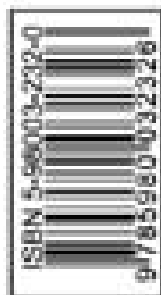


Библиотека Инженера



Дьяконов В. П.

Современная осциллография и осциллографы



ВОПРОСЫ: все об осциллографах в одной книге!

Осциллографы: история и современность

Приемы обработки сигналов

Устройства осциллографов

Особенности отечественных и зарубежных осциллографов

Осциллографы и компьютеры

Виртуальная лаборатория

Накладка для специалиста!



УДК 681.3
ББК 32.973.26-018.2
Д 93

В. П. Дьяконов

Д93 Современная осциллография и осциллографы. Серия «Библиотека инженера». — М.: СОЛОН-Пресс, 2010. — 320 с.: ил.

ISBN 5-98003-232-0

Описана техника графической визуализации электрических процессов — осциллография. Даны основы работы электронных осциллографов — от осциллоскопа Брауна и первых советских осциллоскопов до новейших стробоскопических осциллографов ведущих фирм мира с полосой частот сигналов до 100 ГГц. Детально описано применение современных аналоговых, аналогово-цифровых и цифровых запоминающих осциллографов, в том числе с цифровым люминофором и аналоговым послесвечением, компьютеризированных осциллографов, осциллографов в виде плат расширения и приставок к компьютерам, а также виртуальных лабораторий с обширными возможностями математической обработки осциллограмм. Описаны курсорные и автоматические измерения, спектральный и статистический анализ сигналов и др.

Для инженеров и техников служб сервиса, научных работников и аспирантов, студентов и преподавателей вузов и опытных радиолюбителей.

www.solon-press.ru
E-mail: solon-avtor@coba.ru

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-Пресс» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из двух способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20.
2. Передать заказ по электронной почте на адрес: **magazin@coba.ru**.

Бесплатно высылается каталог издательства по почте.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-Пресс». Для этого надо послать пустое письмо на робот-автоответчик по адресу: **katalog@coba.ru**.

По вопросам приобретения обращаться:
ООО «АЛЬЯНС-КНИГА КТК»
Тел: (095) 258-91-94, 258-91-95, **www.abook.ru**

ISBN 5-98003-232-0

© Макет и обложка «СОЛОН-Пресс», 2010
© В. П. Дьяконов, 2010

Глава 1. История и основы электронной осциллографии

1.1. Сигналы и их спектры

1.1.1. Синусоидальные колебания и сигналы

Мир велик и многообразен! То, что мы видим, слышим и осязаем, составляет ничтожную часть того, что происходит в окружающем нас мире. Мы не ощущаем, что живем в океане электромагнитных волн, не видим, какие токи текут в проводах и в тканях нашего организма. Нам не видим мир атомов и молекул, атомных и молекулярных процессов. Некоторые процессы протекают в природе очень медленно, другие чрезвычайно быстро. Область науки и техники, позволяющая визуально (чаще всего графически) представлять различные процессы, получила название *осциллография*. Приборы, реализующие возможности осциллографии, называются *осциллографами*.

Колебания (осцилляции) широко распространены в природе. Звучание камертона и струны, свист человека — все это примеры достаточно простых колебаний, близких к синусоидальным. Мы слышим звуки от таких колебаний, но не имеем ни малейшего представления о том, какую форму имеют эти колебания. Лишь с помощью механических осциллографов более сотни лет тому назад была установлена форма этих колебаний — она оказалась синусоидальной (рис. 1.1). Впрочем, математики давно установили, что такую форму имеют низкочастотные, так называемые свободные, механические колебания, например механического маятника, качелей или моста, после их возбуждения. Это очень немногие виды колебаний, которые мы можем увидеть и оценить.

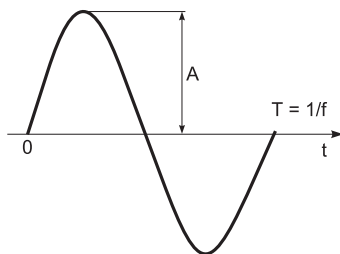


Рис. 1.1. Период синусоидального колебания (сигнала)

Синусоидальные колебания $y(t)$ описываются следующей зависимостью:

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1.1)$$

где A — амплитуда (для тока в амперах, для напряжения в вольтах и т. д.), f — частота (в герцах, 1 Гц это одно полное колебание в секунду) и φ — фаза (в радианах). Период синусоидальных колебаний (один их полный цикл) $T = 1/f$. Синусоидальные колебания циклически повторяются. Частота синусоидальных колебаний это число циклов в единицу времени. Для звуковых колебаний амплитуда определяет громкость звука, частота — его тон, а вот фазу чистого синусоидального колебания ухо не воспринимает.

Нередко используется и понятие круговой частоты синусоиды $\omega = 2\pi f$, тогда синусоидальное колебание записывается в виде:

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi). \quad (1.2)$$

Если все три параметра (амплитуда, частота, фаза) неизменны во времени, то мы имеем стационарное синусоидальное колебание. Изменение одного или двух из параметров во времени означает модуляцию синусоидального сигнала. При этом сигнал становится нестационарным.

Синусоидальное колебание имеет огромное значение в науке и технике. В отличие от постоянных величин, например, постоянного напряжения или тока, синусоидальное колебание описывает простейшие колебательные режимы работы динамических систем. Для получения синусоидальных колебаний создано множество приборов, например, это генераторы низкой (НЧ) и высокой (ВЧ) частот, генераторы стандартных сигналов (ГСС), RC-генераторы, кварцевые и квантовые генераторы синусоидальных сигналов с высокостабильной частотой. А модуляция (изменение параметров синусоидального сигнала по закону модулирующего сигнала) синусоидального сигнала сделала возможной передачу таких сигналов на расстояние в виде электромагнитных волн. Это стало основой радиотехники.

1.1.2. Понятие о спектральном синтезе сложных сигналов

Роль синусоидальных сигналов многократно возрастает, если учесть, что сложные сигналы практически любой реальной формы могут быть представлены набором синусоидальных колебаний — *гармоник* с кратными основной частоте (первой гармоники) частотами [1]. При этом такой набор (*спектр*) образует сложные колебания, например звуки музыки или человеческой речи. Простые колебания именуют *гармоническими*, поскольку они, несмотря на свой колебательный характер, находятся как бы в гармонии с окружающей средой — их форма и параметры (амплитуда, частота и фаза) неизменны во времени.

Эту возможность, вначале на примере задач теплопроводности, теоретически обосновал гениальный французский математик Жан Батист Жозеф Фурье (1768—1830 гг.). С помощью современных систем компьютерной математики [2, 3] можно дать наглядную трактовку гениальному мышлению Фурье. Возьмем для примера широко распространенные в технике осциллографии сигналы — прямоугольные и пилообразные импульсы. Первые применяются для контроля временных параметров осциллографов и различных технических устройств, вторые (что показано ниже) для создания развертки осциллографов. Оба сигнала содержат скачки. Можно ли получить хотя бы приближение таких сигналов с помощью сумм их синусоидальных составляющих? Ответ оказывается положительный и иллюстрируется рис. 1.2 и 1.3, где даны примеры синтеза этих сигналов.

Кривые на рис. 1.2 получены суммированием 1, 3 и 21 синусоиды с частотами, кратными частоте сигнала, и амплитудой, убывающей обратно пропорционально номеру частотной составляющей — гармоники. Используются только нечетные гармоники. Нетрудно заметить, что чем больше гармоник используется, тем ближе форма синтезированного сигнала к идеальной прямоугольной форме меандра — сигнала прямоугольной формы с равной длительностью полупериодов и равной амплитудой положительной и отрицательной полуволн. Если суммируются все гармоники (как четные, так и нечетные), то форма синтезируемого сигнала оказывается близкой к пилообразной — рис. 1.3 (здесь показаны 1, 5 и 15 гармоник).

