

**Иллюстрации к курсу лекций «Основы цифровой обработки сигналов»,  
РПД-91, РПД-С-91.**

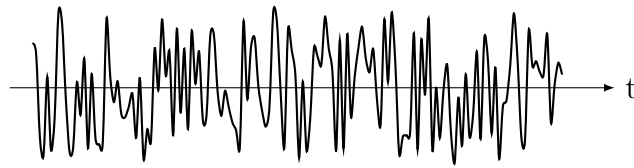


Рис. 1. Белый шум

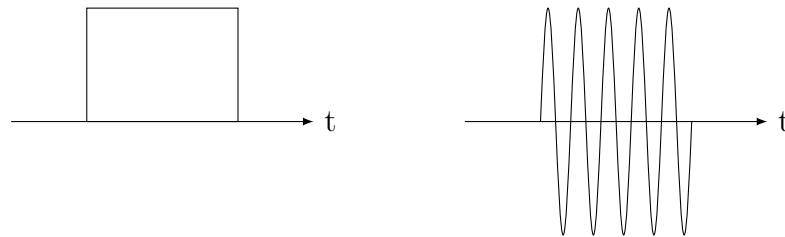


Рис. 2. Осциллограммы видеоимпульса (а) и радиоимпульса (б).

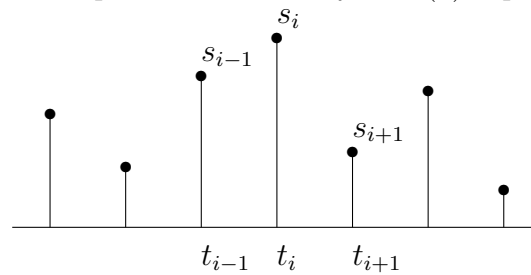


Рис. 3. Пример дискретного сигнала.  $s_i$  — отсчёты.

Таблица 1. Пример цифрового сигнала

.....  
00110011  
00101010  
10101111  
11110001  
.....

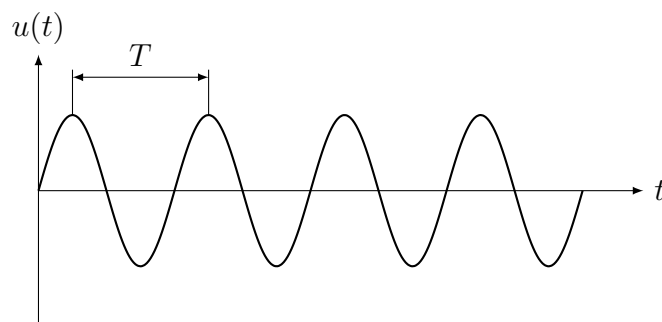


Рис. 4. Осциллограмма синусоидального сигнала

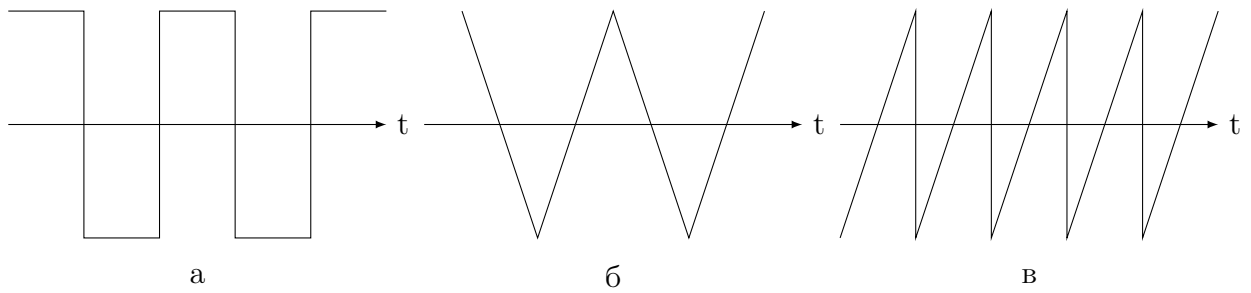


Рис. 5. Примеры периодических сигналов: прямоугольный сигнал (а), треугольный сигнал (б), пилообразный сигнал (в).

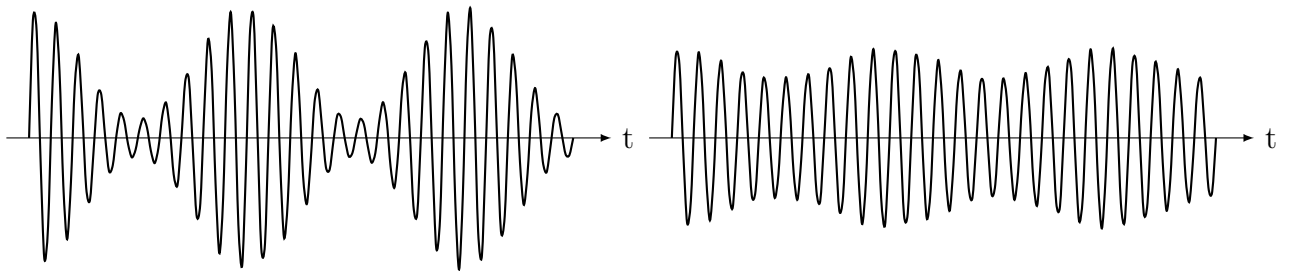


Рис. 6. Амплитудно-модулированный сигнал при  $M = 0.5$  (слева) и  $M = 0.2$  (справа).

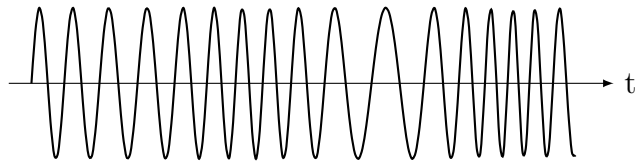


Рис. 7. Частотно-модулированный сигнал.

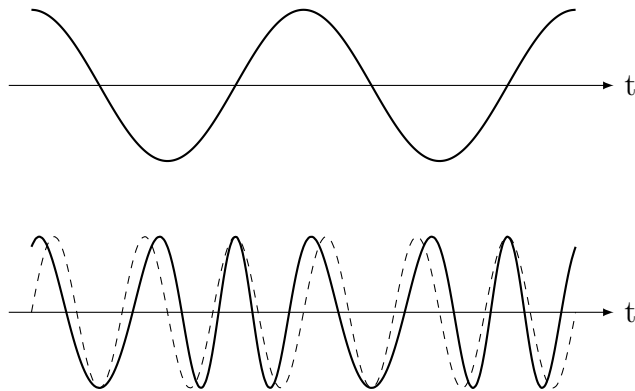


Рис. 8. Фазово-модулированный сигнал. Верхняя осциллограмма — модулирующий сигнал. Нижняя осциллограмма: штриховая кривая — сигнал несущей, сплошная кривая — модулированный по фазе сигнал.

