

## 4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. РЯДЫ ФУРЬЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – изучить метод анализа периодических функций с использованием ряда Фурье в пакете MATLAB.

### 4.1 Теоретические сведения

#### Общие понятия

Фурье-анализ является важным инструментом для решения широкого круга задач обработки сигналов. Жан Батист Жозеф Фурье (1768–1830) предложил концепцию представления **периодической** функции  $x(t)$  (рис. 4.1) в виде тригонометрического ряда из косинусов и синусов:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(\omega_k t) + b_k \sin(\omega_k t)), \quad (4.1)$$

где  $\omega_k = \frac{2\pi k}{T_0}$ ;  $T_0$  – период функции.

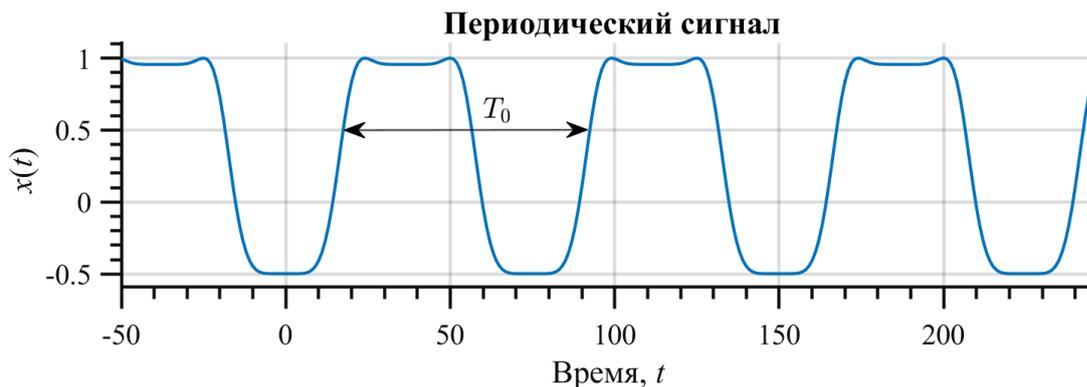


Рис. 4.1 – Пример периодического сигнала

Самая **низкочастотная составляющая** сигнала, которая входит в (4.1), называется *основной частотой*, или *частотой основного тона*

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \text{ или } \omega_1 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (4.2)$$

поскольку все остальные частоты кратны ей, т.е.  $\omega_k = k\omega_1$ . Частотные компоненты сигнала называются *гармониками*. Например, частотная компонента

$$(a_2 \cos \omega_2 t + b_2 \sin \omega_2 t), \quad (4.3)$$

является 2-й гармоникой. Слагаемое  $a_0/2$  в выражении (4.1) является постоянной составляющей и представляет собой *среднее значение* сигнала за период. Причина, по которой стремятся представить сигнал в форме (4.3), заключается в том, что часто необходимо представить «сложный» сигнал в виде суммы более «простых» сигналов – в данном случае косинусов и синусов. Не следует думать, что периодические сигналы редкость в природе. Например, на рис. 4.2 показан участок речевого сигнала (звук /а/), форма которого близка к периодической. Такой же периодичностью обладают все гласные звуки.

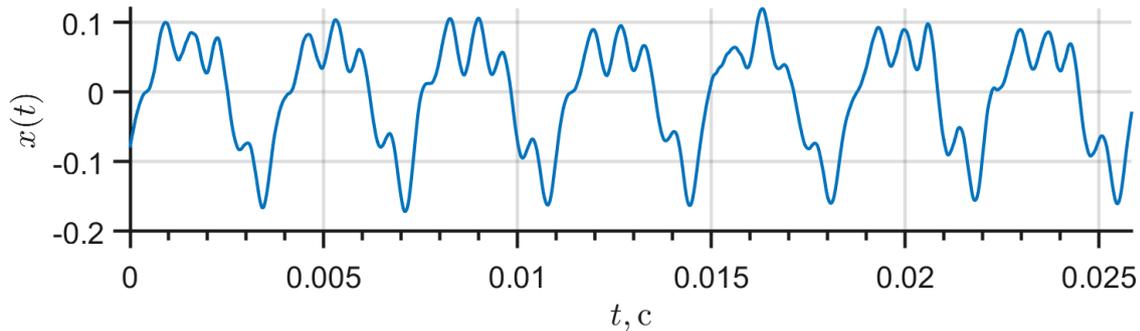


Рис. 4.2 – Пример речевого сигнала

### Ортогональность

Иногда возникает вопрос, почему для разложения функции в ряд (4.1) выбраны именно функции  $\sin$  и  $\cos$ ? Так происходит потому, что эти функции обладают важным свойством *ортогональности*. Ортогональность известна нам из курса геометрии, где она относилась к векторам. Оказывается, между функциями и векторами существует аналогия: как произвольный вектор можно представить в виде суммы ортогональных векторов (составляющих базис), так и произвольную функцию можно представить в виде суммы ортогональных функций (рис. 4.3).

