

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

А.В.Ушаков

ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ:

элементы теории и практикум

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2012

УДК [517.938 + 519.713 / .718]:62.52: 621.398

Ушаков А.В. Прикладная теория информации: элементы теории и практикум: Учебное пособие для вузов. – СПб.: СПбНИУИТМО, 2010.–325с.: ил. 36.

В пособии изложены в сжатой форме основные положения учебной дисциплины «Прикладная теория информации» цикла специальных дисциплин образовательного стандарта направления 220200 – «Автоматизация и управление» подготовки бакалавров и магистров и специальности 220201 – «Управление и информатика в технических системах» подготовки специалистов – инженеров, достаточные для освоения теоретического материала дисциплины и проведения практикума по ней.

Учебное пособие предназначено для студентов, однако оно может быть рекомендовано также аспирантам и молодым специалистам, которым по роду своей деятельности приходится иметь дело с проблемами канализации информации, обеспечения её помехозащиты при передаче и хранении, а также разработки устройств дискретной автоматики и функционального преобразования кодов.

Рецензенты: д.т.н., профессор В.Н.Дроздов;
д.т.н., профессор А.А.Шалыто.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета компьютерных технологий и управления, протокол № 6 от 14.02.2012



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012

© Ушаков А.В.2012

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
Используемые обозначения и сокращения	10
Введение. Прикладная информатика в общей проблематике управления	14
0. Основные понятия и определения	21
1. Количественные меры информации. Характеристики источника информации	28
1.1 Структурные меры количества информации	29
1.2 Вероятностная мера количества информации К.Шеннона	33
2. Передача информации по каналам связи	48
2.1 Передача информации по каналам связи без помех	51
2.2 Передача информации по каналам связи с помехами	54
3. Основные задачи кодирования информации	61
4. Эффективное кодирование	69
4.1 Объем сигнала и емкость канала связи, условия их согласования	69
4.2 Алгоритм эффективного кодирования К.Шеннона – Р.Фэно	71
4.3 Алгоритм эффективного кодирования Д.Хаффмена	78
5. Помехозащитное кодирование	85
5.1 Формирование базовых параметров систематического помехозащищенного кода	85
5.2 Матричное представление помехозащитного преобразования кодов. Конструирование матриц систематических помехозащищенных кодов	91
5.3 Представление помехозащитного преобразования кодов на основе действий с модулярными многочленами. Выбор образующего модулярного многочлена кода	107
5.4 Связь корректирующей способности кода с кодовым расстоянием, экспресс – оценки корректирующей способности помехозащищенного кода	120
6. Преобразование кодов с помощью линейных двоичных динамических систем (ЛДДС)	129
6.1 Аппарат передаточных функций в задаче модельного представления линейных двоичных динамических систем	129

6.2	Векторно - матричное модельное представление линейных двоичных динамических систем, свойства квадратных матриц над двоичным конечным полем Галуа	139
6.3	Линейные двоичные динамические системы в задачах рекуррентного помехозащитного кодирования и декодирования	152
6.4	Концепция подобия в теории линейных двоичных динамических систем	168
6.4.1	Концепция подобия в задаче двоичного динамического наблюдения состояния ЛДДС	170
6.4.2	Процесс помехозащитного декодирования как процесс двоичного динамического наблюдения состояния двоичного канала связи	176
6.4.3	Синтез двоичных динамических систем в логике произвольных линейных триггеров на базе концепции подобия	180
7.	Преобразование кодов с помощью нелинейных двоичных динамических систем (конечных автоматов)	188
7.1	Канонический алгоритм синтеза конечного автомата (КА). Автоматные логики Мура и Мили	188
7.2	Аналитическое описание комбинационных схем КА. Булевы функции и их свойства, базисы представления, дизъюнктивные совершенные нормальные формы (ДСНФ) и конъюнктивные совершенные нормальные формы (КСНФ), проблема редуцирования аналитического представления переключательных функций. Булевы производные булевых функций, области применения	198
7.3	Триггеры: функции перехода и функции возбуждения входов триггеров	221
7.4	Реализация рекуррентных устройств помехозащитного кодирования и декодирования в логике произвольных триггеров	225
7.5	Синтез конечных автоматов на основе граф – схем алгоритмов функционирования устройств дискретной автоматики	230
8.	Конечные цепи А. Маркова в моделировании двоичных каналов связи	242
8.1	Элементы теории конечных цепей Маркова	243
8.2	Моделирование двоичных каналов связи с помощью конечных цепей Маркова	254

9.	Спектры передаваемых по каналам связи непрерывных сигналов	261
9.1	Спектры немодулированных одиночных сигналов и импульсных (кодовых) последовательностей	261
9.2	Спектры модулированных и демодулированных сигналов	266
10.	Дискретное представление непрерывных сигналов. Базисные функции. Теорема В.Котельникова – К.Шеннона.	275
10.1	Прямая задача дискретного представления непрерывных сигналов. Матрица Грама. Базисные функции	275
10.2	Обратная задача дискретного представления непрерывных сигналов. Теорема В.Котельникова – К.Шеннона	279
	Заключение	287
	Литература	288
	Приложения 1: Таблица неприводимых модулярных многочленов	292
	Приложения 2: D -преобразование двоичных последовательностей	298
	Приложение 3: Коды, используемые в современных телекоммуникационных системах	304
	Приложения 4: Выдержки из ГОСТ 26.205 – 88 Комплексы и устройства телемеханики	305
	Из истории лаборатории технической информатики и телемеханики кафедры СУИ	318
	Об авторе	325

Посвящается Лидии Тимофеевне
Никифоровой, вовлекшей автора
в прикладную теорию информации

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Прикладная теория информации (ПТИ)» к настоящему моменту имеет следующую предысторию. Первоначально в учебных планах подготовки инженеров – электриков по специальности 0606 – «автоматика и телемеханика» в 70-е годы XX-го века появилась дисциплина «Математические основы кибернетики (МОК)», составным компонентом в которую входили вопросы, связанные с прикладной теорией информации и проблемами ее канализации в каналах передачи и хранения. К концу 70-х годов XX-го века название дисциплины претерпевает первое изменение, в результате чего она стала называться «Теоретическими основами кибернетики (ТОК)», при этом информационный и каналный модуль был сохранен в новой дисциплине как составной компонент.