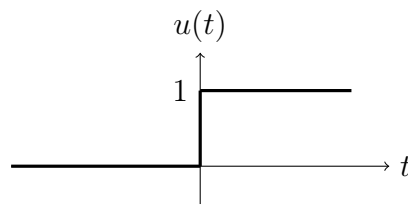


Рис. 9. Сигма-функция  $\sigma(t)$

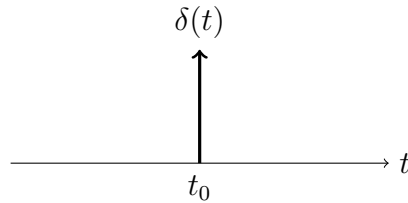


Рис. 10. Дельта функция  $\delta(t)$

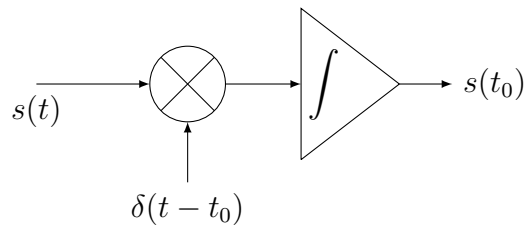


Рис. 11. Структурная схема измерителя мгновенного значения сигналов

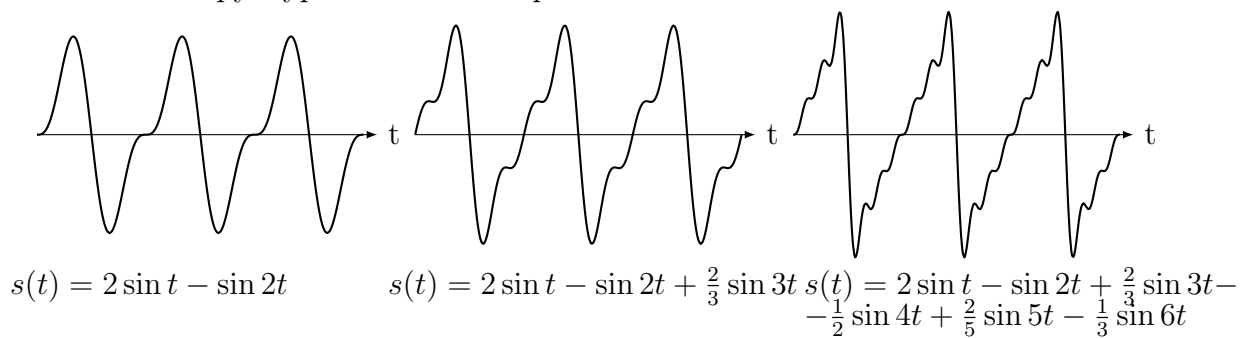


Рис. 12. Представление пилообразного сигнала в виде суммы синусоидальных сигналов.

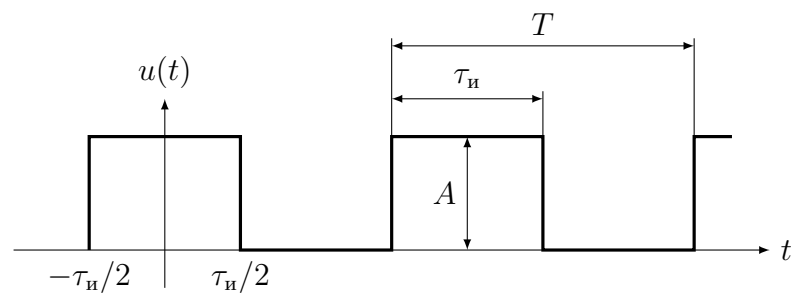


Рис. 13. Последовательность прямоугольных импульсов.

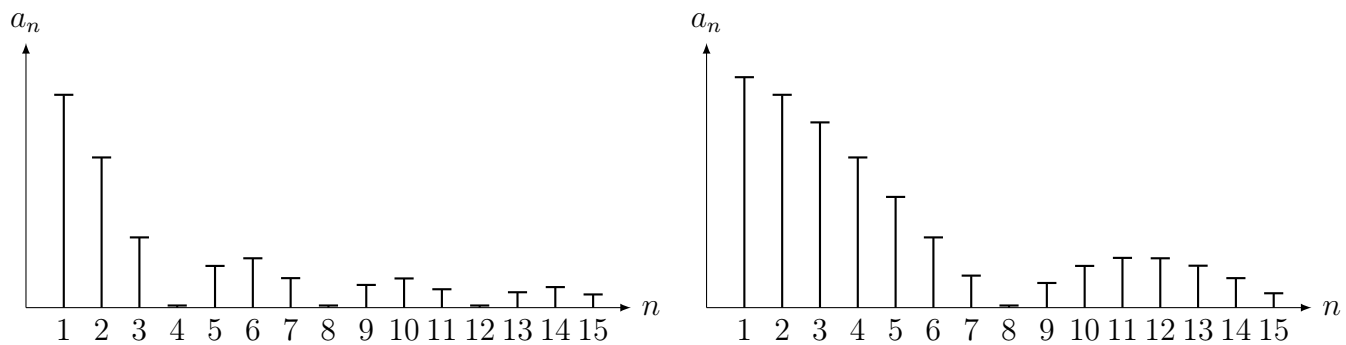


Рис. 14. Амплитудный спектр последовательности прямоугольных импульсов при малой скважности  $q = 2$  (слева) и при большой скважности  $q = 4$  справа.

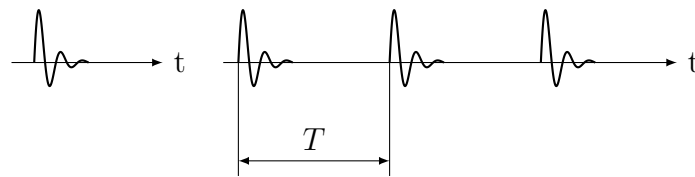


Рис. 15. Одиночный импульс (слева) и периодическая последовательность (справа).

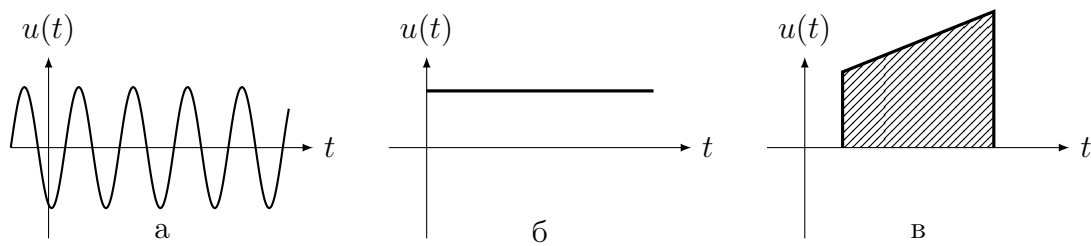


Рис. 16. Абсолютно неинтегрируемые (а,б) и интегрируемые (в) сигналы.

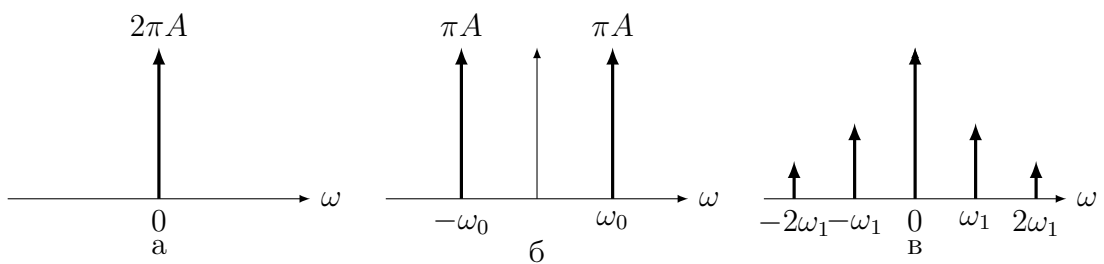


Рис. 17. Амплитудные спектры постоянного по уровню сигнала (а), синусоидального сигнала (б) и произвольного периодического сигнала (в).

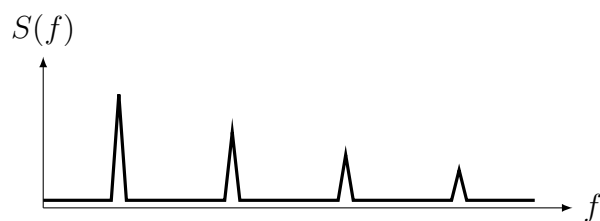


Рис. 18. Периодический сигнал на дисплее анализатора спектра

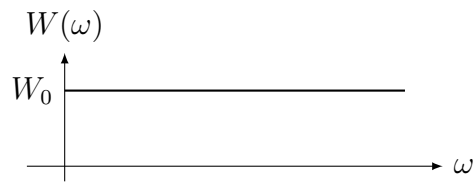


Рис. 19. График спектральной плотности мощности белого шума.

