

Теория информационных процессов и систем

Характерной особенностью нашего времени является резкое увеличение объемов информации во всех сферах человеческой деятельности. Время удвоения накопленных знаний сейчас составляет всего 2-3 года. Объем информации, необходимой для нормального функционирования современного общества, растет примерно пропорционально квадрату развития производительных сил. Материальные затраты на сбор, хранение, обработку, распространения информации сравнимы с затратами на энергетику. Темпы ускорения научно-технического прогресса, роста производительности труда во многом определяются тем, насколько быстро и эффективно человек вооружен новыми средствами, усиливающими его интеллектуальные возможности, позволяющие автоматизировать обработку информации [1,3].

Основой решения многих теоретических проблем создания и применения сложных информационных систем является теория информации, предоставляющая возможности для их комплексного рассмотрения.

Слово «информация» многозначно, и в различных разделах науки требуется уточнение его смысла. Понятие «информация» является центральным для кибернетики. Оно часто используется в информатике, хотя основным понятием классической теории информации следует считать «количество информации». Тем не менее, при всех различиях в трактовке понятия информации бесспорно то, что информации всегда проявляется в материально-энергетической форме в виде *сигналов*. Информацию, представленную в формализованном виде, позволяющем осуществлять ее обработку с помощью технических средств, называют *данными*.

1 ПОНЯТИЕ ИНФОРМАЦИИ И ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

1.1 Сущность информационного процесса

Человеческое общество в процессе своего развития овладевает различными природными ресурсами. В первую очередь это были материальные ресурсы: пища, одежда, строительные материалы для жилья, орудия охоты и труда и т.д. Затем последовало подчинение человеку энергии. Начало этому процессу положила первая техническая революция, первую стадию которой связывают с изобретением в XVIII в. паровой машины Уатта. При этом работа, совершавшаяся ранее мускульной силой человека и животных, была заменена работой машин. Таким образом, во время этой революции человек начал овладевать новыми для себя видами энергии.

Мы являемся современниками второй научно-технической революции, начало которой можно отнести к 1945 г. Во время этой революции резко увеличилось разнообразие и количество используемых материальных средств (новые виды соединений, материалов, комплектующих изделий, готовой продукции и т.д.), открыты и применяются новые виды энергии (атомная, термоядерная, энергия излучений). Но самой важной чертой этой революции является замена человека вычислительными и кибернетическими машинами в процессе производства и управления. Речь идет о создании машин, способных частично заменить человека в сфере его умственной, интеллектуальной деятельности, которые были бы своего рода усилителями человеческого интеллекта, так же как электрические, механические, гидравлические машины являются усилителями или заменителями мускульной силы человека. Основой разработки, создания и применения этих машин является кибернетика.

Кибернетика (по-гречески – «искусство управлять») – наука об общих законах получения, хранения, передачи и преобразования сигналов в сложных управляющих системах. При этом под управляющими системами здесь понимают не только технические, но и любые биологические, административные и социальные системы. Примерами очень сложных управляющих

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем

систем являются нервные системы живых организмов, в особенности организм человека, а также аппарат управления в человеческом обществе.

Кибернетические системы взаимодействуют с внешней средой по трем каналам – материальному, энергетическому и информационному. Эти каналы легко выявить при рассмотрении любого конкретного примера.

Если обратиться к функционированию крупного промышленного предприятия, то можно обнаружить сложные по своей структуре материальный, энергетический и информационный потоки. Потоки сырья, материалов, комплектующих изделий и готовой продукции составляют материальный поток. Энергетический поток обеспечивают системы энергоснабжения предприятия. Вместе с этим на предприятии существует и информационный поток, отражающий то, «как обстоят дела» и «что и как нужно делать».

Представление об информационном канале основывается на понятии «информация». *Информация* (лат. *informatio* – разъяснение, изложение, осведомленность) – одно из наиболее общих понятий науки, обозначающее некоторые сведения, совокупность каких-либо данных, знаний и т.п. Понятие информации обычно предполагает наличие двух объектов – источника информации и потребителя информации (адресата). Информация, переносимая сигналом, как правило, для ее потребителя всегда имеет некоторый смысл, отличный от смысла самого факта поступления этого сигнала. Это достигается за счет специальных соглашений, по которым, скажем, один удар барабана свидетельствует о приближении противника. Для человека, не знающего о таком соглашении, этот звук информации не несет. Другой пример – пароль: смысл его совсем не в тех словах, которые он содержит. Итак, информация бывает о чем-то, и сигнал об этом, принимаемый потребителем, может и не иметь прямой физической связи с событием или явлением, о котором он сигнализирует.

В результате установления связи между источником и приемником информации возникает так называемый *информационный процесс*, который состоит в восприятии, отборе, сборе, передаче, накоплении, обработке, хране-

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем
нии, поиске, отображении информации и принятии решений. Преобразование, переработка потоков информации, т.е. *реализация* информационного процесса, осуществляется *информационной системой*.

Материальная среда, определяющая взаимодействие между источником и приемником информации (адресатом), называется *каналом связи*. Таким каналом могут быть: два провода, соединяющие источник с приемником, канал, использующий радиоволны (радиоканал), свет (оптический канал), акустические волны (звуковой канал) и т.д.

Источники информации весьма разнообразны. Они бывают стационарными (статическими) и подвижными (динамическими), сосредоточенными и распределенными в пространстве, детерминированными и вероятностными.

Вероятностные свойства объекта определяют степень детерминированности источника информации. Для сравнительно простых объектов можно считать, что их основные параметры определены и функциональные связи между этими параметрами выражены достаточно отчетливо. Такой объект является *детерминированным* источником информации. Примерами детерминированных источников служат система отсчета времени, автомат-справочник выдачи сведений о стоимости железнодорожных билетов, книги и т.п. *Вероятностными* источниками информации являются объекты, функционирование которых в той или иной мере подчиняется случайным законам. Примеры вероятностных источников: промышленные объекты, океан и атмосфера как физические системы, биологические структуры, человек.

1.2

Информация. Ее виды. Данные

Выделим два вида информации: биологическую и социальную.

Биологическая информация обеспечивает жизнедеятельность отдельно взятого живого организма (в том числе – генетическая информация). Ее материальные носители – высокомолекулярные химические соединения, сигналы химической и электрохимической природы. *Социальная* информация связана с практической деятельностью человека.

Несмотря на то, что слово «информация» в обычном, общеупотребительном значении понятно – новые сведения, знания о чем-либо – как научный термин оно плохо поддается определению. Это объясняется в первую очередь тем, что не существует пока какой-либо общей теории информации, которая вобрала бы в себя и объяснила все стороны этого многогранного понятия.