Введенная в учебный план специальности 0606 дисциплина как в версии МОК, так и в версии ТОК в основном решала задачи математического обеспечения модельных представлений процессов управления и информационных процессов в канальных средах. В конце 80-х годов XX-го века дисциплина претерпевает очередное изменение названия, в результате чего она начинает называться «Математическими основами исследования процессов управления (МОИПУ)». Из программы дисциплины МОИПУ изымаются положения, связанные с информационными процессами в канальных средах, которые переносятся в программу появившейся в учебном плане специальности дисциплины «Прикладная теория информации (ПТИ)». С этого момента дисциплина «Прикладная теория информации» в учебном плане подготовки инженеров – электриков по специальности «автоматика и телемеханика» живет и развивается самостоятельно по естественным законам диалектики.

Последняя модификация учебного процесса произошла в начале 90-х годов XX-го века, которая сопровождалась одновременными изменениями номера и названия специальности инженерной подготовки так, что выпускники вузов по данной специальности стали получать квалификацию инженера по специальности 210100 (ныне 220201) – «управление и информатика в технических системах». С середины 90-х годов XX-го века дисциплина ПТИ вошла также в структуру учебного плана по разделу специальных дисциплин

образовательного стандарта направления 651900 (ныне 220201) – «Автоматизация и управление» подготовки бакалавров и магистров.

Таким образом, предлагаемое учебное пособие подготовлено на основе опыта преподавания дисциплин МОК, ТОК и «Прикладная теория информации (ПТИ)», накопленного на кафедре Систем управления и информатики (до 2001-го года кафедре автоматике и телемеханики) Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

До 2002 – го года дисциплина «Прикладная теория информации» составляла с дисциплиной «Телемеханика» единый методологический и проблемный образовательный модуль, на который возлагалась подготовка выпускников кафедры по вопросам дистанционного управления техническими объектами и технологическими ресурсами на основе использования возможностей агрегативных средств систем телемеханики (АССТ), представлявших собой телемеханическую технику четвертого поколения.

С 2002 – го года в учебных планах подготовки специалистов по специальности 220201 и подготовки бакалавров и магистров направления 220200 дисциплина «Телемеханика» заменена на дисциплину «Информационные сети и телекоммуникации (в задачах дистанционного управления техническими объектами)». Учитывая стековую структуру протоколов построения современных сетевых технологий, на дисциплину «Прикладная теория информации» в основном возлагаются задачи погружения студентов в проблематику сетевых технологий, представленную физическим и канальным уровнями стеков протоколов.

При подготовке учебного пособия использованы материалы ранее опубликованных научных и учебно-методических публикаций, содержательно коррелирующих с проблематикой дисциплины «Прикладная теория информации»: Никифорова Л. Т., Рогинский И. Ю., Ушаков А. В. Алгебраический синтез дискретных систем. Учебное пособие. Л.:ЛИТМО, 1978.; Болтунов И.П., Никифорова Л. Т., Ушаков А. В. Расчет систем телемеханики. Учебное пособие. Л.:ЛИТМО, 1978.; Никифорова Л. Т., Болтунов Г.И., Ушаков А. В. Расчет телемеханических узлов и систем с применением ЭВМ. Учебное пособие. Л.:ЛИТМО, 1980.; Никифорова Л.Т., Ушаков А.В., Хабалов В.В. Теоретические основы кибернетики. Учебное пособие. Л.: ЛИТМО, 1984; Кирюшин А. А., Рассветалова Л. А., Ушаков А. В. Модальное управление в задаче синтеза двоичных динамических систем в логике линейных триггеров //Автоматика и телемеханика, 1993, №8.; Рассветалова Л. А., Ушаков А. В. Двоичное динамическое наблюдение в задаче помехоустойчивого кодирования //Автоматика и

телемеханика, 1993, №6.; Матричные уравнения в исследовании дискретных процессов над бесконечными и конечными полями / Т.А. Акунов, С. Алишеров, Р.О. Оморов, А.В. Ушаков / Под ред. А.В. Ушакова. – Бишкек: Илим, 1993.; Ушаков А. В. Синтез циклических кодирующих и декодирующих устройств в логике произвольных триггеров //Автоматика и телемеханика, 1997, №11.; Алгебраические методы в теории устройств дискретной автоматики и телемеханики: Труды лаборатории телемеханики СПбГИТМО(ТУ). / Под ред. А.В.Ушакова. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2001; Мельников А.А., Ушаков А.В. Двоичные динамические системы дискретной автоматики / Под ред. А.В. Ушакова. СПб: СПбГУ ИТМО, теории систем: элементы теории и практикум./ Под ред. Ушакова А.В. – СПб: СПбГУИТМО, 2007.; Боженкова Н.Ю., Осипцева О.С., Ушаков А.В. Фактор канальной среды в задаче синтеза цифрового дистанционного управления непрерывным объектом // Изв.вузов. Приборостроение.2008.Т.51,№3; Дударенко Н.А., Нуйя – Осипцева О.С., Ушаков А.В., Филиппов М.И. Проблемы организации управления объектом типа «многомерный вход – многомерный выход» с помощью скалярного двоичного канала связи // Изв.вузов. Приборостроение.2009.Т.52,№11; Ушаков А.В., Яицкая Е.С. Двоичное наблюдение и задача помехозащитного декодирования систематических кодов // Изв.вузов. Приборостроение.2009.Т.52,№11; Ушаков А.В., Яицкая Е.С. Рекуррентное систематическое помехозащитное преобразование кодов: возможности аппарата линейных двоичных динамических систем //Изв. Вузов. Приборостроение. 2011.т.54.№3.

В написании разделов 5, 6 и 7 приняла участие аспирант кафедры систем управления и информатики СПбНИУ ИТМО Яицкая Елена Сергеевна.

Особую благодарность автор хотел бы выразить рецензентам доктору технических наук, профессору Дроздову Валентину Нилевичу и доктору технических наук, профессору Шальто Анатолию Абрамовичу, чьи указания и советы заметно улучшили качество учебного пособия.

Конструктивную критику по существу содержания учебного пособия следует направлять автору по: почтовому адресу 195267 до востребования, телефонам 5954128, 2900744 и электронной почте ushakov-AVG@yandex.ru.

