

# Оглавление

Предисловие .....	3
<b>1. Детерминированные и случайные процессы .....</b>	<b>8</b>
1.1. Физические процессы — носители информации .....	8
1.1.1. Физические процессы и величины .....	8
1.1.2. Численные значения физических величин .....	11
1.2. Детерминированные процессы .....	13
1.2.1. Периодические детерминированные процессы .....	13
1.2.2. Гармонические колебания .....	14
1.2.3. Ряды Фурье и спектральное представление периодических детерминированных процессов .....	18
1.2.4. Интеграл Фурье и спектральное представление непериодических детерминированных процессов .....	22
1.3. Расчёт спектров детерминированных процессов .....	24
1.3.1. Прямоугольный импульс .....	25
1.3.2. Периодическая последовательность прямоугольных импульсов ..	26
1.3.3. Отрезок периодической последовательности прямоугольных импульсов .....	30
1.3.4. Меандр .....	33
1.3.5. Отрезок меандра .....	35
1.3.6. Импульс по форме полуволны синусоиды .....	37
1.3.7. Периодическая последовательность импульсов по форме полуволны синусоиды .....	39
1.3.8. Гармоническое колебание .....	41
1.3.9. Отрезок гармонического колебания .....	42
1.3.10. Отрезок синусоиды с синусоидальной огибающей .....	47
1.3.11. Импульс по форме $\cos^2 x$ .....	49
1.3.12. Периодическая последовательность импульсов по форме $\cos^2 x$ ..	51
1.3.13. Отрезок периодической последовательности импульсов по форме $\cos^2 x$ .....	52
1.3.14. Импульс треугольной формы .....	54
1.3.15. Импульс трапецидальной формы .....	57
1.3.16. Импульс по форме $\sin x/x$ .....	61
1.3.17. Импульс по форме $m$ -последовательности .....	64
1.3.18. Периодическая последовательность импульсов по форме $m$ -последовательности .....	68
1.4. Случайные процессы .....	72
1.4.1. Параметры случайных процессов .....	72
1.4.2. Стационарные и эргодические процессы .....	80
1.4.3. Спектры случайных процессов .....	83

<b>2. Цифровые сигналы — общие сведения</b> .....	85
2.1. Формирование цифровых сигналов .....	85
2.1.1. Дискретизация аналогового сигнала .....	85
Теорема отсчётов (85). Восстановление сигнала по его отсчётам (88). Особенности применения теоремы и ряда Котельникова–Шеннона (89)	
2.1.2. Квантование по уровням дискретизированного сигнала .....	90
2.1.3. Цифровое кодирование отсчётных значений .....	94
2.1.4. Канальное кодирование .....	98
2.1.5. Структурирование сигналов в цифровых сетях .....	99
2.2. Статистические параметры цифровых сигналов .....	104
2.2.1. Особенности временных функций цифровых сигналов .....	104
Сочетание стохастичности и детерминированности временной функции (104). Наличие периодической составляющей (105). Образование групп сопрягающихся элементов (108)	
2.2.2. Статистические параметры групповых элементов .....	110
Группирование элементов типа NRZ (110). Группирование элементов по форме синусоидальной полуволны (116)	
2.2.3. Функции распределения вероятностей .....	121
Общие определения (121). Функции распределения вероятностей детерминированных элементов сигнала (122). Функции распределения вероятностей групповых элементов сигнала (124). Графическое представление функций распределения вероятностей (125)	
2.2.4. Моментные функции и функции корреляции .....	130
Функция корреляции сигнала без учёта группирования элементов (130). Функция корреляции сигнала с учётом группирования элементов (131). Функция корреляции элементов в виде кусочно-заданных функций (134)	
2.2.5. Энергетический спектр и его параметры .....	136
Энергетическая спектральная плотность (136). Зависимость спектральной плотности от частоты (138). Спектральная плотность дискрет (140). Спектральная характеристика цифрового сигнала (143). Средняя мощность сигнала (146). Реальная ширина спектра (147). Огибающая максимумов спектральной характеристики (150)	
<b>3. Первичные сигналы</b> .....	154
3.1. Сигналы с постоянными уровнями единичных элементов .....	154
3.1.1. Однополярные сигналы NRZ с различными уровнями элементов .....	154
Общая характеристика сигналов (154). Спектры сигналов (154). Свойства однополярных сигналов с различными уровнями элементов (157)	
3.1.2. Однополярные сигналы RZ с односторонним ограничением длительности единичных элементов .....	160
Общая характеристика сигналов (160). Спектры сигналов (161). Свойства сигналов (169)	
3.1.3. Однополярные сигналы RZ с двухсторонним ограничением длительности единичных элементов .....	173
Общая характеристика сигналов (173). Спектры сигналов (174). Свойства сигналов (178)	
3.1.4. Двухполярные сигналы RZ с односторонним ограничением длительности единичных элементов .....	182
Общая характеристика сигналов (182). Спектры сигналов (183)	
3.1.5. Двухполярные сигналы RZ с двухсторонним ограничением длительности единичных элементов .....	185