К основным типам социальной информации относятся технологическая, экономическая, научная, культурная, медицинская, политическая, военная и др. Информация в виде документов, формул, таблиц и т.п. называется *семантической* информацией, т.е. информацией, имеющей значение, смысл в некотором языке (в отличие от физической информации). Понимание семантической информации может осуществить только человек, владеющий этим языком. (*Семантика* – раздел логики, посвященный изучению значений понятий и суждений. Греческое «семантикос» – «означающий»).

Все виды информации имеют ряд общих свойств и подчиняются некоторым общим закономерностям. К общим свойствам как физической, так и семантической информации относятся достоверность, значимость, долговечность, важность, ценность.

Существует особый вид информации, называемый «данными». *Данные* – это сведения, представляемые обычно в цифровой форме или в каком-либо другом формализованном виде, предназначенные для обработки на ЭВМ (метеоданные, статистические данные, данные опросов и т.д.). Данные легко закодировать и передавать в форме дискретных электрических сигналов. К ним предъявляется ряд требований. Одно из них – возможность большой *скорости* передачи данных. Современные системы передачи данных работают при скоростях передачи от единиц байт в секунду до десятков мегабайт в секунду. Второе важное требование – *высокая верность* передачи. Она характеризуется числом ошибок в передаваемом массиве данных. Бывает, что искажение только одного символа нарушает работу программы, и ЭВМ выдает ложную информацию. Поэтому при передаче данных требование верно-

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем

сти передачи приобретает важное значение. Допускается в среднем одна ошибка на 10 млн. и более правильно принятых символов.

Нередко под *данными* понимаются те сведения, которые поступают на вход системы обработки информации, а под *информацией* – то, что получается на выходе системы обработки данных. Иными словами, *информация – это переработанные данные*. При этом считается, что информация имеет место только там, где она используется в процессе принятия решения, там, где есть цель, там, где имеет значение *смысл* информации. Здесь различают три типа данных:

- данные, которые обычно используются при принятии решений, - эти данные *сразу становятся информацией*;
- данные, которые обычно непосредственно не используются при принятии решений, но накапливаются для возможного использования в определенных ситуациях, которые можно предвидеть, - это *потенциальная информация*;
- данные, которые не используются при принятии решений и их использование не предусматривается – это *избыточные данные, информационный «шум» (фон)*.

Например, метеорологические сведения сегодняшнего дня используются как информация для планирования сегодняшних сельскохозяйственных работ; такие же сведения, полученные за предыдущие годы на этот сезон – потенциальная информация для долгосрочного прогнозирования сельхозработ в будущем; сведения о том, кто конкретно предоставил эту информацию, здесь – информационный «шум».

Другой пример: радиолокационные данные после обработки дают информацию о параметрах движения цели или объектов и являются основанием для принятия решения об открытии огня, постановке помех, расхождения со встречным объектом и т.д. Накопление подобных данных может служить базой для представления о характере построения и взаимодействия целей и

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем объектов (построение ордера кораблей, тактические приемы и т.д.). Сведения о том, кто получил эту информацию – здесь информационный шум.

В принципе данные вообще могут не содержать информации об интересующем нас явлении. В то же время они могут нести информацию о множестве других явлений. Так, из анализа данных обычно можно установить разрядность кода, в котором они представлены, интервалы отсчета, объем данных и т.д.

1.3 Семиотические аспекты информационных процессов

Информация не является ни материей, ни энергией, Ее нельзя ни пощупать, ни увидеть, ни услышать. Как же информацию передавать, хранить, осуществлять ее преобразование? Для этого служат *материальные посредники*: знаки, сигналы, сообщения.

Имеются следующие общие определения этих понятий:

Знак – материальный чувственно воспринимаемый объект, который *символически*, условно представляет и отсылает к обозначаемому им предмету, явлению, действию или событию. Другое определение: знак – материальный предмет (явление, событие), который служит представителем, заместителем другого предмета и *используется* для приобретения, хранения и передачи информации о последнем. Примеры:

- дорожные знаки, еще не установленные в соответствующих местах;
- герб государства, логотип фирмы;
- иероглиф, содержание которого нам неизвестно;
- буква.

Сигнал (лат. *signum* – знак) – условный зрительный или звуковой знак, с помощью которого *передаются* какие-нибудь сведения. В кибернетике – это материальный процесс, несущий информацию, часто – электрический. Примеры:

- дорожные знаки, установленные на магистрали;

- сигнал сирены движущейся пожарной машины ;
- звонок на урок и др.

Один и тот же знак может обозначать разные сигналы. Например, знак “в” в русском языке обозначает звук “вэ”, в английском языке – “бэ”.

Сообщение – форма изложения содержания мышления о чем-либо в виде письменного текста, устной речи, доклада, цифровых данных и т.п. Примеры: статьи в газете, телевизионные передачи, последовательность электрических импульсов при передаче телеграмм после ее расшифровки и т.д.

Приведенные определения указывают на то, что сигналы и сообщения по сути своей являются не чем иным, как знаками или совокупностями знаков. Их изучает *семиотика* (от греческого *σημιον* - знак) – комплекс научных теорий, изучающих свойства *знаковых систем*, т.е. систем конкретных или абстрактных объектов (которые называют знаками), с каждым из которых определенным образом сопоставлено некоторое значение. Для различных знаковых систем и при различном истолковании смысла знаков это значение может быть как конкретным физическим объектом, так и абстрактным понятием.

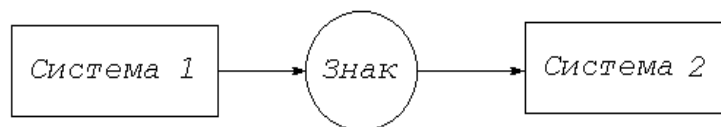


Рисунок.1.1. Обмен информацией между двумя материальными системами

Имеется и иное, более близкое нам определение: знаковая система есть материальный посредник, служащий обмену информацией между некоторыми двумя материальными системами (*рис. 1.1*).

Система 1 для осуществления информационной связи с системой 2 должна генерировать знаки в соответствии с передаваемой информацией, а система 2 – принимать эти знаки и интерпретировать их, т.е. получать информацию. Так как системы в общем случае разнесены на некоторое расстояние, то знак должен иметь возможность перемещаться в пространстве.

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем

Сам знак не перемещается, а перемещается *сигнал* о нем: световой, звуковой, электрический и т.д.

Знаковыми системами являются естественные (разговорные) языки, специальные искусственные языки (например, математическая и химическая символика, алгоритмические языки) искусственные языки общения типа "эсперанто", системы сигнализации в человеческом обществе и животном мире от азбуки Морзе и системы знаков уличного движения до "языка" пчел и дельфинов и т.д. При определенных условиях знаковыми системами можно считать «языки» изобразительных искусств и музыки (на Востоке – особые «языки» танца, где каждый жест имеет определенное значение).