Используемые обозначения и сокращения

S, X - множество элементов произвольной природы;

$G, G_0, F, GF(p), GF(p^n)$ - алгебраические структуры соответственно группа, подгруппа, поле, простое поле Галуа с характеристикой (модулем) p , расширенное поле Галуа;

$\{X, d\}, X_d$ - метрическое пространство с метрикой $d = d(x, y)$;

A, A - соответственно линейный оператор (ЛО) и матрица ЛО;

X^n - n -мерное линейное пространство над полем F ;

R^n - линейное вещественное пространство;

\square - единичная матрица;

\square - нулевой скаляр, вектор, матрица;

A, A^i, A_j - матрица, i -я строка, j -й столбец матрицы A ;

столбце;

A^T - матрица, транспонированная к матрице A ; A^* - матрица, сопряженная к матрице A ;

A^{-1} - матрица, обратная к матрице A ; A^+ - матрица, псевдообратная к матрице A ;

$diag\{\lambda_i, i = \overline{1, n}\}$ - диагональная матрица с элементами λ_i на диагонали;

$row\{\alpha_i, i = \overline{1, n}\}$ - строчная матричная структура с элементами α_i в строке;

$col\{\alpha_i, i = \overline{1, n}\}$ - столбцовая матричная структура с элементами α_i в столбце;

$\|o\|$ - норма элемента (o) ; $\|o\|_p$ - норма элемента (o) с весом P ;

$ang\{x, y\}$ - угол между векторами x и y ;

Δ
= - равенство по определению;

\forall - для всех;

\exists - существует;

\in - принадлежит;

\notin - не принадлежит;

\max_i - максимум на множестве элементов с индексом i ;

\cup, \cap - символы объединения и пересечения множеств;
 $\gamma = \arg\{\beta(\gamma)\}$ - значение γ , удовлетворяющее условию $\beta(\gamma)$;
 $\det(o), tr(o), rank(o)\{rang(o)\}$ - соответственно определитель, след, ранг матрицы (o) ;
 $dim(o)$ - размерность элемента (o) ;
 $deg(o)$ - степень полинома (o) ;
 $Im(o)$ - образ (o) ЛО; $Ker(o)$ - ядро (o) ЛО;
 \otimes - символ кронекеровского произведения;
 $contr\{(A, B)\}$ - предикат наличия свойства управляемости пары матриц (A, B) ;
 $observ\{(A, C)\}$ - предикат наличия свойства наблюдаемости пары матриц (A, C) ;
 \vee - логическое "или";
 $\&$ - логическое "и";
 $(o): \eta$; $(o) | \eta$ - предикат наличия характеристического свойства η у элемента (o) ;
 $rest(rem)\{*/_o\}$ - остаток от деления $*/_o$;

АА	–	абстрактный автомат
БП	–	блок памяти
БФ	–	булева функция
ВА	–	время «аппаратурное»
ВВ	–	модель «вход-выход»
ВК	–	время «канальное»
ВМП	–	векторно-матричное представление
ВНН	–	вектор невязки наблюдения
ВПС	–	векторный показатель сложности
ВС	–	модель «вход-состояние»
ВСВ	–	векторно-матричное линейное описание «вход-состояние-выход»
ГДДС	–	гибридная двоичная динамическая система
ГСА	–	граф-схема алгоритма
ДА	–	дискретная автоматика
ДДС	–	двоичная динамическая система
ДКП	–	двоичная кодовая последовательность
ДКС	-	двоичный канал связи

ДКУ	–	декодирующее устройство
ДНУ	–	двоичное наблюдающее устройство
ДПВ	–	диаграмма переходов и выхода
ДСНФ	–	дизъюнктивная совершенная нормальная форма
ДУПК	–	дивидендное устройство помехозащитного кодопреобразования
ИВП	–	источник входной последовательности
ИДИ	-	источник дискретной информации
ИМ	-	информационный массив
ИЧК	–	информационная часть кода
КА	–	конечный автомат
КИ	-	квант информации
КПР	–	кодое пространство
КС	–	канал связи
КУ	–	кодирующее устройство
ЛДДС	–	линейная двоичная динамическая система
ЛУ	–	линейное устройство
ММ	–	модулярный многочлен
МС	–	модельная среда
НДДС	–	нелинейная двоичная динамическая система
ОПВ	–	оценка приведенной востребованности
ОСВ	–	оценка степени востребованности
ПЗК	–	помехозащищенный код
ПЗКА	–	помехозащищенный конечный автомат
ПНЗК	–	помехонезащищенный код
ПТИ	-	прикладная теория информации
РПКС	–	Регистр помехи в канале связи
СД	–	«синдромный» дешифратор
СДФБ	–	селлерсовское дифференцирование булевых функций
СО	-	синдром ошибки
ТИ	-	теория информации
Т	-	триггер (примитивный автомат памяти первого порядка)
УДА	–	устройство дискретной автоматики
УДММ	–	устройство деления модулярных многочленов
УК	–	устройство коммутации
УКК	–	устройство коррекции кода
УПЗК	–	укороченный помехозащищенный код
УС	–	уравнение Сильвестра
УУММ	-	устройство умножения модулярных многочленов
УФКС	-	Устройство формирования кода сообщения
УФСК	–	устройство формирования сигнала коррекции
ХММ	–	характеристический модулярный многочлен

ХП	–	характеристический полином
ЦДУ	–	циклическое декодирующее устройство
ЦКУ	–	циклическое кодирующее устройство
ЦПЗК	–	циклический помехозащищенный код
ЧПС	–	частная производная Селлера
ЭЗ	–	элемент задержки
ЭП	–	элемент памяти

■ – знак завершения доказательства утверждения, решения примера, завершения алгоритма;

□ – знак завершения высказывания (утверждения, определения, примечания, следствия, свойства, постулата, гипотезы);

$D\{(\bullet)(k)\}$ – прямое D – преобразование кодовой последовательности (\bullet) над простым полем Галуа;

$E\{(\bullet)\}$ – оператор округления величины (\bullet) до ближайшего большего целого;

$F(d) = D\{f(k)\}$ – D – образ последовательности $f(k)$;

$f(k) = D^{-1}\{f(d)\}$ – оригинал D –образа последовательности $f(k)$;

$GF(p) = \{0, 1, 2, \dots, p-1\}$, $p \in N$ – простое поле Галуа;

$GF(p^n)$, $p, n \in N$ – расширенное поле Галуа;

k – дискретное время ($k = 0, 1, 2, \dots$), выраженное в числе тактов длительностью Δt процессов передачи и преобразования кодов;

$row\{\alpha_i, i = \overline{1, n}\}$ – строчная матричная структура с элементами α_i в строке;

$u(k)$ – входная кодовая последовательность ДДС;

$x(k)$ – вектор исходного состояния ДДС;

$x(k+1)$ – вектор состояния перехода ДДС;

$y(k)$ – выходная кодовая последовательность ДДС;

& – союз «И» предикатов;

∨ – союз «ИЛИ» предикатов.

