Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

Владимирский государственный университет

Кафедра конструирования и технологии радиоэлектронных средств

# СПЕКТРЫ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

*Методические указания к лабораторной работе по курсу «Основы радиоэлектроники и связи»*

Составитель
Г.Д. ДАВЫДОВ

Владимир 2007

УДК 621.396.6
ББК 31.27-059.5
С71

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент
Владимирского государственного университета
*В. Р. Асланянц*

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

С71 **Спектры** колебаний в электронных устройствах : метод. указания к лабораторной работе по курсу «Основы радиоэлектроники и связи» / Владим. гос. ун-т ; сост. Г. Д. Давыдов. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 24 с.

Содержат основы теории спектральных преобразований периодических колебаний в объеме, необходимом для выполнения лабораторной работы, требования по подготовке, вариантное лабораторное задание, контрольные вопросы и список литературы.

Предназначены для подготовки бакалавров направления 210200 – проектирование и технология электронных средств, а также для студентов специальности 210201 – проектирование и технология радиоэлектронных средств и могут быть полезны студентам других специальностей университета.

Табл. 1. Ил. 7. Библиогр.: 3 назв.

УДК 621.396.6
ББК 31.27-059.5

*Цель лабораторной работы «Спектры колебаний в электронных устройствах» – изучение состава, формы и ширины спектров электрических колебаний, наиболее часто применяемых в электронике, исследование изменения спектральных характеристик колебаний при изменении их формы и параметров.*

## 1. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1.1. В процессе подготовки к выполнению лабораторной работы каждый студент должен, используя техническую литературу, конспекты лекций и данные методические указания, изучить основы теории спектрального анализа колебаний и самостоятельно подготовить в электронной или рукописной форме заготовку отчета. Последняя должна содержать титульный лист, формулировку цели работы, краткие теоретические сведения и лабораторное задание.

Необходимо разобрать следующие теоретические вопросы:

- ряд Фурье в комплексной форме;
- основы спектрального анализа непериодических колебаний;
- примеры спектров периодических колебаний различной формы;
- свойства преобразований Фурье;
- понятие ширины спектра.

По приведенному на с. 17 описанию лабораторной установки ознакомиться с принципиальными электрическими схемами исследуемых узлов и порядком проведения экспериментов.

1.2. Из таблицы вариантов задания надо выбрать данные, необходимые для выполнения работы, и внести их в заготовку отчета.

Варианты задания

| Номер в учебном журнале | Период $T$, мкс | Длительность $\tau$, мкс | Амплитуда $A_m$, В |
|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 2 | 11 |
| 2 | 15 | 4 | 15 |
| 3 | 25 | 6 | 12 |
| 4 | 20 | 3 | 14 |
| 5 | 30 | 8 | 13 |
| 6 | 40 | 8 | 11 |
| 7 | 10 | 2,5 | 12 |
| 8 | 15 | 3 | 11 |
| 9 | 20 | 5 | 13 |
| 10 | 25 | 5 | 11 |
| 11 | 30 | 7 | 15 |
| 12 | 40 | 9 | 12 |
| 13 | 10 | 1,5 | 13 |
| 14 | 25 | 7 | 13 |
| 15 | 10 | 2 | 14 |
| 16 | 20 | 3 | 11 |
| 17 | 30 | 6 | 11 |
| 18 | 20 | 4 | 12 |
| 19 | 30 | 6 | 14 |
| 20 | 20 | 4 | 15 |
| 21 | 25 | 5 | 14 |
| 22 | 10 | 2,5 | 15 |
| 23 | 25 | 6 | 15 |
| 24 | 15 | 3,5 | 12 |
| 25 | 15 | 4 | 13 |
| 26 | 15 | 3 | 14 |
| 27 | 30 | 7 | 12 |

# 2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Спектром колебания произвольной формы называется совокупность гармонических составляющих, с помощью которых данное колебание можно представить в виде суммы. Спектры удобно изображать в виде графиков, на которых по горизонтали откладывается частота, а по вертикали – значения оставшихся параметров спектральных составляющих. Каждая составляющая является гармоническим колебанием и полностью описывается тремя параметрами: амплитудой $A_{mn}$, фазой $\psi_n$ и циклической частотой $\omega_n$. Поэтому достаточно построить два графика зависимостей $A_{mn}(\omega)$ и $\psi_n(\omega)$. Первый называется амплитудным спектром, а второй – фазовым. Высота линии определяет значение амплитуды или фазы соответствующей спектральной составляющей, а положение линии на оси частот задает частоту составляющей.

## 2.1. Спектры периодических колебаний

***Графическое изображение спектра***

Спектр любого периодического колебания состоит только из составляющих с частотами, кратными частоте следования периодов исходного колебания $F$. Спектральные составляющие с кратными частотами называются гармониками.

На всех остальных частотах, не кратных частоте колебания составляющие отсутствуют, т. е. имеют амплитуду, равную нулю. Поэтому графики спектров периодических колебаний выглядят как набор вертикальных линий и называются линейчатыми. Эти линии расположены с постоянным шагом по горизонтальной оси частот. Шаг равен частоте исходного колебания.