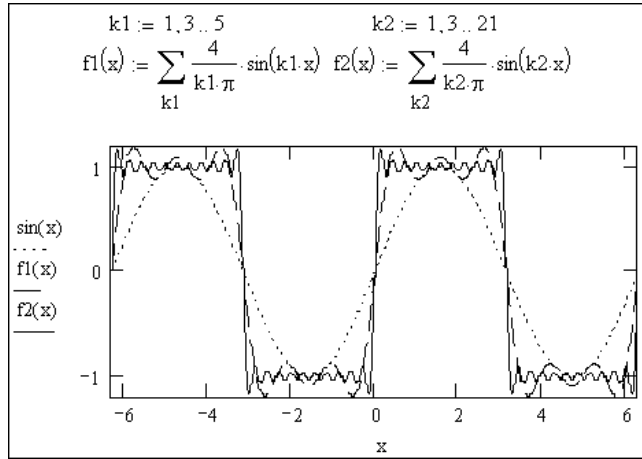


Рис. 1.2. Пример гармонического синтеза прямоугольных импульсов — меандра

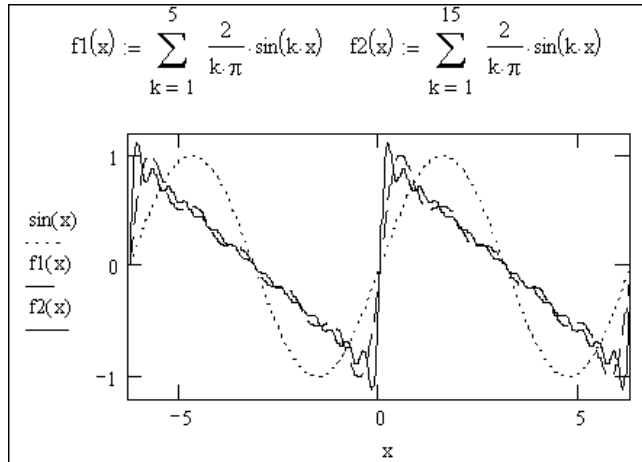


Рис. 1.3. Пример гармонического синтеза пилообразных импульсов

Для получения импульсных сигналов применяются импульсные генераторы. Из них особо надо выделить функциональные генераторы, генерирующие сигналы с различными функциональными зависимостями, например, в виде синусоид, прямоугольных и треугольных импульсов и т. д. Они также широко используются для испытания и отладки различных электронных устройств и систем. Существуют и синтезаторы импульсных сигналов на основе фурье-синтеза, но это очень дорогие и редкие приборы. Все они без осциллографа были бы бессмысленны.

1.1.3. Фурье-анализ и синтез периодических функций

Задача замены произвольной сложной или неудобной для вычислений функции набором более простых функций давно занимала умы математиков. Гениальность Фурье проявилась не только в том, что он предсказал гармонический синтез сложных сигналов, но и в том, что еще в 1807 году теоретически обосновал воз-

возможность гармонического синтеза произвольных периодических зависимостей, удовлетворяющих условиям Дирихле на промежутке $(-\pi, \pi)$:

- функция $y(x)$ непрерывна или имеет конечное число разрывов первого рода;
- промежуток $(-\pi, \pi)$ можно разбить на конечное число таких промежутков, на которых функция меняется монотонно.

Здесь важно отметить, что условия Дирихле выполняются для всех практически существующих периодических сигналов, поэтому в дальнейшем мы будем опускать ссылки на них. Рядом Фурье для функции общего вида $y(x)$, удовлетворяющей условиям Дирихле и имеющей период 2π , является ряд:

$$y(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N (a_k \sin(kx) + b_k \cos(kx)), \quad (1.3)$$

коэффициенты которого находятся по формулам Эйлера—Фурье:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(x) \cos(kx) dx \quad (1.4)$$

и

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(x) \sin(kx) dx. \quad (1.5)$$

Строгое доказательство того, что ряд (1.3) может приближать произвольную функцию, базируется на элементарных тригонометрических преобразованиях и понятии ортогональности набора функций, образующих этот ряд:

$$1, \cos(x), \sin(x), \cos(2x), \sin(2x), \dots, \cos(nx), \sin(nx), \dots$$

Ортогональность означает, что интеграл от произведения двух любых различных функций этого (возможно и иного) набора функций в промежутке от 0 до 2π равен нулю. Само доказательство, довольно громоздкое, можно найти в учебниках по высшей математике.

Важными сферами применения рядов Фурье являются расчеты радиотехнических устройств. В них обычно периодические сигналы представляют как функции времени $y(t)$ на отрезке $[0, T]$ с периодом $T = 1/f_1$, где f_1 — частота первой гармоники периодического сигнала. В этом случае ряд Фурье, после несложных преобразований, записывается в виде:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(2\pi k f_1 t) + b_k \sin(2\pi k f_1 t)), \quad (1.6)$$

где

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(2\pi k f_1 t) dt \quad (1.7)$$

и

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(2\pi k f_1 t) dt. \quad (1.8)$$

В этом случае коэффициенты a_k и b_k описывают косинусную и синусную составляющие k -й гармоники сигнала с периодом T и частотой $f_i = 1/T$. Часто используется иная форма ряда Фурье, упрощающая его синтез:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N M_k \cos(2\pi k f_1 t + \varphi_k), \quad (1.9)$$

где амплитуды гармоник M_k и их фазы φ_k определяются выражениями:

$$M_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (1.10)$$

и

$$\varphi_k = -\arctan(b_k/a_k). \quad (1.11)$$

Разложение функции на гармонические составляющие, то есть вычисление коэффициентов Фурье, принято называть *спектральным анализом*. А воссоздание функции, представленной рядом Фурье, называют *спектральным синтезом*. Гармонике с $k = 1$ называют основной или *первой гармоникой* сигнала. Она задает его частоту повторения f_1 . Остальные гармоники называют *высшими*, их частоты равны $f_k = k \cdot f_1$, где $k = 2, 3, 4, \dots$. Таким образом, спектр периодических сигналов, которые могут быть представлены рядом Фурье *дискретный* — он содержит набор фиксированных частот f_k , где $k = 1, 2, 3, \dots$.

Как видно из (1.9), сложные колебания могут содержать множество гармонических составляющих. Чем сложнее форма просматриваемых на экране осциллографа сигналов, тем больше гармоник требуется для его представления и тем шире должна быть полоса частот осциллографической трубки и усилителей отклонения. С помощью ряда Фурье можно установить, сколько гармоник сигнала нужно для представления сложного сигнала с заданной погрешностью. Словом, мы можем узнать, какой АЧХ и какой ФЧХ должен обладать осциллограф, чтобы представлять тот или иной сигнал достаточно достоверно. Спектральный подход лежит в основе многих направлений современной радиоэлектроники — достаточно отметить современную технику радиосвязи.

1.1.4. Дискретный фурье-анализ и спектр периодических функций

Вычисление коэффициентов Фурье непосредственно по интегральным представлениям встречает большие вычислительные трудности. Даже в системах компьютерной математики, где такое вычисление возможно, оно занимает много времени и ограничено приближенным вычислением амплитуд и фаз не более чем десятков гармоник. К тому же далеко не всегда сигнал является непрерывным. Чаше (особенно в цифровых устройствах) он имеет дискретное представление.

Предположим, что некоторая функция (или сигнал) задана рядом равноотстоящих дискретных отсчетов с числом N , т. е. $y_1, y_2, \dots, y_N$. В этом случае нет никаких оснований считать, что в промежутках между узлами значения функции не постоянны. Если же они постоянны, то интегралы при расчете коэффициентов Фурье (1.7) и (1.8) могут вычисляться простейшим методом прямоугольников:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N y_i \cos\left(\frac{2\pi k i}{N}\right) \text{ и } b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N y_i \sin\left(\frac{2\pi k i}{N}\right). \quad (1.12)$$

Детальный анализ, выходящий за рамки данной книги, показывает, что приведенные формулы для коэффициентов Фурье являются единственными теоретически обоснованными формулами приближенного вычисления коэффициентов Фурье [1]. Для произвольных функций они обеспечивают минимум среднеквадратической погрешности. Другими словами, приближение функции тригонометрическим рядом Фурье с ограниченным числом членов является регрессией. Описание средств дискретного анализа и синтеза методом дискретного преобразования Фурье можно найти в [2, 3]. Именно дискретное преобразование Фурье лежит в основе построения современных анализаторов спектра, которые часто встраиваются в цифровые осциллографы.