ВВЕДЕНИЕ. ПРИКЛАДНАЯ ИНФОРМАТИКА В ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМАТИКЕ УПРАВЛЕНИЯ

Основные проблемы управления рассмотрим на примере сложной системы, структурное представление которой приведено на рисунке В.1.

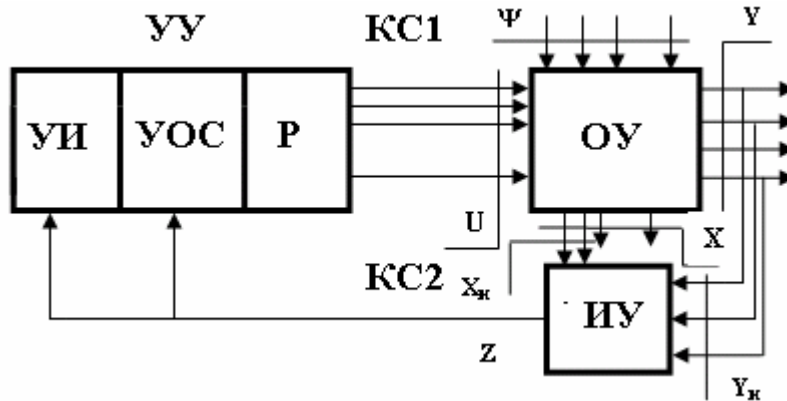


Рисунок В.1. Структурная схема сложной системы управления

На рисунке В.1: ОУ – *объект управления*, представляющий собой некоторый физический объект (технологический процесс), на котором размещены *регулирующие органы* (РО), управляемые сформированными по некоторому закону сигналами управления; ИУ – измерительное устройство, преобразующее доступные непосредственному измерению компоненты вектора состояния и вектора выхода в электрический сигнал, согласованный с предоставленным каналом связи (КС); УИ – устройство *идентификации* объекта управления; УОС – устройство *оценивания состояния* объекта управления; Р – регулятор, представляющий собой техническую среду, средствами которой создается сигнал управления U , сформированный в соответствии с требуемым *закон управления* (ЗУ) регулирующими органами ОУ; УУ – *устройство управления*, представляющее собой функциональное объединение устройства идентификации объекта, устройства оценивания его состояния и регулятора; КС1, КС2 – соответственно *прямой* (управляющий) и *обратный* (информационный, известительный) каналы связи.

Таким образом, сложная система представляет собой функциональное объединение *объекта управления, устройства управления и канальной среды*, образованной прямым и обратным каналами связи.

В современной теории управления объект управления задается с помощью макровектора

$$OU = \{U, \Psi, X, Y, T, \Omega_U, \Omega_X, \lambda, \delta, \lambda_\Psi, \delta_\Psi, F\} \quad (B.1)$$

В макровекторе (В.1): $U = [U_1, U_2, \dots, U_r]^T = \text{col}\{U_j, j = \overline{1, r}\}$ – r -мерный вектор управления объектом; $\Psi = [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_v]^T = \text{col}\{\Psi_l, l = \overline{1, v}\}$ – v -мерный вектор внешних возмущающих воздействий, осуществляющих нежелательное управление объектом; $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T = \text{col}\{x_i, i = \overline{1, n}\}$ – n -мерный вектор состояния, содержательно выполняющий функцию памяти объекта; $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T = \text{col}\{y_k, k = \overline{1, m}\}$ – m -мерный вектор выхода, содержательно представляющий собой выходную пользовательскую продукцию объекта управления как некоторого технологического процесса; T – временной интервал управления объектом, представляющий собой сплошное множество (континуум) моментов управления в случае, если ОУ имеет непрерывную природу, и счетное множество моментов управления в случае, если объект имеет дискретную природу; Ω_U – множество (область в r -мерном пространстве) допустимых управлений; Ω_X – множество (область в n -мерном пространстве состояния) допустимых траекторий; $\lambda: X \times U \Rightarrow X$ – n -мерная векторная функция перехода, описывающая процесс перехода из некоторого исходного состояния в состояние перехода под действием сформированного управления; $\delta: X \times U \Rightarrow Y$ – m -мерная векторная функция выхода, описывающая процесс формирования выхода объекта при переходе из некоторого исходного состояния в состояние перехода под действием сформированного управления; $\lambda_\Psi: X \times U \times \Psi \Rightarrow \Delta X$ – n -мерная векторная функция, описывающая процесс формирования дополнительного движения ΔX по состоянию под действием внешнего возмущающего воздействия Ψ при переходе из некоторого исходного состояния в состояние перехода под действием сформированного управления; $\delta_\Psi: X \times U \times \Psi \Rightarrow \Delta Y$ – m -мерная векторная функция, описывающая процесс формирования дополнительного движения ΔY по выходу под действием внешнего возмущающего воздействия Ψ при переходе из некоторого исходного состояния в состояние перехода под действием сформированного управления; F – числовое поле, которому принадлежат элементы векторов U, Ψ, X, Y , а также системные параметры векторных функций $\lambda, \delta, \lambda_\Psi, \delta_\Psi$.

В учебной и научной литературе по теории систем управления в основном используется редуцированная версия системного макровектора (В.1), которая имеет представление

$$OU = \{U, X, Y, T, \lambda, \delta\}. \quad (\text{В.2})$$

Компоненты редуцированной версии макровектора (В.2) имеют тот же, что и в (В.1) смысл. Форма (В.2) представления математических

моделей объектов управления непрерывной и дискретной природы в учебном пособии будет основной.