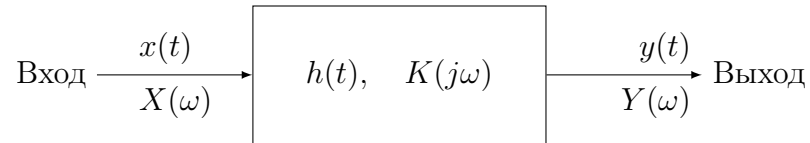


Рис. 20. Линейная система и сигналы на её выходе и входе.

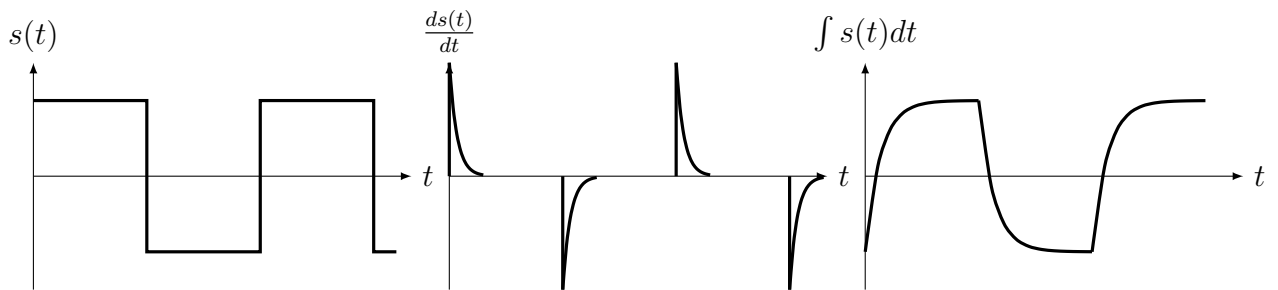


Рис. 21. Дифференцирование и интегрирование прямоугольных импульсов.

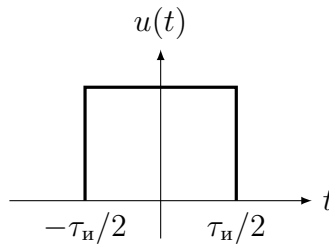


Рис. 22. Прямоугольный видеоимпульс

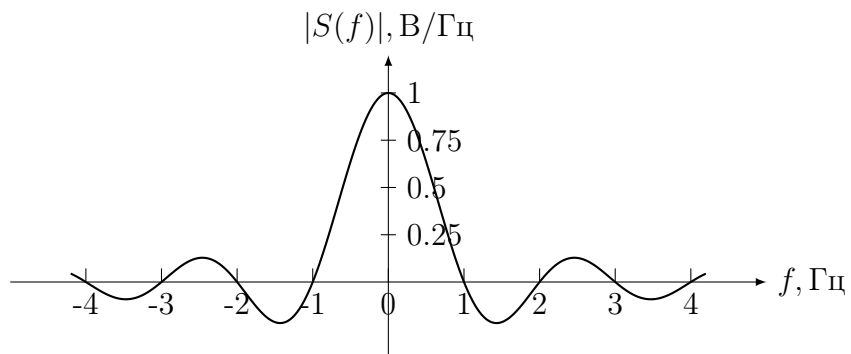


Рис. 23. График спектральной плотности видеоимпульса с амплитудой 1 В и длительностью 1 сек

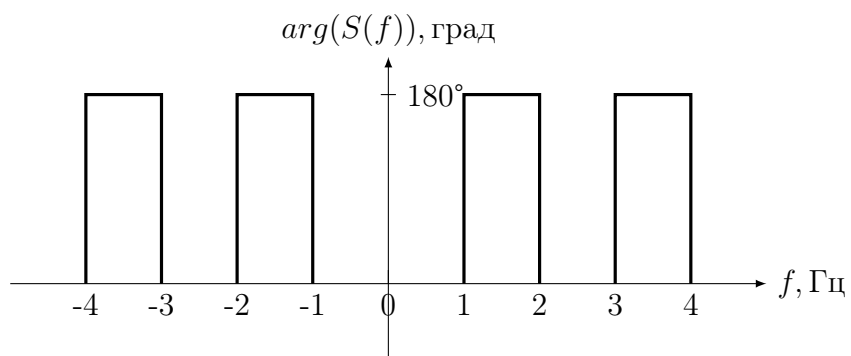


Рис. 24. Фазовый спектр видеоимпульса с амплитудой 1 В и длительностью 1 сек

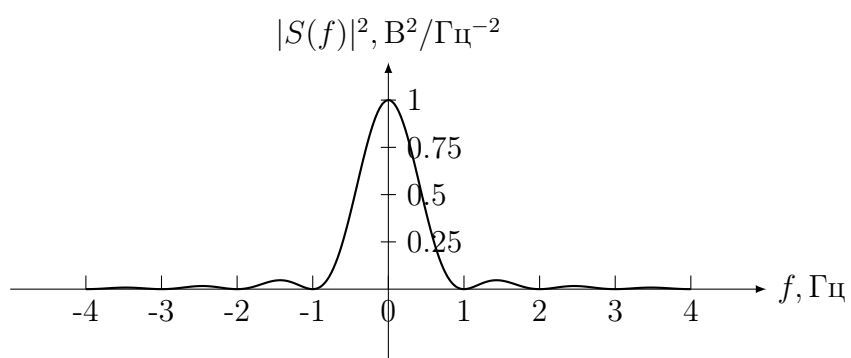


Рис. 25. График спектра мощности видеоимпульса с амплитудой 1 В и длительностью 1 сек

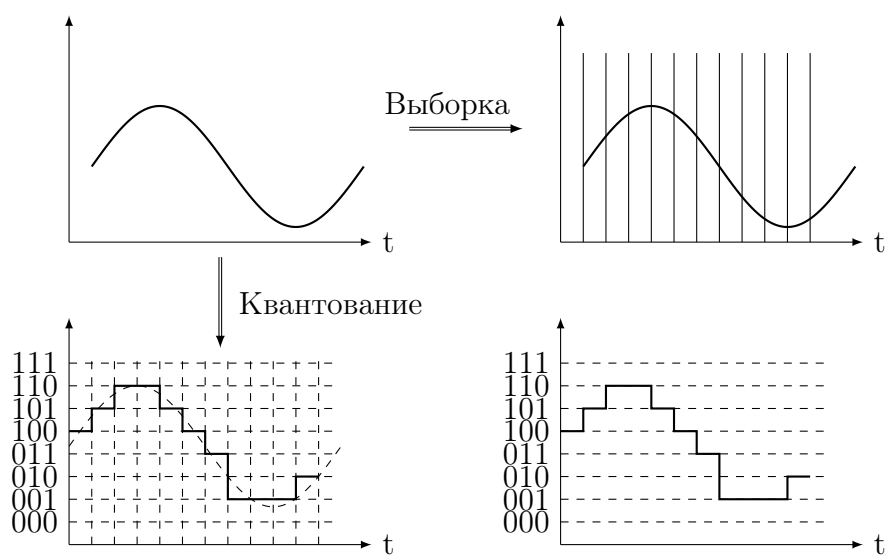


Рис. 26. Преобразование аналогового сигнала в цифровой

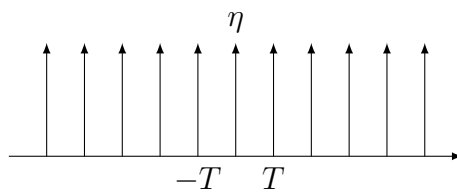


Рис. 27. Дискретизирующая последовательность импульсов

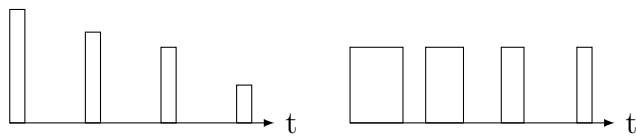


Рис. 28. Сигналы АИМ (слева) и ШИМ (справа)

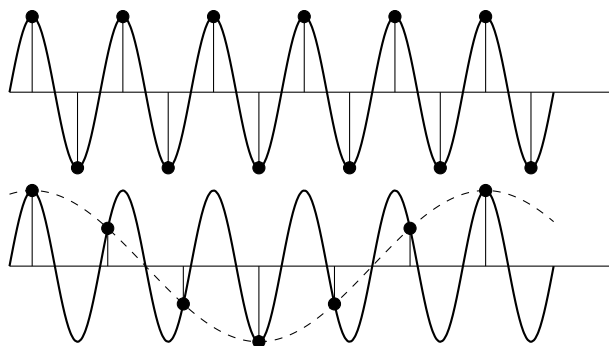


Рис. 29. Дискретизация синусоидального сигнала.