Возможность изучения в рамках семиотики такого широкого круга объектов связана с рассмотрением их *именно как систем знаков*, которые служат или могут служить для выражения некоторого *содержания*. Правильность такого подхода определяется всем развитием науки, в ходе которого устанавливается все большее число общих для различных знаков *систем закономерностей*. Фактический материал, полученный к настоящему времени в семиотических исследованиях, относится главным образом к математической логике и к математической лингвистике.

Знаковые системы осуществляют ряд важных функций познавательного, социального и технико-прикладного характера, в частности: функцию передачи выражаемого знаками сообщения, особенно функцию выражения его смысла, значения; функцию общения (обеспечения взаимопонимания между людьми в социальных коллективах, волевого и эмоционального воздействия); познавательную функцию, связанную с приобретением новых знаний и др.

Знаки окружают нас повсюду. Это и дружеское рукопожатие, и мимика, и фасон одежды, и реклама и т.д. и т.п. Но самая главная для человека и самая совершенная знаковая система – это *язык*. В общем случае можно выделить такие структурные компоненты языка:

- *алфавит* – совокупность субэлементарных знаков языка (морфемы, буквы, символы);
- *словарь* – совокупность элементарных знаков языка (слов), построенных из субэлементарных знаков и используемых в языке;
- *грамматика* – правила использования элементарных знаков (правила построения текстов).

Однако вполне определенно сказать, что такое язык, затруднительно. «Язык относится к числу таких понятий, о которых мы можем говорить, но которые не можем строго определить» (Налимов В.В.)

Особый методологический, конкретно-научный и практический интерес представляют исследования естественных и искусственных знаковых систем в связи с задачей моделирования поведения сложных биологических систем и конструирования искусственных знаковых систем. Это особенно наглядно проявляется, например, в развитии бионики или при разработке специальных языков, могущих оказаться пригодными для межпланетных коммуникаций (например, ЛИНКОС).

Семиотические идеи интенсивно проникают в современную социологию и экономическую науку. Особое значение семиотический подход приобретает при разработке проблем машинного перевода и семантических задач, возникающих в связи с проблемой приближения языков ЭВМ и алгоритмических языков к естественному языку, а в более широком плане – с проблемой общения человека с машиной.

1.4 Теоретические подходы к изучению знаковых систем

Семиотика, т.е. наука, изучающая свойства знаковых систем, рассматривается в трех основных аспектах, которым соответствует три основных раздела; *синтактика*, *семантика* и *прагматика*.

Синтактика – раздел семиотики, в котором чисто структурно исследуются знаковые системы с точки зрения их синтаксиса, безотносительно к каким бы то ни было интерпретациям (синтаксис по-гречески – «составление»).

Синтактика изучает отношения между знаками и словами. Например, *синтаксический анализ программ* для ЭВМ – процесс, состоящий в распознавании правильности слов, цепочек символов, предложений, т.е. их принадлежности к рассматриваемому языку, и в описании синтаксической структуры правильных цепочек (аналогично грамматическому разбору предложений в естественных языках). При этом содержательная сторона программы никоим образом не учитывается.

Под *семантикой* понимается смысл, содержание информации. Семантика занимается изучением связей между *знакосочетаниями и интерпретациями* (истолкованиями) этих знакосочетаний. Например, слово «лук» в русском языке может интерпретироваться как существительное, означающее огородное растение или спортивный снаряд для стрельбы, а в английском – как глагол «смотреть». В более узком и конкретном смысле семантика есть совокупность правил соответствия между формальными выражениями и их интерпретациями. Интерпретациями формальных символов, в частности, могут быть другие формальные символы, которые считаются более понятными для целей данной задачи (например, перевод на другой язык).

Прагматика – раздел семиотики, изучающий отношение использующего знаковую систему (интерпретатора) к самой знаковой системе, практическую полезность знаков и слов. Прагматика изучает восприятие осмысленных выражений знаковой системы в соответствии с разрешающими способностями воспринимающего. В прагматике принимаются некоторые гипотезы о свойствах и строении интеллекта, формируемые на основе данных нейрофизиологии, экспериментальной психологии, бионики и др. Накапливаемые в «памяти» интеллекта наблюдения могут служить исходными данными для обучения интеллекта, приводить к его самоорганизации и, следовательно, изменять его реакции при восприятии семантической системы. Примером этого может служить изучение иностранного языка. В последнее время такие подходы широко используются при разработке, создании и обучении искусственных нейронных сетей.

1.5 Этапы обращения информации

В технических (автоматических) и человеко-машинных (автоматизированных) системах информация чаще всего используется для выработки управляющих воздействий. Так как материальным носителем информации является сигнал, то реально этапами обращения информации будут этапы обращения и преобразования сигналов (рис. 1.2).

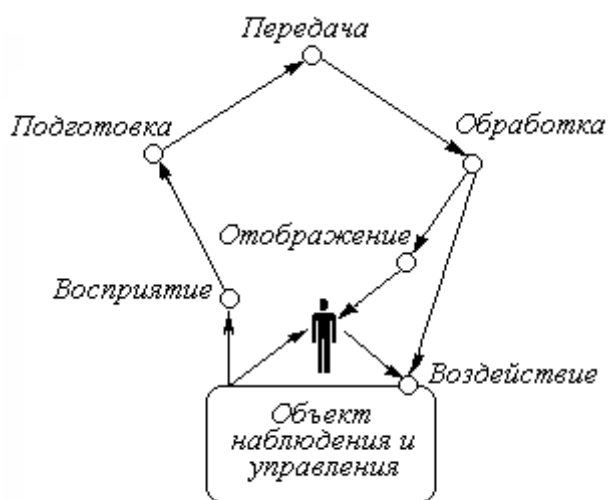


Рисунок 1.2. Этапы обращения информации

На этапе *восприятия* информации осуществляется целенаправленное извлечение и анализ информации о каком-либо объекте (процессе), в результате чего формируется образ объекта, проводятся его опознание и оценка. Здесь необходимо отделить интересующую нас информацию от мешающей (от шумов), что в ряде случаев связано со значительными трудностями. Простейшим видом восприятия является различение двух противоположных состояний: наличия («да») и отсутствия («нет»), более сложным – измерение.

На этапе *подготовки* информации проводятся такие операции, как нормализация, аналого-цифровое преобразование, шифрование. Иногда этот этап рассматривается как вспомогательный для этапа восприятия. В результате восприятия и подготовки получается сигнал в форме, удобной для передачи и/или обработки.

На этапах *передачи и хранения* информация пересылается либо из одного места в другое, либо от одного момента времени до другого. Теоретические задачи, возникающие на этих этапах, близки друг другу, и поэтому этап хранения информации часто как самостоятельный не рассматривается. Для передачи на расстояние используются каналы различной физической природы. Самыми распространенными из них являются электрические и электромагнитные каналы. В настоящее время получили признание также оптический и инфракрасный каналы. Для хранения информации используются в основном полупроводниковые, магнитные и оптические носители. Извлечение сигнала на выходе канала, подверженного действию шумов, носит характер вторичного восприятия.

