

УДК 621.391.3

МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАЗЕМНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ И КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В. В. Гришин,

канд. техн. наук

Ю. Е. Богачик,

старший преподаватель

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Математическое моделирование информационного взаимодействия рассматривается в рамках системного подхода к анализу космических комплексов, при котором анализируется интегральный показатель качества управления космическими аппаратами – вероятность выполнения сеансов управления без замечаний. Проводится анализ подходов к математическому моделированию сеансов управления космическими аппаратами. Дается общая характеристика вероятностных и автоматных математических моделей информационного взаимодействия наземной радиоэлектронной системы и космического аппарата.

The mathematical modelling of the informational interaction is considered in the framework of the system approach to the analysis of space complexes where an integral index of spacecraft control quality - probability of an error-free control session - is analyzed. Different approaches to mathematical modelling of spacecraft control are analyzed. Probabilistic and automata-theoretic mathematical models of interaction between a ground radioelectronic system and a spacecraft are described.

Применение космических аппаратов (КА) в соответствии с их целевым назначением обеспечивается проведением сеансов управления (СУ) КА наземными радиоэлектронными системами (РЭС), входящими в состав наземного комплекса управления (НКУ) [1, 2]. В ходе СУ происходит информационное взаимодействие наземной РЭС и КА. Программа типового СУ, как правило, включает в себя передачу на КА командно-программной информации (КПИ), измерение текущих навигационных параметров (ТНП) КА, прием телеметрической информации (ТМИ), сверку и коррекцию бортовой шкалы времени (СКВ) [2, 3].

Учитывая специфику применения наземных РЭС управления КА, представляющих собой сложные многофункциональные технические системы, и высокую стоимость проведения на них любого рода экспериментальных работ, для анализа процессов информационного взаимодействия с КА получает широкое распространение математическое моделирование.

Основным содержанием СУ является передача на космический аппарат КПИ – функциональных и числовых команд, программ управления бортовой аппаратурой и информации обратного контроля (ИОК). Это обусловлено тем, что КПИ либо

непосредственно задает режимы управления бортовой аппаратурой, либо инициирует выполнение других задач СУ, таких как передача с КА ТМИ, СКВ. В связи с этим выполнение программы полета космического аппарата предусматривает, прежде всего, полную и достоверную передачу в ходе СУ всей запланированной КПИ, в том числе в условиях штатных и нештатных ситуаций, возникающих при технической эксплуатации наземных РЭС, и применения их в реальных условиях радиосвязи с КА.

При математическом моделировании информационного взаимодействия наземной РЭС с КА предполагается, что РЭС является автоматизированной системой со встроенным информационно-управляющим комплексом (ИУК) и системой контроля технического состояния (СКТС), эксплуатируемой подготовленным персоналом (дежурным расчетом). Такие автоматизированные РЭС составляют в настоящее время основу средств НКУ всех типов КА [4, 5]. В них в штатном режиме функционирования организацию информационного взаимодействия с космическим аппаратом обеспечивает ИУК, а СКТС контролирует техническое состояние аппаратуры, осуществляя при необходимости переключение объемов аппаратуры радиотех-

нической части РЭС и ИУК. Критерием качества выполнения СУ является своевременная и достоверная передача на КА всего запланированного объема КПИ.

В общем случае РЭС управления КА может находиться в одном из режимов: дежурства, подготовки к проведению СУ и проведения СУ. В соответствии со сложившейся практикой оценки результатов решения задач управления КА рассматриваются три возможных исхода СУ: выполнение СУ без замечаний (СУБЗ), выполнения СУ с замечаниями (СУЗ) и невыполнение СУ (НСУ). Учет второго исхода (СУЗ) при моделировании СУ имеет значение как с точки зрения оценки действий дежурного расчета, так и с точки зрения анализа условий выполнения последующей программы полета КА. Вследствие логической (семантической) взаимосвязи различных управляющих воздействий отклонения от запланированного порядка информационного взаимодействия РЭС и КА в случае СУЗ могут оказать прямое или косвенное влияние на качество решения целевых задач. В случае НСУ это влияние полагается прямым.