1.1.5. Непрерывное преобразование Фурье для произвольного сигнала

До сих пор мы рассматривали периодические функции и сигналы. А как быть, если они не периодические? Тут правомерны два подхода. Если функция или сигнал определены на некотором конечном промежутке пространства или времени (носителе конечной длины), то мы можем считать сигналы как бы периодически и применять к ним описанный выше спектральный анализ и синтез. Например, если сигнал определен в некоторый момент времени t_0 , то его можно посчитать периодическим с периодом t_0 или частотой $f_1 = 1/t_0$.

Другой путь заключается в переходе к непрерывному преобразованию Фурье в общем виде — для произвольного сигнала. Прямое преобразование Фурье в таком случае позволяет получить в аналитическом виде функцию частоты $F(\omega)$ от временной функции $f(t)$. Оно реализуется формулой

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (1.13)$$

Здесь $f(t)$ — скалярная функция независимой переменной t . Спектр при этом становится сплошным.

Заметим, что существует особый вид *оконного преобразования Фурье*. Он реализуется вводом в подынтегральное выражение множителя $W(t)$, описывающего некоторую временную зависимость, определенную на конечном интервале времени. Это позволяет перейти от фурье-анализа полного сигнала $f(t)$ к анализу его по частям, локализованным во времени.

Поскольку мы исходим из предположения, что $f(t)$, в общем, непериодическая функция, то уже нельзя вести речь об отдельных гармониках и о дискретном спектре сигнала. Спектр $F(\omega)$ становится непрерывным, и можно говорить лишь о плотности энергии сигнала в некоторой малой (стремящейся к нулю) полосе частот. Так что в данном случае $F(\omega)$ есть зависимость плотности энергии сигнала от частоты.

Соответственно, обратное преобразование Фурье задается следующим образом:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega. \quad (1.14)$$

Эта формула позволяет по функции $F(\omega)$ найти в аналитическом виде функцию $f(t)$.

Из формулы (1.13) вытекает главный недостаток прямого преобразования Фурье — интегральная оценка всех частотных составляющих спектра вне зависимо-

сти от времени их существования. Это связано непосредственно с бесконечными пределами интегрирования в (1.13). В результате вполне возможны случаи, когда совсем разные сигналы имеют одинаковый частотный спектр. Другими словами, фурье-анализ прекрасно подходит для стационарных сигналов, но не годится для нестационарных, у которых определенные частотные компоненты существуют только в определенные промежутки времени или когда параметры сигнала меняются во времени.

Роль осциллографии может резко возрасти при переходе к новому базису представления произвольных зависимостей — вейвлетам [48]. Вейвлет-анализ означает разложение таких зависимостей на сумму произведений вейвлет-коэффициентов на вейвлет-функции, имеющие вид ограниченных во времени зависимостей, удовлетворяющих ряду особых условий. Большинство вейвлетов имеет вид импульсных или очень сложных (например, фрактальных) колебаний, ограниченных во времени, перемещаемых и масштабируемых. Вейвлет-анализ и синтез уже широко применяются в технике обработки сигналов с локальными особенностями, например импульсных и цифровых сигналов. Он положен в основу наиболее эффективных алгоритмов сжатия звуковых и видеосигналов, их фильтрации и очистки от шума. Уже появились интегральные микросхемы, реализующие вейвлет-преобразования.

Техника вейвлет-преобразований ничуть не снижает значения фурье-преобразований. Она лишь устраняет некоторые принципиальные недостатки фурье-преобразований, в частности неудовлетворительный учет локальных особенностей сигналов и непригодность для анализа нестационарных сигналов (частично устраняемая применением оконного преобразования Фурье).

1.1.6. Быстрое преобразование Фурье (БПФ)

С позиций практики главным недостатком всех описанных выше методов фурье-анализа и синтеза функций и сигналов является большое время вычислений. Это связано с тем, что в формулах для коэффициентов Фурье присутствуют быстро осциллирующие множители, что требует разбивки интервалов интегрирования на очень малые части. В итоге объем вычислительных операций резко возрастает.

Для преодоления вычислительных трудностей, связанных с интегрированием в ходе ППФ и ОПФ быстроизменяющихся зависимостей, были предложены методы быстрого преобразования Фурье (БПФ или, в англоязычной транскрипции, FFT — от Fast Fourier Transform). Они используют специальную технику комбинации отсчетов функций, помноженных на осциллирующие множители, и учитывают периодичность значений тригонометрических функций. Алгоритмы БПФ не уменьшают погрешности вычислений при заданном числе гармоник, но позволяют резко уменьшить время спектрального анализа и синтеза — особенно если число временных отсчетов $y_i(t)$ кратно 2^N , где N — целое число.

В основе БПФ лежит прореживание по частоте и пирамидальный алгоритм, исключающий повторные вычисления периодически повторяющихся членов тригонометрического ряда Фурье. БПФ-алгоритм выполняется за $\sim N \log N$ -операций, где N — число отсчетов сигнала. БПФ применяется не только в системах компьютерной математики для ускорения преобразований Фурье, но и во многих иных аппаратных и программных средствах, описываемых в данной книге. Например, этот метод используется в анализаторах спектра, входящих практически во все цифровые осциллографы.

1.1.7. Эффект Гиббса

Синусоида (рис. 1.1) не содержит скачков и, следовательно, любой конечный набор синусоид (гармоник) не в состоянии создать скачки сигнала с бесконечно малой длительностью. Лишь в том случае, когда суммируется бесконечное число гармоник, можно надеяться на то, что быстрые изменения сигнала будут иметь стремящуюся к нулю длительность и будут близки к скачкам. Однако теоретически бесконечное число гармоник применить невозможно хотя бы потому, что при этом время синтеза сигнала будет бесконечно большим. Поэтому на практике число гармоник при синтезе импульсных сигналов всегда ограничено, а форма синтезированного сигнала несколько отличается от идеализированной формы. В этом отношении вейвлеты ведут себя куда лучше и легко синтезируют скачки [48].

При ограничении спектра конечным числом гармоник наблюдаются характерные волнообразные колебания синтезированных сигналов, особенно заметные в области разрывов. Этот эффект получил название эффекта Гиббса. Это очень нежелательный эффект, поскольку он сильно искажает форму колебаний и служит источником больших погрешностей. Относительная амплитуда пульсаций синтезированных сигналов (самых по себе не имеющих пульсаций) достигает 18% (или 9% от двойной амплитуды) и практически не меняется при увеличении числа гармоник — просто выбросы при пульсациях становятся короче. Между тем известно множество задач, где точность приближения должна составлять значения намного меньшие 1%, а порою не превышать и тысячных долей процента.

Поскольку пульсации эффекта Гиббса наиболее явно проявляются в моменты скачков анализируемой функции, ограничимся рассмотрением случая представления скачка, который ограничен спектром:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

Ограничение спектра можно учесть, введя в (1.14) умножение на прямоугольное частотное окно

$$W(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \gamma \\ 0, & |\omega| > \gamma \end{cases}.$$

Это окно задает резкое ограничение спектра. Опуская детали вывода, которые приведены в [1], найдем, что в этом случае

$$f(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} Si(\gamma x), \quad (1.15)$$

где функция $Si(z)$ известна как интегральный синус

$$Si(z) = \int_0^z \frac{\sin(t)}{t} dt. \quad (1.16)$$

Задание функции $Si(z)$ и построение зависимости $f(x)$ для данного случая представлены на рис. 1.4. Там же даны результаты вычисления значений выбросов, обусловленных эффектом Гиббса.