На рис. 2.1 приведен условный пример спектра произвольного колебания с периодом $T$ и циклической частотой следования: *а* – амплитудный, *б* – фазовый.

$$\Omega = 2\pi F = 2\pi \frac{1}{T}.$$

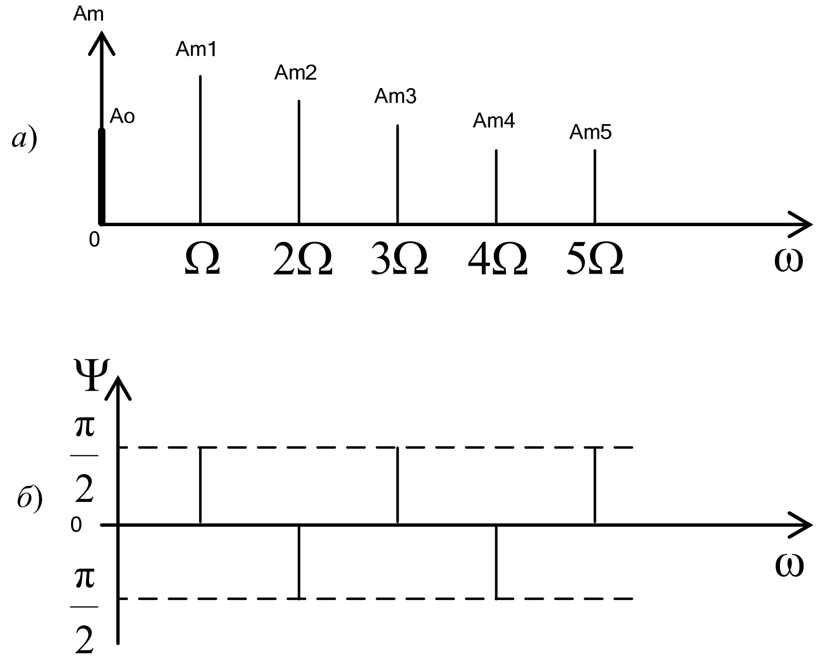



Рис. 2.1

***Ряд Фурье в комплексной форме***

Определение параметров гармоник спектра произвольного колебания выполняется на основе ряда Фурье. В электрических цепях применяется ряд Фурье в комплексной форме, получаемый применением формулы Эйлера к мгновенным значениям спектральных составляющих.

$$s(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{A}_{mn} \cdot e^{jn\Omega t}, \tag{2.1}$$

здесь

$$\dot{A}_{mn} = \frac{2}{T} \int_{T} s(t) \cdot e^{-jn\Omega t} dt, \tag{2.2}$$

где $\dot{A}_{mn}$ – комплексная амплитуда $n$-й гармоники;

$n$ – целое число, меняющееся от минус до плюс бесконечности.

Этот ряд имеет компактную и логичную форму записи, но каждая гармоника реального спектра представлена в нем в виде двух комплексных гармоник с сопряженными номерами *n* и -*n*. Сопряженные гармоники имеют одинаковую амплитуду, равную половине амплитуды реальной гармоники. Частоты этих гармоник одинаковы по величине, но частота второй считается отрицательной. Мгновенные значения комплексных гармоник имеют вещественную и мнимую части. Вещественные части обеих комплексных гармоник имеют одинаковые знаки. При суммировании они складываются. Мнимые имеют противоположные знаки, обусловленные отрицательной частотой второй комплексной гармоники, и при суммировании по формуле (2.1) взаимно компенсируются.

Формула (2.2) позволяет рассчитать спектр колебания сложной формы, если известно само колебание. Преобразование колебания в спектр называют прямым преобразованием Фурье. Формула (2.1) решает обратную математическую задачу, т. е. позволяет рассчитать само колебание по известному спектру. Это действие называют обратным преобразованием Фурье.

Амплитудный спектр является четной функцией. Получить его можно, если учесть, что комплексная амплитуда содержит обычную амплитуду *n*-й составляющей спектра $A_{mn}$ и ее фазу $\psi_n$,

$$\dot{A}_{mn} = A_{mn} e^{-j\psi_n} .$$

Для построения графика амплитудного спектра достаточно определить модуль комплексной амплитуды

$$A_{mn} = |\dot{A}_{mn}| .$$

Пример возможного графика амплитудного спектра для комплексной формы ряда Фурье приведен на рис. 2.2. Здесь он построен с учетом множителя 1/2 в формуле (2.1).

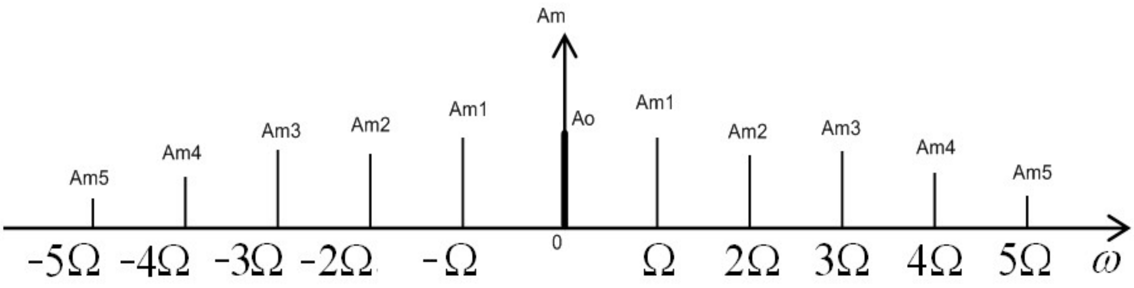



Рис. 2.2

При графическом представлении спектров нерационально рисовать обе половины спектра, поэтому изображают только правую, но амплитуды первой и последующих гармоник берут удвоенной величины. Такой график соответствует реальным амплитудам спектра. Именно эту форму спектра выводит на экран моделирующая программа пакета Workbench. Спектральные преобразования в этом случае описываются следующими выражениями:

$$s(t) = \frac{\dot{A}_0}{2} + \sum_{n=-1}^{\infty} \dot{A}_{mn} \cdot \mathrm{Re}(e^{jn\Omega t}), \tag{3}$$

$$\dot{A}_{mn} = \frac{2}{T} \int_T s(t) \cdot e^{-jn\Omega t} dt, \tag{4}$$

здесь $\mathrm{Re}(e^{jn\Omega t}) = \cos(n\Omega t)$ – реальная часть экспоненты с комплексной степенью.