Причиной невыполнения задач управления космического аппарата могут быть отказы наземной РЭС или бортовой аппаратуры КА и нештатные ситуации. При этом под нештатной ситуацией при информационном обмене с КА понимается непредусмотренный программой СУ режим работы РЭС, приводящий к выполнению с замечаниями или к невыполнению СУ. Нештатные ситуации представляют наибольшую опасность для выполнения программы СУ. Они могут быть обусловлены внешними и внутренними причинами. К внутренним причинам относятся отказы (неисправности) аппаратуры, не обнаруживаемые СКТК, и неправильные действия дежурного расчета РЭС. К внешним причинам относятся внешние воздействия, изменения условий радиосвязи с КА, а также нештатный режим функционирования смежных средств, взаимодействующих с РЭС при проведении СУ.

Предполагается, что в случае возникновения нерасчетных режимов функционирования РЭС на этапах дежурства и подготовки к СУ планируемые задачи управления КА могут оперативно передаваться другим РЭС в составе НКУ. В процессе проведения СУ такая передача оказывается невозможна, что позволяет определить нештатную ситуацию как явление, присущее исключительно этапу проведения СУ. Опыт эксплуатации средств НКУ показывает определяющую роль нештатных ситуаций в снижении надежности управления КА. Поэтому их учет обязателен при моделировании информационного взаимодействия РЭС и КА, хотя формализованное описание таких ситуаций может составлять основную сложность при разработке математических моделей.

Разделение причин нарушения функционирования РЭС в ходе СУ на отказы (обнаруживаемые

и идентифицируемые СКТС) и нештатные ситуации необходимо для формализации процессов информационного взаимодействия РЭС и КА в ходе СУ. При отказах функционирования РЭС и действия дежурного расчета определены эксплуатационно-технической документацией и соответствующими инструкциями, а сами отказы обусловлены только внутренними причинами – техническим состоянием и готовностью РЭС. При нештатных ситуациях функционирование РЭС и действия дежурного расчета не в полной мере определены документацией и инструкциями, решения по их устранению принимаются оперативно, исходя из сложившейся обстановки, а сами ситуации могут быть обусловлены как внутренними, так и внешними причинами.

Разработка математической модели информационного взаимодействия наземной РЭС и КА включает в себя этапы содержательного описания режимов функционирования РЭС в ходе СУ, выбора математического аппарата для адекватного описания процесса информационного взаимодействия РЭС и КА в ходе СУ и непосредственного построения математической модели с использованием средств данного аппарата. Выделение первых двух этапов обусловлено следующими обстоятельствами.

1. Моделирование СУ в рамках эталонной модели открытых информационных систем [6] относится к сеансному уровню и уровню представления – высоким уровням, на которых необходимо формализованное описание процессов информационного взаимодействия объектов в пространстве состояний.

2. Математический аппарат моделирования должен обеспечивать возможность введения в модель всех возможных внешних и внутренних воздействий, изменения (варьирования) их параметров и проведения исследования методом статистических испытаний.

3. Математический аппарат имитационного моделирования может быть различным при обобщенном описании процессов информационного взаимодействия РЭС и КА и при описании информационного взаимодействия РЭС и КА в ходе конкретных (стандартных) СУ при использовании конкретных РЭС.

4. Гибкий подход к выбору метода формализованного описания СУ в зависимости от задачи модельных исследований и объема априорной информации позволяет использовать достоинства различных математических аппаратов моделирования для достижения адекватности создаваемой модели.

С учетом особенностей СУ как предметной области математического моделирования и принятия предложений об учете влияния внешних и внутренних факторов на процесс информационного взаимодействия РЭС и КА в ходе сеансов управления для их моделирования могут быть рекомендованы:

– вероятностные модели на основе ориентированных графов – при определении обобщенных показателей надежности и устойчивости управления КА для заданных условий функционирования РЭС;

– вероятностные автоматные модели – при определении показателей качества выполнения конкретных (стандартных) СУ определенным типом РЭС для заданных условий радиосвязи с КА.

Основным результатом моделирования в обоих случаях является определение для заданных условий интегрального показателя качества управления КА – вероятности выполнения СУБЗ. Данный показатель характеризует надежность и устойчивость информационного взаимодействия РЭС и КА в заданных условиях, в том числе при воздействии совокупности внешних и внутренних факторов.