Итак, как следует из рассмотренного, эффект Гиббса существует, увы, как теоретически обоснованная реальность. И связан он прежде всего с неудачно подобранной (или просто поневоле существующей) прямоугольной формой частотного

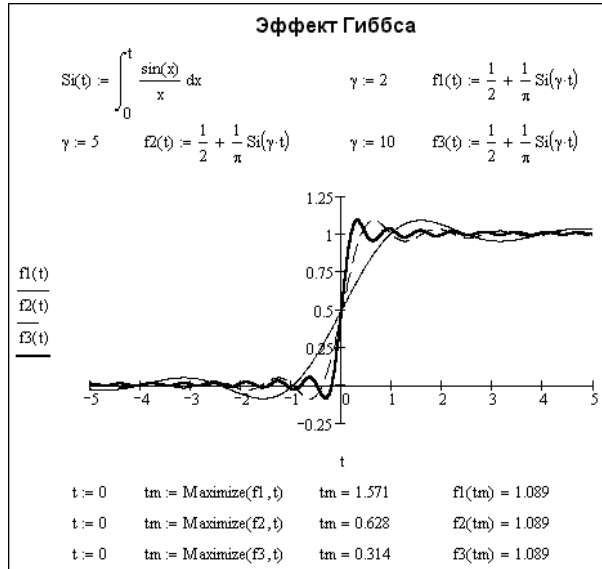


Рис. 1.4. Иллюстрация к возникновению эффекта Гиббса

окна, резко ограничивающего число используемых при спектральном синтезе гармоник (частот). Выбором специального окна можно заметно ослабить влияние этого «зловредного» эффекта. Для этого в подынтегральное выражение (1.14) вводится множитель $W(\omega)$, задающий окно с заданной формой амплитудно-частотной характеристики. Тем самым реализуется *обратное оконное преобразование Фурье*. Математические средства борьбы с эффектом Гиббса и примеры их реализации в системе Mathcad можно найти в [3]. Там же, кстати, как и в [48], можно найти примеры представления импульсов с помощью вейвлет-анализа и синтеза.

1.2. История осциллографии

1.2.1. Механические, светолучевые и магнитоэлектрические осциллографы

Человечество давно искало способы отображать графически временную зависимость сложных колебаний (сигналов). Для этого использовалась развертка колебаний во времени. Автор этой книги для объяснения такой развертки иногда использовал следующий прием. В руку берется кусочек мела, рука вытягивается и ею совершаются колебательные движения вверх-вниз, вверх-вниз и т. д. Теперь, не переставая совершать эти колебательные движения, подойдите к обычной классной доске, коснитесь мелом ее поверхности и постарайтесь равномерно пройти вдоль доски. Кусок мела прочертит линию, которая и будет наглядно представлять синусоидальное колебание (синусоиду). Исхитрившись, нетрудно таким образом показать «осциллограмму» прямоугольного или треугольного сигнала.

Можно сказать, что этот эксперимент отражает работу механического *осциллографа* — прибора, предназначенного для графического представления временных зависимостей колебаний.

Область науки и техники, посвященная решению этой задачи, получила название *осциллографии*. А приборы для наблюдения временных зависимостей различных изменяющихся величин получили название *осциллоскопов*, а в дальнейшем, после приспособления их к достаточно точным и быстрым измерениям, — *осциллографов*.

Слово «осциллограф» образовано от слов «осциллум» — колебания и «графо» — пишу. Отсюда и назначение этого измерительного прибора — отображать на экране кривые, характеризующие форму тех или иных колебаний. Другое название этого прибора — *осциллоскоп* происходит от того же «осциллум» и «скопео» — смотрю. Т. е. речь идет опять-таки о наблюдении формы колебаний. И хотя второе название более точное, в литературе на русском языке принято все же первое — осциллограф.

Будь автор этой книги историком, он отдал бы предпочтение в первенстве создания осциллографии изобретателю фонографа — Эдисону. Тот еще в 1877 году стал записывать механические колебания иглы, прикрепленной к мембране, на вращающийся восковый валик. Получаемая при этом звуковая дорожка на восковом диске представляла собой типичную осциллограмму сложных звуковых колебаний с механической разверткой, осуществляемой равномерным вращением валика (позже диска граммофонной пластинки). Однако Эдисон не обратил внимания на то, что создал первый *механический осциллограф*, записывающий сложные колебания и позволяющий их наблюдать. Возможно, так было потому, что амплитуда отклонений прорези в канавке воскового диска была столь мала, что «осциллограмму» можно было разглядеть лишь в лупу с хорошим увеличением.

Восемь лет спустя, в 1885 году, казанским физиком Р. А. Колли (1845—1891) был создан *осциллометр* — прототип современных светолучевых (шлейфовых) осциллографов. Магнитоэлектрический осциллоскоп французского физика А. Блонделя (1863—1938), изобретен в 1893 году. Однако использование светолучевых и магнитоэлектрических осциллографов было ограничено их низкочастотным диапазоном. Эти приборы применяются и в наши дни, порою под несколько иными названиями. Например, в электроэнергетике широко используются магнитоэлектрические ленточные самописцы, исправно вычерчивающие временные зависимости токов и напряжений на рулонной бумаге. Их можно увидеть на любой электростанции. Но эти приборы регистрируют лишь медленно изменяющиеся процессы.

1.2.2. Трубка и осциллоскоп Брауна

В последней четверти XIX века бурно развивается электроэнергетика и электротехника. Электрические сети многих городов работали на переменном токе. Появились различные преобразователи переменного тока. В ходе такого преобразования синусоидальная форма переменного напряжения нередко сильно искажалась. Например, даже простое однополупериодное выпрямление переменного напряжения вело к обрезанию одной из полуволн синусоидального напряжения. Возникла необходимость в измерении мгновенных значений напряжений и токов, их эффективных значений и разности фаз в электрических цепях. Так появилась потребность в графическом представлении сложных временных зависимостей напряжений и токов в электротехнических системах и устройствах..

Открытие Генрихом Герцем в 1886—1888 годах электромагнитных волн и связанных с ними высокочастотных электромагнитных процессов привело к возникновению радиотехники, в которой стали широко использоваться высокочастотные

сигналы. Возникла техника связи, а затем радиолокация и импульсная техника, а еще позже телевидение и вычислительная техника. В этих отраслях науки и техники широкое применение получили импульсные сигналы самой разнообразной формы, порою очень сложной. Но органы чувств человека вообще не реагируют на слабые электрические и световые сигналы, совершенно не чувствительны к их форме (временной зависимости).

Все это вело к необходимости создания быстродействующих и широкополосных осциллографов. Ими стали *электронные осциллографы*. Ныне это «глаза» человека в мире самых разнообразных сигналов, которые человеческий организм сам по себе не воспринимает. Уникальные возможности этих приборов, как и массовость их применений, невозможно переоценить. Но путь к их появлению был не простым, а сами эти приборы поначалу были далеко не так совершенны, как в наши дни. Первые осциллографы были вовсе не массовыми изделиями, скорее они были уникальными физическими приборами.

6 июня 2000 года исполнилось 150 лет со дня рождения крупного немецкого ученого-физика, члена-корреспондента Берлинской академии наук Фердинанда Брауна, который считается изобретателем электронного осциллографа и ряда других физических и электроизмерительных приборов [4—8]. Он был удостоен этой престижной награды вместе со знаменитым итальянским радиотехником Г. Маркони за выдающийся вклад в развитие радиотехники вообще и изобретение осциллографа в частности.

Во время творчества Брауна многие физики увлекались опытами с различными излучениями. Браун обратил внимание на катодные лучи и вскоре пришел к убеждению, что, взяв за основу известную физикам трубку У. Крукса (1832—1919) с холодным катодом, можно создать катодно-лучевой прибор для индикации формы электромагнитной волны, поскольку световое пятно на флуоресцирующем экране трубки, мгновенно реагируя на электромагнитное поле, может синхронно следовать за его изменением. Так появилась трубка Брауна (рис. 1.5). Это событие датируется 1897 годом.

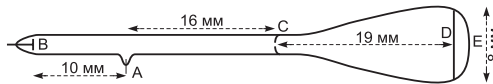


Рис. 1.5. Чертеж трубки Брауна

Трубка Брауна (это название вплоть до 40-х годов распространялось и на другие электронно-лучевые приборы) монтировалась горизонтально на опоре вместе с отклоняющей луч электронов катушкой. Таким образом, впервые использовалось *магнитное отклонение*, а не электростатическое, как у трубок современных электронных осциллографов. В дальнейшем такие трубки с двумя катушками получили название *кинескопов*, а катушки — *магнитной отклоняющей системы*. Брауном использовались как опаянные трубки, так и трубки с ручным ртутным насосом, непрерывно откачивающим воздух. Анодное напряжение около 50 кВ (впечатляет и сейчас) обеспечивалось индукционной машиной.