На этапах *обработки* информации выявляются ее общие и существенные взаимозависимости, представляющие интерес для системы. Преобразование информации осуществляется либо средствами информационной техники, либо человеком. Если процесс обработки формализуем, он может выполняться техническими средствами. В современных сложных системах эти функции возлагаются на рабочие станции, компьютеры и микропроцессоры. Если процесс обработки не поддается формализации и требует творческого подхода, обработка информации осуществляется человеком. В системах управления важнейшей целью обработки является решение задачи выбора управляющих воздействий (этап принятия решения).

Этап *отображения* информации должен предшествовать этапам, связанным с участием человека. Цель этапа отображения – предоставить человеку нужную ему информацию с помощью устройств, способных воздействовать на его органы чувств.

На этапе *воздействия* информация используется для осуществления необходимых изменений в системе.

1.6 Понятие информационной системы

Совокупность средств информационной техники и людей, объединенных для достижения определенных целей или для управления, образуют *автоматизированную информационную систему*, к которой по мере надобности подключаются абоненты (люди или устройства), поставляющие и использующие информацию.

Информационные системы (ИС), действующие без участия человека, называются *автоматическими*. За человеком в таких системах остаются функции контроля и обслуживания.

Автоматизированная информационная система становится *автоматизированной системой управления (АСУ)*, если поставляемая информация извлекается из какого-либо объекта (процесса), а выходная информация используется для *целенаправленного изменения того же объекта (процесса)*. Здесь абонентом, использующим информацию для выбора основных управляющих воздействий (принятия решений), является человек. Объектом воздействия могут быть техническая система, экологическая среда, коллектив людей. Существуют АСУ, в которых отдельные функции управления возлагаются на технические средства, в основном на компьютеры и микропроцессоры.

Информационные системы более высокого уровня становятся территориально рассредоточенными, иерархическими как по функциональному принципу, так и по реализации их техническими средствами. Для них требуются протяженные высокоскоростные и надежные каналы связи и ЭВМ высокой производительности, разработанные к настоящему времени.

Наиболее распространенными ИС являются системы, обеспечивающие передачу информации из одного места в другое (*системы связи*) и от одного момента времени до другого (*системы хранения информации*). Обе эти разновидности ИС имеют много общего в принципиальных вопросах обеспечения эффективности функционирования. Их применяют как самостоятельные системы и как подсистемы в составе любых более сложных ИС. Совокупность таких подсистем в информационно-вычислительной сети образует ее

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем

основное звено – сеть передачи данных. Поэтому можно рассматривать в основном системы передачи данных, подразумевая возможность интерпретации ее основных понятий и выводов к другим ИС.

При анализе и синтезе ИС необходимо оперировать определенными качественными и количественными показателями, позволяющими производить оценку систем, а также сопоставлять их с другими, подобными им системами.

Все задачи, стоящие перед ИС, сводятся обычно к двум основным проблемам: обеспечению высокой эффективности и надежности системы.

Под *эффективностью* ИС понимается ее способность обеспечить *передачу* заданного количества информации *наиболее экономичным способом.* Очевидно, что эффективность системы прежде всего определяется максимально возможной скоростью передачи информации. *Скорость передачи информации* определяется количеством данных, передаваемым в единицу времени. Максимально возможную скорость передачи информации принято называть *пропускной способностью* системы. Пропускная способность характеризует потенциальные возможности системы.

Так как эффективность характеризует экономичность системы, то наиболее полная ее количественная оценка будет характеризоваться *отношением передаваемой информации к затратам,* связанным с передачей данного количества информации. Для передачи информации с помощью сигнала необходимы определенные затраты мощности, определенное время и определенный диапазон частот.

Под *надежностью* технических систем обычно понимают ее способность к *безотказной работе* в течение заданного промежутка времени и в заданных условиях эксплуатации. При этом под *отказом* понимается событие, приводящее к невозможности использования хотя бы одного из рабочих свойств системы. Количественно надежность оценивается различными показателями. Одним из таких показателей является *вероятность безотказной работы* системы в течение заданного промежутка времени. Однако, именно

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем

для информационных систем весьма важной характеристикой является *информационная надежность*, под которой понимается *способность системы передавать информацию с достаточно высокой достоверностью*. *Достоверность* количественно характеризуется степенью соответствия принятого сообщения переданному. Эту величину принято называть *верностью*.

Снижение достоверности передачи сообщений называется их *искажением*, происходящим под воздействием внешних и внутренних (аппаратурных) помех. Способность ИС противостоять вредному действию помех называют *помехоустойчивостью*.

Теория информации и кодирования устанавливает критерии оценки помехоустойчивости и эффективности ИС, а также указывает общие пути повышения помехоустойчивости и эффективности. Условия повышения помехоустойчивости и эффективности, являются *противоречивыми*. Повышение помехоустойчивости практически всегда сопровождается ухудшением эффективности и, наоборот, повышение эффективности отрицательно сказывается на помехоустойчивости системы. Здесь необходим выбор разумного компромисса.

1.7 Структура системы передачи информации

Структурная схема одноканальной системы передачи информации приведена на *рис. 1.3*. Информация поступает в систему в форме сообщений. Напомним, что под сообщением понимается совокупность знаков или первичных сигналов, содержащих информацию. В общем случае источник сообщений состоит из совокупности источника информации *ИИ* (исследуемого или наблюдаемого объекта) и первичного преобразователя *ПП* (датчика, человека-оператора и т.п.), воспринимающего информацию о его состоянии или протекающем в нем процессе.

Различают дискретные или непрерывные сообщения.

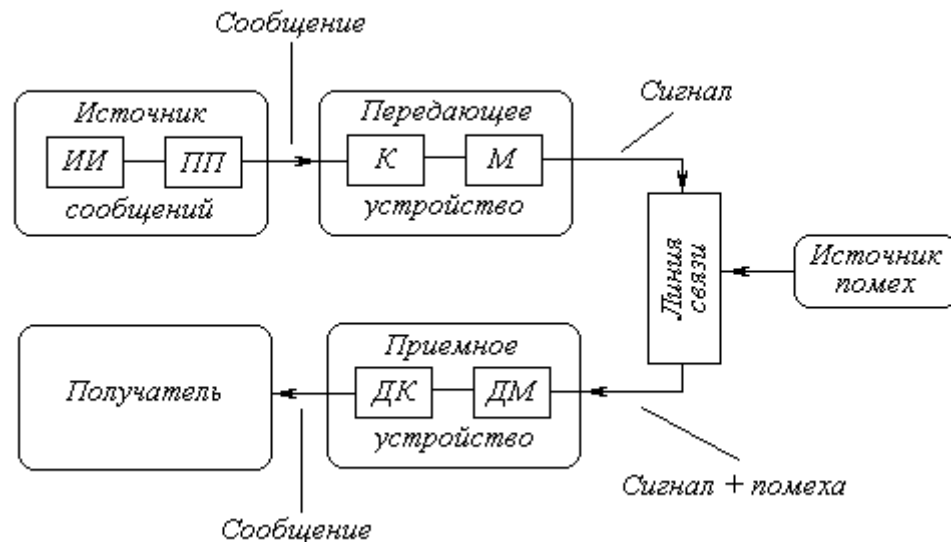


Рисунок 1.3. Структурная схема системы передачи информации

Дискретные сообщения формируются в результате последовательной выдачи источником отдельных элементов – знаков. Множество различных знаков составляют *алфавит источника сообщений*, а число знаков – *объем алфавита*. В частности, знаками могут быть буквы естественного или искусственного языка, удовлетворяющие определенным правилам взаимосвязи. Распространенной разновидностью дискретных сообщений являются *данные*.