***Определение ширины спектра***

Весьма важная частотная характеристика колебания – ширина его спектра, под которой понимаются верхняя и нижняя частотные границы. В пределах этих границ амплитуды спектральных составляющих должны воспроизводиться с достаточной точностью. За пределами ширины спектра точность воспроизведения амплитуд не нормируется и допускается ее уменьшение. Очевидно, что число правильно воспроизводимых гармоник должно рассчитываться исходя из необходимой точности восстановления колебания по его спектру. Однако практически для приближенной оценки ширины часто используют упрощенные критерии.

Наиболее часто применяют критерий, при котором в ширину спектра включают все составляющие с величиной мощности большей, чем половина мощности гармоники с максимальным значением $A_{\min}$. Так как спектр изображается в виде амплитуд, пересчитывать их в мощности достаточно неудобно. По этой причине обычно пользуются тем, что мощность пропорциональна амплитуде во второй степени. В качестве границ используют максимальное значение $A_{\min}$, деленное на корень из двух.

Правильная передача постоянной составляющей спектра колебания или близких к ней частот нередко имеет принципиальное значение. В этом случае в качестве нижней границы используют нулевое значение и ширину спектра определяют только по верхней границе.

При желании получить большую точность представления колебания с помощью спектра иногда используют критерий 0,1 от максимального значения $A_{\min}$. Спектр получается при этом шире, а точность представления значительно выше. Примеры определения ширины спектра приведены при рассмотрении спектра прямоугольных импульсов.

### ***Спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов***

Рассчитаем амплитудный и фазовый спектры периодической последовательности прямоугольных видеоимпульсов, имеющих амплитуду *E,* длительность $\tau_и$, период повторения $T$ и расположенных симметрично относительно начала координат (рис. 2.3).

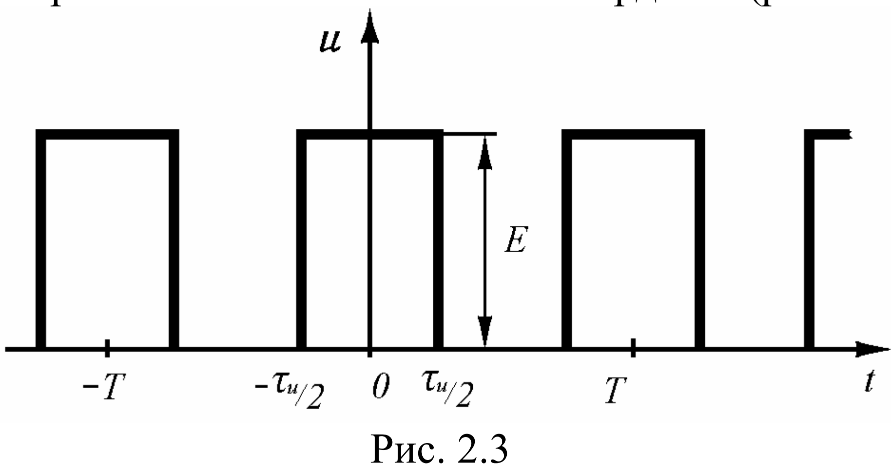



Рис. 2.3

Одиночный идеальный прямоугольный импульс описывается уравнением

$$u(t) = E[\sigma(t + \tau_и / 2) - \sigma(t - \tau_и / 2)],$$

т. е. он формируется как разность двух единичных функций $\sigma(t)$ (функций включения, или функций Хевисайда), сдвинутых во времени на $\tau_и$.

Последовательность прямоугольных импульсов представляет собой известную сумму одиночных импульсов

$$u(t) = \sum_{k=0}^{\infty} E[\sigma(t + kT + \tau_и / 2) - \sigma(t - kT - \tau_и / 2)].$$

Используя ряд Фурье, получим выражение для комплексных амплитуд составляющих спектра

$$\dot{A}_n = \frac{2E}{\pi n} \cdot \sin \frac{n\omega_1 \tau_и}{2},$$

здесь $\omega_1 = 2\pi \frac{1}{T}$ – циклическая частота первой гармоники.

Это выражение показывает, что спектр последовательности импульсов, симметричной относительно оси $t = 0$, не содержит мнимых частей в комплексных амплитудах. Амплитуды спектральных составляющих – вещественные величины, но знакопеременные.

Амплитудный спектр найдем как модуль комплексного спектра:

$$A_n = |\dot{A}_n| = a_n = \frac{2E}{\pi n} \cdot \left| \sin \frac{n\omega_1 \tau_и}{2} \right|.$$

Фазовый спектр найдем как аргумент комплексной амплитуды. Для каждого значения $n$ фаза определяется как аргумент тангенса отношения мнимой части $\dot{A}_n$ к действительной. В данном случае мнимая часть равна нулю.

$$\psi_n = \operatorname{arctg} \frac{0}{a_n} = \pm m\pi, \qquad m = 0, 1, 2, \ldots$$

Амплитудный (*а*) и фазовый (*б*) спектры последовательности прямоугольных импульсов изображены на рис. 2.4.