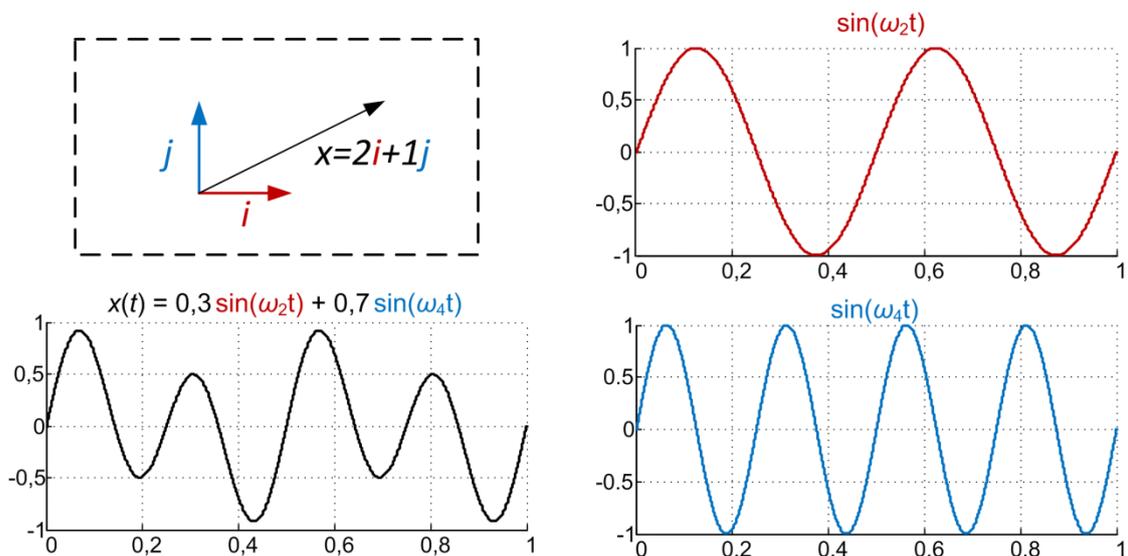


Рис. 4.3 – Разложение в ортогональный базис вектора и функции

В левом верхнем углу на рис. 4.3 представлено разложение вектора  $\mathbf{x}$  в виде взвешенной суммы базисных векторов  $\mathbf{x} = 2\mathbf{i} + 1\mathbf{j}$ . Аналогичным образом периодическая функция  $x(t)$ , показанная в нижнем левом углу может быть представлена в виде взвешенной суммы функций  $\sin(\omega_2 t)$  и  $\sin(\omega_4 t)$ . В данном случае, для получения  $x(t)$  требуется  $\sin(\omega_2 t)$  умножить на коэффициент 0,3, а  $\sin(\omega_4 t)$  на коэффициент 0,7. Как видно из формулы (4.1), в общем случае в разложении периодической  $x(t)$  участвуют базисные «элементы» вида  $a_k \cos(\omega_k t)$  и  $b_k \sin(\omega_k t)$ . Причем набор частот  $\omega_k$  фиксирован, он зависит от периода сигнала  $x(t)$ , а вот коэффициенты  $a_k$  и  $b_k$  – это то, что необходимо определить исходя из заданной функции  $x(t)$ . Расчёт коэффициентов  $a_k$  и  $b_k$  и есть центральная задача Фурье-анализа.

Возвращаясь к примеру, показанному на рис. 3 нужно сказать, что различие в разложении вектора и функции в том, что количество базисных векторов конечно, а число базисных функций в общем случае бесконечно.

### **Ортогональность и скалярное произведение**

Как определить, является ли одна функция ортогональной по отношению к другой? Известно, что ортогональные векторы имеют нулевую проекцию друг на друга. С понятием проекции связано понятие скалярного произведения векторов

$$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle = a_1 b_1^* + a_2 b_2^* + \dots + a_n b_n^* = \sum_{i=1}^n a_i b_i^*, \quad (4.4)$$

которое равно нулю для ортогональных векторов. Для функций также есть аналог скалярного произведения:

$$\langle f_1(t), f_2(t) \rangle = \int_a^b f_1(t) \cdot f_2^*(t) dt. \quad (4.5)$$

Это выражение равно нулю, если функции  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  ортогональны на интервале  $[a, b]$ , иначе получаемое число показывает *проекцию* одной функции на другую. Исходя из того, что геометрический смысл интеграла – площадь под кривой, на рис. 4.4 иллюстрируется понятие скалярного произведения функций.

На верхней панели рис. 4.4 показана функция  $s_1(t)$ , состоящая из одного периода синуса. Графически проиллюстрировано, что скалярное произведение  $s_1(t)$  на саму себя равно 0,5. На нижней панели приведена функция  $s_2(t)$ , состоящая из двух периодов синуса. Рядом графически представлено произведение  $s_1(t) \cdot s_2(t)$ , которое состоит из двух симметричных участков, суммарная площадь которых с учетом знака равна нулю. Таким образом, можно сделать вывод, что функции  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  ортогональны друг другу на интервале  $[0, 1]$ .