Исследуемый ток подводили к катушке электромагнита, расположенной снаружи узкой части стеклянной колбы между диафрагмой и экраном. Пучок электронов, создаваемый катодом, откликаясь на изменения магнитного поля, вычерчивал на флуоресцирующем экране линию между двумя точками, соответствующими минимальной и максимальной величинам исследуемого сигнала. Светящаяся линия отбрасывалась на внешний экран с помощью зеркала В. Кенига, которое, поворачи-

чиваясь, позволяло наблюдать изменение сигнала во времени. Итак, в осциллокопе Брауна использовалась оптико-механическая развертка по горизонтали.

Скорость сканирования с помощью зеркала, превращающего пульсирующую вертикальную линию в двумерную визуально наблюдаемую кривую, отображающую временную зависимость тока в отклоняющей катушке, была невелика. Таким образом, созданная Брауном трубка заметно отличалась от современных осциллографических трубок и тем более от современных цветных кинескопов с маской для телевизоров, изобретение которых иногда безосновательно приписывают К. Ф. Брауну. Отличалась трубка и от современных осциллографических трубок с электростатическим отклонением.

Осциллограф Брауна в некотором роде был парадоксальным инструментом. Он содержал скоростной электронный прибор — электронно-лучевую трубку, но использовал инерционный метод магнитного отклонения луча катушкой и механическую развертку. Отсюда и невысокое быстродействие прибора в целом.

К. Ф. Браун не патентовал свой осциллограф. Он решил сделать его доступным для всех исследователей и лично содействовал его распространению путем многократных публичных демонстраций и публикаций в научной печати. Это был благородный шаг ученого, способствовавшего эффективному применению замечательного прибора и дальнейшему его улучшению. Во многом благодаря этому осциллограф стал быстро совершенствоваться и вскоре из уникального физического прибора превратился в незаменимый инструмент, применяющийся в различных лабораториях, от академических до производственных.

Трубка Брауна широко применялась в научных исследованиях русскими учеными [9]. Об опытах с нею сообщали в своих публикациях А. Л. Гершун (1868—1915), В. К. Лебединский (1868—1937), А. А. Петровский (1873—1942) и другие, вносящие в методы осциллографии и в прибор Брауна значительные усовершенствования. В 1899 году ассистент Брауна И. Ценнек (1871—1959) ввел электромагнитную развертку для замены зеркала Кенига. В 1907 году другой его ассистент — россиянин Л. И. Мандельштам разработал метод и схему получения пилообразного тока для линейной развертки осциллограммы по оси времени [9]. Суть метода заключалась в том, что для развертки использовалось только начало разрядного процесса конденсатора, когда ток является практически линейной функцией времени. Остальная часть тока (80%) отбрасывала пятно за край экрана. Эти и другие нововведения существенно расширили возможности осциллографа, сделали его использование более удобным.

Достижения К. Ф. Брауна высоко оценила мировая научная общественность и Комитет по присуждению Нобелевских премий, уравнивший его заслуги с заслугами именитого итальянца Г. Маркони, которого считают создателем радиотехнической индустрии Запада. Нобелевские премии присуждаются только живым ученым. Наш соотечественник А. С. Попов умер 1906 году. Если бы не это печальное событие, возможно, что и он разделил бы в 1909 году славу Нобелевского лауреата в области радиотехники — вместе с Г. Маркони и К. Ф. Брауном.

1.2.3. От трубки Брауна к трубке с электростатическим отклонением

Одной из главных особенностей осциллографа Брауна было то, что он мог применяться для построения временных зависимостей тока $i(t)$, протекающего через отклоняющую катушку с индуктивностью L . Магнитное поле катушки пропорционально протекающему через нее току и меняется с изменением тока.

Однако чаще возникает необходимость наблюдать временную зависимость изменяющегося напряжения $u(t)$, а вовсе не тока. Но для этого магнитная развертка не эффективна. В этом легко убедиться, если учесть, что напряжение на идеальной катушке индуктивности с индуктивностью $L = \text{const}$ пропорционально производной протекающего через нее тока:

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}. \quad (1.17)$$

Эту закономерность ныне знают даже в школе. Если предположить, что $u(t) = E = \text{const}$, то из (1.17) мы имеем:

$$\frac{E}{L} = \frac{di(t)}{dt} = \text{const}. \quad (1.18)$$

Отсюда следует, что если к идеальной катушке индуктивности приложено постоянное напряжение, то ток в ее цепи будет линейно расти, так как только в этом случае производная тока является константой. Она задает крутизну пилообразного напряжения, равную E/L .

Мало разбирающийся в электротехнике читатель может ошибочно предположить, что при приложении к отклоняющей катушке напряжения пятно от электронного луча переместится от исходного положения в новое место. Оказывается (см. выше), это совсем не так — пятно начнет горизонтально перемещаться по экрану с постоянной линейной скоростью в соответствии с линейным изменением тока в катушке. Кстати, из этих рассуждений пришли к идее реализации линейной магнитной развертки по горизонтали, но это совсем не годится для отклонения луча по вертикали.

На самом деле ситуация осложняется тем, что реальная катушка индуктивности обладает собственным омическим сопротивлением (резистивностью). Имеет свое внутреннее сопротивление и источник напряжения (сигнала). Не вдаваясь в детали [44], отметим, что в этом случае изменение тока при воздействии на катушку постоянного напряжения будет описываться уже не линейным, а экспоненциальным законом с постоянной времени $\tau = L/R$, где R — суммарное сопротивление в цепи катушки.

Судя по описанию осциллографа Брауна, отклоняющая катушка имела индуктивность порядка десятков — сотен миллигенри (мГн). Взяв, к примеру, $L = 100$ мГн и $R = 100$ Ом, получим $\tau = 0,1/100 = 1 \cdot 10^{-3}$ с или 1 мс. Величина постоянной времени оказывается достаточно характерной для осциллографа с магнитным отклонением. Дело в том, что время переходных процессов, регистрируемых осциллографом, не может быть заметно меньше постоянной времени τ . Это говорит о том, что осциллограф с магнитным отклонением не может быть скоростным. Его удел — наблюдение низкочастотных колебаний с постоянными временами порядка миллисекунд или долей миллисекунды.

Разработчики современных осциллографических электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) пришли к кардинальному изменению принципа отклонения электронного луча — был использован *электростатический* метод отклонения. При этом электронный луч отклоняется под действием электрического поля. Первая вакуумная трубка с электростатическим отклонением и горячим (подогретым) катодом появилась в 1911 году и была разработана Д. А. Рожанским в компании «Дженерал Электрик».

Этот метод гораздо проще метода магнитного отклонения — в качестве отклоняющей системы используется пара пластин, расположенных по обе стороны электронного луча. Правда, расчеты, приведенные ниже, показывают, что пластины должны быть расположены достаточно близко и потому должны находиться внутри трубки, а не снаружи, как в случае отклоняющей катушки трубки Брауна. Но и в этом случае напряжение на пластинах, нужное для полного отклонения луча, должно достигать десятков, а иногда и сотен В.

Если подать на пластины постоянное напряжение, то электронный луч с отрицательным зарядом будет отталкиваться от пластины с отрицательным напряжением и притягиваться к пластине с положительным напряжением. Он будет испытывать отклонение и попадет уже в новую точку экрана. Симметричность подачи отклоняющих напряжений нужна для сохранения хорошей фокусировки луча осциллографической трубки. В этом случае потенциал областей пространства между пластинами не меняется и не влияет на фокусировку луча, как в случае подачи отклоняющих напряжений на одну пластину (при заземленной другой). Для получения парафазных отклоняющих напряжений используются специальные схемы каскадов усиления с симметричным выходом или схемы фазоинверторов.

Рассмотрим устройство современной электронно-лучевой осциллографической трубки (рис. 1.6). Экран трубки покрыт изнутри люминофором — веществом, способным светиться под ударами потока электронов. Чем больше поток электронов, тем ярче свечение той части экрана, куда он попадает. Электронный луч создается электронной пушкой, размещенной на противоположном от экрана конце трубки. Она состоит из подогревателя (нити накала) и катода. Между пушкой и экраном размещен модулятор, регулирующий плотность потока летящих к экрану электронов.