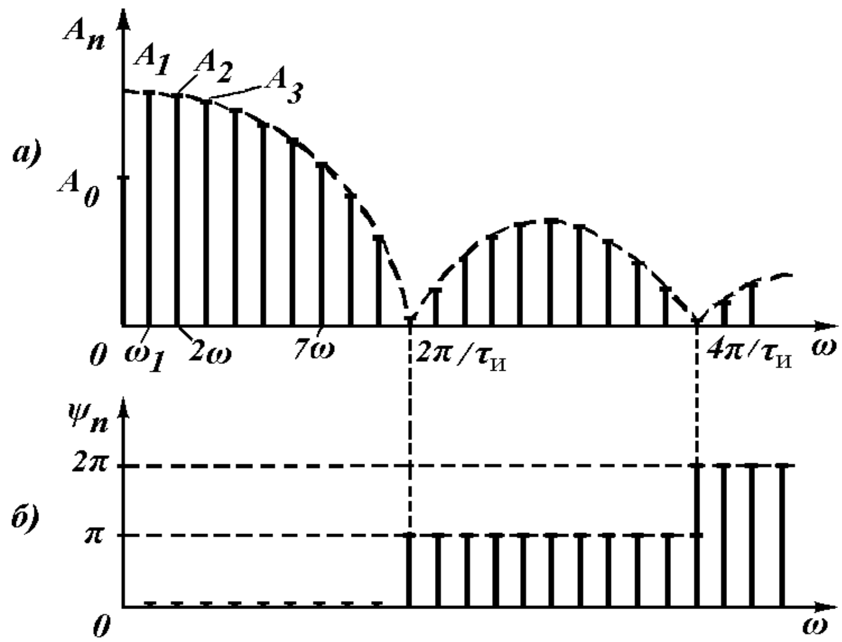



Рис. 2.4

Найденный амплитудный спектр заданного сигнала в значительной степени зависит от величин периода повторения $T$ и длительности импульса $\tau_{И}$. Очень важно отметить, что при одной и той же длительности импульса $\tau_{И}$ с увеличением периода их повторения $T$ основная частота $\omega_1 = 2\pi/T$ уменьшается, и линии спектра располагаются плотнее. Если укорачивается длительность импульса $\tau_{И}$ при неизменном периоде $T$, величина $\omega_1$ не меняется и каждая вертикальная линия, обозначающая спектральную составляющую, остается на том же месте оси частот. Меняются высоты линий, так как частоты нулей огибающей увеличиваются, т. е. нули смещаются вправо по оси частот.

Амплитуды всех гармоник меняются синхронно при изменении величины импульсов $E$ и отношения периода $T$ к длительности импульсов $\tau_{И}$, т. е. от скважности $q$. Форма амплитудного спектра при изменении $E$ не меняется.

## 2.2. Спектры непериодических колебаний

Спектр непериодического колебания не может быть представлен рядом Фурье. Чтобы воспользоваться им, можно искусственно представить непериодическое колебание в виде предела, к которому стремится периодическое колебание при увеличении его периода до бесконечности. При увеличении периода линии спектра начинают сближаться. В пределе спектр становится сплошным и изображается не вертикальными линиями амплитуд спектральных составляющих, а одной кривой, проходящей по вершинам линий.

По мере увеличения периода амплитуды составляющих спектра уменьшаются и в пределе становятся бесконечно малыми величинами. После предельного перехода суммирование в формуле ряда превращается в интеграл. Восстановить исходное колебание по такому ряду математически несложно, но изобразить амплитуды на графике не удастся. По этой причине в качестве спектра непериодического колебания используют спектральную плотность, определяемую как предел отношения амплитуды спектральной составляющей к разности частот смежных гармоник. Спектральная плотность может быть определена по форме колебания с помощью математического выражения, называемого формулой прямого преобразования Фурье:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t}dt\,.$$

Восстановить колебание по известному спектру можно с помощью формулы обратного преобразования Фурье:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega)e^{j\omega t}d\omega\,.$$

Эти два выражения позволяют для непериодических сигналов выполнять все преобразования, которые возможны для периодических колебаний с помощью рядов Фурье. Периодические колебания – математическая абстракция, так как предполагается, что они существуют на бесконечном интервале времени. Непериодические колебания ближе к реальным сигналам, поэтому преобразование Фурье, основанное на спектральной плотности, – общий случай. В практике спектрального анализа оно применяется чаще и в теории сигналов считается основным.

На рис. 2.5 для примера приведена временная диаграмма (*а*) и спектральная плотность одиночного прямоугольного импульса (*б*). Импульс соответствует последовательности импульсов, представленной на рис. 2.3 и 2.4. По форме спектр одиночного импульса совпадает с огибающей спектра периодической последовательности. Для наглядности отображения сплошного спектра на рис. 2.5 пространство под кривой спектральной плотности заштриховано. Обычно штриховка не выполняется.