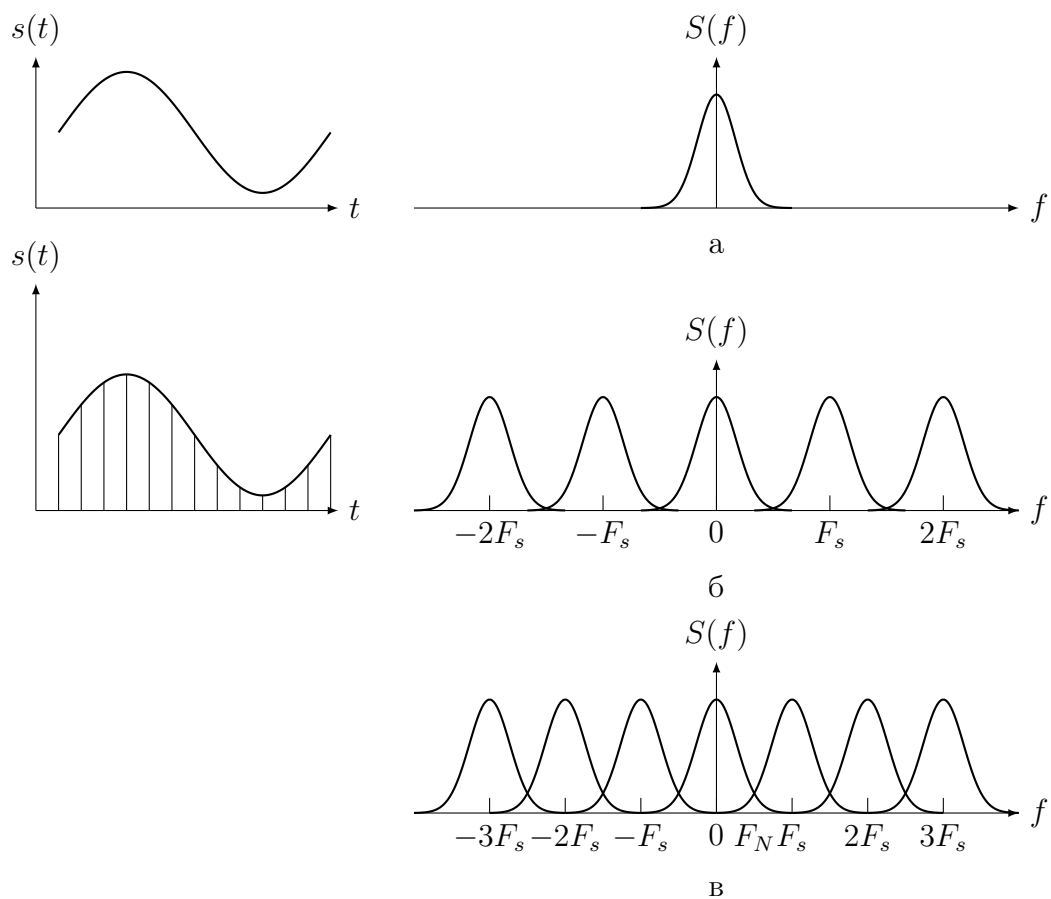


Рис. 30. Спектр  $S(f)$  аналогового (а) и дискретного (б) сигнала  $s(t)$ . Частота дискретизация  $F_s$  выбрана правильно (б), частота дискретизации мала.  $F_N$  равна половине частоты дискретизации. (в). Частота  $F_N$  равна половине частоты дискретизации.



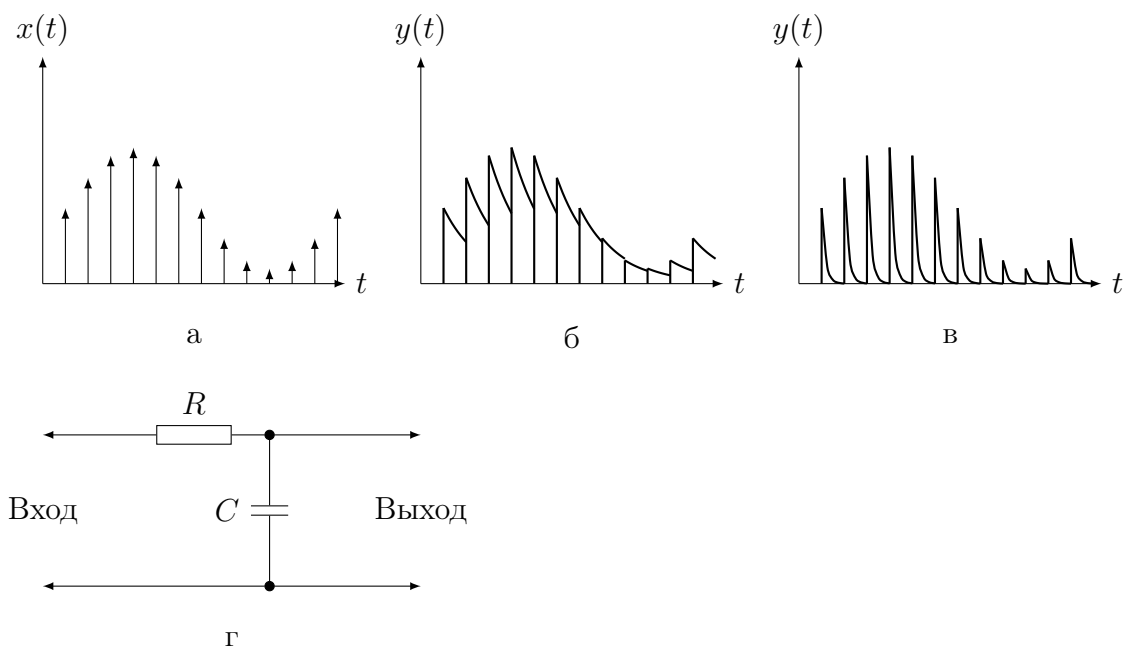


Рис. 31. Восстановление сигнала по отсчётам при помощи интегрирующей RC-цепочки.  $x(t)$  — сигнал (а) на входе RC-цепочки,  $y(t)$  — сигнал на выходе RC-цепочки. Постоянная времени RC много больше интервала дискретизации (б). Постоянная времени RC много меньше интервала дискретизации (в). Схема интегрирующей RC-цепочки (г)

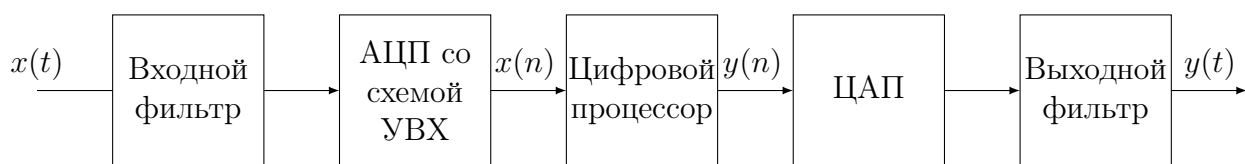


Рис. 32. Структурная схема ЦОС реального времени.  $x(t)$  — аналоговый входной сигнал,  $y(t)$  — аналоговый выходной сигнал,  $x(n)$  — цифровой входной сигнал,  $y(n)$  — цифровой выходной сигнал.

