатора Ат ОТСЧЕТ
«>>	Индикация появления динамических искажений. Загорается, когда входной сигнал превышает уровень, индицируемый на цифровом табло ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ
	Входное гнездо для подачи входного сигнала

9. ПОРЯДОК РАБОТЫ

9.1 Подготовка к проведению измерений

9.1.1. Включить тумблер СЕТЬ. Прибор автоматически устанавливает органы управления в определенные положения (начальная установка). Включены клавиши: ОПТИМ, АВТ, 100 dB. Установлены значения: полоса обзора – 200 kHz; время развертки – 0,2 s; постоянная времени – 0,1 ms; полоса пропускания – 3 kHz.

9.2. Калибровка прибора

Установить умеренную яркость изображения. Установить переключатель Ат ВХ × 10 dB в положение "3" (30 dB), отсчетный аттенюатор Ат ОТСЧЕТ в положение "0 dB". На табло ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ должно индицироваться значение предела измерения "30 mV". Прогреть прибор в течение 30 min. Включить клавиши КАЛИБР, "V" и тумблер "f". Установить ручками ЧАСТОТА на табло частоту, равную 128 kHz. В центре экрана должен наблюдаться отклик сигнала внутреннего калибратора. Органом калибровки КАЛИБР совместить вершину отклика на экране с верхней линией масштабной сетки. Выключить клавишу КАЛИБР.

При работе в логарифмическом масштабе калибровку производить аналогично при включенной клавише "100 dB" или "10 dB".

9.2. Проведение измерений

9.2.1. Измерение спектра периодических сигналов по амплитуде и частоте в абсолютных и относительных единицах.

Отсчет абсолютных уровней составляющих спектра производится по масштабной сетке ЭЛТ с учетом показаний индикаторов ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ, единиц измерения (V, mV, μ V) и индикатора "+".

При измерениях в линейном масштабе ("V") цена большого деления A_N масштабной сетки на экране ЭЛТ вычисляется по значению предела измерения на табло ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ (S). При положениях отсчетного аттенюатора кратных 10 она равна $A_N = S/10$. При положениях отсчетного аттенюатора не кратных 10 (единицы децибел отличны от 0) $A_N = (S/10)/10^{n/20}$; n - значение единиц децибел отсчетного аттенюатора.

При измерениях в логарифмическом масштабе "10 dB" напряжение сигнала U_c определяется по формуле $U_c = S/10^{(10-n+n)/20}$, где n - амплитуда отклика сигнала в делениях масштабной сетки.

При измерениях в логарифмическом масштабе "100 dB" напряжение сигнала U_c определяется по формуле: $U_c = S/10^{(10-n)/20}$. Отсчет относительных уровней производится по масштабной сетке и отсчетным устройствам прибора.

При измерениях в режиме "V" отношения уровней сигналов можно определять по масштабной сетке (масштаб линейный) и с помощью аттенюаторов. Необходимо следить, чтобы не было перегрузки.

При измерениях в режиме "10 dB" отношения сигналов можно определять по масштабной сетке в пределах 10 dB (масштаб логарифмический 1 dB/деление) и с помощью аттенюаторов прибора. В режиме "100 dB" отсчет отношения уровней сигналов производится по масштабной сетке (масштаб логарифмический 10 dB/деление).

Измерение частоты производится следующим образом:

в ручном режиме (РУЧ) показания частотомера соответствуют частоте настройки прибора (в точке нахождения УМЗ);

в автоматическом режиме (АВТ) при выключенном клавише МЕТКА индицируется центральная частота настройки прибора (соответствует центру экрана), а при включенной клавише МЕТКА измеряется частота, соответствующая положению метки.

Рассмотрим типичный пример измерения частот и амплитуд спектральных компонент амплитудно-модулированного (АМ) сигнала. Измерение производится в следующей последовательности.

Подать на вход прибора исследуемый сигнал (не превышая максимально-допустимый уровень 3 V), при помощи ручек ЧАСТОТА настроиться так, чтобы спектр исследуемого сигнала находился в пределах экрана, переключением клавиш ПОЛОСА ОБЗОРА выбрать соответствующую полосу обзора;

установить желаемый масштаб амплитуд, переключением ослабления входного аттенюатора (At BX x 10) установить вершину наибольшего отклика в верхней части масштабной сетки ЭЛТ;

включить клавишу МЕТКА, совмещая метку с положением вершин основного и боковых откликов определить по показаниям частотомера частоту несущей и боковых спектральных составляющих; определить уровень напряжения несущей и относительный уровень боковых составляющих, как описано выше.