Общая характеристика сигналов (185). Спектры сигналов (186). Свойства сигналов (190)	
3.1.6. Двухполярные сигналы RZ с взаимным смещением уровней элементов .....	191
Общая характеристика сигналов (191). Спектры сигналов (191). Свойства сигналов (196)	
3.1.7. Двухполярные сигналы NRZ с различными уровнями постоянной составляющей .....	198
Общая характеристика сигналов (198). Спектры сигналов (199). Свойства сигналов (200)	
3.1.8. Однополярные двоичные сигналы с различными вероятностями следования единичных элементов .....	202
Общая характеристика сигналов (202). Спектры сигналов (202). Свойства сигналов (207)	
3.1.9. Двухполярные трёхуровневые сигналы с различными вероятностями следования элементов .....	210
Общая характеристика сигналов (210). Спектры сигналов (210). Свойства сигналов (216)	
3.1.10. Биимпульсные сигналы с прямоугольными импульсами .....	218
Общая характеристика сигналов (218). Спектры сигналов (219). Свойства сигналов (226). Свойства биимпульсных сигналов (238)	
3.2. Сигналы с непостоянными уровнями единичных элементов .....	243
3.2.1. Двухполярные сигналы с элементами треугольной формы .....	243
Общая характеристика сигналов (243). Функция корреляции и энергетический спектр (244). Спектры сигналов (247). Свойства двухполярных сигналов (252)	
3.2.2. Однополярные сигналы с элементами треугольной формы .....	255
Общая характеристика сигналов (255). Разделение сигнала и его средняя мощность (255). Спектр периодической составляющей сигнала (257). Функция корреляции и энергетический спектр информационной составляющей сигнала (259). Спектры сигналов (262). Свойства сигналов (267)	
3.2.3. Двухполярные сигналы с элементами трапецеидальной формы ..	268
Общая характеристика сигналов (268). Свойства сигналов (268). Спектры сигналов (275)	
3.2.4. Однополярные сигналы с элементами трапецеидальной формы ..	280
Общая характеристика сигналов (280). Свойства сигналов (280). Спектры сигналов (287)	
3.2.5. Двухполярные сигналы с элементами в виде трапеций с синусоидальными фронтами .....	291
Общая характеристика сигналов (291). Спектры сигналов (291). Свойства сигналов (295)	
3.2.6. Однополярные сигналы с элементами в виде трапеций с синусоидальными фронтами .....	297
Общая характеристика сигналов (297). Спектры сигналов (297). Свойства сигналов (302)	
3.2.7. Сигналы с элементами в виде трапеций с синусоидальными вершинами .....	307
Общая характеристика сигналов (307). Спектры сигналов (308). Свойства сигналов (312)	
3.2.8. Сигналы с элементами в виде полуволны синусоиды с подставкой .....	317