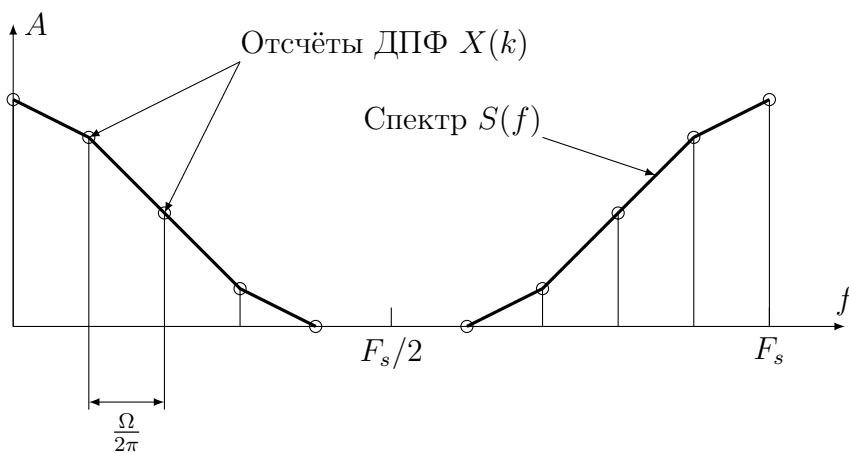


Рис. 33. Связь между ДПФ  $X(k)$  дискретного сигнала и спектром  $S(f)$  соответствующего ему непрерывного сигнала.

	$x(k)$				2	1	3	-1	
$y(0-k)$	2	1	-1	$f(0) = 2 \cdot (-1) = -2$					
$y(1-k)$	2	1	-1	$f(1) = 2 - 1 = 1$					
$y(2-k)$	2	1	-1	$f(2) = 2 \cdot 2 + 1 - 3 = 2$					
$y(3-k)$	2	1	-1	$f(3) = 2 + 3 + 1 = 6$					
$y(4-k)$	2	1	-1	$f(4) = 2 \cdot 3 - 1 = 5$					
$y(5-k)$	2	1	-1	$f(5) = -2$					

Рис. 34. Вычисление линейной свёртки  $f(n)$  двух последовательностей  $x(n)$  и  $y(n)$ .

	$x(k)$	2	1	3	-1	
$y(0-k)$	-1	1	2	3	$f(0) = 2$	
$y(1-k)$	3	-1	1	2	$f(1) = 6$	
$y(2-k)$	2	3	-1	1	$f(2) = 3$	
$y(3-k)$	1	2	3	-1	$f(3) = 14$	

Рис. 35. Вычисление круговой свёртки  $f(n)$  двух последовательностей  $x(n)$  и  $y(n)$ .

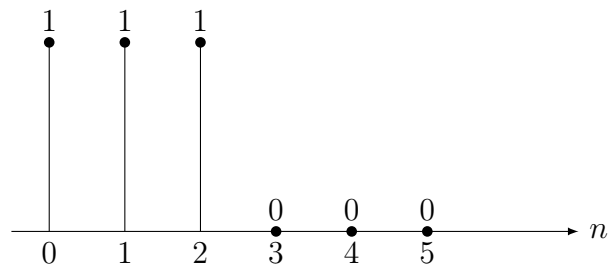


Рис. 36. Пример дискретного сигнала для вычисления ДПФ.

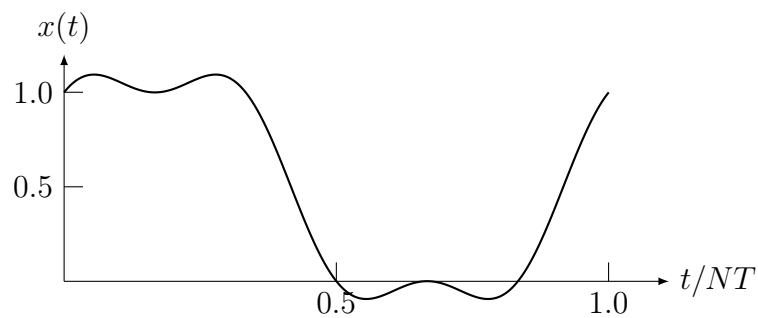


Рис. 37. Сигнал, восстановленный по коэффициентам ДПФ.

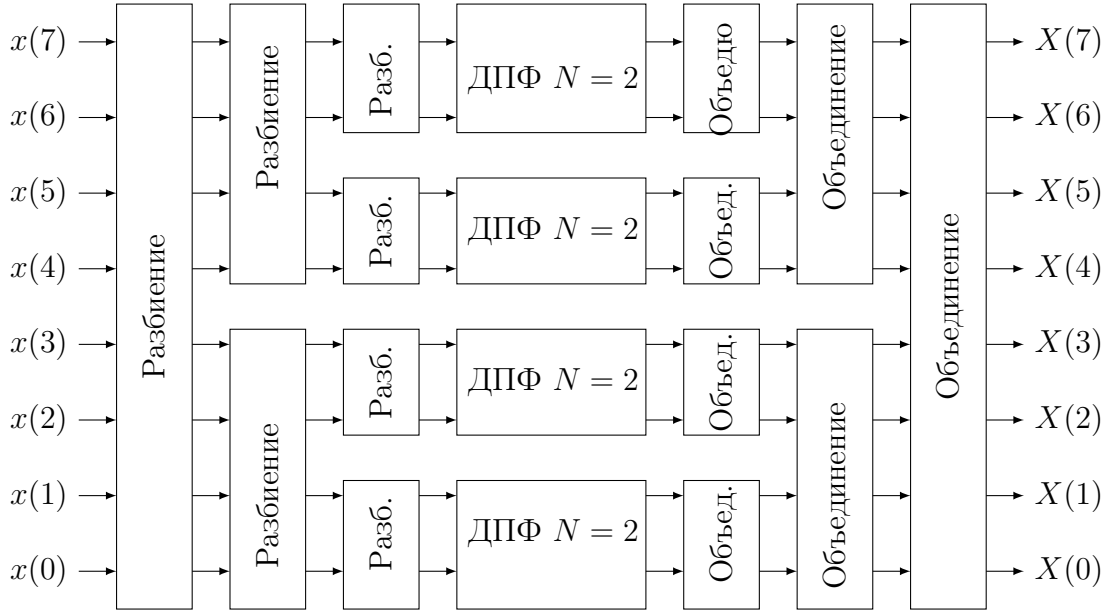


Рис. 38. Схема вычисления БПФ на примере последовательности из  $N$  отсчётов.

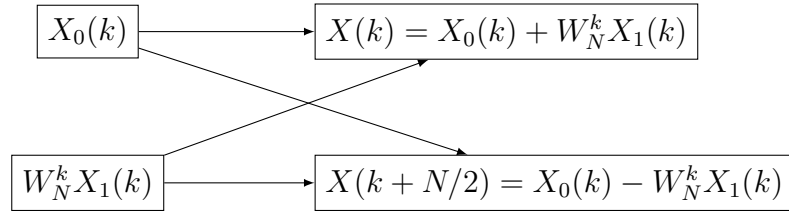


Рис. 39. Процедура объединения на основе графа «бабочка».