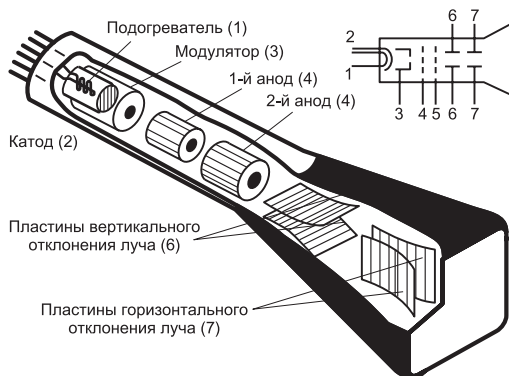


Рис. 1.6. Осциллографическая ЭЛТ с электростатическим отклонением и ее обозначение

С помощью двух электродов — анодов создаются электрические поля, распределение потенциалов которых создает электронные линзы. Благодаря этому пучок электронов довольно большого диаметра (несколько мм), пройдя электронные линзы, фокусируется и принимает форму конуса с острием у экрана трубки. В результате размеры изображения точки на экране удастся довести до долей мм. Кроме того, анодами обеспечивается нужное ускорение электронов в пучке, благодаря чему достигается достаточно высокая скорость записи осциллограмм. Луч отклоняется с помощью пары двойных металлических отклоняющих пластин. Одна из них отклоняет луч по вертикали (ось Y), а другая по горизонтальной (ось X).

Экран электронно-лучевой трубки будет светиться лишь при подаче на ее специальные ускоряющие электроды — аноды определенных напряжений. Их обычно называют ускоряющими. Эти напряжения достигают сотен вольт у малогабаритных трубок и тысяч вольт у большинства трубок умеренных размеров. Для их создания используются высоковольтные источники питания. Часто поверхность трубки у экрана покрывается проводящим ток слоем, и он используется как еще один анод, обеспечивающий ускорение электронов луча уже после его отклонения. Такое решение существенно повышает яркость изображения и графическую скорость записи (см. ниже).

На нить накала обычно подают переменное напряжение, на управляющий электрод (модулятор), постоянное, отрицательной полярности по отношению к катоду, на аноды — положительное, причем на первом аноде (фокусирующем) напряжение значительно меньше, чем на втором (ускоряющем). Меняя напряжение на управляющем электроде, можно менять интенсивность электронного луча от максимальной или рабочей до нулевой.

На отклоняющие пластины подается как постоянное напряжение, позволяющее смещать пучок электронов в любую сторону относительно центра экрана, так и переменное, создающее линию развертки той или иной длины, а также «рисующее» на экране форму исследуемых колебаний.

1.3. Современные осциллографические трубки

1.3.1. Особенности конструкции осциллографических ЭЛТ

Описание деталей конструкции осциллографических ЭЛТ можно найти в [10, 11]. Далеко вдаваться в него не стоит, поскольку цель данной книги заключается не в конструировании ЭЛТ, а лишь в знакомстве с ними как с одной, хотя и важной, деталью осциллографа. В осциллографах применяются серийно выпускаемые осциллографические (индикаторные) ЭЛТ. Их параметры нельзя менять, но некоторые из них надо учитывать при оценке применимости тех или иных трубок и осциллографов на их основе в практике измерений.

Отметим некоторые характерные особенности современных осциллографических ЭЛТ:

- колба трубки имеет плоскую или выпуклую область экрана, плоская область дает меньшие геометрические искажения, но худшую фокусировку, чем выпуклая;
- катод имеет нить подогрева, питающуюся чаще всего стандартным напряжением 6,3 В при токе в доли А;
- максимальный ток катода составляет несколько мА, но ток луча у экрана не превышает 0,1 мА (часть электронов потока поглощается анодами и до экрана не доходит);
- для полного запираания трубки на управляющий электрод достаточно подать отрицательное напряжение (относительно катода) порядка десятков В;
- на аноды трубки подаются ускоряющие напряжения в сотни В, меньшее подается на первый анод (вблизи катода);
- используется пара отклоняющих пластин с однократным изгибом, ближайшая к катоду используется для отклонения по оси Y, более дальняя — по оси X;

- угол отклонения луча обычно не превышает 15° , т. к. в противном случае ухудшается фокусировка и чувствительность трубки;
- для уменьшения бликов от внутренней поверхности колбы она выполняется со специальным изгибом и покрывается слоем графита.

Наиболее важными параметрами осциллографических ЭЛТ являются их геометрические размеры, в частности размеры экрана и параметры отклоняющих систем. У нас размер трубки принято указывать цифрами в ее названии. Например, 13ЛО37И — это индикаторная трубка с диаметром экрана 13 см и с номером разработки 37. Трубки делаются как с круглым, так и прямоугольным экраном. Последнее позволяет сделать трубки меньшего размера и лучше использовать площадь экрана. Однако для повышения прочности у таких трубок приходится увеличивать толщину стекла у экрана, и они получаются более тяжелыми. Современная ЭЛТ с размером экрана 13 см имеет длину до полуметра, что и объясняет большие размеры осциллографов с такими трубками.

1.3.2. Графическая скорость луча

Одной из фундаментальных характеристик осциллографической трубки является графическая скорость луча, т. е. скорость, с которой луч чертит изображение на экране. Чем быстрее луч движется по экрану, тем слабее будет его видимая яркость в случае наблюдения однократных и редко повторяющихся процессов. В случае регистрации синусоидального сигнала (1.1) вертикальную составляющую этой скорости можно вычислить следующим образом:

$$v_{y \max} = \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = 2\pi f. \quad (1.19)$$

Тогда максимальная графическая скорость v_z , с учетом скорости движения луча при горизонтальной развертке, будет равна:

$$v_{z \max} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (1.20)$$

Расчеты показывают, что при размере осциллограммы по вертикали около 1 см и типовой возможной яркости следа от луча максимальные частоты регистрации синусоидального сигнала составляют около 3 ГГц. При этом графическая скорость перемещения пятна от электронного луча оказывается близкой к скорости света.

В случае регистрации видеоимпульса графическая скорость выражается следующей формулой [11]:

$$v_z = \sqrt{v_x^2 + \sigma v_y^2}, \quad (1.21)$$

где σ — чувствительность трубки по вертикальному отклонению (в см/В). Максимальная графическая скорость при регистрации видеоимпульса имеет место на его фронтах, где максимальна скорость изменения сигнала.

Графическая скорость определяет яркость осциллограмм. Последняя резко падает при наблюдении однократных или редко повторяющихся событий. Для повышения графической скорости нужно увеличивать напряжения на ускоряющих электродах трубки (до 10—20 кВ). Однако (см. далее) это ведет к падению чувствительности по отклонению.

1.3.3. Время установления отклоняющей системы

Отклоняющая система осциллографических трубок из двух пластин является фактически неидеальным конденсатором, имеющим емкость C . В его цепи надо учитывать паразитную индуктивность выводов L и сопротивление источника сигнала R (например, это выходное сопротивление усилителя). Таким образом, эквивалентная схема цепи отклонения представляет собой звено фильтра низких частот или последовательный RLC -контур (рис. 1.7).

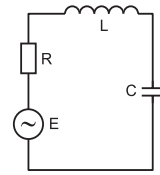


Рис. 1.7. Эквивалентная схема тракта отклонения

Если на вход такого контура подать идеальный перепад напряжения E , то временная зависимость напряжения на C будет иметь вид:

$$u(t) = E \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\frac{\alpha}{\delta} \sin(\delta t) + \cos(\delta t) \right) \right],$$

где $\alpha = R/2L$ и $\delta = (1/LC - R^2/4L^2)^{1/2}$. Расчеты показывают, что эта зависимость может иметь значительный выброс при малых R . При $\alpha/\delta = 1$ этот выброс составляет не более 4% от амплитуды перепада, что является вполне удовлетворительным показателем. Для этого величину R надо выбирать равной:

$$R = \sqrt{2L/C}. \quad (1.22)$$

Если воспользоваться известным выражением для резонансной частоты контура

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1.23)$$

то можно получить значение R через резонансную частоту контура, определяющую предельную частоту тракта отклоняющей системы:

$$R = \frac{1}{f_0 C \sqrt{2\pi}} = \frac{0,22}{f_0 C}. \quad (1.24)$$

Нетрудно доказать, что время достижения напряжением $u(t)$ значения E составит значение:

$$t = 3\pi RC/4 = 2,2RC. \quad (1.25)$$

Это значение обычно и принимают за время установления отклоняющей системы с оптимальной переходной характеристикой.