Непрерывные сообщения не делимы на отдельные элементы. Они описываются функциями времени, принимающими непрерывное множество значений. Типичными примерами непрерывных сообщений могут служить речь, телевизионное изображение, изменения во времени физических параметров (температуры воздуха и воды, давления, влажности и т.д.). В современных системах связи непрерывные сообщения с целью повышения качества передачи часто преобразуются в дискретные.

Для передачи сообщения по каналу связи ему необходимо поставить в соответствие определенный *сигнал*. В ИС, как уже говорилось выше, под сигналом понимают физический процесс, отображающий (несущий) сообщение. Преобразование сообщения в сигнал, удобный для передачи по данному каналу связи, называют *кодированием в широком смысле слова*. Операцию восстановления сообщения по принятому сигналу называют *декодированием*.

Число возможных дискретных сообщений при неограниченном увеличении времени стремится к бесконечности, а за достаточно большой промежуток времени достаточно велико. Поэтому ясно, что для каждого сообщения создать свой специальный сигнал практически невозможно. Однако, поскольку дискретные сообщения складываются из знаков, имеется возможность обойтись конечным количеством образцовых сигналов, соответствующих отдельным знакам алфавита источника.

Для обеспечения простоты и надежности распознавания образцовых сигналов их число целесообразно сократить до минимума. Поэтому, как правило, прибегают к операции представления исходных знаков в другом алфавите с меньшим числом знаков, называемых здесь *символами*. При обозначении этой операции используется тот же термин «кодирование», рассматриваемый в узком смысле. Устройство, выполняющее такую операцию, называется *кодером К* (рис. 1.3). Так как алфавит символов меньше алфавита знаков, то каждому знаку соответствует некоторая последовательность символов, называемая *кодовой комбинацией*.

Аналогично, для операции сопоставления символов со знаками исходного алфавита используется термин «декодирование». Ее техническая реализация осуществляется декодирующим устройством или *декодером ДК*. В простейшей системе связи кодирующее, а следовательно, и декодирующее устройство может отсутствовать.

Передающее устройство осуществляет преобразование непрерывных сообщений или дискретных знаков в сигналы, удобные для прохождения по конкретной линии связи (либо для хранения в некотором запоминающем устройстве). Для этого один или несколько параметров выбранного носителя изменяют в соответствии с передаваемой информацией. Такой процесс называют *модуляцией*. Он осуществляется *модулятором М*. Обратное преобразование сигналов в символы производится *демодулятором ДМ*.

Под *линией связи* понимают любую физическую среду (воздух, металл, магнитная лента и т.п.), обеспечивающую поступление сигналов от пере-

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем

дающего устройства к приемному. Сигналы на выходе линии связи могут отличаться от переданных вследствие затухания, искажения и воздействия помех. *Помехи* – это любые мешающие возмущения, вызывающие случайные отклонения принятых сигналов от переданных. Могут быть внешними (атмосферные, промышленные, специально организованные) и внутренними (их источником является сама аппаратура связи), линейными и нелинейными. Эффект воздействия помех на различные блоки системы стараются учесть соответствующим изменением характеристик линии связи. Поэтому источник помех условно относят к линии связи.

Из смеси сигнала и помехи *приемное устройство* выделяет сигнал и посредством декодера восстанавливает сообщение, которое в общем случае может отличаться от посланного. Мету соответствия принятого сообщения посланному называют *верностью передачи*. Обеспечения заданной верности передачи сообщений – важнейшая цель системы связи.

Принятое сообщение с выхода системы связи поступает к абоненту-получателю, которому была адресована исходная информация.

Совокупность средств, предназначенных для передачи сообщений, называется *каналом связи*. Для передачи информации от *группы* источников, сосредоточенных в одном пункте, к *группе* получателей, расположенных в другом пункте, часто целесообразно использовать только одну линию связи, организовав не ней требуемое число каналов. Такие системы называются *многоканальными*.

2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИГНАЛОВ

2.1 Понятие сигнала и его модели

Как указывалось ранее, понятие «сигнал» имеет неоднозначное толкование. В широком смысле слова под сигналом понимается материальный носитель информации. При этом к сигналам относят как *естественные* сигнала-

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем

лы, так и сигналы, *специально создаваемые* с определенной целью. Естественными являются, например, световые сигналы, позволяющие видеть окружающий мир, космические сигналы, электрические разряды во время грозы, сейсмосигналы во время землетрясения и т.д. Примером специально создаваемых сигналов могут служить сигналы, генерируемые с целью извлечения информации об изменениях в объекте или процессе (эталонные сигналы). Это – акустические, оптические, электрические, радио- и т.п. сигналы.

В дальнейшем понятие *сигнал*, если это не оговорено специально, будет использоваться в узком смысле как сигнал, *специально создаваемый* для передачи сообщения в информационной системе. *Материальную основу* сигнала составляет какой-либо физический объект или процесс, называемый *носителем (переносчиком)* информации (сообщения): звук, свет, электрический ток или электромагнитные волны, чернила и т.д. Обычно носитель становится сигналом в процессе *модуляции*. Параметры носителя, изменяемые в соответствии с передаваемым сообщением, называют *информативными*.

В качестве носителей информации используются колебания различной природы, чаще всего *гармонические*, т.е. вида

$$u(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \quad (2.1)$$

включая частный случай – постоянное состояние ($\omega = 0$). В технических информационных системах наиболее широкое распространение получили носители в виде электрического напряжения или тока. Поэтому, рассматривая в дальнейшем модели сигналов, будем соотносить их с электрическими сигналами.

В носителе $u(t) = A = \text{const}$ имеется только один информативный параметр – уровень A (например, уровень напряжения).

При использовании гармонических колебаний информативными могут стать такие параметры, как амплитуда A , частота ω , фаза φ .

Сигналы принято подразделять на детерминированные и случайные.