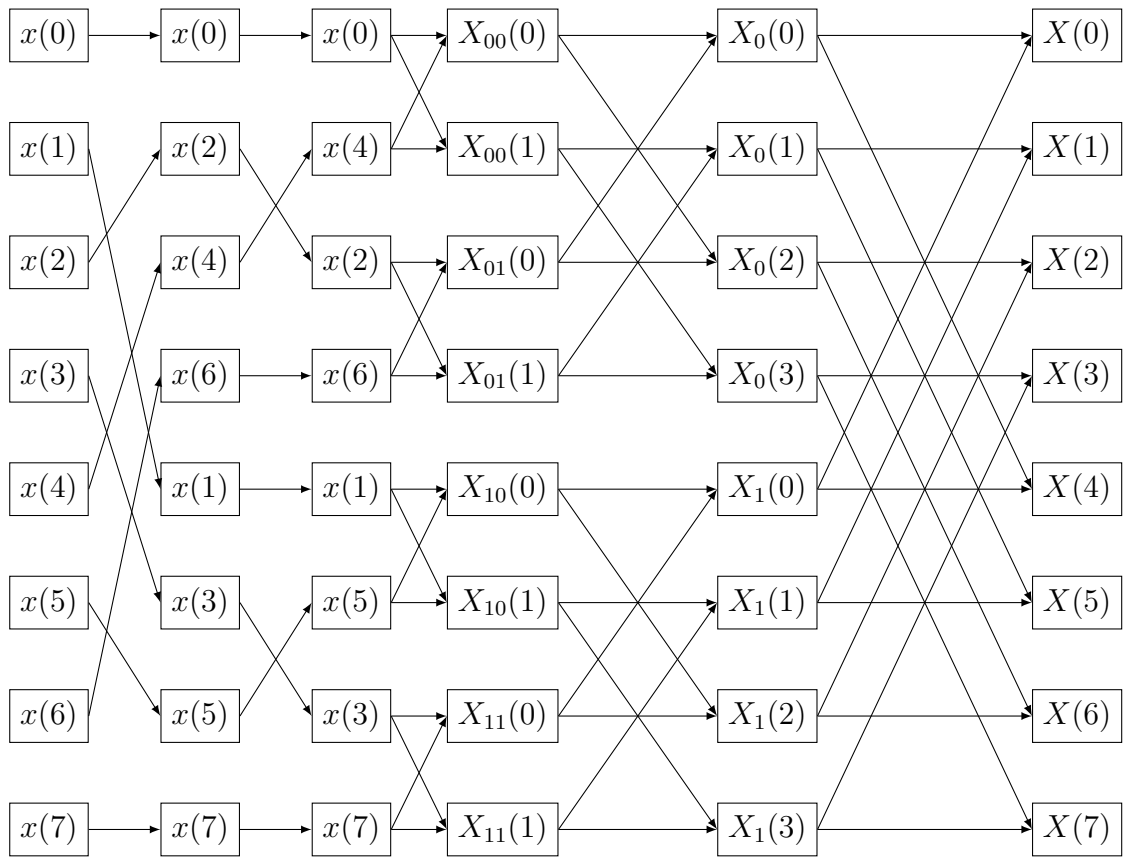


Рис. 40. Алгоритм ДПФ с прореживанием по времени. Пример для последовательности из  $N = 8$  элементов.

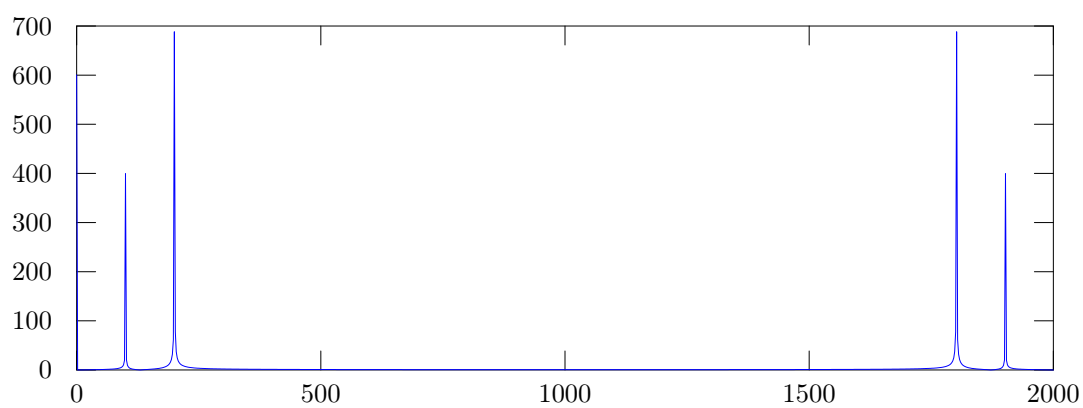
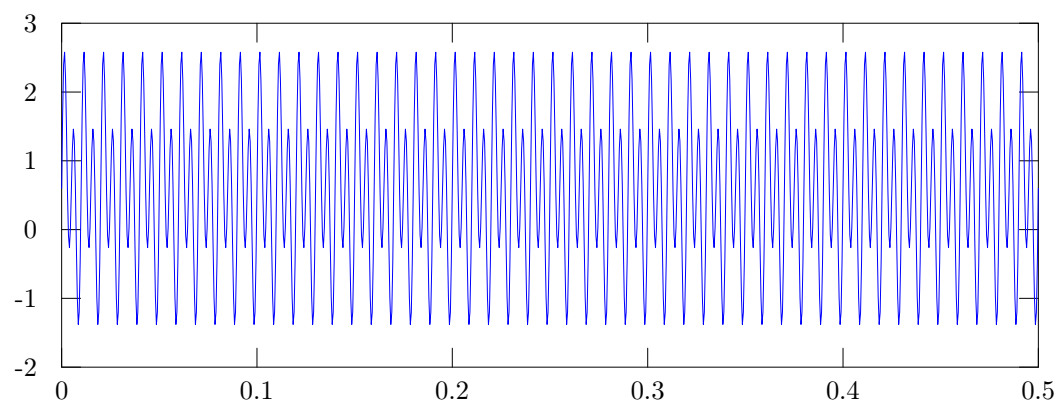


Рис. 41. Результат применения функции `fft` к двухтональному сигналу

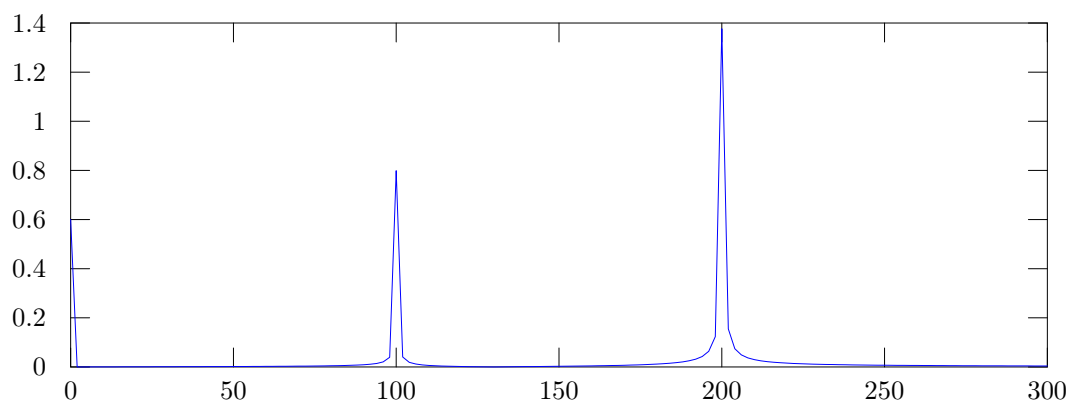
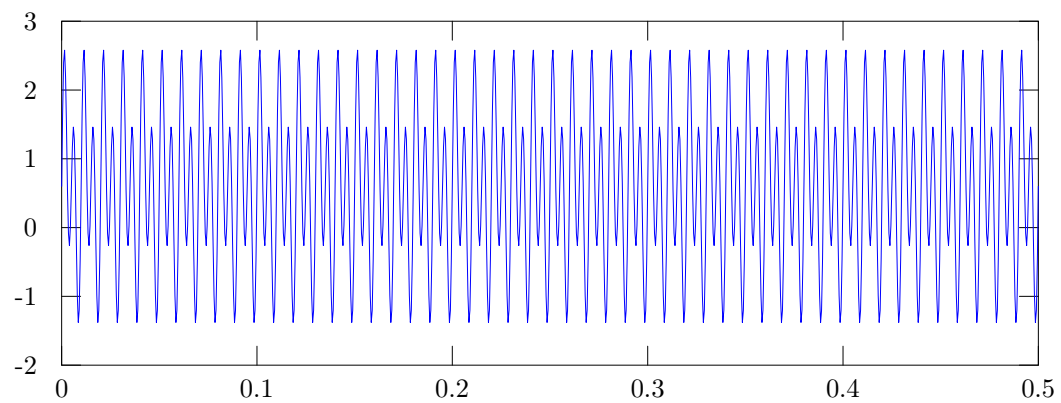