Вероятностные модели на основе ориентированных графов позволяют формализовать широкий класс операций эксплуатации и применения РЭС управления КА [7]. Необходимыми условиями, определяющими адекватность описания процессов подготовки и проведения СУ вероятностными методами, являются:

– наличие представительных выборок статистической информации по результатам эксплуатации моделируемой РЭС, позволяющей определить численные значения используемых вероятностных характеристик с требуемой достоверностью;

– допустимость для целей моделирования представления СУ в виде однородного интервального события без дальнейшего раскрытия его структуры;

– возможность описания действий дежурного расчета РЭС обобщенными статистическими характеристиками без конкретизации содержания реальных СУ.

С учетом основных этапов технологического цикла применения РЭС управления КА процесс подготовки и проведения СУ может быть представлен ориентированным графом состояний (рис. 1). Здесь введены следующие состояния:

1.1 – РЭС технически исправна основным и резервным полуккомплектами аппаратуры и находится в режиме дежурства;

1.2 – РЭС технически исправна основным и резервным полуккомплектами аппаратуры и находится в режиме подготовки к СУ;

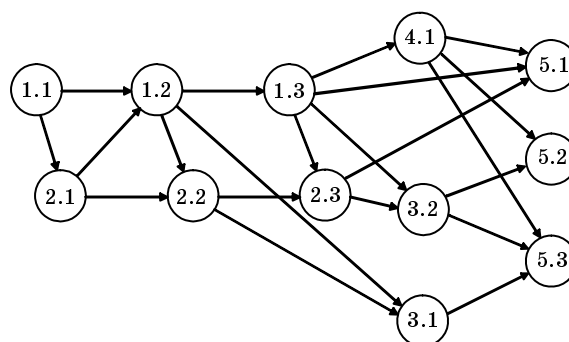
1.3 – РЭС технически исправна основным и резервным полуккомплектами аппаратуры и находится в режиме проведения СУ;

2.1 – РЭС технически исправна одним полуккомплексом аппаратуры и находится в режиме дежурства;

2.2 – РЭС технически исправна одним полуккомплексом аппаратуры и находится в режиме подготовки к проведению СУ;

2.3 – РЭС технически исправна одним полуккомплексом аппаратуры и находится в режиме проведения СУ;

3.1 – РЭС находится в режиме подготовки к СУ и произошел отказ;



■ Рис. 1. Ориентированный граф процесса подготовки и проведения сеанса управления

3.2 – РЭС находится в режиме проведения СУ и произошел отказ;

4.1 – РЭС находится в режиме проведения СУ и произошла нештатная ситуация;

5.1 – РЭС выполнила программу СУ без замечаний;

5.2 – РЭС выполнила программу СУ с замечаниями;

5.3 – РЭС не выполнила программу СУ.

При построении графа принят ряд допущений, соответствующих условиям применения современных автоматизированных РЭС космических комплексов:

– РЭС работает в непрерывном режиме эксплуатации;

– состояния РЭС, связанные с послесеансной обработкой информации, не влияют на исход СУ и поэтому не формализуются;

– к отказам аппаратуры РЭС относятся только отказы, обнаруживаемые СКТС, в противном случае они относятся к нештатным ситуациям;

– СТСК обнаруживает отказ практически мгновенно;

– наличие нештатной ситуации обнаруживается только в режиме применения, когда РЭС перестает выполнять штатные задачи СУ.

Содержанием математической модели СУ является описание состояний графа и переходов между ними. Исходы СУ описываются состояниями 5.1, 5.2, 5.3, соответствующими СУБЗ, СУЗ и НСУ. Задавая различные условия и вероятности переходов между состояниями (для переходов, выходящих из каждой вершины, должно выполняться условие полноты группы событий), определяются вероятности попадания процесса в состояния, соответствующие различным исходам СУ. В результате аналитически (при аналитическом описании всех вероятностей переходов в ориентированном графе) или методом статистических испытаний (для входного потока, каждый элемент которого соответствует одной реализации СУ) определяются вероятности различных исходов СУ: $P_{СКБЗ}$, $P_{СУЗ}$, $P_{НСУ}$.