	Общая характеристика сигналов (317). Спектры сигналов (317). Свойства сигналов (322)	
3.3.	Сигналы с элементами без прямолинейных участков	326
3.3.1.	Сигналы с элементами по форме полуволны синусоиды	326
	Общая характеристика сигналов (326). Спектр однополярного сигнала (327). Спектр двухполярного сигнала (328). Свойства сигналов (329)	
3.3.2.	Сигналы с элементами по форме волны функции $\sin^2 x$ или волны приподнятого косинуса	344
	Общая характеристика сигналов (344). Спектр однополярного сигнала (345). Спектр двухполярного сигнала (346). Свойства сигналов (347)	
3.3.3.	Бимпульсные сигналы с импульсами синусоидальной формы	352
	Общая характеристика сигналов (352). Спектр сигнала с нулевыми элементами (353). Спектр сигнала с инверсными элементами (354). Свойства сигналов (355)	
3.3.4.	Бимпульсные сигналы с импульсами синус-квадратичной формы	357
	Общая характеристика сигналов (357). Спектры сигналов (358). Свойства сигналов (360)	
3.3.5.	Сигналы с элементами в виде отрезка синусоиды с синусоидальной огибающей	366
	Общая характеристика сигналов (366). Спектры сигналов (366). Свойства сигналов (370)	
3.3.6.	Сигналы с элементами в виде отрезков функции $\sin x/x$	373
	Общая характеристика сигналов (373). Спектр сигнала с элементами вида $(\sin x = x)/0$ (375). Спектры сигналов с нулевыми элементами (376). Спектры сигналов с инверсными элементами (381). Свойства сигналов с нулевыми элементами (388). Свойства сигналов с инверсными элементами (394). Сравнительные свойства сигналов с нулевыми и инверсными элементами (396). Сравнительная характеристика энергетических спектров (397)	
3.3.7.	Сигналы с элементами ЛЧМ	399
	Общая характеристика сигналов (399). Спектры сигналов (401). Свойства сигналов (405)	
3.4.	Типовые сигналы с канальным кодированием	409
3.4.1.	Двухуровневые сигналы с элементами NRZ	409
	Общая характеристика сигналов (409). Спектры сигналов (411). Свойства сигналов (413)	
3.4.2.	Трёхуровневые сигналы с элементами NRZ	424
	Общая характеристика сигналов (424)	
3.4.2.1.	Сигналы с дикодным кодированием	425
	Общая характеристика сигналов (425). Спектр сигнала (425). Свойства сигналов (426)	
3.4.2.2.	Биполярные трёхуровневые сигналы с высокой плотностью (HDB2 и HDB3)	433
	Общая характеристика сигнала (433). Спектр сигнала HDB2 (436). Спектр сигнала HDB3 (437). Свойства сигналов (438)	
3.4.2.3.	Сигнал MLT-3	443
	Общая характеристика сигнала (443). Спектр сигнала (444). Свойства сигналов (445)	
3.4.3.	M-уровневые сигналы	450
	Общая характеристика сигналов (450). Спектры сигналов (452). Свойства сигналов (455)	
3.4.4.	Сигналы 4В3Т (FOMOT)	458

	Общая характеристика сигналов (458). Спектры сигналов (460). Свойства сигналов (462)	
3.4.5.	Сигналы СМІ .....	464
	Общая характеристика сигналов (464). Спектр сигналов (465). Свойства сигналов (466)	
3.4.6.	Сигналы АМІ .....	472
	Общая характеристика сигналов (472). Спектры сигналов (472). Свойства сигналов (473)	
3.4.7.	Сигналы с кодированием Миллера .....	478
	Общая характеристика сигналов (478). Спектр сигнала (479). Свойства сигналов (480). Формирование сигналов (484)	
3.4.8.	Сигналы с элементами в виде псевдослучайных последовательностей .....	486
	Общая характеристика сигналов (486). Спектр сигнала (487). Свойства сигналов с использованием ПСП (488)	
3.4.9.	Сигналы с элементами в виде отрезков меандра .....	519
	Общая характеристика сигналов (519). Спектр сигнала с отрезками меандра (520). Свойства сигналов (521)	
<b>4.</b>	<b>Модулированные цифровые сигналы .....</b>	<b>532</b>
4.1.	Цифровые сигналы с амплитудным различием элементов .....	532
4.1.1.	Сигналы с постоянной амплитудой на интервале элемента .....	532
	Общая характеристика сигналов (532). Спектры сигналов (533). Свойства сигналов с постоянными амплитудами элементов (536)	
4.1.2.	Сигналы с треугольным изменением огибающей элементов .....	540
	Общая характеристика сигналов (540). Спектры сигналов с треугольной огибающей элементов (541). Свойства цифровых сигналов с треугольной огибающей элементов (542)	
4.1.3.	Сигналы с трапецеидальным изменением огибающей элементов ..	551
	Общая характеристика сигналов (551). Спектры сигналов (552), Свойства цифровых сигналов с трапецеидальной огибающей элементов (558)	
4.1.4.	Сигналы с синусоидальной огибающей элементов .....	571
	Общая характеристика сигналов (571). Спектр сигнала с синусоидальной огибающей элементов (572). Свойства сигналов с синусоидальной огибающей элементов (573)	
4.1.5.	Сигналы с синусоидальными фронтами огибающей элементов ...	581
	Общая характеристика сигналов (581). Спектры сигналов (582). Свойства сигналов с синусоидальными фронтами огибающей элементов (586)	
4.2.	Цифровые сигналы с частотным различием элементов и с разрывом фазы на границах элементов .....	601
4.2.1.	Двухчастотные сигналы с разрывом фазы (ЧМр-2) .....	601
	Общая характеристика сигналов (601). Спектры сигналов (602). Свойства сигналов ЧМр-2 (610)	
4.2.2.	Четырёхчастотные сигналы с разрывом фазы (ЧМр-4) .....	622
	Общая характеристика сигналов (622). Спектры сигналов (623). Свойства сигналов ЧМр-4/1 (631)	
4.3.	Сигналы с частотным различием элементов без разрыва фазы на границах элементов .....	651
4.3.1.	Двухчастотные сигналы без разрыва фазы (ЧМ-2) .....	651