Эти данные относятся к идеальному случаю подачи сигнала прямо на электроды отклоняющей системы осциллографической трубки. Расчеты показывают, что максимальная частота регистрируемых сигналов не превышает 300 МГц, а время установления тракта отклоняющих пластин не может быть меньше 1 нс без кардинальной переработки конструкции трубки. Разумеется, эти значения на много порядков выше, чем у трубки Брауна, но все же далеки от тех, которые нужны в современной скоростной осциллографии. Отметим, что, исходя из квантово-механического принципа неопределенности, предельное разрешение осциллографии оценивается временем порядка 10^{-14} с. Так что даже в наше время конструкторы осциллографических трубок имеют шансы на улучшение их временных характеристик.

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. История и основы электронной осциллографии	7
1.1. Сигналы и их спектры	7
1.1.1. Синусоидальные колебания и сигналы	7
1.1.2. Понятие о спектральном синтезе сложных сигналов	8
1.1.3. Фурье-анализ и синтез периодических функций	9
1.1.4. Дискретный фурье-анализ и спектр периодических функций.....	11
1.1.5. Непрерывное преобразование Фурье для произвольного сигнала	12
1.1.6. Быстрое преобразование Фурье (БПФ).....	13
1.1.7. Эффект Гиббса.....	14
1.2. История осциллографии.....	15
1.2.1. Механические, светолучевые и магнитоэлектрические осциллографы.....	15
1.2.2. Трубка и осцилоскоп Брауна.....	16
1.2.3. От трубки Брауна к трубке с электростатическим отклонением	18
1.3. Современные осциллографические трубки	21
1.3.1. Особенности конструкции осциллографических ЭЛТ.....	21
1.3.2. Графическая скорость луча.....	22
1.3.3. Время установления отклоняющей системы.....	23
1.3.4. Отклоняющие системы осциллографических ЭЛТ	24
1.3.5. Осциллографические трубки специального назначения.....	25
1.4. Принцип действия и устройство аналогового осциллографа.....	28
1.4.1. Принцип действия осциллографа	28
1.4.2. Структурная схема аналогового осциллографа	28
1.4.3. Требования к усилителям осциллографа.....	32
1.4.4. Особенности широкополосных осциллографических усилителей.....	37
1.4.5. Принципы построения генераторов развертки.....	42
1.4.6. Узлы синхронизации осциллографов	45
1.4.7. Блоки питания осциллографов.....	45
1.5. Параметры и выбор электронных осциллографов.....	46
1.5.1. Основные параметры.....	46
1.5.2. Дополнительные параметры	47
1.5.3. Выбор осциллографов	47
Глава 2. Аналоговые осциллографы широкого применения.....	51
2.1. Лучшие из реликтов.....	51
2.1.1. Ламповые осциллографы 50—60-х годов двадцатого века.....	51
2.1.2. Массовые советские транзисторные осциллографы 60-х годов	53
2.1.3. Осциллографы для радиолюбителей и радиолюбительские	55
2.2. Современные сервисные аналоговые осциллографы	57
2.2.1. Сервисные осциллографы серий ОСУ и МРС	57
2.2.2. Отечественные сервисные осциллографы	59
2.3. Современные отечественные универсальные осциллографы	61

2.3.1. Отечественные универсальные осциллографы	61
2.3.2. Современные универсальные осциллографы фирмы Good Will	67
2.3.3. Современные универсальные осциллографы серии ACK	72
2.3.4. Осциллографы АКТАКОМ-IWATSU Hi-End-класса	77
2.3.5. Универсальные осциллографы фирмы HITACHI	82
2.3.6. Осциллографы фирмы PINTEK	83
Глава 3. Цифровые и стробоскопические осциллографы	85
3.1. Цифровое представление аналоговой информации	85
3.1.1. Общие принципы построения цифровых осциллографов	85
3.1.2. О выборе числа отсчетов и восстановлении сигналов	87
3.1.3. Об интерполяции в цифровых осциллографах	88
3.1.4. Принципы построения стробоскопических осциллографов	89
3.1.5. Генераторы стробирующих импульсов	91
3.1.6. Устройства выборки сигналов	92
3.2. Современные аналогово-цифровые осциллографы	93
3.2.1. Аналогово-цифровые осциллографы АКТАКОМ	93
3.2.2. Аналогово-цифровые осциллографы фирмы Good Will	95
3.3. Цифровые осциллографы	96
3.3.1. Цифровые осциллографы Минского приборостроительного завода	96
3.3.2. Цифровые осциллографы фирмы Good Will	100
3.3.3. Цифровые осциллографы АКТАКОМ	102
3.3.4. Цифровые осциллографы фирмы HITACHI	105
3.3.5. Цифровые осциллографы фирмы TEKTRONIX	106
3.3.6. Осциллографы фирмы Tektronix с цифровым люминофором	110
3.3.7. Цифровые осциллографы фирмы RIGOL	112
3.3.8. Цифровые осциллографы фирмы LeGroy (общая оценка)	112
3.3.9. Цифровые осциллографы LeGroy WaveRunner	114
3.3.10. Цифровые осциллографы LeGroy WaveSurfer	118
3.3.11. Цифровые осциллографы LeGroy WavePro	118
3.3.12. Цифровые осциллографы LeGroy WaveMaster	123
3.3.13. Стробоскопические осциллографы серии Wave Expert с полосой до 100 ГГц	124
3.3.14. Цифровые осциллографы фирмы Agilent Technologies	127
3.4. Портативные цифровые осциллографы	129
3.4.1. Тенденция микроминиатюризации цифровых осциллографов	129
3.4.2. Миниатюрные осциллографы АКТАКОМ	129
3.4.3. Цифровые осциллографы — скопметры фирмы FLUKE	131
3.4.4. Графические мультиметры-осциллографы фирмы BEETECH	140
3.4.5. Портативные осциллографы фирмы Velleman	140
3.4.6. Портативный осциллограф-мультиметр DMM-740	144
3.4.7. Портативные осциллографы-мультиметры фирмы METEX	145
3.4.8. Портативные осциллографы корпорации Tektronix	146
3.4.9. Цифровые осциллографы — ноутбуки фирмы Hitachi	150
Глава 4. Виртуальные осциллографы и лаборатории	152
4.1. Виртуальные PC-осциллографы	152
4.1.1. Назначение виртуальных осциллографов и их типы	152

4.1.2. Виртуальные осциллографы в виде плат расширения ПК	153
4.2. Виртуальные осциллографы фирмы Velleman	153
4.2.1. Виртуальные осциллографы фирмы Velleman.....	153
4.2.2. Спектроанализатор на базе виртуального осциллографа фирмы Velleman.....	156
4.2.3. Самописец на базе виртуального осциллографа фирмы Velleman.....	156
4.2.4. Работа с PC-осциллографом фирмы Velleman	157
4.3. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman.....	159
4.3.1. Функциональные измерительные генераторы	159
4.3.2. Виртуальные функциональные генераторы фирмы Velleman.....	160
4.3.3. Работа с виртуальным функциональным генератором фирмы Velleman	161
4.4. Компьютеризированная лаборатория PC-Lab 2000	163
4.4.1. Создание компьютеризированной лаборатории PC-Lab 2000.....	163
4.4.2. Специальные возможности лаборатории PC-Lab 2000	164
4.5. Новые возможности виртуальной лаборатории PC-Lab 2000 v. 1.38	167
4.5.1. Развитие лаборатории PC-Lab 2000	167
4.5.2. Установка обновленной лаборатории PC-Lab 2000.....	167
4.5.3. Новый режим запоминания осциллограмм PERSIST	167
4.5.4. Отключение режима соединения точек графиков	168
4.5.5. Автоматизация измерений параметров осциллограмм.....	170
4.5.6. Режим запоминания спектрограмм.....	172
4.5.7. Другие возможности обновленной PC-Lab 2000	173
4.6. Осциллографические модули и платы фирмы BORDO	174
4.6.1. Цифровой осциллограф BORDO-421 с USB-интерфейсом.....	174
4.6.2. Цифровые осциллографы — плата B-121 и приставка B-323.....	176
4.6.3. Двухканальные цифровые осциллографы — платы PCI.....	178
4.6.4. Интерфейс пользователя осциллографов фирмы BORDO	180
4.7. Платы-осциллографы других фирм.....	181
4.7.1. Ультраскоростные платы M8-500, M8-500Y и M8-1000.....	181
4.7.2. Приставка-осциллограф DSO-2100	183
4.7.3. Осциллографическая приставка SDS200	184
4.8. Виртуальная USB-лаборатория АКТАКОМ	186
4.8.1. Управляемые источники питания ATH-1535/1539	186
4.8.2. Функциональные генераторы АНР-3121/3122	186
4.8.3. Генератор измерительных телевизионных сигналов АНР-3125/3126	187
4.8.4. Цифровые запоминающие осциллографы АСК-3106/3107/3116/3117.....	188
4.8.5. Комбинированный прибор АСК-4106	190
4.9. Виртуальный характериограф АСС-4211	193
4.9.1. Приставка АСС-4211 и ее параметры	193
4.9.2. Работа с приставкой АСС-4211	194
Глава 5. Осциллографические измерения	196
5.1. Подготовка аналогового осциллографа к работе.....	196
5.1.1. Включение аналогового осциллографа и подготовка его к работе	196
5.1.2. Подключение осциллографа к источнику сигнала.....	197
5.1.3. Выбор режимов работы усилителей канала Y.....	198