Детерминированными называют сигналы, которые точно определены в любые моменты времени.

Случайные колебания отличаются тем, что значения их некоторых параметров точно предсказать невозможно. Они могут рассматриваться как сигналы, когда несут интересующую нас информацию (случайные сигналы), или как помехи, когда мешают наблюдению интересующих нас сигналов.

При изучении общих свойств каналов связи, сигналов и помех мы отвлекаемся от их конкретной физической природы, содержания и назначения, заменяя моделями. *Модель* – это выбранный способ описания объекта, процесса или явления, отражающий существенные с точки зрения решаемой задачи факторы.

Задачи повышения эффективности функционирования информационных систем связаны с установлением количественных соотношений между основными параметрами, характеризующими источник информации и канал связи. Поэтому при исследовании используют *математические модели* как сигнала, так и информационной системы [3].

Исследование сложных сигналов, как детерминированных, так и случайных, имеет своей основой изучение простых детерминированных сигналов. Обычно сложные сигналы могут быть представлены в виде некоторых (конечных или бесконечных) совокупностей простых сигналов. Этот факт более подробно будет рассмотрен ниже (*разд.3*). Простые детерминированные сигналы имеют и самостоятельное значение. Они создаются специально для целей измерения, наладки и регулирования объектов информационной техники, играя роль *эталонов*.

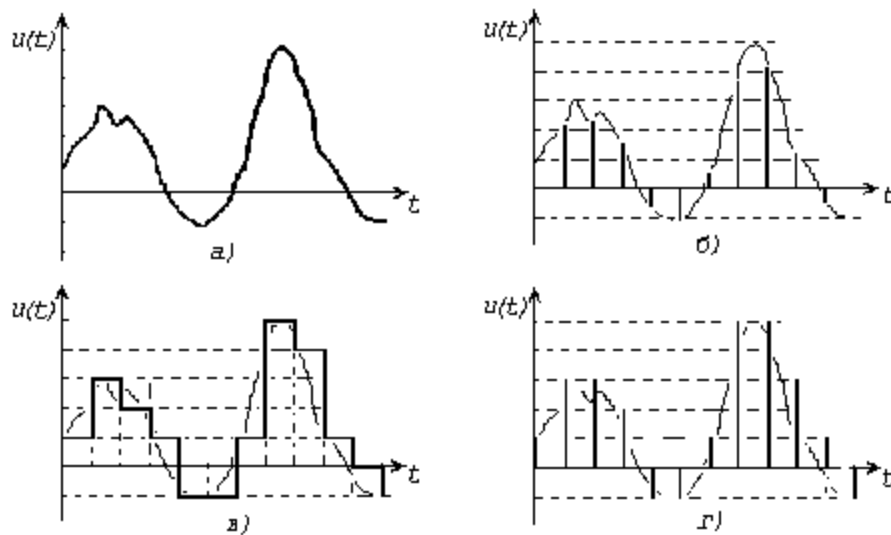


Рисунок 2.1. Виды сигналов

В зависимости от структуры информационных параметров сигналы подразделяют на дискретные, непрерывные и дискретно-непрерывные.

Сигнал считают *дискретным* по данному параметру, если число значений, которое может принимать этот параметр, *конечно* или *счетно*. Если множество возможных значений параметра образует *континуум*, то сигнал считается *непрерывным* по данному параметру. Сигнал, дискретный по одному параметру и непрерывный по другому, называют *дискретно-непрерывным*.

В соответствии с этим существуют следующие разновидности математических моделей детерминированного сигнала (рис. 2.1):

- *непрерывная функция непрерывного аргумента*, например, непрерывная функция времени (рис. 2.1а);
- *непрерывная функция дискретного аргумента*, например, функция, значения которой отсчитываются только в определенные моменты времени (рис. 2.1б);
- *дискретная функция непрерывного аргумента*, например, функция времени, квантованная по уровню (рис. 2.1в);
- *дискретная функция дискретного аргумента*, например, функция, принимающая одно из конечного множества возможных значений (уровней) в определенные моменты времени (рис. 2.1г).

Рассматриваемые модели сигналов в виде функций времени предназначены в первую очередь для анализа формы сигналов. Желательно найти такое представление сигнала, которое облегчает задачи исследования прохождения реальных сигналов, часто имеющих достаточно сложную форму, через интересующие нас системы. С этой целью сложные сигналы представляются совокупностью элементарных (базисных) функций, удобных для последующего анализа.

2.2 Одиночные детерминированные сигналы

Приступая к рассмотрению задачи построения сигналов, необходимо выделить их некоторые классы, которые будут встречаться в дальнейшем [4].

Это необходимо в силу двух обстоятельств.

Во-первых, проверка принадлежности сигнала к конкретному классу сама по себе является процедурой анализа сигнала.

Во-вторых, для представления и анализа сигналов разных классов зачастую приходится применять разные средства и подходы.

Выше уже указывалось, что сигналы могут быть разделены на детерминированные и случайные. В данном разделе мы будем рассматривать детерминированные сигналы.

Из теории информации известно, что детерминированный сигнал отображает известное сообщение, которое нет смысла передавать. Ему соответствует модель в виде функции, полностью определенной во времени. И тем не менее, изучение моделей детерминированных сигналов необходимо по многим причинам. Важнейшая из них заключается в том, что результаты анализа детерминированных сигналов являются основой для изучения более сложных случайных сигналов. Это обусловлено тем, что детерминированный сигнал может рассматриваться как элемент множества детерминированных функций, составляющих в совокупности случайный процесс. Детерминированное колебание, таким образом, представляет собой вырожденную форму

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем
случайного процесса со значениями параметров, известными в любой момент времени с вероятностью, равной единице.

Детерминированные сигналы имеют и самостоятельное значение. Они специально создаются для целей измерения, наладки и регулирования объектов информационной техники, играя роль *эталонов*.

Следующий важный класс сигналов – сигналы с *интегрируемым квадратом*. Еще их называют сигналами с *ограниченной энергией*. Для таких сигналов $s(t)$ выполняется соотношение

$$\int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt < \infty. \quad (2.2)$$

Многие важные соотношения теории сигналов получены именно в предположении о конечности энергии анализируемых сигналов. Если это условие не выполняется, приходится менять подходы к решению задачи, в частности, прибегать к использованию аппарата обобщенных функций.

Здесь следует заметить, что реальные, физически реализуемые сигналы всегда обладают конечной энергией, т.е. для них обязательно выполняется условие (2.2). Однако, применение обобщенных функций нередко позволяет проще и эффективнее решать стоящие перед исследователем задачи теории сигналов.