Прежде, чем формулировать проблемы управления, необходимо отметить следующее. Любая техническая антропогенная система, то есть система, созданная умом и руками человека, имеет четыре фазы своего существования. Первой фазой является *фаза разработки*, включающая в себя построение математической модели объекта управления и среды его функционирования, аналитический синтез закона управления, построение алгоритмического обеспечения процедур оценки параметров модели объекта и его состояния, моделирование системы с использованием возможностей современных программных оболочек, разработка технической реализации (программной – SOFT и схмотехнической – HARD) всех компонентов процесса управления, разработка конструкции устройства управления и технологического сопровождения его изготовления и испытания макетного образца устройства управления с использованием стендовых испытательных средств. Второй фазой существования технической системы является *фаза изготовления(производства)*, третьей – *фаза эксплуатации*, четвертой – *фаза утилизации*.

Проблемы управления в своей алгоритмической основе решаются в фазе разработки, а реализуются в фазе эксплуатации. Это значит, что математическая постановка задачи (цели) управления должна быть корректно сформулирована, математические модели объекта управления и среды его функционирования должны быть адекватны реальным физическим процессам в них, параметры математических моделей объекта и окружающей среды должны быть оценены с допустимой погрешностью, оценка вектора состояния должна сходиться к вектору состояния, сформированный закон управления должен доставлять процессу управления объектом требуемые динамические качества с одновременным обеспечением стабильности потребительских свойств в условиях возможной параметрической неопределенности, при этом канальная среда в прямом канале должна передавать достоверно сигналы управления к регулирующим органам объекта, а в обратном канале – достоверно передавать информацию о доступных непосредственному измерению компонентах вектора состояния и выхода в устройство управления. Все алгоритмы, задействованные в процессе управления должны быть вычислительно устойчивыми, матричные компоненты используемых математических модельных представлений должны быть хорошо обусловлены.

Приведенная на рисунке В.1 структурная схема сложной системы, представляющей собой функциональное объединение объекта

управления, устройства управления и канальной среды, а также сделанный к ней комментарий позволяют сформулировать основные *проблемы управления*.

Первой проблемой является проблема составления математической модели ОУ в форме (В.1) или (В.2), причем ключевыми моментами здесь оказываются назначение *разумной* размерности вектора состояния, а также аналитические представления правил λ и δ . Первая проблема в основном решается *экспертным* образом, который опирается на библиографические источники, физические закономерности, опыт специалистов и собственный опыт разработчика.

Второй проблемой является решение задачи идентификации объекта управления, которая сводится при сконструированных аналитических представлениях правил λ и δ к разработке и реализации алгоритма ζ формирования оценок \hat{p}_λ и \hat{p}_δ параметров p_λ и p_δ этих правил на основе результатов измерения доступных непосредственному измерению компонентов x_u и y_u векторов x состояния и y выхода ОУ, причем алгоритм должен гарантировать сходимость оценок параметров в форме

$$\zeta: \{x_u, y_u\} \Rightarrow (\hat{p}_\lambda, \hat{p}_\delta): \lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{p}_\lambda, \hat{p}_\delta) = (p_\lambda, p_\delta) \quad (\text{В.3})$$

Третьей проблемой является решение задачи оценки состояния объекта, которая сводится к разработке и реализации алгоритма ξ формирования оценки \hat{x} вектора состояния x на основе результатов измерения доступных непосредственному измерению компонентов x_u и y_u векторов x состояния и y выхода ОУ, причем алгоритм должен гарантировать сходимость оценки вектора состояния в форме

$$\xi: \{x_u, y_u\} \Rightarrow \hat{x}: \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{x}(t) = x(t) \quad (\text{В.4})$$

Четвертой проблемой является решение задачи формирования закона управления, которое является многофазным.

Первая фаза решения состоит в формализации *задачи (цели) управления*. При всем многообразии содержательных постановок задач (целей) управления в формализованном представлении они могут быть сведены к двум версиям. Первая версия, именуемая *задачей перевода (регулирования)*, формулируется следующим образом: *перевести объект управления, находящийся в начальный момент времени $t=t_0$ в состоянии $x(t_0)$, к моменту времени $t=t_k$ в требуемое состояние $x(t_k)$ за минимально возможный на множестве доступных управлений Ω_U промежуток времени $\Delta T = t_k - t_0$, формализованное представление задачи перевода (регулирования) имеет вид*

$$x(t=t_0) \Rightarrow x(t=t_k): \Delta T = (t_k - t_0) = \min_{U \in \Omega} \quad (\text{В.5})$$

Вторая версия задачи (цели) управления, именуемая *задачей удержания (слежения)*, формулируется следующим образом: *удерживать состояние объекта управления $x(t)$ на программной траектории $x_{np}(t)$ с минимальной на множестве доступных управлений Ω_U нормой вектора ошибки этого удержания, формализованное представление задачи удержания (слежения) принимает вид*

$$\|x_{np}(t) - x(t)\| = \min_{U \in \Omega_U} \quad (B.6)$$

Вторая фаза решения задачи формирования закона управления состоит в формировании *показателя (критерия) качества* протекания управляемого процесса, сформулированного в одной из *постановочной версий*. Показатель качества $J = J(x, u)$ задаётся так, чтобы траекториям управляемого процесса *лучшего качества* соответствовало экстремальное на множествах допустимых управлений Ω_U и допустимых траекторий Ω_X значение $\text{extrem}_{U \in \Omega_U, X \in \Omega_X} \{J = J(x, u)\}$ этого показателя.

Последняя (финальная) фаза формирования закона управления состоит в формировании сигнала управления как *функции текущего состояния объекта управления*, а в случае непосредственной неизмеримости вектора состояния его оценки, а также оценки параметров правил λ и δ его модели так, что закон управления принимает аналитическое представление

$$U = U\{\hat{x}, \hat{p}_\lambda, \hat{p}_\delta\}: \left\{ \begin{array}{l} x(t_0) \Rightarrow x(t_k): \Delta T = (t_k - t_0) = \min; \vee \\ U \in \Omega_U \\ \|x_{np}(t) - x(t)\| = \min; \& J = \text{extrem}_{U \in \Omega_U, X \in \Omega_X} \{J(x, u)\} \end{array} \right\} \quad (B.7)$$

Пятой проблемой является проблема канализация информации по прямому каналу связи (КС1) от устройства управления к объекту и по обратному каналу связи (КС2) – от объекта управления к устройству управления. Содержательно проблема канализации информации, как в прямом, так и в обратном каналах сводятся к решению двух задач. *Первая задача* связана с требованием эффективного использования предоставленного канала связи. В вербальной форме задача может быть сформулирована следующим образом: *передачу информации по предоставленному каналу связи следует вести так, чтобы объем сигнала (V_c) не превышал емкости (V_k) канала связи, максимально приближаясь к выполнению равенства $V_c = V_k$, где*

$$V_c = T_c F_c \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_n}\right); \quad V_k = T_k F_k \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_n}\right). \quad (B.8)$$

В формуле (В.8): T_c – временная длительность сигнала, F_c – эффективный спектр сигнала, P_c – мощность сигнала, P_n – мощность помехи, сопровождающей процесс формирования сигнала; T_k – длительность интервала времени, на который предоставлен канал связи, F_k – эффективная полоса пропускания канала связи, P_c – мощность сигнала, фиксируемая в канальной среде, P_n – мощность помехи в канальной среде.