При использовании метода статистических испытаний направления переходов между состояни-

ями определяются с помощью датчика случайных чисел с заданными (для фиксированных исходных данных) характеристиками, а результирующие вероятности исходов определяются в виде: $P_X = N_X/N_0$, где $X = \{СУБЗ, СУЗ, НСУ\}$ – вид исхода; N_X – число реализаций, в которых имел место исход X ; N_0 – общее число реализаций, полученных в процессе моделирования для фиксированных исходных данных.

Вероятностные автоматные модели позволяют формализовать процесс проведения СУ для наземной РЭС заданного конкретного типа и учитывать динамику выполнения программы СУ вплоть до отдельных операций управления КА. Условиями, определяющими адекватность описания процесса проведения СУ вероятностными автоматными моделями, являются:

- наличие представительных выборок статистической информации по результатам эксплуатации моделируемой РЭС, позволяющей определить с требуемой достоверностью численные значения элементов стохастических матриц переходов;

- ориентация планируемых модельных экспериментов на исследование конкретного типа РЭС с учетом особенностей ее аппаратного состава и реализуемой технологии управления КА;

- конкретизация требований к описанию содержания и динамических процессов СУ, не допускающая представления СУ в виде однородного интервального события.

Содержание автоматного моделирования информационного взаимодействия РЭС и КА состоит в представлении РЭС, проводящей СУ, в виде некоторого конечного автомата, алгоритм функционирования которого учитывает логику и содержание выполняемых в ходе СУ операций управления КА. Учитывая случайный характер возможных отказов аппаратуры и нештатные ситуации в ходе СУ, описание алгоритма функционирования конечного автомата производится в терминах конечных вероятностных автоматов [8].

Можно выделить следующие особенности представления СУ моделями конечных автоматов:

- изменение значения выхода наступает только после изменения состояния автомата – функция выхода не зависит явно от входного сигнала;

- из множества возможных состояний автомата можно выделить одно или несколько начальных состояний, из которых автомат начинает функционировать при подаче входного слова;

- переход автомата из одного состояния в другое при фиксированном входном символе осуществляется неоднозначным образом, причем эта неоднозначность может быть задана в виде некоторого распределения вероятностей на множестве возможных переходов;

- изменение состояний и выходных символов автомата под воздействием входных символов происходит в дискретные моменты автоматного времени, причем интервал дискретизации выбран так,

чтобы обеспечить однозначное разрешение событий моделируемого СУ.

В соответствии с перечисленными особенностями РЭС определяется как асинхронный нестрогий инициальный вероятностный конечный автомат Мура и формализуется упорядоченной совокупностью: $S = \{A, Q, X, Q_0, M, \Psi\}$, где Q, A, X – конечные алфавиты внутренних состояний, входных и выходных символов автомата соответственно; $Q_0 \in Q$ – подмножество начальных состояний автомата; M – множество квадратных стохастических матриц переходов, определяемых входными символами автомата; Ψ – функция выхода автомата.

Функционирование конечного автомата рассматривается в дискретные моменты времени t_0, t_1, t_2, \dots , называемые тактами функционирования и имеющими нумерацию $0, 1, 2, \dots$ автоматного времени. Моменты изменения автоматного времени привязаны к дискретным операциям информационного взаимодействия РЭС и КА в ходе СУ.

Алфавит внутренних состояний автомата Q определяется возможными оперативнотехническими состояниями РЭС при проведении СУ. Под оперативнотехническим состоянием РЭС понимается ее техническое состояние в условиях выполнения конкретной операции технологического цикла управления КА, определяемое принятой технологией управления КА и проведения СУ. Объем внутреннего алфавита задается декартовым произведением: $Q = Q_1 \times Q_2$, где Q_1 – конечное множество состояний, характеризующих способность передачи КПИ на КА; Q_2 – конечное множество состояний, характеризующих режим передачи КПИ на КА.

Для упрощения описания алгоритма функционирования конечного автомата может быть принят ряд допущений:

- 1) РЭС начинает проведение СУ полностью исправной;

- 2) выход из строя нерезервируемых элементов РЭС и воздействие внешних факторов моделируется неработоспособными состояниями РЭС;

- 3) все управляющие воздействия (элементы КПИ), передаваемые с РЭС на КА, имеют равную значимость.