Квадратурный модулятор (651). Свойства сигналов ЧМ-2 с индексом модуляции $m = 0,5$ (654). Формирование сигналов ЧМ-2 (659). Формирование сигналов ЧМ-2 с целочисленными индексами модуляции (662). Формирование сигналов ЧМ-2 с индексами модуляции $m = n - 0,5$ (664). Общая методика определения формы сигналов на выходах АФМ и синтеза структурных схем модуляторов (669). Спектр сигнала ЧМ-2 с индексами модуляции $m = n - 0,5$ (671). Спектр сигнала ЧМ-2 с индексами модуляции $m = n$ (674). Весфильтровое формирование фазовращающих напряжений (680). Сигналы ЧМ-2 с плавным изменением фазы несущего колебания (681). Сигналы ЧМ-2 с плавным изменением фазы и частоты несущего колебания (687). Сигналы с расщеплённым спектром (693). Применение ЧМ-2 для транспозиции спектра в системах частотного уплотнения цифровых каналов (703). Радиосигналы на основе псевдослучайных последовательностей (708). Сигналы с индексом модуляции $m = 0,25$ (720). Спектры сигналов ЧМ-2 с различными индексами модуляции (735). Выводы к разделу 4.3.1 (746)	
4.3.2. Трёхчастотные ЧМ сигналы без разрыва фазы (ЧМ-3) .....	748
4.3.2.1. Виды сигналов ЧМ-3 .....	748
4.3.2.2. Сигналы ЧМ-3(Д) .....	749
Временные характеристики (749). Двумерная плотность вероятности и функция корреляции (751). Спектральные характеристики (756). Структурная схема модулятора ЧМ-3(Д) (757)	
4.3.2.3. Сигналы ЧМ-3(ТД) .....	758
Временные характеристики (758). Статистические характеристики фазовращающих напряжений (761). Функции корреляции (764). Спектральные характеристики (770). Общая структурная схема формирования сигнала ЧМ-3(ТД) (771)	
4.3.2.4. Сигналы ЧМ-3(ТН) .....	774
Формирование сигнала (774). Статистические характеристики сигналов в модуляторе (775). Функции корреляции групповых элементов (778). Функции корреляции фазовращающих напряжений и сигнала (783). Спектральные характеристики сигнала (787)	
4.3.2.5. Функциональные узлы модулятора ЧМ-3(ТН) .....	789
Общая структурная схема модулятора (789). Преобразователь кода (789). Генератор сигналов (793). Анализатор состояния выходов (794). Логический блок (796). Блок ключей (800). Работа модулятора (801)	
4.3.2.6. Параметры энергетических спектров сигналов ЧМ-3 .....	803
Спектры сигналов (803). Сравнительная характеристика спектров сигналов ЧМ-3 (807)	
4.3.3. Четырёхчастотные сигналы без разрыва фазы (ЧМ-4) .....	810
4.3.3.1. Сигналы ЧМ-4/2-0,5/1,5 .....	810
Временные характеристики сигнала (810). Двумерная плотность вероятности (815). Функции корреляции (816). Спектральные характеристики (821)	
4.3.3.2. Сигналы ЧМ-4/2-0,5/1 .....	822
Временные характеристики сигналов (822). Вероятностные характеристики элементов (825). Двумерная плотность вероятности (827). Функции корреляции элементов сигнала (828). Функции корреляции сигнала (833). Спектральные характеристики (835)	
4.3.3.3. Сигнал ЧМ-4/1-0,5/1,5 .....	837
4.3.3.4. Параметры энергетических спектров сигналов ЧМ-4 .....	839
Спектры сигналов (839). Сравнительная характеристика спектров сигналов ЧМ-4 (843)	