Вторая задача канализации информации связана с удовлетворением требованиям обеспечения достоверности принимаемой информации (*информационной надежности каналовобразующих средств*). В вербальной форме задача может быть сформулирована следующим образом: *передачу информации по предоставленному каналу связи в условиях помех следует организовать так, чтобы за счет введения в структуру передаваемых кодов, несущих необходимую получателю информацию, избыточных разрядов, на приемной стороне существовала возможность восстановления искаженного при передаче кода в такой степени, чтобы вероятность $P_{ош}$ исполнения искаженной (ошибочной, ложной) команды не превышала бы вероятности $P_{дон}$ допустимой для данной категории проектируемой системы дистанционного управления*. В формальной постановке задача обеспечения информационной надежности канальными средствами сводится к обеспечению неравенства

$$P_{ош} = \sum_{i=s+1}^n C_n^i p^i (1-p)^{n-i} \leq P_{дон}, \quad (В.9)$$

где n – число разрядов помехозащищенного кода, p – вероятность искажения элементарного сигнала (бита) двоичного кода, s – число исправляемых ошибок средствами помехозащитного декодирования при приеме информации, i – число возможных ошибок, C_n^i – число сочетаний из n по i .

Перечисленные проблемы управления относятся к разряду «вечных», содержательно они инвариантны относительно технологической среды, в которой пребывает конкретное гуманитарное сообщество.

Первая из перечисленных выше проблем является предметной областью дисциплины «Математические основы теории систем» (МОТС). На математическое сопровождение решения перечисленных выше базовых задач управления в их модельном представлении направлено основное содержание дисциплины МОТС. Освоение основных положений *математических основ теории систем* сопровождается богатым практикумом по базовым проблемам курса,

что гарантирует успешное овладение современным инструментарием исследования системной проблематики.

Вторая, третья и четвертая проблемы являются предметной областью «куста» дисциплин, объединенных названием «Современная теория управления».

Пятая из перечисленных проблем является предметной областью дисциплины «Прикладная теория информации» (ПТИ).

Читатель приглашается к внимательному прочтению теоретического материала учебного пособия по курсу ПТИ, решению задач и примеров по разделам дисциплины «Прикладная теория информации» и критическому осмыслению полученных знаний. Памятуя о том, что в силу структуры рисунок В.1, современная система является функциональным объединением объекта управления, устройства управления и канальной среды, последняя естественным образом входит в состав системы, во многом определяя ее пользовательские показатели.

Следует помнить, что система управления, спроектированная без учета фактора канальной среды в ее составе, это система далекая от оптимальной.

0. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Определение 01(О.01). *Информацией* называется совокупность сведений о свойствах объекта, процесса, события или явления, разложенная по базисным компонентам субъекта, определяемых его профессиональными и личными интересами, образовательной подготовкой и природной любознательностью. □

Таким образом, бинарные отношения объекта и субъекта порождают коммуникационный информационный процесс, в котором объект выполняет роль источника информации (ИИ), а субъект – получателя (приемника) информации (ПИ). Следует заметить, что источник информации может функционировать в двух режимах. Первый режим функционирования ИИ пассивный, в котором ПИ вынужден из ИИ информацию извлекать. Второй режим - активный, в котором ИИ выводит информацию без явного принуждения. Последний режим является основным в прикладной теории информации.

В задачах управления и информатики технических систем понятие информации сужается и принимает следующий вид.

Определение 02(О.02). *Информацией* называется совокупность сведений о свойствах технического объекта (ТО) или технологического процесса (ТП), необходимых для организации и осуществления процесса управления ими с заданными показателями качества. □

В связи с введенным определением разделяют два типа информации в задачах управления и информатики технических систем: априорная (начальная) и текущая (рабочая) информация.

Определение 03(О.03). *Априорной информацией* называется совокупность сведений о свойствах технического объекта или технологического процесса, необходимых для организации процесса управления ими средствами встраиваемой в ТО или ТП устройства управления (УУ), имеющихся в распоряжении разработчиков УУ до начала его разработки. □

Носителями априорной информации являются документы: техническое задание (ТЗ) на разработку устройства управления; характеристика среды его функционирования; технические характеристики компонентов, на которых планируется строить УУ, и т.д.

Определение 04(О.04). *Текущей информацией* называется совокупность сведений о свойствах процесса управления техническим объектом или технологическим процессом, необходимых для его поддержания с заданными показателями качества средствами встроеного в ТО или ТП устройства управления, имеющихся в

распоряжении *осуществляющего эксплуатацию УУ персонала* в режиме рабочего функционирования. □

По прямому каналу связи (ПКС) *текущая информация* передается в форме: *команд, управляющих воздействий, запросов на контроль состояния* технического объекта. По обратному каналу связи (ОКС) *текущая информация* передается в форме: *извещений* о состоянии технического объекта, формируемых в *текущем* режиме или по *запросу*.

Текущую информацию без учета специфики передачи ее по ПКС или ОКС, а также ее функционального содержания, в современной прикладной теории информации (ПТИ) принято называть *сообщением*.

Носителями сообщений (текущей информации) являются *сигналы*.

Определение 05(О.05). *Сигналом* называется *транспортабельная модель сообщения*, согласованная с предоставленным каналом связи. □

Определение 06(О.06). *Каналом связи* называется набор технических средств, размещенных в предоставленной физической среде, функциональное взаимодействие которых позволяет передавать *сигнал*, сформированный на его входе. □

Следует различать понятия *канал связи* и *линия связи*. Понятие «*канал связи*» определено, дадим определения понятию «*линия связи*».