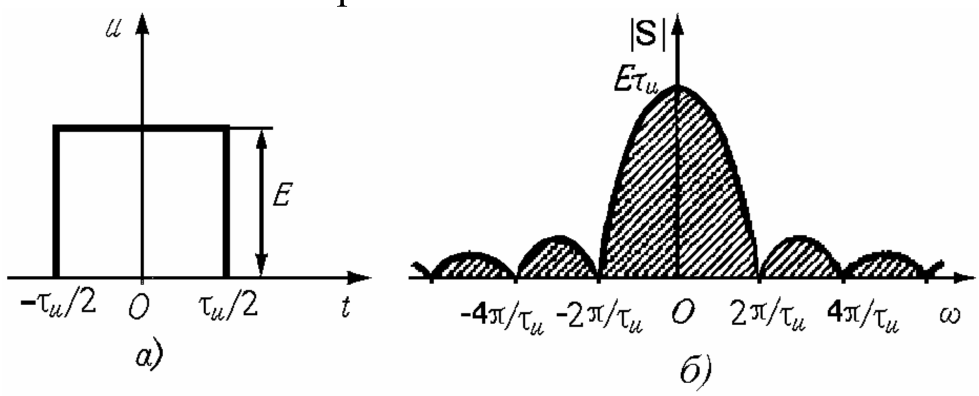



Рис. 2.5

## 2.3. Примеры спектров колебаний

Ниже приведены спектры колебаний, наиболее распространенных в электронных устройствах.

Из приведенных спектров видно, что дельта-функция обладает наиболее широким спектром. Эта функция – математическая абстракция, так как под ней понимается бесконечно короткий импульс с бесконечно большой амплитудой и единичной площадью импульса. Реальный аналог дельта-функции – просто очень короткий импульс, ширина спектра которого значительно больше полосы пропускания анализируемого электронного устройства.

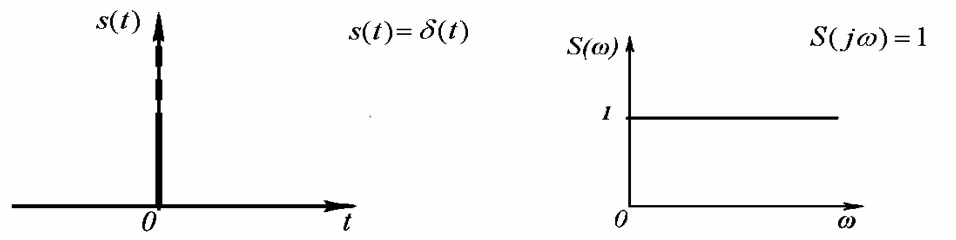
Сравнивая спектр дельта-функции со спектром прямоугольного импульса, можно заметить, что ширина последнего уменьшается с увеличением длительности. Амплитуда низкочастотных составляющих спектра с увеличением длительности увеличивается за счет быстрого уменьшения амплитуд высокочастотных составляющих. Это означает, что чем медленнее меняется сигнал, тем уже его спектр.

Если длительность импульсов фиксировать и менять только форму импульсов, то ширина спектра будет зависеть от наличия на временной диаграмме сигнала участков с резкими изменениями. Такие изменения отсутствуют в импульсах колоколообразной формы. Плавная форма этих импульсов приводит к тому, что спектр у них самый узкий.

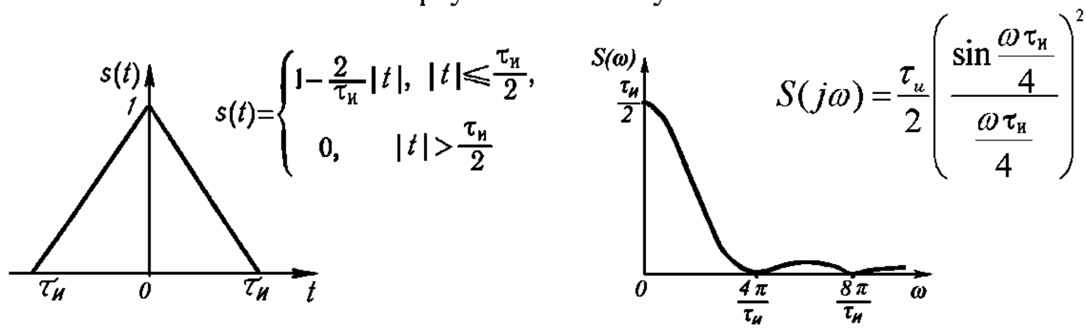
Спектры колебаний, наиболее распространенных
в электронных устройствах