4.3.3.5. Схемотехнические основы формирования сигналов ЧМ-4/2 .....	846
Общая структурная схема блока формирования фазовращающих напряжений (846). Взаимодействие узлов БФФС модулятора (847). Генератор в БФФС модулятора (849). Анализатор состояния выходов (852). Логический блок (853). Блок ключей (856). Работа модулятора (857). Блок формирования фазовращающих напряжений модулятора (859). Выводы к разделу (864)	
4.4. Цифровые сигналы с фазовыми различиями элементов .....	865
4.4.1. Сигналы с двумя различающимися фазами (ФМ-2) .....	865
Формирование и временные характеристики сигналов (865). Двумерная плотность вероятности и функция корреляции (867). Энергетический спектр (870)	
4.4.2. Сигналы ФМ-4 .....	872
Общая характеристика сигналов (872). Временные характеристики сигналов ФМ-4 (873). Параметры группирования элементов (875). Функция корреляции сигнала ФМ-4/2 (875). Энергетический спектр сигнала ФМ-4/2 (878). Функция корреляции сигнала ФМ-4/1 (880). Энергетический спектр сигнала ФМ-4/1 (881)	
4.4.3. Сигналы ФМ-8 .....	883
Общая характеристика сигналов ФМ-8 (883). Временные характеристики сигналов ФМ-8/3 (885). Функция корреляции сигнала ФМ-8/3 (886). Энергетический спектр сигнала ФМ-8/3 (888). Функция корреляции сигнала ФМ-8/1 (891). Энергетический спектр сигнала ФМ-8/1 (892)	
4.4.4. Фазомодулированные сигналы с $m$ -последовательностями (ФМ- $m$ )	894
Общие сведения (894). Группирование элементов (896). Функции корреляции групповых элементов (896). Функция корреляции и энергетический спектр сигнала ФМ- $m$ (898)	
4.4.5. Сигналы ФМ с треугольным изменением фазы .....	901
Формирование и временные характеристики сигналов (901). Функция корреляции и спектр сигнала с треугольным изменением фазы (904). Спектр периодической составляющей сигнала (915). Реальная ширина спектра (916)	
4.4.6. Сигналы ФМ с трапецидальным изменением фазы .....	919
Формирование и временные характеристики сигналов (919). Спектр периодической составляющей сигнала (923). Спектр информационной составляющей сигнала (924)	
4.4.7. Сигналы ФМ с синусоидальным изменением фазы .....	926
Формирование и временные характеристики сигналов (926). Группирование элементов в канале с управлением (929). Функция корреляции и энергетический спектр сигнала в канале с управлением (930). Спектр сигнала в канале без управления (936). Параметры спектральной характеристики сигнала ФМ с синусоидальным изменением фазы (937)	
4.4.8. Сигналы ФМ с синус-квадратичным изменением фазы .....	940
Формирование и временные характеристики сигналов (940). Группирование элементов в канале с управлением (943). Функция корреляции и спектр сигнала в канале с управлением (944). Спектр сигнала в канале без управления (947). Параметры спектральной характеристики сигнала ФМ с синус-квадратичным изменением фазы (948). Сравнительная характеристика сигналов ФМ (951)	
4.5. Цифровые сигналы с двухпараметрическим различием элементов .....	952
4.5.1. Сигналы с амплитудно-фазовой манипуляцией .....	952

Применение сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в сетях цифрового телевидения (952)	
4.5.2. Сигналы с квадратурной амплитудной манипуляцией (MQAM) ..	954
Общая характеристика сигналов (954). Мощность сигналов (956). Группирование элементов и функция корреляции сигналов (959). Энергетические спектры сигналов (966)	
4.5.3. Сигналы MAPSK .....	985
Общая характеристика сигналов (985). Конstellационные диаграммы сигналов (986). Группирование элементов и функции корреляции сигналов (989). Энергетические спектры сигналов (991). Сравнительная характеристика сигналов MQAM и MAPSK (998)	
4.5.4. Сигналы COFDM .....	998
Общая характеристика сигналов (998). Энергетические спектры сигналов OFDM (1002).	
4.5.5. Сигналы с двухпараметрической угловой модуляцией .....	1009
Принципы двухпараметрической угловой модуляции (1009). Сигналы ММС-ФМ-4/1 (1011). Сигналы ЧМ-4/2-ФМ-4/1 (1016). Сигналы ЧМ-4/2-ФМ-4/2 (1022). Выводы к разделу 4.5.5 (1025)	
Приложение. Свёртывание бесконечных рядов и несобственные интегралы, использованные в книге .....	1027
Литература .....	1028
Перечень сигналов .....	1030