Данные допущения позволяют ограничить объем множества Q_1 и Q_2 следующими элементами – состояниями:

- множество Q_1 :

- 1) РЭС работоспособна;

- 2) РЭС неработоспособна;

- множество Q_2 :

- 1) РЭС находится в режиме ожидания связи с КА;

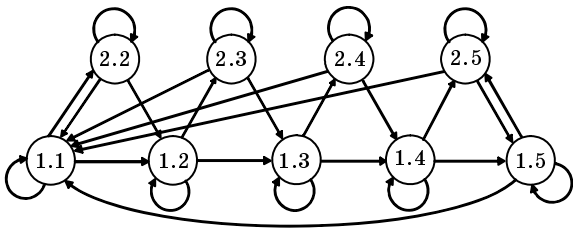
- 2) РЭС вошла в связь с КА на несущей частоте;

- 3) РЭС вошла в режим автосопровождения;

- 4) РЭС вошла в режим синхронизации;

- 5) РЭС в режиме передачи КПИ.

Граф состояний автоматной модели РЭС управления КА, выполненный на основе элементов мно-



■ Рис. 2. Граф состояний автоматной модели РЭС

жеств Q_1 и Q_2 , показан на рис. 2. Вершины графа обозначаются номерами состояний РЭС i, j из множества $Q = Q_1 \times Q_2$, где индексы i и $j, i = 1, 2, j = 1, \dots, 5$, определяются номерами состояний из множеств Q_1 и Q_2 соответственно.

Входной алфавит A определяется, исходя из следующих соображений. Переходы РЭС из одного состояния в другое задаются выполнением элементов программы СУ (передачей на КА КПИ) и операций взаимодействия с КА (захват, автоспровождение, прием ИОК). Моменты появления этих событий асинхронны и имеют вероятностный характер. В целях обобщения особенностей программ различных СУ и сглаживания разброса времени вхождения в связь с КА переходы автоматной модели из одного состояния в другое принимаются синхронными. С этой целью временной интервал СУ моделируется совокупностью временных отсчетов автоматного времени, длительность каждого из которых соответствует определенному промежутку СУ. Объем входного алфавита A выбирается таким образом, чтобы описать все операции управления КА, выполняемые РЭС в ходе моделируемого СУ, каждая из которых представляется событием, привязанным к регулярной временной последовательности t_0, t_1, t_2, \dots , задающей автоматное время. Структура входного слова, составленного из символов входного алфавита, соответствует содержанию моделируемого СУ.

Выходной алфавит модели X определяется, исходя из целевой задачи – вычисления вероятности выполнения задач СУ без замечаний. В принятом графовом представлении успешная работа РЭС управления КА моделируется нахождением ее в состоянии 1.5. Очевидно, что степень выполнения задач СУ пропорциональна времени нахождения РЭС в этом состоянии. Следовательно, элементом, представляющим практический интерес на выходе автомата, является факт его нахождения в состоянии 1.5 на момент очередного временного отсчета. Таким образом, выходной алфавит модели образует множество вида $X = \{x_1, x_2\}$, где элемент x_1 представляет собой событие, соответствующее нахождению РЭС в штатном режиме передачи КПИ, а элемент x_2 представляет событие, соответствующее нахождению РЭС в одном из остальных состояний.

Множество начальных состояний Q_0 определяет совокупность состояний, из которых возможно

начало функционирования автомата при подаче на него входного слова. Специфика модели и принятые допущения задают следующий состав множества начальных состояний: $Q_0 = \{q_{11}\}$, где q_{11} – состояние 1.1, соответствующее работоспособному состоянию РЭС и ее нахождению в режиме ожидания связи с КА.

Множество стохастических матриц M переходов в общем случае представляет собой объединение двух множеств: множества матриц переходов штатного функционирования РЭС и множества стохастических матриц переходов нештатного функционирования РЭС. Смысл стохастических матриц переходов заключается в следующем. Пусть автомат находится в некотором состоянии $(i, j)^{(r)}$, в которое он перешел за предыдущие r тактов работы. Тогда переход автомата на $(r + 1)$ -м такте работы в новое состояние осуществляется с вероятностями, отвечающими соответствующей (ij) -й стохастической матрице переходов. Множество возможных переходов для каждого состояния образует полную группу событий.

Функция выхода $Y: A \times Q \rightarrow X$ определяет выходной эффект в зависимости от входного воздействия и внутреннего состояния автомата и связывает тем самым вероятность успешного выполнения СУ с типом СУ и условиями его проведения (совокупностью действий дежурного расчета РЭС и действующих внутренних и внешних воздействий).