5.1.4. Калибровка чувствительности	199
5.1.5. Учет влияния входной цепи осциллографа	200
5.1.6. Применение компенсированных делителей напряжения	202
5.1.7. Установка точной компенсации делителя	204
5.1.8. Лабораторные испытания аналоговых осциллографов	205
5.2. Работа с разверткой и синхронизация.....	208
5.2.1. Изменение режимов развертки.....	208
5.2.2. Запуск нарастающим или спадающим изменениями сигнала.....	208
5.2.3. Установка длительности и растяжка развертки	209
5.2.4. Наблюдение телевизионных сигналов	209
5.2.5. Выбор источника запуска и синхронизации развертки	210
5.3. Измерение параметров сигналов	210
5.3.1. Измерение амплитуды и уровней сигнала.....	210
5.3.2. Измерение временных интервалов.....	211
5.3.3. Измерение сдвига фаз синусоидальных сигналов	212
5.4. Измерения в режиме X—Y.....	213
5.4.1. Измерение фазового сдвига с помощью фигур Лиссажу	213
5.4.2. Сравнение частот с помощью фигур Лиссажу	214
5.4.3. Осциллограф в роли характериографа	216
5.5. Некоторые другие применения осциллографа	217
5.5.1. Наблюдение амплитудно-модулированных сигналов.....	217
5.5.2. Вычисление коэффициента модуляции	220
5.5.3. Применение калибратора для исследования переходных процессов в <i>RC</i> -цепях	220
5.5.4. Наблюдение переходных процессов в <i>LRC</i> -цепях.....	220
5.5.5. Курсорные измерения	222
5.6. Особенности измерений цифровыми осциллографами	224
5.6.1. Измерение постоянных напряжений и калибровка	224
5.6.2. Измерение частотных и временных параметров цифровых осциллографов.....	225
5.6.3. Выбор вида интерполяции	226
5.6.4. Использование накопления (аналогового послесвечения)	227
5.6.5. Работа с памятью цифрового осциллографа	228
5.6.6. Цифровой осциллограф в роли анализатора спектра.....	228
5.7. Специальные вопросы осциллографирования	229
5.7.1. О дискуссии «Good Will против Tektronix»	229
5.7.2. Как регистрируют процессы различные типы осциллографов.....	230
5.7.3. О роли памяти в цифровых осциллографах	231
5.7.4. Применение окна для просмотра части содержимого памяти	232
5.7.5. О случайной дискретизации и эффективной ее частоте.....	234
5.7.6. Курсорные и автоматические вычисления	236
5.7.7. Особенности работы разверток и синхронизации	237
5.7.8. Быстрое преобразование Фурье и другие возможности осциллографов Good Will	238
5.7.9. Применение осциллографов с цифровым люминофором	239
Глава 6. Практическая работа с компьютеризированными лабораториями	243

6.1. Интерфейс компьютеризированной лаборатории PC-Lab 2000	243
6.1.1. Общий вид окна лаборатории PC-LAB 2000.....	243
6.1.2. Добавление текста в окно экрана.....	244
6.1.3. Меню лаборатории PC-Lab 2000	246
6.1.4. Позиция Options меню	246
6.1.5. Опции позиции View	248
6.1.6. Позиция Math задания математических операций.....	248
6.1.7. Меню файловых операций File	249
6.1.8. Работа со справкой PC-Lab 2000.....	251
6.2. Осциллографирование в PC-Lab 2000 в реальных условиях	252
6.2.1. Просмотр синусоидальных колебаний высоких частот	252
6.2.2. Просмотр амплитудно-модулированного сигнала	256
6.2.3. Функциональная схема исследования электронных цепей и устройств.....	257
6.2.4. Исследование дифференцирующей RC-цепочки	258
6.2.5. Получение семейств осциллограмм в режиме PERSIST.....	259
6.2.6. Исследование реакции интегрирующей RC-цепочки на меандр.....	259
6.2.7. Исследование реакции интегрирующей RC-цепочки на сложные импульсы.....	261
6.2.8. Исследование реакции LRC-цепочки на меандр	261
6.2.9. Исследование релаксационного генератора	261
6.3. Анализ спектра реальных сигналов	266
6.3.1. Назначение анализаторов спектра	266
6.3.2. Спектр синусоидального сигнала.....	267
6.3.3. Работа с окнами и режимами усреднения.....	268
6.3.4. Спектр амплитудно-модулированного колебания	270
6.3.5. Спектр прямоугольных и треугольных импульсов	272
6.3.6. Спектр сигнала вида $\sin(t)/t$	274
6.4. Работа с построителем АЧХ и ФЧХ устройств.....	274
6.4.1. Назначение и роль построителя АЧХ и ФЧХ.....	274
6.4.2. Построение АЧХ и ФЧХ дифференцирующей RC-цепи.....	275
6.4.3. Построение АЧХ и ФЧХ колебательного LRC-контура	276
6.5. Работа PC-Lab 2000 с системой Mathcad	277
6.5.1. Передача осциллограмм в среду системы Mathcad.....	277
6.5.2. Взаимодействие Mathcad с функциональным генератором.....	278
6.5.3. Импорт спектрограмм	279
6.5.4. Об экспорте данных из Mathcad	280
6.6. Работа PC-Lab с системой MATLAB.....	280
6.6.1. Передача осциллограмм в среду системы MATLAB.....	280
6.6.2. Взаимодействие MATLAB с виртуальным функциональным генератором.....	281
6.6.3. Импорт спектрограмм в MATLAB	281
6.6.4. Об экспорте данных из MATLAB	282
6.7. Работа с виртуальными лабораториями АКТАКОМ	283
6.7.1. Подготовка виртуальных лабораторий.....	283
6.7.2. Работа с осциллографом-анализатором	283
6.7.3. Применение анализатора спектра	286

6.7.4. Осуществление цифровой фильтрации.....	287
6.7.5. Математическая обработка сигналов	288
6.7.6. Статистические вычисления	289
6.7.7. Эмуляция сигналов.....	290
6.7.8. Работа в качестве виртуального самописца.....	290
6.7.9. Задание аварийной сигнализации	292
6.7.10. Работа с разверткой и памятью	293
6.7.11. Работа с курсорами	293
6.7.12. Режим мультиналожения.....	294
6.7.13. Измерение фазового сдвига	294
6.7.14. Применение режима цифрового вольтметра.....	295
6.7.15. Построение гистограммы распределения вероятности	295
6.7.16. Сохранение данных	296
6.7.17. Работа с модулем функционального генератора.....	297
6.7.18. Системные функции	301
6.8. Работа АСК-4106 с реальными сигналами	302
6.8.1. Измерительная схема и развертывание лаборатории	302
6.8.2. Автоматические измерения и определяемые параметры сигналов	304
6.8.3. Предоставление результатов измерений	305
6.8.4. Настройка графиков	307
6.8.5. Просмотр табличных данных.....	309
6.8.6. Применение модуля анализа формы сигналов	310
Литература.....	312