Еще один признак классификации сигналов, существенно влияющий на методы их анализа, – *периодичность*. Для периодического сигнала с *периодом* T выполняется соотношение $s(t + nT) = s(t)$ при любом t , где n – произвольное целое число (рис. 2.2). Если величина T является периодом сигнала $s(t)$, то периодами для него будут и кратные ей значения $2T, 3T$ и т.д. Как правило, говоря о периоде сигнала, имеют в виду *минимальный* из возможных периодов.

Величина, обратная периоду, называется *частотой повторения* сигнала: $f = 1/T$. Она измеряется в герцах, если T измеряется в секундах. В теории сигналов также часто используется понятие *круговой частоты* $\omega = 2\pi f$, измеряемой в радианах в секунду.

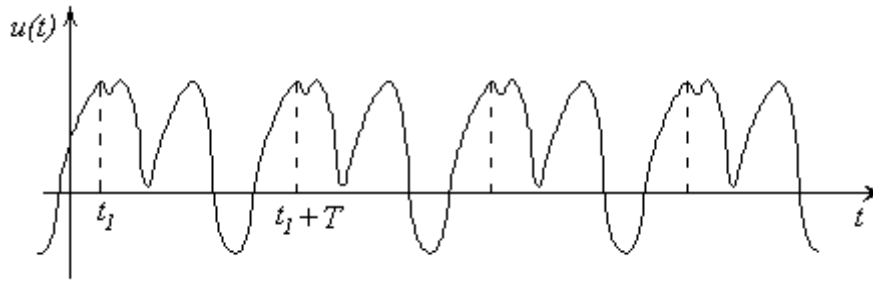


Рисунок 2.2. Пример периодической функции

Очевидно, что любой периодический сигнал (за исключением сигнала, тождественно равного нулю) имеет бесконечную энергию. Следовательно, он в чистом виде физически не реализуем.

Следующий класс – сигналы *конечной длительности* (их еще называют *финитными* сигналами). Такие сигналы отличны от нуля только на ограниченном промежутке времени. Иногда говорят, что сигнал *существует* на конечном временном интервале. Очевидно, что сигнал конечной длительности будет иметь и конечную энергию, если только не содержит разрывов второго рода (с уходящими в бесконечность ветвями функции). Сигналы с такими разрывами физически не реализуемы.

Перейдем к более узким классам сигналов. Как уже указывалось, очень важную роль в технике обработки сигналов играют *гармонические* колебания (2.1), которые полностью определяются тремя числовыми параметрами: амплитудой A , частотой ω и начальной фазой φ .

Гармонический сигнал является одним из широко распространенных *тестовых* сигналов, применяющихся для анализа характеристик электрических и электронных цепей, как линейных, так и нелинейных. Кроме него к тестовым относятся еще две очень важные функции: дельта-функция и функция единичного скачка.

Из сигналов конечной длительности значительный интерес представляют *прямоугольные импульсы* с амплитудой A и длительностью τ . На *рис. 2.3a* представлен такой импульс, центрированный относительно начала отсчета времени:

$$s(t) = \begin{cases} A, & |t| \leq \tau/2, \\ 0, & |t| > \tau/2. \end{cases} \quad (2.3)$$

Если положить в этом выражении $A=1/\tau$ и устремить $\tau \rightarrow 0$, то в пределе такой импульс станет бесконечно узким с бесконечной амплитудой, будучи расположенным при нулевом значении аргумента функции. Очевидно, его площадь при любом τ будет равна единице. Он носит название *дельта-функции* $\delta(t)$, или *функции Дирака*:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0, \\ \infty, & t = 0, \end{cases}$$

причем выполняется условие

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1.$$

Разумеется, сигнал в виде дельта-функции невозможно реализовать физически, однако эта функция очень важна для теоретического анализа сигналов и систем. На графиках дельта-функция обычно изображается жирной стрелкой, высота которой пропорциональна множителю, стоящему перед дельта-функцией (рис. 2.3б).

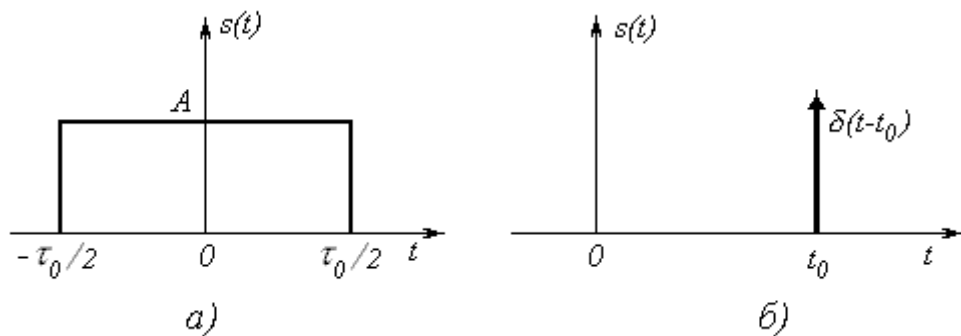


Рисунок 2.3. Сигналы конечной длительности

Одно из важных свойств дельта-функции – так называемое *фильтрующее свойство*. Оно состоит в том, что если дельта-функция присутствует под интегралом в качестве множителя, то результат интегрирования будет равен значению остального подынтегрального выражения в той точке, где сосредоточен дельта-импульс:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - t_0) dt = f(t_0). \quad (2.4)$$

Пределы интегрирования в (2.4) не обязательно должны быть бесконечными, главное, чтобы в интервал интегрирования входило значение t_0 ; в противном случае интеграл будет равен нулю.

Из того факта, что интеграл от дельта-функции дает безразмерную единицу, следует, что размерность самой дельта-функции обратна размерности ее аргумента. Например, дельта-функция времени имеет размерность 1/сек, то есть размерность частоты.

Функция *единичного скачка*, она же *функция Хевисайда*, она же *функция включения*, равна нулю для отрицательных значений аргумента и единице – для положительных. При нулевом значении аргумента функцию считают либо неопределенной, либо равной $1/2$:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1/2, & t = 0, \\ 1, & t > 0, \end{cases} \quad (2.5)$$

График функции единичного скачка приведен на *рис. 2.4*.

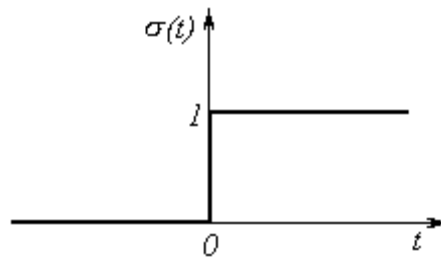


Рисунок 2.4. Функция единичного скачка

Функцию единичного скачка удобно использовать при создании математических выражений для сигналов конечной длительности. Простейшим примером является формирование прямоугольного импульса с амплитудой A и длительностью T : $s(t) = A [\sigma(t) - \sigma(t - T)]$.

Вообще, любую кусочно-заданную зависимость можно записать в виде единого математического выражения с помощью функции единичного скачка.