Определение 07(О.07). *Линией связи* называется физическая среда, в которой может быть размещен (организован) канал связи. □

Линии связи (ЛС) *различаются* по виду *физической среды*, используемой для передачи сигналов, и по *структуре (топологии)* размещения в пространстве.

В соответствии с используемой физической средой для передачи сигналов можно выделить следующие *виды линий связи*:

- механические,
- гидравлические,
- пневматические,
- акустические,
- электрические (воздушные и кабельные),
- радиотехнические (длинноволнового, средневолнового, коротковолнового, ультракоротковолнового (УКВ) и т.д. диапазонов),
- оптические (использующие открытое пространство и волоконно-оптические кабели).

По *структуре (топологии)* размещения в пространстве ЛС делятся на:

- радиальные,
- каскадные,
- магистральные,
- комбинированные (древовидные).

Каналы связи (ЛС) *различаются* по следующим критериям:

- размерность передаваемого сигнала,
- организация канала связи,
- вид передаваемого сигнала,
- организация обмена сигналами,
- математической модели искажений сигнала в канале связи.

Определение 08(O.08). Канал связи называется *векторным или параллельным*, если по нему передается *векторный* сигнал. □

Определение 09(O.09). Канал связи называется *скалярным или последовательным*, если по нему передается *скалярный* сигнал. □

Определение 010(O.010). Канал связи называется *временным* длительности T , если для его организации на оси времени выделен интервал $T = \{t : t_0 \leq t \leq t_k : t_k - t_0 = T\}$. □

Определение 011(O.011). Канал связи называется *частотным* с полосой частот ΔF , если для его организации на оси частот выделен интервал $\Delta F = \{f : f_0 \leq f \leq f_k : f_k - f_0 = \Delta F\}$. □

Определение 012(O.012). Канал связи называется *первичным непрерывным*, если по нему передаются непрерывные сигналы *без трансформации* его амплитудного частотного спектра вдоль оси частот. □

Определение 013(O.013). Канал связи называется *вторичным непрерывным*, если по нему передаются непрерывные сигналы с *трансформацией* его амплитудного частотного спектра вдоль оси частот, осуществляемой одним из видов гармонической модуляции *первичного сигнала*. □

Определение 014(O.014). Канал связи называется *первичным дискретным*, если по нему передаются *дискретные сигналы*, представляющие собой дискретные *по времени* выборки из непрерывных сигналов, осуществляемые в дискретные моменты времени $t = k(\Delta t)$ с интервалом дискретности Δt так, что в каждый дискретный момент времени сигнал выборки принадлежит простому полю Галуа $GF(p) = \{0, 1, 2, \dots, (p-1)\}$, *без трансформации* амплитудных частотных спектров вдоль оси частот. □

Определение 015(O.015). Канал связи называется *первичным двоичным* (или просто *двоичным*), если в определении **O.014** дискретного канала характеристика (модуль) p простого поля Галуа принимает значение $p = 2$.

Определение 016(O.016). Канал связи называется *вторичным дискретным*, если по нему передаются *дискретные сигналы*, представляющие собой дискретные *по времени* выборки из непрерывных сигналов, осуществляемые в дискретные моменты

времени $t = k(\Delta t)$ с интервалом дискретности Δt так, что в каждый дискретный момент времени сигнал выборки принадлежит простому полю Галуа $GF(p) = \{0, 1, 2, \dots, (p-1)\}$, с трансформацией амплитудных частотных спектров вдоль оси частот, осуществляемой одним из видов гармонической модуляции. □

Определение 017(О.017). Канал связи называется *симплексным*, если в нем возможна только односторонняя передача сигналов в направлении от ИИ к ПИ. □

Определение 018(О.018). Канал связи называется *дуплексным*, если в нем возможна *одновременно* двусторонняя передача сигналов в направлении от ИИ к ПИ и наоборот. □

Определение 019(О.019). Канал связи называется *полудуплексным*, если в нем возможна двусторонняя передача сигналов в направлении от ИИ к ПИ и наоборот, организованная сеансовым способом, для чего для них выделяются примыкающие друг к другу *временные КС*. □

Искажения сигналов в канале связи происходит под воздействием аддитивных помех. Если ограничиться рассмотрением искажений в *двоичном* канале связи, то основными помехами в нем являются:

- флуктуационные помехи,
- импульсные помехи.

Определение 020(О.020). *Флуктуационной* помехой называется «паразитный» непрерывный сигнал стохастического типа, длительность действия которого соизмерима с длительностью передаваемых по двоичному КС кодовых комбинаций (КК). □

Флуктуационная помеха искажает передаваемую двоичную кодовую комбинацию в целом, основным способом коррекции искажений КК является использование метода *оптимального приема*.

Определение 021(О.021). *Импульсной* помехой называется «паразитный» дискретный сигнал, длительность действия которого соизмерима с длительностью одного элементарного двоичного сигнала (бита) передаваемых по двоичному КС кодовых комбинаций (КК), под действием которого бит, на который накладывается импульсная помеха, принимает инверсное значение. □

Основным способом коррекции искажений КК, вызванных импульсными помехами, является использование методов *помехозащитного кодирования и декодирования* КК путем введения в состав кодовых комбинаций избыточных проверочных разрядов.

Определение 022(О.022). Двоичный канал связи называется *симметричным*, если вероятность p_{01} трансформации символа «0» в символ «1» и вероятность p_{10} трансформации символа «1» в символ

«0» при передаче по двоичному КС равны, что записывается в форме $p_{01} = p_{10} = p$, при этом p именуется вероятностью трансформации бита (элементарного сигнала) двоичного кода.

Определение 023(О.023). Двоичной канал связи называется *несимметричным*, если вероятность p_{01} трансформации символа «0» в символ «1» и вероятность p_{10} трансформации символа «1» в символ «0» при передаче по двоичному КС не равны так, что выполняется неравенство $p_{01} \neq p_{10}$.