Рис. 42. Нормировка результата применения функции `fft` к двухтональному сигналу

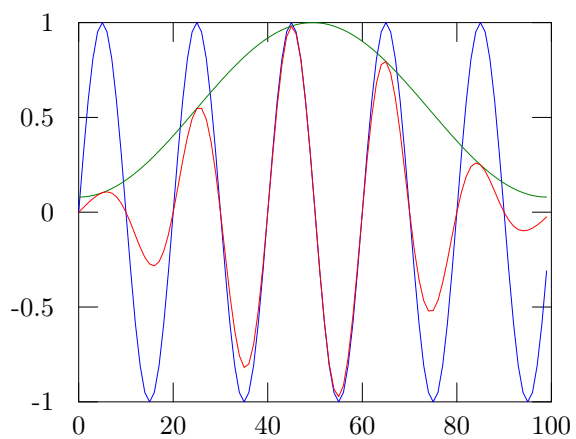


Рис. 43. Пример применения оконной функции Хэмминга.

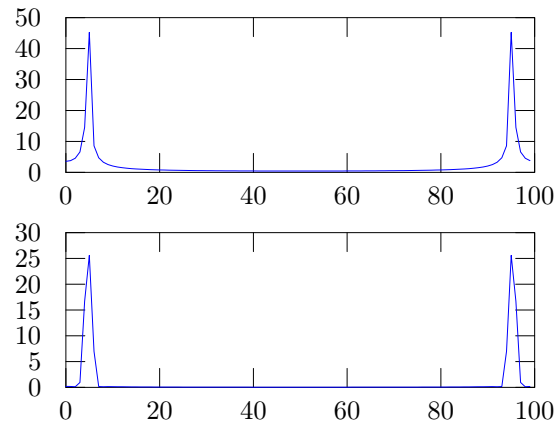


Рис. 44. ДПФ сигнала без применения окна (верхний график, видно размытие спектра) и с применением окна Хэмминга (нижний график) — размытие спектра устранено.