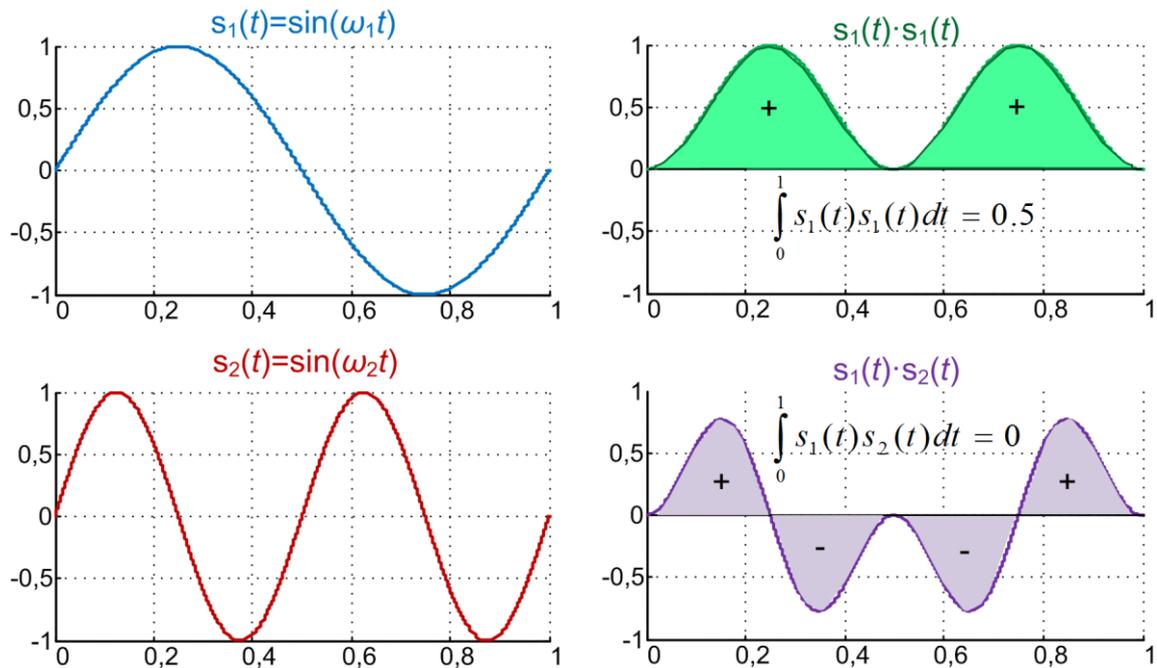


Рис. 4.4 – Скалярное произведение функций

Учитывая введенные вначале обозначения, свойство ортогональности функций  $\sin$  и  $\cos$  записываются следующим образом:

$$\int_0^{T_0} \cos \omega_k t \sin \omega_m t dt = 0, \quad \forall k, m,$$

$$\int_0^{T_0} \cos \omega_k t \cos \omega_m t dt = \begin{cases} 0, & k \neq m \\ T_0/2, & k = m, \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\int_0^{T_0} \sin \omega_k t \sin \omega_m t dt = \begin{cases} 0, & k \neq m \\ T_0/2, & k = m. \end{cases}$$

Попробуйте самостоятельно доказать данные выражения.

### Фурье-анализ

Основная задача Фурье-анализа найти коэффициенты  $a_k$  и  $b_k$  в выражении (4.1). Чтобы получить значение конкретного коэффициенты  $a_m$  необходимо найти *проекцию*  $x(t)$  на базисную функцию  $\cos \omega_m t$ , т.е.

$$a_m = \langle x(t), \cos(\omega_m t) \rangle.$$

Учитывая (4.5) для нахождения проекции необходимо умножить левую и правую части (4.1) на  $\cos \omega_m t$ , а затем проинтегрировать левую и правую часть, используя свойство ортогональности синусов и косинусов. Итак, умножая левую и правую части (4.1) на  $\cos \omega_m t$  получим:

$$x(t) \cos \omega_m t = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos \omega_k t \cos \omega_m t + b_k \sin \omega_k t \cos \omega_m t).$$

Интегрируя обе части по переменной  $t \in [0, T_0]$ , получаем

$$\int_0^{T_0} x(t) \cos \omega_m t dt = \frac{a_0}{2} \int_0^{T_0} \cos \omega_m t dt + \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \int_0^{T_0} \cos \omega_k t \cos \omega_m t dt + b_k \int_0^{T_0} \sin \omega_k t \cos \omega_m t dt \right).$$

Используя свойство ортогональности (4.6), легко можно найти выражения для коэффициентов  $a_m$ :

$$a_m = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \cos \omega_m t dt.$$

В полученном выражении можно для удобства заменить индекс  $m$  на  $k$ .