Определение 024(О.024). Двоичной канал связи называется *симметризованным*, если при вероятности p_{01} трансформации символа «0» в символ «1» и вероятности p_{10} трансформации символа «1» в символ «0» при передаче по двоичному КС не равных друг другу так, что выполняется неравенство $p_{01} \neq p_{10}$, за вероятность p , именуемой вероятностью трансформации бита (элементарного сигнала) двоичного кода, принимается величина, вычисляемая в силу соотношения $p = \max\{p_{01}, p_{10}\}$. □

Определение 025(О.025). Двоичной канал связи, в котором используется на сигнальном уровне распознавание символа $x=0$ с помощью фиксации выполнения неравенства $U(x) \leq U_0$ и распознавание символа $x=1$ с помощью фиксации выполнения неравенства $U(x) \geq U_1$, где $U_0 < U_1$, называется *двоичным каналом со стиранием*, если при приеме сигнала $U(x)$, удовлетворяющего цепочке неравенств $U_0 < U(x) < U_1$, относительно символа x не принимается никакого решения, при этом символ x считается стертым при передаче по двоичному КС. □

Интервал $[U_0, U_1]$ называется *зоной стирания*, которой на символьном уровне приписывается символ q (*стертый символ*). В двоичном канале связи *со стиранием* при передаче кодовых двоичных посылок возможны исходы $\{(0,0), (0,q), (0,1)\}$ с вероятностями исходов $\{p_{00}, p_{0q}, p_{01}\}$ и $\{(1,0), (1,q), (1,1)\}$ с вероятностями исходов $\{p_{10}, p_{1q}, p_{11}\}$, которые характеризуются выполнением условий $p_{00} + p_{0q} + p_{01} = 1$ и $p_{10} + p_{1q} + p_{11} = 1$.

Определение 026(О.026). Двоичный канал именуется *каналом хранения*, если технически он организован с помощью средств записи и запоминания (размещения) двоичной информации, при этом процессы хранения информации в нем не *параметризованы временем*, то есть являются *статическими*. □

Определение 027(О.027). Двоичный канал именуется *каналом передачи*, если информационные процессы в технической среде его

образующей *параметризованы временем*, то есть являются *динамическими*. □

Определение 028(O.028). *Кодом* называется одномерный массив, организованный в виде вектора – строки или вектора - столбца, элементами которого могут быть объекты любой природы. □

Определение 029(O.029). *Код* называется *последовательным*, если он организован в виде вектора – строки. □

Определение 030(O.030). *Код* называется *параллельным*, если он организован в виде вектора – столбца. □

Определение 031(O.031). Если объектами, образующими *код*, являются элементы лингвистических алфавитов, то такой код именуется *словом*. □

Определение 032(O.032). Если объектами, образующими *код*, являются понятия, то такой код именуется *кодовым макровектором*. □

Определение 033(O.033). Если объектами, образующими *код*, являются элементы простого поля Галуа $GF(p) = \{0, 1, 2, \dots, p-1\}$, то такой код именуется *числовым*. □

Следует заметить, что с понятием *код* связывается не только одномерный массив, организованный в виде вектора – строки или вектора - столбца, но и *правило* формирования его элементов. В этой связи параллельно понятию код используются понятия: кодовая комбинация, кодовая посылка, кодовая последовательность, под которыми понимаются конкретные реализации кодов как одномерных массивов. В этой связи под кодом понимается также множество кодовых комбинаций, образованных по некоторому единому правилу.

Определение 034(O.034). *Код* называется *равномерным*, если множество кодовых комбинаций его образующих имеют одинаковое число элементов, именуемое его *размерностью*. □

Определение 035(O.035). *Код* называется *неравномерным*, если множество кодовых комбинаций его образующих имеют различное число элементов. □

Определение 036(O.036). Числовой код, образующими объектами которого являются элементы простого поля Галуа с характеристикой (модулем) $p = 2$ $GF(p)_{p=2} = \{0, 1\}$, называется *двоичным кодом*. □

Определение 037(O.037). *Кодированием* называется процесс присвоения элементам q_j исходного информационного массива Q их кодов $K\{q_j\} = \text{row}\{x_i; 1 \leq i \leq n\}$ с элементами $x_i \in GF(p)$, осуществляемого по правилам построения используемого кода. □

Определение 038(О.038). *Декодированием* называется процесс восстановления элементов q_j исходного информационного массива Q по их кодам $K\{q_j\} = \text{row}\{x_i; 1 \leq i \leq n\}$. □

Определение 039(О.039). *Скремблированием* называется процесс, осуществляемый на передающей стороне, преобразования передаваемой кодовой посылки для сокращения длительности пачек нулевых и единичных символов путем суммирования по модулю два передаваемой посылки со псевдослучайной двоичной кодовой последовательностью для целей максимизации числа передних фронтов переходов от нуля к единице, что повышает синхронизирующие работу генераторов передающей и приемной сторон свойства кода. □

Определение 040(О.040). *Дескремблированием* называется процесс, осуществляемый на приемной стороне, преобразования принятой скремблированной кодовой посылки для восстановления передаваемой путем суммирования по модулю два скремблированной посылки со псевдослучайной двоичной кодовой последовательностью. □

Определение 041(О.041). *Модуляцией* называется процесс, осуществляемый на *передающей* стороне, изменения сигнальных параметров *сигнала – носителя* $g(t)$ таких, как амплитуда, частота, фаза, длительность, под действием первичного *информационного сигнала* $U(t)$ для трансформации его амплитудного частотного спектра $U(\omega)$ вдоль оси частот ω с целью согласования его амплитудного частотного спектра $U(\omega)$ с предоставляемым частотным каналом $\Delta\omega_{КС}$ путем размещения в нем амплитудного частотного спектра $U_M(\omega)$ модулированного сигнала $U_M(t)$. □

Определение 042(О.042). *Демодуляцией* называется процесс, осуществляемый на *приемной* стороне, путем изменения сигнальных параметров модулированного сигнала $U_M(t)$ посредством трансформации его амплитудного частотного спектра $U_M(\omega)$ вдоль оси частот ω с целью формирования *демодулированного* сигнала $U_{DM}(t)$, амплитудный частотный спектр которого $U_{DM}(\omega)$ максимально приближен к амплитудному частотному спектру $U(\omega)$ первичного информационного сигнала $U(t)$ так, что демодулированный сигнал $U_{DM}(t)$ может быть использован с точностью до высокочастотных составляющих в качестве оценки $\hat{U}(t)$ сигнала $U(t)$.