2.3 Спектры детерминированных сигналов

В общем случае сигнал представляет собой сложное колебание. Поэтому возникает необходимость представить сложную функцию $u(t)$, определяющую сигнал на интервале $-T/2 \leq t \leq T/2$, через некоторые *простые* функции. Простейшей с практической точки зрения является *линейная комбинация* некоторых элементарных функций $\psi_k(t)$:

$$u_n(t) = \sum_{k=1}^n \alpha_k \psi_k(t), \quad (2.6)$$

причем будем считать, что $u_n(t)$ мало отличается от $u(t)$. Функции $\psi_k(t)$ выбираются таким образом, чтобы *любой сигнал* можно было представить сходящейся суммой вида (2.6).

Очевидно, что разница между сигналом $u(t)$ и его представлением $u_n(t)$ зависит от времени:

$$\varepsilon(t) = u(t) - u_n(t).$$

Погрешность представления сигнала $u(t)$ суммой $u_n(t)$ на всем интервале $(-T/2 \leq t \leq T/2)$ может быть оценена средним квадратом ошибки

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \varepsilon^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [u(t) - u_n(t)]^2 dt. \quad (2.7)$$

Найдем коэффициенты α_k , минимизирующие величину ε^2 (т.е. определим α_k по методу наименьших квадратов). Этот минимум достигается, если для всех $1 \leq i \leq n$ выполняются условия

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \alpha_i} = 0. \quad (2.8)$$

Согласно формуле (2.7) отсюда с учетом (2.6) имеем для всех $1 \leq i \leq n$

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \alpha_i} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [u(t) - u_n(t)] \frac{\partial u_n}{\partial \alpha_i} dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [u(t) - u_n(t)] \psi_i(t) dt.$$

Так как в соответствии с выражением (2.7) эта величина равна нулю, то отсюда следует

$$\int_{-T/2}^{T/2} u_n(t) \psi_i(t) dt = \int_{-T/2}^{T/2} u(t) \psi_i(t) dt,$$

или, с учетом (2.6),

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k \int_{-T/2}^{T/2} \psi_k \psi_i(t) dt = \int_{-T/2}^{T/2} u(t) \psi_i(t) dt, \quad (1 \leq i \leq n). \quad (2.9)$$

Итак, n соотношений (2.8) дают систему из n линейных уравнений (2.9) для определения n неизвестных α_k .

Эта система имеет наиболее простой вид (становится диагональной), если функции $\psi_k(t)$ удовлетворяют условиям:

$$\int_{-T/2}^{T/2} \psi_k(t) \psi_i(t) dt = \begin{cases} c_k & \text{при } i = k, \\ 0 & \text{при } i \neq k. \end{cases}$$

Такие функции $\psi_k(t)$ называются *ортгональными*. Очевидно, что $c_k > 0$. Если, кроме того, $c_k = 1$, то функции $\psi_k(t)$ называются *ортонормированными*.

Из уравнений (2.9) для ортгональных функций имеем

$$\alpha_k = \frac{1}{c_k} \int_{-T/2}^{T/2} u(t) \psi_k(t) dt. \quad (2.10)$$

Коэффициенты α_k , определяемые по этой формуле, называются *обобщенными коэффициентами Фурье*. Ряд, который получается из конечной суммы (2.6) при $n \rightarrow \infty$, называется *обобщенным рядом Фурье*.

Система функций $\psi_k(t)$ называется *полной*, если к ней нельзя присоединить ни одной функции, ортгональной одновременно всем этим функциям и не равной тождественно нулю.

Представление функций времени в виде ряда Фурье называется *спектральным анализом*, а совокупности чисел α_k - *спектрами* этих функций.

Наиболее важный для практики класс ИС – это инвариантные во времени линейные системы, т.е. системы, параметры которых не зависят от времени. При анализе этих систем целесообразно применять гармонические базис-

Доценко С.В. Теория информационных процессов и систем

ные функции. Известно, что детерминированные сигналы, представляющие собой *гармонические* функции, при прохождении через такие системы остаются *гармоническими*. При этом у них в общем случае изменяются только амплитуда и фаза, а частота остается неизменной. Поэтому разложение сигналов по системе гармонических базисных функций подверглось всестороннему исследованию учеными. На его основе создана широко известная классическая спектральная теория сигналов. Рассмотрим некоторые применения этой теории.

Библиографический список

1. Куликовский Л.Ф. Теоретические основы информационных процессов. / Л.Ф. Куликовский, В.В. Мотов. – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.
2. Темников Ф.Е. Теоретические основы информационной техники. / Ф.Е. Темников, В.А. Афонин, В.И.Дмитриев. - М.: Энергия, 1971. – 4234 с.
3. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации. / В.И. Дмитриев. - М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. / А.Б. Сергиенко. – М.: С/П, НН, В, РнД, Е, С, К, Х, Мн.: ПИТЕР, 2003. – 603 с.
5. Толстов Г.П. Ряды Фурье./ Г.П. Толстов. – М.: Физматгиз, 1960. – 390 с.
6. Снеддон И. Преобразования Фурье./ И. Снеддон. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955. – 667 с.
7. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. Том 1. / Л.Т. Кузин. – Энергия, 1973. – 503 с.
8. Харкевич А.А. Борьба с помехами. / А.А. Харкевич. – М.: Наука, 1965. – 276 с.
9. Френкс Л. Теория сигналов. / Л. Френкс. – М.: Сов. Радио, 1974. – 344 с.
10. Хеннан Э. Многомерные временные ряды./ Э. Хеннан. – М.: Мир, 1974. - 576 с.
11. Александров П.С. Лекции по аналитической геометрии. / П.С. Александров. – М.: Наука, 1968. – 912 с.
12. Пугачев В.С. Теория случайных функций./ В.С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 1960, - 883 с.
13. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая. / Б.Р. Левин. – М.: Сов. Радио, 1969. – 751 с.
14. Королюк В.С. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. / В.С. Королюк, Н.И.Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
15. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах. / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1969. – 395 с.

16. Крамер Г. Математические методы статистики. /Гаральд Крамер. – М.: Мир, 1975. -648 с.
17. Гельфанд И.М. О вычислении количества информации о случайной функции, содержащейся в другой такой функции. / И.М. Гельфанд, А.М. Яглом. Успехи математических наук, том XII, вып.1(73), 1957. – С.3-52.
18. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. / К. Шеннон. – М.: Изд. иностр. лит-ры, 1963. – 829 с.
19. Кавалеров Г.И. Введение в информационную теорию измерений. / Г.И. Кавалеров, С.М. Мандельштам. – М.: Энергия, 1974. – 375 с.
20. Беллман Р. Введение в теорию матриц./ Р. Беллман. М.: Наука, 1969. – 367 с.
21. Анго Андре. Математика для электро- и радиоинженеров./ Андре Анго. – М.: Наука, 1964. – 772 с.