Коэффициенты  $b_k$  находятся аналогичным образом, только выражение (4.1) умножается на  $\sin \omega_m t$ :

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^{T_0} x(t) \sin \omega_k t dt.$$

Иногда бывает полезным следующее разложение функции  $x(t)$ , которое может быть получено из (4.1):

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (4.7)$$

где

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2},$$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \left( \frac{-b_k}{a_k} \right).$$

$A_k$ — амплитуда компоненты сигнала на частоте  $\omega_k$ ;  $\varphi_k$ — фаза компоненты сигнала на частоте  $\omega_k$ .

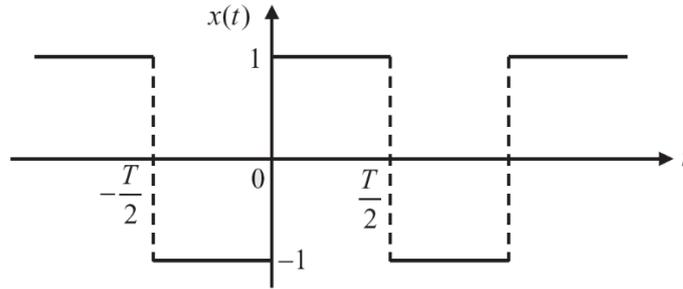


Рис. 4.5 –Прямоугольный сигнал

### **Пример разложения в ряд Фурье прямоугольного сигнала**

В качестве примера рассмотрим ряд Фурье для периодического сигнала  $x(t + nT) = x(t)$ , который определен следующим образом (рис. 4.5):

$$x(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T/2, \\ -1, & T/2 < t < T. \end{cases} \quad (4.8)$$

Легко заметить, что среднее значение сигнала равно нулю:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = 0,$$

а коэффициенты  $a_k$  и  $b_k$  равны

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(\omega_k t) dt = \frac{2}{T} \left[ \int_0^{T/2} \cos(\omega_k t) dt - \int_{T/2}^T \cos(\omega_k t) dt \right] = 0, \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(\omega_k t) dt = \frac{2}{T} \left[ \int_0^{T/2} \sin(\omega_k t) dt - \int_{T/2}^T \sin(\omega_k t) dt \right] = \\ &= -\frac{1}{\pi k} \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) \Big|_0^{T/2} + \frac{1}{\pi k} \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) \Big|_{T/2}^T \\ &= \frac{1}{\pi k} (-\cos(\pi k) + 1 + \cos(2\pi k) - \cos(\pi k)) = \frac{2}{\pi k} (1 - \cos(\pi k)). \end{aligned}$$

Если принять  $T = 1$ , то  $b_k$  принимает следующий вид

$$b_k = \frac{2}{k\pi}(1 - \cos(k\pi)).$$

Подставляя полученные значения в (4.1), получим выражение для сигнала:

$$x(t) = \frac{4}{\pi} \left[ \sin(\omega_0 t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_0 t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega_0 t) + \dots \right]. \quad (4.9)$$

Необходимо отметить, что в разложении участвуют только функции  $\sin$ . Это происходит из-за того, что прямоугольный сигнал является нечетной функцией и для его представления не нужны четные функции  $\cos$ .

Полезно рассмотреть, как частичные суммы (4.9) аппроксимируют исходный сигнал  $x(t)$ . Обозначим через  $S_n(t)$  сумму первых  $n$  членов в (4.9). Ниже приведен код, который использовался для получения графиков частичных сумм.

Графики первых трех частичных сумм приведены на рис. 4.6. Можно заметить, что при увеличении числа гармоник  $n$  результирующая форма функции  $S_n(t)$  становится все ближе к оригиналу  $x(t)$ .