| Сигнал | Спектральная плотность |
|---|---|

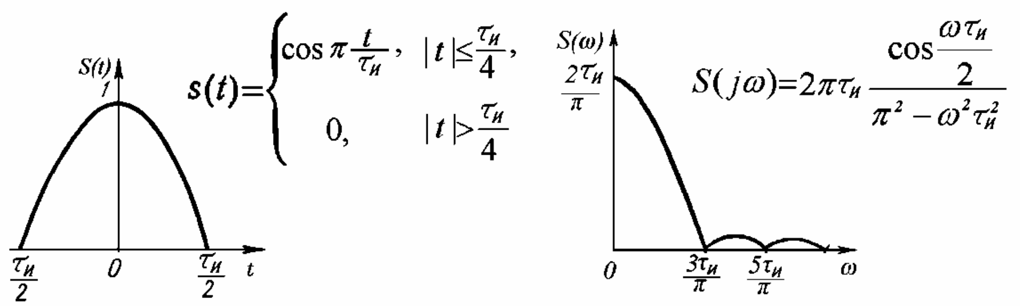
Дельта-функция



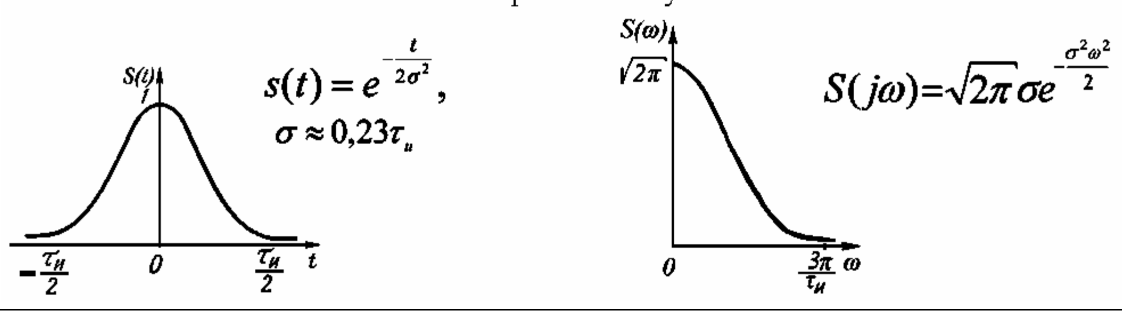

Треугольный импульс




Косинусоидальный импульс




Колоколообразный импульс



## 2.4. Свойства преобразований Фурье

1. Преобразование Фурье является линейным, т. е. спектр суммы колебаний равен сумме спектров этих колебаний:

$$F\left[\sum_{i=1}^{n} s_i(t)\right] = \sum_{i=1}^{n} S_i(j\omega).$$

2. Увеличение амплитуды колебания $s(t)$ в $a$ раз приводит к увеличению в $a$ раз амплитуд составляющих спектра:

$$F[as(t)] = aS(j\omega).$$

3. Увеличение масштаба времени колебания в $a$ раз приводит к уменьшению в $a$ раз амплитуд составляющих спектра и ширины частотной полосы спектра:

$$F[s(at)] = \frac{1}{a} S\left(j\frac{\omega}{a}\right).$$

Это очень важное свойство для передачи сигналов по каналам связи, так как показывает, что, например, широкополосные сигналы можно передавать по узкополосным каналам, растянув сигналы во времени (путем записи, к примеру, на магнитную ленту и воспроизведения с пониженной скоростью движения ленты).

4. Задержка колебания на $\tau$ эквивалентна умножению его спектра на множитель $e^{-j\omega\tau}$:

$$F\left[s(t-\tau)\right] = S(j\omega)e^{-j\omega\tau}.$$

5. Дифференцирование колебания эквивалентно умножении его спектра на $j\omega$:

$$F\left[\frac{ds(t)}{dt}\right] = j\omega S(j\omega).$$

6. Интегрирование колебания эквивалентно делению его спектра на $j\omega$:

$$F\left[\int_{-\infty}^{t} s(\tau)\,d\tau\right] = S(j\omega)/j\omega.$$

# 3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Экспериментальная часть лабораторной работы выполняется методом моделирования с помощью прикладного пакета Electronic Workbench на персональном компьютере линии IBM PC с производительностью не ниже P150 и оперативной памятью 32 МБ и выше. Рабочее окно пакета приведено на рис .3.1.

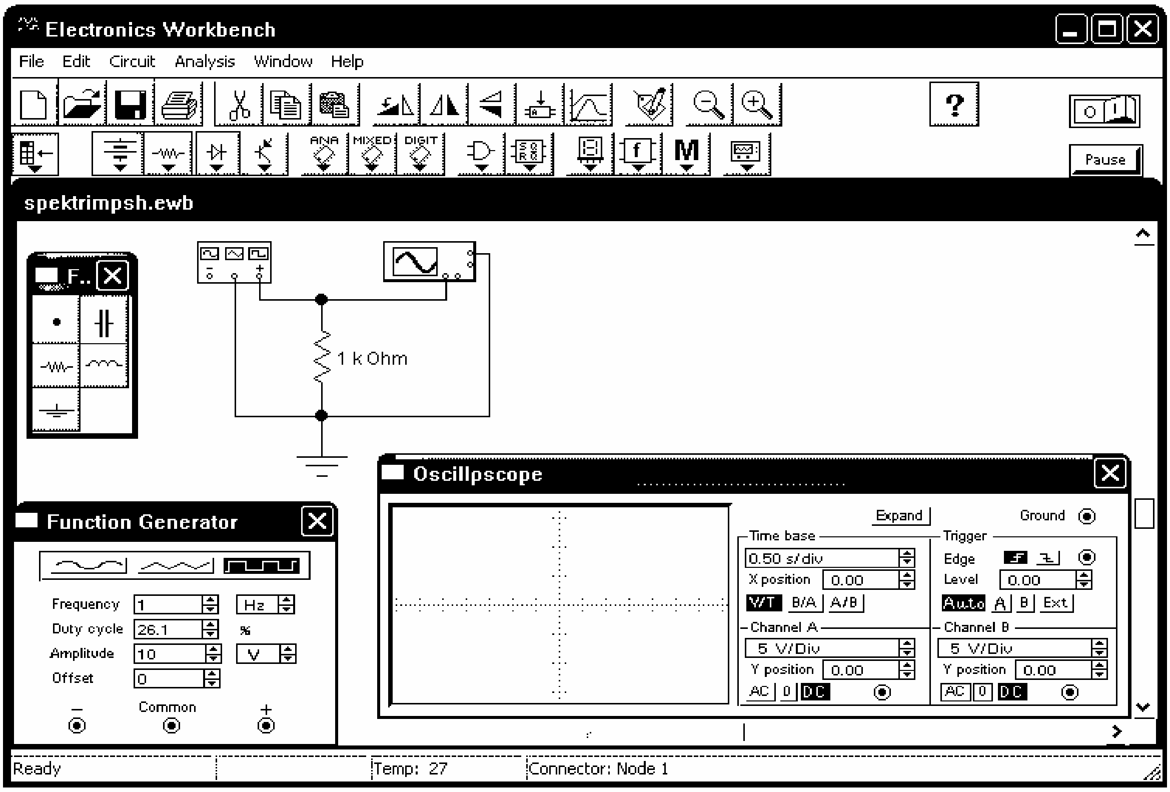



Рис. 3.1

Вызов рабочих панелей генератора и осциллографа можно выполнить двойным щелчком по обозначению прибора на схеме.