9.2.2. Измерение спектра шумового сигнала

Для устранения флюктуации уровня шумового сигнала необходимо выбрать соответствующую величину постоянной времени (клавишу ОПТИМ следует выключить).

Спектральная плотность распределения мощности шума определяется измерением эффективного значения напряжения исследуемого шумового сигнала в полосе пропускания анализатора.

Спектральная плотность шума $S_n(F)$ определяется по формуле

$$S_n(F) = V_n^2(F)/(1,11\Delta f_n).$$

Здесь $V_n(F)$ – измеренное эффективное значение напряжения шумового сигнала в полосе пропускания прибора.

9.2.3. Измерение амплитудно-частотных характеристик четырехполюсников

С помощью анализатора спектра можно измерять АЧХ четырехполюсников как в ручном, так и в автоматическом режимах, а также измерять коэффициент передачи четырехполюсников.

При измерении малых значений неравномерностей АЧХ необходимо работать в линейном режиме или логарифмическом режиме 10 dB.

При измерении больших затуханий (свыше 20 dB) удобнее работать в логарифмическом режиме 100 dB. Прибор позволяет измерять частотные характеристики с затуханием до минус 140 dB при подаче на вход прибора сигнала амплитудой 3 V.

При измерении АЧХ четырехполюсников необходимо включить его между выходом  СГ и входом прибора. В случае необходимости при измерении АЧХ с затуханием до 140 dB перед измеряемым четырехполюсником или после него целесообразно включить усилитель, обеспечивающий на входе прибора уровень сигнала равный 3 V. При этом необходимо следить, чтобы сигнал на входе четырехполюсника не перегружал его.

Приложение 2. Таблица перевода децибел в отношения напряжений

Таблица перевода децибелы ↔ отношения напряжений									
Децибел	Усиление	Ослабление	Децибел	Усиление	Ослабление	Децибел	Усиление	Ослабление	
0,1	1,01	0,989	3,4	1,48	0,676	20	10,00	0,100	
0,2	1,02	0,977	3,6	1,51	0,661	22	12,6	0,079	
0,3	1,04	0,966	3,8	1,55	0,646	24	15,8	0,063	
0,4	1,05	0,955	4,0	1,58	0,631	26	20,0	0,050	
0,5	1,06	0,944	4,2	1,62	0,617	28	25,1	0,040	
0,6	1,07	0,933	4,4	1,66	0,603	30	31,6	0,032	
0,7	1,08	0,923	4,6	1,70	0,589	32	39,8	0,025	
0,8	1,10	0,912	4,8	1,74	0,575	34	50,1	0,020	
0,9	1,11	0,902	5,0	1,78	0,562	36	63,1	0,016	
1,0	1,12	0,891	5,5	1,88	0,531	38	79,4	0,013	
1,1	1,14	0,881	6,0	2,00	0,501	40	100	0,010	
1,2	1,15	0,871	6,5	2,11	0,473	42	126	7,94E-03	
1,3	1,16	0,861	7,0	2,24	0,447	44	158	6,31E-03	
1,4	1,17	0,851	7,5	2,37	0,422	46	200	5,01E-03	
1,5	1,19	0,841	8,0	2,51	0,398	48	251	3,98E-03	
1,6	1,20	0,832	8,5	2,66	0,376	50	316	3,16E-03	
1,7	1,22	0,822	9,0	2,82	0,355	55	562	1,78E-03	
1,8	1,23	0,813	9,5	2,99	0,335	60	1000	1,00E-03	
1,9	1,24	0,804	10	3,16	0,316	65	1778	5,62E-04	
2,0	1,26	0,794	11	3,55	0,282	70	3162	3,16E-04	
2,2	1,29	0,776	12	3,98	0,251	75	5623	1,78E-04	
2,4	1,32	0,759	13	4,47	0,224	80	10000	1,00E-04	
2,6	1,35	0,741	14	5,01	0,200	85	17783	5,62E-05	
2,8	1,38	0,724	15	5,62	0,178	90	31623	3,16E-05	
3,0	1,41	0,708	16	6,31	0,158	95	56234	1,78E-05	
3,2	1,45	0,692	18	7,94	0,126	100	100000	1,00E-05	