При задании характеристик конечного вероятностного автомата S проводится моделирование СУ космическим аппаратом методом статистических испытаний. Каждая реализация формируется по результатам отработки одного входного слова (совокупности воздействий), описывающего заданный тип СУ, и соответствует результату его выполнения. Ансамбль реализаций образуется в результате проявления вероятностных свойств автомата, которые описываются множеством стохастических матриц переходов M .

Поскольку штатному выполнению СУ соответствует нахождение конечного автомата в состоянии 1.5, вероятности СУБЗ, СУЗ и НСУ определяются по продолжительности пребывания автомата в этом состоянии с усреднением по автоматному времени: $T_{1.5} = N_{1.5}/N$, где $N_{1.5}$ – количество временных тактов, во время которых автомат находится в состоянии 1.5; N – общее число временных тактов описания СУ.

Исходя из принятой технологии управления КА и особенностей выполнения операций управления в ходе моделируемого СУ задаются граничные значения T_I и T_{II} для величины $T_{1.5}$, позволяющие отнести данную реализацию к тому или иному исходу: СУБЗ при $T_{1.5} \geq T_I$, СУЗ при $T_{II} \leq T_{1.5} < T_I$, НСУ при $T_{1.5} < T_{II}$. Для конечного автомата, граф состояний которого изображен на рис. 2, при нормальном функционировании РЭС в отсутствии в ходе СУ отказов и нештатных ситуаций выполняется: $T_{1.5} = N - 4$, следовательно, $T_I \leq (N - 4)/N$.

В процессе имитационного моделирования методом статистических испытаний направления переходов в графе состояний конечного автомата определяются с помощью датчиков случайных чисел на основании стохастических матриц переходов для фиксированных исходов данных. Результирующие вероятности исходов определяются по числу реализаций N_X , в которых имел место исход $X = \{СУБЗ, СУЗ, НСУ\}$, а также по общему числу реализаций N_0 . За счет задания входного слова и описания алгоритма работы конечного автомата может быть точно формализована программа работы любого СУ, и основной задачей обеспечения адекватности имитационного моделирования, как и в случае использования вероятностных моделей на основе ориентированных графов, является наличие представительных исходных данных для задания элементов стохастических матриц переходов.

Сформулированные подходы к математическому моделированию информационного взаимодействия наземной РЭС с КА в ходе СУ позволяют разработать комплекс математических моделей для исследования процессов информационного взаимодействия наземной РЭС и КА в составе НКУ. В зависимости от целей и задач моделирования может быть выбран математический аппарат для формализации проведения некоторого обобщенного СУ, как однородного события, или конкретного содержания заданного типа СУ. При этом моделирование может проводиться как в интересах анализа устойчивости РЭС (как элемента контура управления КА) в различных условиях функционирования, в том числе при возникновении нештатной

ситуации, так и в интересах поиска уязвимых мест в технологии управления и информационного обмена с КА. Для получения исходных данных по используемым при моделировании вероятностным характеристикам процессов подготовки и проведения СУ необходим анализ статистических данных по результатам эксплуатации штатных РЭС; могут быть также рекомендованы экспертные методы.

Литература

1. Покровский Б. А. Космос начинается на земле. М.: Патриот, 1996. 494 с.
2. Кравец В. Г. Автоматизированные системы управления космическими полетами. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
3. Разыграев А. П. Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. М.: Машиностроение, 1977. 469 с.
4. Крохин В. В. Информационно-управляющие космические радиопередачи. Ч. 1 / НИИЭИР. М., 1993. 229 с.
5. Галантерник Ю. М., Гориш А. В., Калинин А. Ф. Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами / МГУЛ. М., 2003. 200 с.
6. Смирнов Д. А., Худяков Г. И., Шипилов М. М. Телекоммуникационные сети и информационно-управляющие системы: Словарь-справочник / СПбГУТ. СПб., 2001. 208 с.
7. Алексеенко А. Я., Адерихин И. В. Эксплуатация радиотехнических систем. М.: Воениздат, 1980. 223 с.
8. Карпов Ю. Г. Теория автоматов. СПб.: Питер, 2003. 208 с.