3.1. Задание вида генерируемых колебаний производят с помощью кнопок в верхней части панели управления генератора. Возможна генерация одного из трех видов колебаний: гармонические колебания напряжения, импульсы пилообразной формы с линейно изменяющимся напряжением фронтов и прямоугольные импульсы с идеальными прямоугольными фронтами. Задание частоты и амплитуды колебаний производится в полях Frequency и Amplitude. Порядок задания стандартный и пояснений не требуется.

Установку длительности прямоугольных импульсов можно производить в поле Duty cycle на панели генератора, в котором указывается длительность в процентах от величины периода следования импульсов. Это значение рассчитывается студентами по известным параметрам колебаний: длительности и периоду следования импульсов. Для пилообразных импульсов Duty cycle задает соотношение между передними и задними фронтами.

Нижнее поле панели генератора Offset управляет напряжением постоянной составляющей колебаний, вызывающей смещение колебаний по шкале напряжений вверх или вниз. При постоянной составляющей, равной нулю, колебания на выходе генератора будут знакопеременными. Для генерации положительных импульсов необходимо подобрать постоянную составляющую так, чтобы минимальное значение колебаний равнялось нулю.

3.2. Для наблюдения временных осциллограмм мгновенных значений напряжения можно воспользоваться виртуальным осциллографом. После ввода параметров колебания в генераторе следует включить выключатель «O I» на инструментальной панели Electronics Workbench (справа вверху) и дождаться, когда будет промоделирован временной интервал, достаточный для снятия осциллограмм. Затем надо выключить «O I». Нельзя оставлять выключатель «O I» включенным на длительное время. Пока он включен, компьютер продолжает расчет временной диаграммы в фоновом режиме и заполняет все больший объем оперативной памяти компьютера. Когда произойдет переполнение, расчет аварийно прекратится. Нормальный процесс нарушается, и возможна потеря всех, не сохраненных результатов.

3.3. Спектр колебаний в желаемой точке схемы можно получить с помощью пункта меню Analysis/Fourier…. Рабочая панель этого пункта приведена ниже (рис. 3.2).

Для правильных измерений необходимо задать следующие параметры:

- **Output node** – номер точки схемы, для которой выполняется расчет спектра. Этот номер появляется в специальном поле внизу рабочего окна Workbench, если навести на точку маркер;
- **Fundamental frequency** – шаг сетки частот, на которых рассчитываются значения спектральных составляющих. В спектрах периодических колебаний присутствуют составляющие только с

частотами, кратными частоте исходного колебания, поэтому можно задавать значение данного параметра, равным частоте исследуемого колебания;

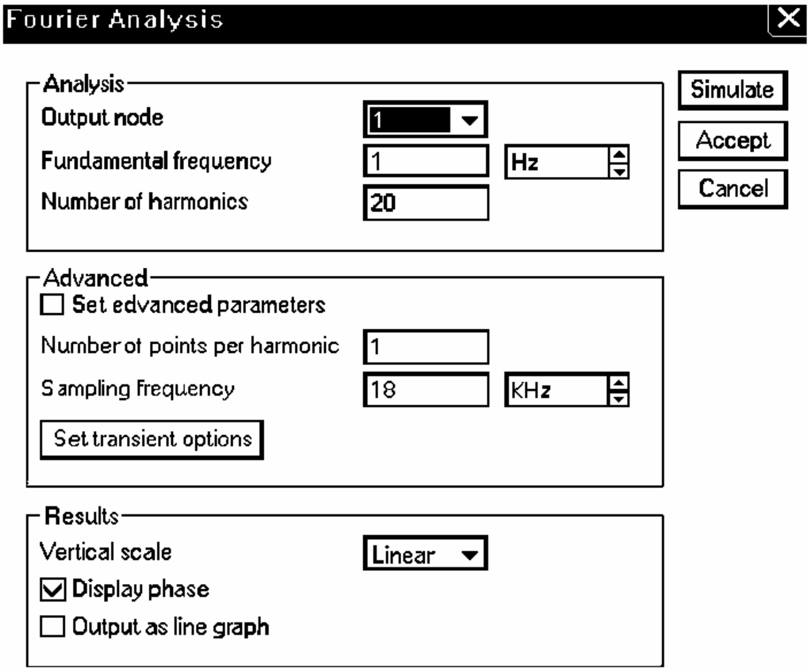



Рис. 3.2

- **Number of harmonics** – число рассчитываемых гармоник, т. е. число составляющих спектра, выводимых на экран;
- **Vertical scale** – тип шкалы по вертикали. В данной работе предполагается использование линейной шкалы;
- **Display phase** – включение вывода на экран графика фазового спектра.

Задав все параметры, надо нажать клавишу **Simulate**. После появления изображений амплитудного и фазового спектров надо отформатировать их в наиболее наглядном виде и скопировать, например, с помощью клавиши Print Screen клавиатуры компьютера и любого редактора фотографических изображений. Удобно пользоваться стандартным редактором **Microsoft Photo Editor**, который работает быстро, прост в обращении и позволяет получать файлы осциллограмм и графиков малого объема с приемлемым качеством. При необходимости графики доводятся до требуемого вида вручную.