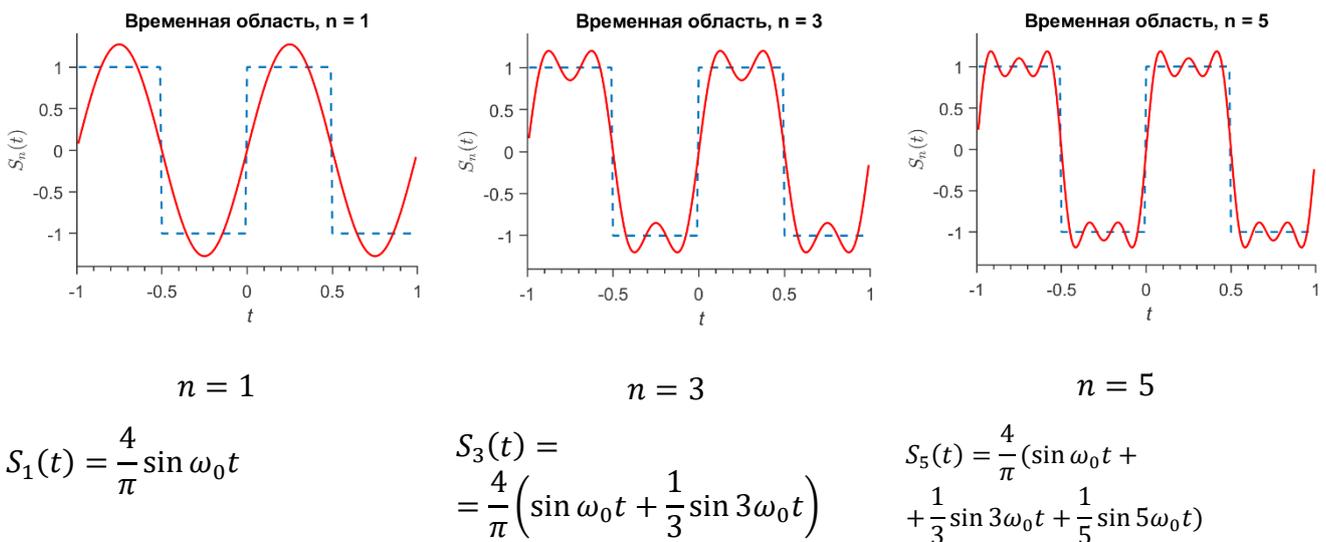


Рис. 4.6 – Частичные суммы, аппроксимирующие прямоугольный сигнал

```

T = 1
t = -T:0.001:T;
% вычисление исходного сигнала
x = square(2*pi*(1/T)*t);
% число гармоник
n = 20;

S_n = zeros(1,length(x));

```

```

b = zeros(1,n);

for k = 1:n
    b(k) = 2/(pi*k)*(1-cos(k*pi));
    S_n = S_n + b(k)*sin(2*pi*k/T*t);
end

%% Graphics
FontSize = 14;
figure('Units','pixels', 'Position',[100 100 450 320]);
plot(t,x,'--');
hold on;
plot(t,S_n,'r');

title(['Временная область, n = ' num2str(n)]);

ylabel('$S_n(t)$', 'Interpreter', 'latex');
xlabel('\it t');

```

### ***Эффект Гиббса***

Поведение частичных сумм ряда Фурье  $S_n(t)$  в точке разрыва функции называют *эффектом Гиббса*. Создается впечатление, что колебания в точках разрыва исчезнут, если просуммировать больше членов ряда, однако этого не происходит (рис. 4.7). Заметьте, что от количества слагаемых в ряде Фурье амплитуда выброса не изменяется.

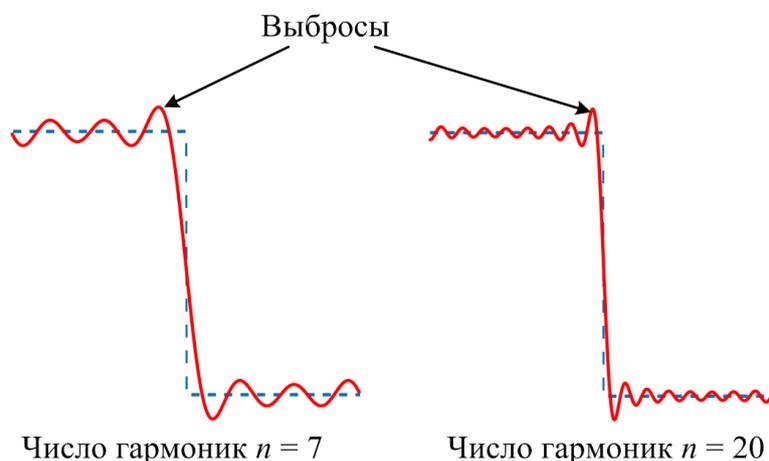


Рис. 4.7– Эффект Гиббса

### ***Комплексная запись ряда Фурье***

Наиболее часто ряд Фурье записывается в терминах комплексных экспонент  $e^{j\omega_k t}$ . Переход к комплексной форме записи ряда Фурье можно выполнить, если учесть, что

$$\cos \theta = \frac{1}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \quad \text{и} \quad \sin \theta = \frac{1}{2j}(e^{j\theta} - e^{-j\theta}). \quad (4.10)$$

Используя эти соотношения, выражение (4.1) можно преобразовать к виду

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{-j\omega_k t}, \quad (4.11)$$

$$c_k = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) e^{-j\omega_k t} dt,$$

где комплексные коэффициенты  $c_k$  связаны с  $a_k$  и  $b_k$  следующим образом:

$$c_k = (a_k - jb_k)/2.$$

Коэффициент  $c_k$  несет в себе информацию об амплитуде синусной и косинусной волны  $k$ -й компоненты разложения Фурье (или  $k$ -й гармоники). Форма (4.11) связана с разложением

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (4.12)$$

следующим образом:

$$|c_k| = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} = A_k, \quad \arg(c_k) = \varphi_k.$$

Напомним, что аргумент комплексного числа  $z = x + jy$  удовлетворяет условию

$$-\pi < \arg z \leq \pi$$

И вычисляется следующим образом:

$$\arg(z) = \begin{cases} \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, & \text{если } x > 0, \\ \pi + \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, & \text{если } x < 0, \quad y \geq 0, \\ -\pi + \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, & \text{если } x < 0, \quad y < 0, \\ \pi/2, & \text{если } x = 0, \quad y > 0, \\ -\pi/2, & \text{если } x = 0, \quad y < 0. \end{cases}$$

В MATLAB для вычисления модуля комплексного числа используется функция `abs`, а для аргумента – функция `angle`.