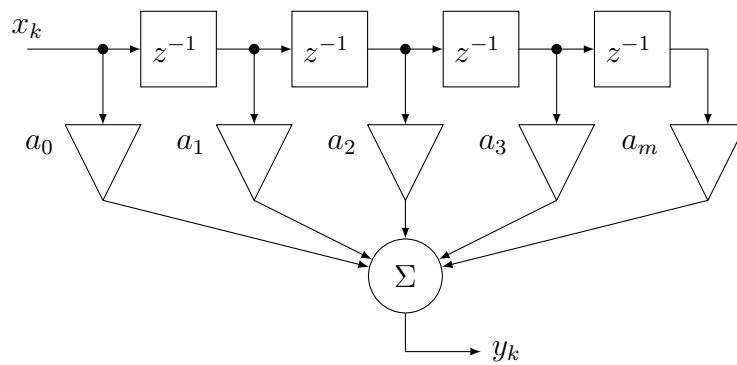


Рис. 45. Схема построения трансверсального ЦФ

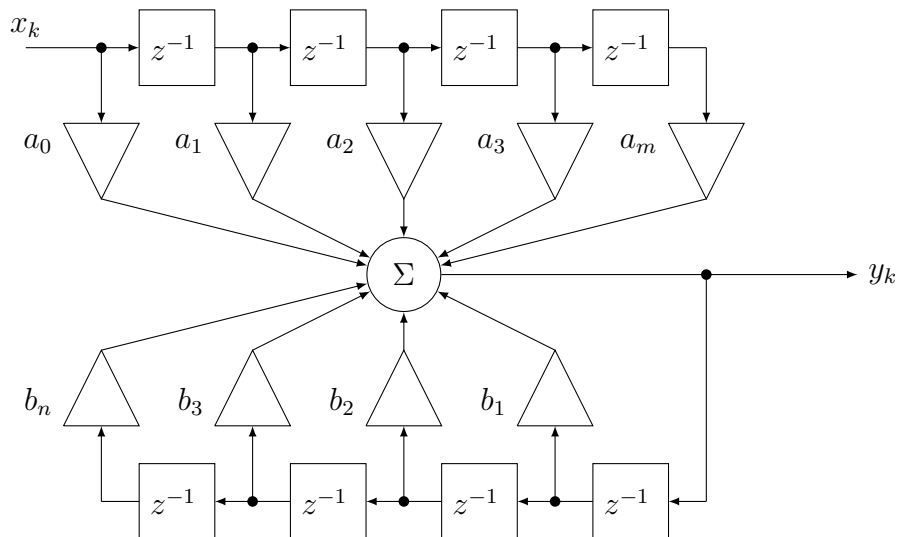


Рис. 46. Схема построения рекурсивного ЦФ

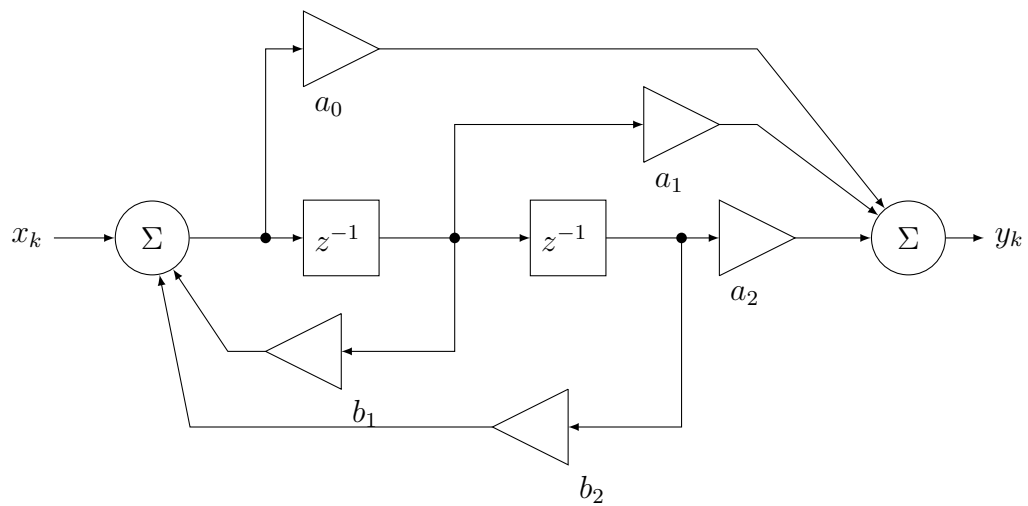


Рис. 47. Схема построения канонического рекурсивного ЦФ

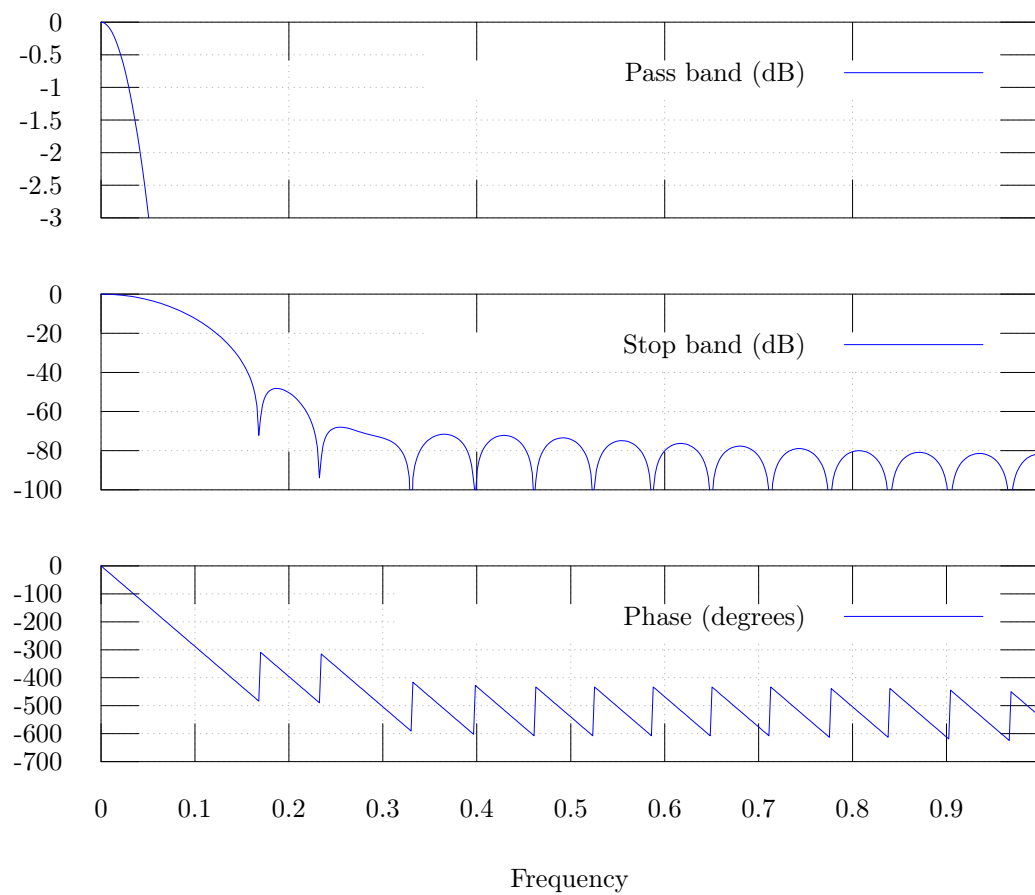


Рис. 48. АЧХ и ФЧХ КИХ цифрового фильтра 32-го порядка



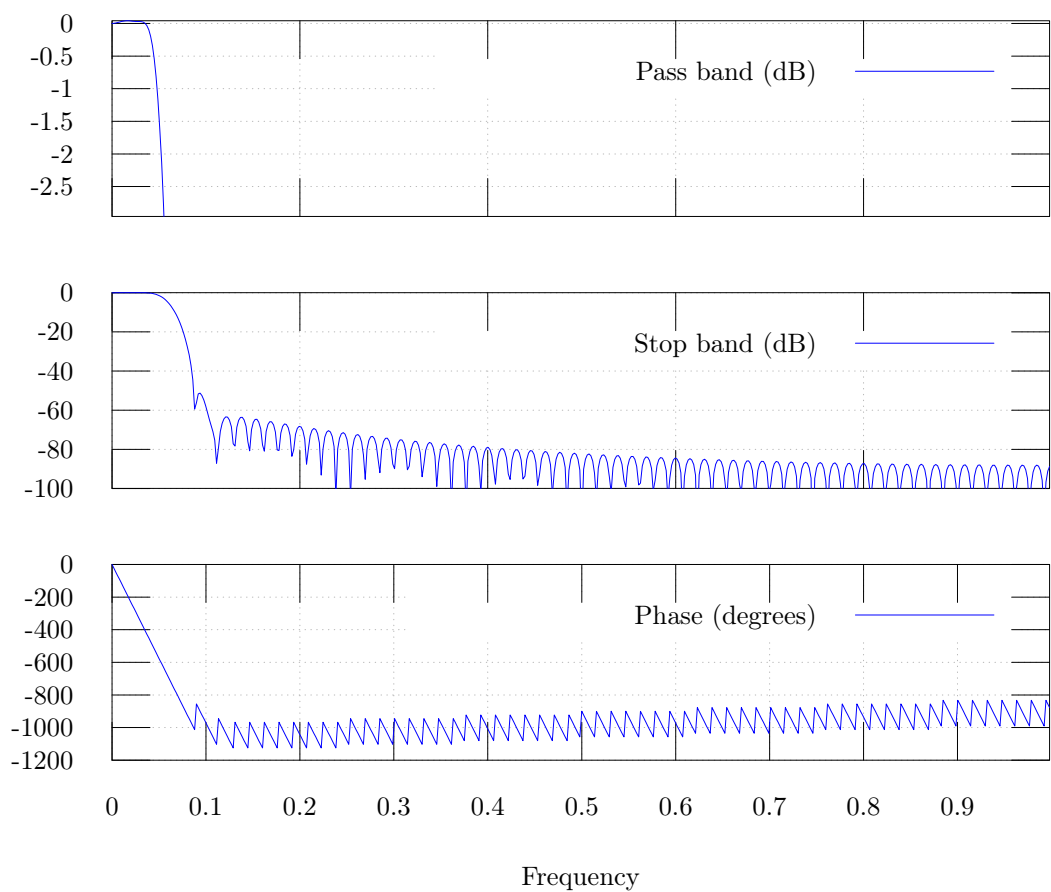


Рис. 49. АЧХ и ФЧХ КИХ цифрового фильтра 128-го порядка

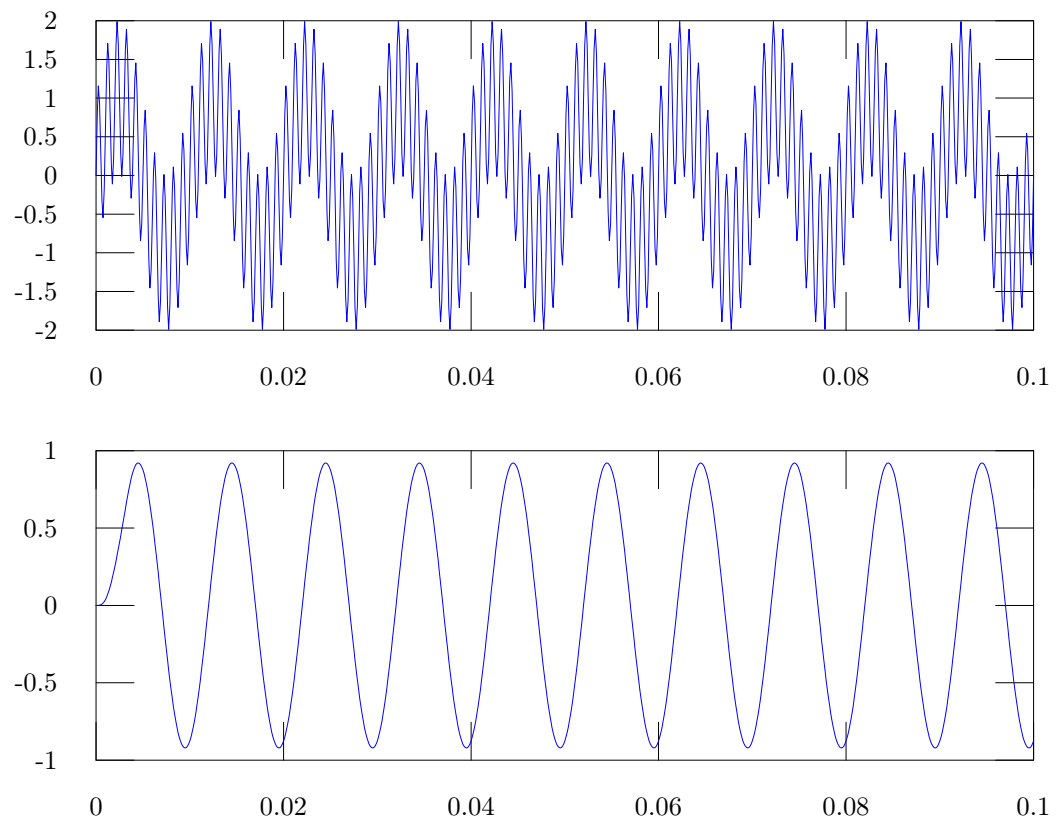


Рис. 50. Результат применения ЦФ к сумме двух синусоидальных сигналов. Верхняя кривая — сигнал на входе фильтра; нижняя кривая — сигнал на выходе фильтра.