# 4. РЕКОМЕНДАЦИИ И ЗАМЕЧАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

4.1. При задании положительных импульсов следует помнить, что калибровка генератора выполнена под знакопеременные сигналы, у которых положительная полуволна равна по амплитуде отрицательной. У положительных импульсов отрицательная полуволна отсутствует, поэтому калибровка установки амплитуды в генераторе нарушается и необходимо контролировать правильность полученных колебаний по осциллограммам. Наиболее удобно это делать, отсчитывая амплитуды и интервалы времени по клеткам сетки, нанесенной на шкале осциллографа, и используя цену деления (клетки). Цифровые указатели рационально использовать только при снятии точных отсчетов.

4.2. Вид графиков спектров, генерируемых пакетом Workbench, имеет общее назначение и не соответствует требованиям наглядности и полноты представления результатов проделанной студентом работы. Это требует ручной доработки графиков, которую можно выполнить черной тушью или шариковой ручкой с черной пастой.

4.3. Скважностью периодической последовательности импульсов называется отношение периода к длительности импульсов. Импульсная последовательность, у которой длительность импульсов равна длительности паузы, называется меандр. На графике спектра такой последовательности частоты четных гармоник совпадают с нулями огибающей. В результате спектр меандра содержит только нечетные гармоники.

# 5. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

5.1. Исследовать спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов, а также связь между параметрами импульсов (длительность, частота следования, амплитуда) и формой амплитудного спектра.

5.1.1. Собрать схему (см. рис. 3.1) и установить на выходе генератора периодическую последовательность положительных прямоугольных импульсов. Параметры колебаний взять из таблицы вариантов, приведенной в п. 1.2.

5.1.2. Снять с помощью виртуального осциллографа временной график периодической последовательности прямоугольных импульсов.

5.1.3. Построить амплитудный и фазовый спектры. Измерить ширину спектра по уровню 0,707 и 0,1 от максимального значения огибающей. Необходимые дополнительные построения на графиках выполнить вручную. Нижнюю частоту спектра принять равной нулю.

5.1.4. Проанализировать графики обоих спектров и сделать выводы о форме амплитудного спектра и связи ее с параметрами последовательности прямоугольных импульсов.

5.2. Исследовать амплитудный спектр прямоугольных импульсов со скважностью $Q = 2$, т. е. с периодом равным удвоенной длительности импульсов. Для этого построить амплитудный спектр и проанализировать его особенности, сравнив со спектром по п. 5.1. Длительность импульсов оставить в соответствии с заданием.

5.3. Исследовать аналогично амплитудно-частотный спектр периодической последовательности положительных пилообразных импульсов. Импульсы установить с одинаковыми передним и задним фронтами и с амплитудой, равной амплитуде прямоугольных импульсов. Период задать равным периоду прямоугольных импульсов в предыдущем пункте. Измерить ширину спектра по уровню 0,707 и 0,1. Сравнить результаты измерений и сам амплитудный спектр со спектром прямоугольных импульсов п. 5.2.

5.4. Исследовать изменение спектральных характеристик периодической последовательности прямоугольных импульсов в зависимости от изменения основных параметров периодического колебания: амплитуды, длительности и периода импульсов.

5.4.1. Построить амплитудный спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов при двух – трех значениях амплитуды. Оставшиеся два параметра последовательности поддерживать неизменными. Значения выбрать такими, чтобы наглядно отразить связь спектра с варьируемым параметром. Измерить ширину спектра по уровню 0,707 относительно амплитуды первой гармоники. Сделать по графикам выводы о влиянии амплитуды на спектр и его ширину.

5.4.2. Исследовать аналогично влияние длительности импульсов на спектр последовательности при постоянном периоде и амплитуде.

5.4.3. Исследовать аналогично влияние величины периода следования импульсов на форму и ширину амплитудного спектра.

## 6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

6.1. Что такое прямое и обратное преобразование Фурье? Чем отличается спектр периодического колебания от спектра непериодического?

6.2. Почему в спектре периодического колебания присутствуют только гармоники и отсутствуют составляющие на промежуточных частотах? Чему равны частоты гармоник?

6.3. На каких частотах огибающая спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов становится равной нулю?

6.4. Почему спектры пилообразных колебаний содержат меньше высокочастотных составляющих, чем спектры прямоугольных импульсов?

6.5. Как меняется высокочастотная часть спектра импульсной последовательности, если длительность фронтов импульсов увеличивается за счет сглаживания формы в инерционных цепях?

6.6. Как должны измениться параметры периодической последовательности прямоугольных импульсов, чтобы спектр полностью сохранил свою форму, но растянулся вдвое по шкале частот?

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каяцкас, А. А*. Основы радиоэлектроники : учеб. пособие для студентов вузов по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры» / А. А. Каяцкас. – М. : Высш. шк., 1988. – С. 13 – 35.

2. *Нефедов, В. И*. Основы радиоэлектроники : учеб. для вузов / В. И. Нефедов. – М. : Высш. шк., 2002. – С.83 – 103. – ISBN 5-06-004274-X.

3. *Баскаков, С. И*. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. для вузов по специальности «Радиотехника» / С. И. Баскаков. – М. : Высш. шк., 2000. – 462 с. – ISBN 5-06-003843-2.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

СПЕКТРЫ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Методические указания к лабораторной работе
по курсу «Основы радиоэлектроники и связи»

Составитель
ДАВЫДОВ Геннадий Дмитриевич

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор М.В.  Руфицкий

Подписано в печать 30.03.07.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 0,00. Тираж 70 экз.
Заказ
Издательство
Владимирского государственного университета.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.