Заметим, что в (4.11) «кирпичиками», из которых складывается сигнал, являются *комплексные экспоненты*  $e^{-j\omega_k t}$ . Коэффициенты  $c_k$  также имеют комплексные значения и несут в себе информацию не только об амплитуде, но и о фазе  $k$ -й гармоники. Кроме того, в (4.11) возникают компоненты с «отрицательной частотой». Понятие отрицательной частоты имеет чисто математическую природу и берет свои истоки в (4.10).

### Спектр сигнала

Для пояснения понятия спектра сигнала обратимся к комплексной форме ряда Фурье (4.11). График зависимости  $|c_k|$  от частоты  $\omega_k$  называется *амплитудным спектром* сигнала  $x(t)$ . График зависимости фаз частотных компонент  $\arg c_k$  от частоты  $\omega_k$  называется *фазовым спектром* сигнала  $x(t)$ . Примеры амплитудного и фазового спектров показаны на рис. 4.8.

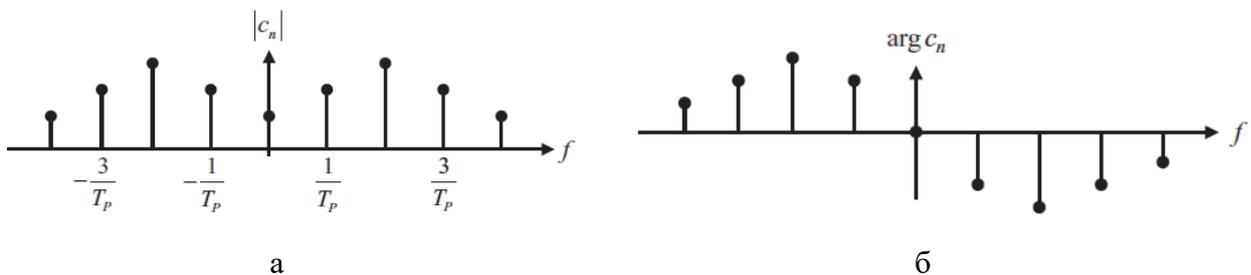


Рис. 4.8 – Спектры: а) амплитудный; б) фазовый

Альтернативным способом изобразить спектр сигнала является построение графиков для  $A_k$  и  $\varphi_k$  из выражения (4.12).

### Теоремы о свертке

Интересно попробовать ответить на вопрос: а как будет выглядеть разложение в ряд Фурье произведения двух функций? Ограничимся рассмотрением случая вещественных функций и для простоты будем полагать, что их период равен  $2\pi$ . В этом случае имеем:

$$x(t)h(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jkt} \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_m e^{jmt}. \quad (4.13)$$

Выполняя подстановку  $n = k + m$  и вынося комплексные экспоненты за знак суммы получаем:

$$x(t)h(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jnt} \left( \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k d_{n-k} \right). \quad (4.14)$$

Полученное выражение (4.14) имеет вид ряда Фурье, причем  $n$ -й член разложения имеет вид:

$$r_n = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k d_{n-k}. \quad (4.15)$$

Это выражение называется *сверткой* последовательностей  $c_k$  и  $d_k$ . Иногда свертку сокращенно обозначают:

$$r_n = c_k * d_k = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k d_{n-k}. \quad (4.16)$$

Если представить, что в свертке (4.16) все  $c_k$  равны нулю, за исключением одного, например  $c_0 = 1$ , то сумма превращается в один член, а именно в  $d_k$ . Другими словами, при

$$c_k = \delta(k), \quad r_n = c_k * d_k = d_n. \quad (4.17)$$

Таким образом, свертка с одиночным импульсом на выходе дает члены второй последовательности.

Мы получили свертку в результате перемножения двух функций, это наталкивает на мысль о нахождении функции, которая соответствует произведению соответствующих коэффициентов двух разложений:

$$g_k = c_k d_k.$$

Чтобы отыскать эту функцию мы должны ввести понятие свертки двух периодических функций:

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\tau)h(t - \tau) d\tau = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} h(\tau)x(t - \tau) d\tau. \quad (4.18)$$

Найдем коэффициенты Фурье для (4.18):

$$\begin{aligned} g_k &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(t)e^{-jkt} dt = \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\tau)h(t - \tau)e^{-jkt} e^{jk\tau} e^{-jk\tau} dt d\tau \\ &= \underbrace{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\tau)e^{-jk\tau} d\tau}_{=c_k} \underbrace{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} h(t - \tau)e^{-jk(t-\tau)} dt}_{=d_k} = c_k d_k. \end{aligned} \quad (4.19)$$

## 4.2 Порядок выполнения работы

### Задание 1

Найдите аналитические выражения для коэффициентов  $a_k, b_k$  разложения в ряд Фурье периодического сигнала  $x(t)$  согласно варианту. На графиках приведен один период сигнала.

*Вариант 1.*

Сигнал имеет вид (рис. 4.9):

$$x(t) = \sin^2(2\pi t) u(0,5 - t), \quad t \in [0, 1].$$

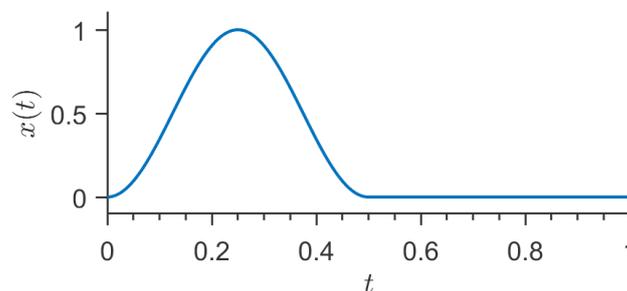


Рис. 4.9 – Сигнал для варианта 1

*Вариант 2.*

Сигнал имеет вид (рис. 4.10):

$$x(t) = u(t - 0,2) - u(t - 0,8), \quad t \in [0, 1].$$

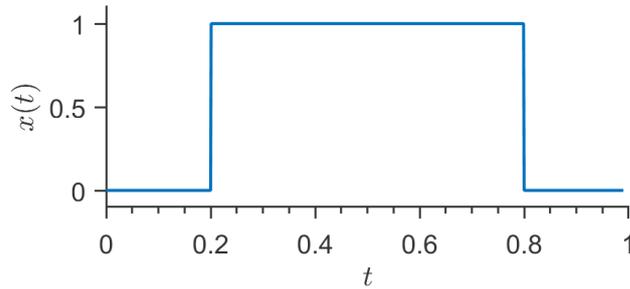


Рис. 4.10 – Сигнал для варианта 2

*Вариант 3.*

Сигнал имеет вид (рис. 4.11):

$$x(t) = (1 - 2t)(u(t - 0,2) - u(t - 0,8)), \quad t \in [0, 1].$$

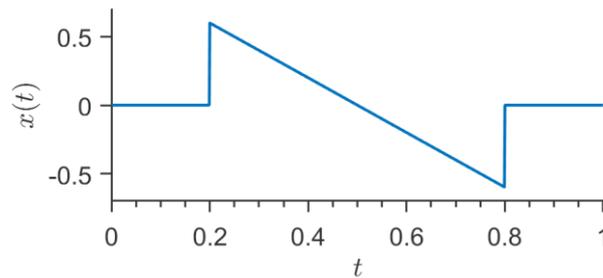


Рис. 4.11 – Сигнал для варианта 3

*Вариант 4.*

Сигнал имеет вид (рис. 4.12):

$$x(t) = 2t \cdot u(-t + 0,5) + u(t - 0,5), \quad t \in [0, 1].$$

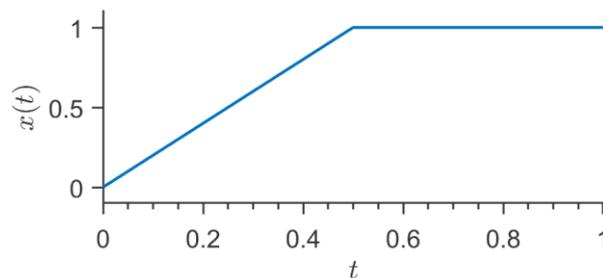


Рис. 4.12 – Сигнал для варианта 4

*Вариант 5.*

Сигнал имеет вид (рис. 4.13):

$$x(t) = (2 - 2t) \cdot u(t + 0,5) + u(-t + 0,5), \quad t \in [0, 1].$$

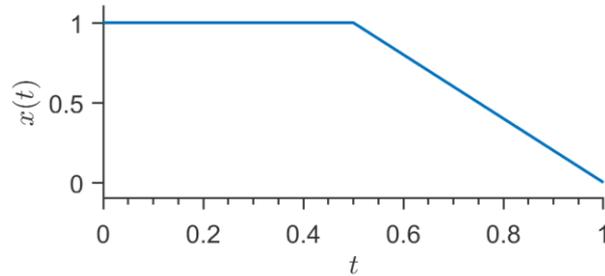


Рис. 4.13 – Сигнал для варианта 5

*Вариант 6.*

Сигнал имеет вид (рис. 4.14):

$$x(t) = 2t \cdot u(-t + 0,5) + (2 - 2t) \cdot u(t - 0,5), \quad t \in [0, 1].$$

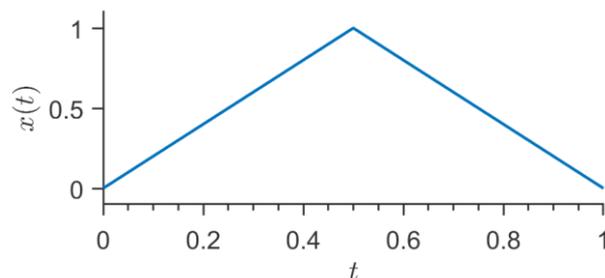


Рис. 4.14 – Сигнал для варианта 6

*Вариант 7.*

Сигнал имеет вид (рис. 4.15):

$$x(t) = \cos(2\pi 4t) \cdot u(t - 0,25) + u(t - 0,75), \quad t \in [0, 1].$$

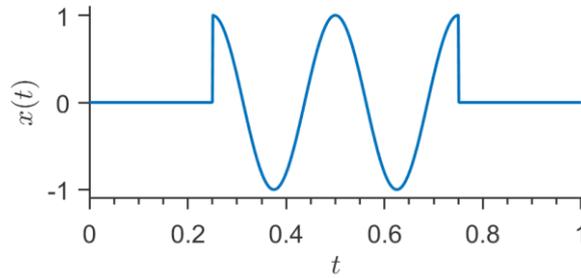


Рис. 4.15 – Сигнал для варианта 7

*Вариант 8.*

Сигнал имеет вид (рис. 4.16):

$$x(t) = \sin(2\pi 6t) \cdot u(t - 0,25) + u(t - 0,75), \quad t \in [0, 1].$$

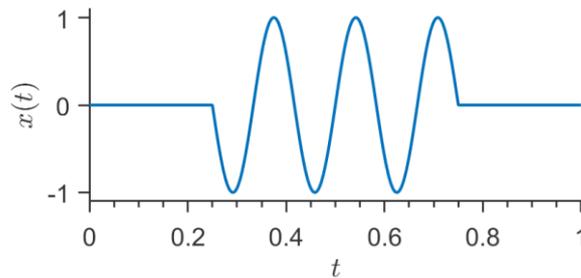


Рис. 4.16 – Сигнал для варианта 8

### **Задание 2**

Рассчитайте коэффициенты  $a_k, b_k$  ( $k = 0, 1, \dots, 20$ ). Постройте графики для  $a_k$  и  $b_k$ , подпишите оси.

### **Задание 3**

Постройте графики частичных сумм

$$S_n(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t)$$

аппроксимирующих исходный сигнал  $x(t)$  на интервале  $t = [-T, 2T]$  для  $n \in \{1, 3, 10, 30\}$ . Наблюдается ли в данном случае эффект Гиббса? Если да, то какова причина его появления?

Для вариантов 4 и 5: постройте отдельно графики для  $S_{200}(t)$  используя только 1) коэффициенты  $a_k$  и 2) используя только коэффициенты  $b_k$ .

#### Задание 4

Постройте графики сигналов ошибки аппроксимации:

$$\epsilon_n(t) = |x(t) - S_n(t)|$$

для  $n$  из задания 3.

Для  $n \in \{1, 2, \dots, 30\}$  вычислите энергию сигнала-ошибки

$$E_n = \sum_{t \in [0, 1]} \epsilon_n^2(t).$$

Уменьшается ли  $E_n$  по мере увеличения  $n$ ?

#### Задание 5

Найдите спектр сигнала, рассчитав параметры  $A_k$ ,  $\varphi_k$  гармонической формы ряда Фурье (4.7) для  $k = 0, 1, \dots, 20$ . Постройте графики для  $A_k$  и  $\varphi_k$ , подпишите оси.

Компонента с какой частотой (в герцах) имеет наибольшую амплитуду?

#### 4.3 Дополнительные задания

1) Почему в варианте 2 при разложении функции в ряд Фурье коэффициенты  $b_k$  равны нулю? Можно ли было это предвидеть, не производя вычислений?

2) Показать, что косинусы ортогональны на интервале  $0 \leq t \leq \pi$ .

3) Показать, что синусы ортогональны на интервале  $0 \leq t \leq \pi$ .

4) Разложить в ряд Фурье функцию  $x(t) = e^{-a|t|}$ ,  $|t| \leq \pi$ .

5) Найдите коэффициенты разложения в ряд Фурье периодическую функцию с периодом  $2\pi$ :

$$x(t) = 1 \text{ при } 0 < t < \pi \text{ и } x(-t) = -x(t).$$

6) Пусть

$$s_k(t) = \sin(2kt).$$

Является ли система функций  $s_k(t)$  ортогональной?

7) Разложить функцию  $x(t) = \cos(t)$  на интервале  $0 \leq t \leq \pi$  в ряд Фурье.

8) Разложить функцию  $x(t) = 2t$  на интервале  $-\pi \leq t \leq \pi$  в ряд Фурье.

9) Разложить функцию  $x(t) = |t|$  на интервале  $-\pi \leq t \leq \pi$  в ряд Фурье.

10) Разложить функцию  $x(t) = |\sin t|$  на интервале  $-\pi \leq t \leq \pi$  в ряд Фурье.