

А. В. Золотов И. В. Фурманов

УПРАВЛЯЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ

СЛОЖНЫХ
КОРАБЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ



ПРЕДИСЛОВИЕ

Рецензенты: кафедра автоматики ЛИВТа (д-р техн. наук С. А. Попов),
инж. Б. А. Горбунов

Золотов В. В., Фрейдзон И. Р.
3-80 Управляющие комплексы сложных корабельных систем:
Учебное пособие.—Л.: Судостроение, 1986.—232 с., ил.
ИСБН

Рассмотрены принципы построения и основы проектирования управляющих комплексов сложных корабельных систем на базе микропроцессорных средств обработки информации. Излагаются методы расчета характеристик функционирования и определения параметров устройств мультипроцессорных систем. Приводятся примеры решения задач с помощью ЭВМ индивидуального пользования.

Предназначена для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электрооборудование судов», а также может быть полезной инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием сложных систем управления техническими объектами.

3 3605030000—058
048(01)—86 42—86 39.46

© Издательство «Судостроение», 1986 г.

Появление надежных, дешевых, малогабаритных микропроцессорных средств обработки информации определило переход к созданию четвертого поколения вычислительных машин, а также принципиально новых систем управления техническими объектами в промышленности и транспорте.

В области судостроения воздействие новой элементной базы оказывается особенно заметным. Микропроцессорные средства позволяют отойти от традиционной организации систем управления, основанной на жестких пространственных связях между приборами и устройствами систем. Единый способ преобразования и передачи информации в микропроцессорных системах дает возможность построить управляющие комплексы сложных корабельных систем с временным разделением общих каналов связи, обеспечивающих информационное взаимодействие корабельных объектов. Это освобождает корабль от всех специализированных линий связи между отсеками, позволяет резко сократить общую протяженность кабеля и отделить проектирование и разработку систем управления от проектирования самого корабля.

Задачи проектирования управляющих комплексов сложных корабельных систем, построенных на базе микропроцессорных средств, являются сравнительно новыми для корабельной автоматики и требуют привлечения некоторых специальных методов, применяемых в других областях (теории вычислительных систем, системного проектирования, автоматизации проектирования и др.). Это определило содержание настоящего пособия, в котором рассматриваются задачи и принципы построения управляющих комплексов сложных корабельных систем и кратко излагаются методы расчета и исследования, используемые в процессе их проектирования.

В основу книги положен курс лекций, читаемый авторами, в Ленинградском электротехническом институте им. В. И. Ульянова (Ленина) студентам специальности «Электрооборудование судов» и слушателям факультета повышения квалификации инженеров. Главы 2, 3 написаны И. Р. Фрейдзоном, главы 5, 6, 7 —

В. В. Золотовым, главы 1, 8 — совместно И. Р. Фрейдзоном и В. В. Золотовым, глава 4 — Р. И. Фрейдзоном. Структурные схемы, приведенные в главе 3, разработаны А. В. Крыловым.

Авторы выражают благодарность студентам С. Ю. Ерофееву, Н. В. Жабиной и В. В. Ваташинову за участие в подготовке программ и выполнении расчетов на ЭВМ, а также Н. Е. Елисеевой, Г. Д. Меднис и В. А. Григорьеву за помощь, оказанную при оформлении рукописи.

ВВЕДЕНИЕ

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АСУ — автоматизированная система управления	ПЛИ — программируемый параллельный интерфейс
БИС — большая интегральная схема	ППБУ — полупогружная плавучая буровая установка
БМУ — блок микропрограммного управления	Пр — процессор
БПП — блок приоритетного прерывания	ПрУ — подруливающее устройство
БС — буровое судно	ПСИ — программируемый последовательный интерфейс
ВРШ — винт регулируемого шага	ПУ — пульт управления
ГД — главный двигатель	ПЭВМ — персональная ЭВМ
ГСУ — групповая система управления	Рг — регистр
ГЭУ — главная энергетическая установка	РОН — регистр общего назначения
Д — датчик	СБИС — сверхбольшая интегральная схема
ИМ — исполнительный механизм	СДУ — система динамического удержания
ИО — исполнительный орган	СЛУ — система логического управления
ИС — интегральная схема	СМО — система массового обслуживания
ИФ — интерфейс	СУ — система управления
КС — контроллер связи	СУП — схема ускоренного переноса
КСУ — комплексная система управления	ТС — технические средства
ЛС — линия связи	УК — управляющий комплекс
ЛСУ — локальная система управления	УО — управляющий объект
МП — микропроцессор	УС — устройство связи
МПК — микропроцессорный комплект	УУ — управляющее устройство
МПС — микропроцессорная система	ФКТС — функциональный комплекс технических средств
МПУ — местный пост управления	ЦАП — цифроаналоговый преобразователь
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство	ЦКС — центральная координирующая система
ОМЭВМ — однокристальная микроЭВМ	ЦПУ — центральный пульт управления
ПЗУ — постоянное запоминающее устройство	ЦПЭ — центральный процессорный элемент
ПК — программируемый контроллер	ЭЭС — электротехническая система

Современное судно — это сложный многофункциональный автономный замкнутый человеко-машинный организм, в котором все проблемы должны решаться только собственными средствами без вмешательства и помощи извне, что определяет высокие требования к качеству управления и надежности систем. Технические средства, обеспечивающие возможность автономного существования корабля, образуют сложные системы взаимосвязанных объектов, требующих согласованного управления в условиях интенсивных внешних воздействий. Это обуславливает сложность задач управления, эффективное решение которых возможно лишь при использовании самых современных средств и методов управления.

Успехи в области вычислительной техники открывают перед разработчиками корабельных систем управления много новых возможностей.

Высокая производительность микропроцессорной техники в сочетании с малыми габаритами и стоимостью дают возможность использовать на корабле сети микро-ЭВМ для обработки информации о состоянии корабельных объектов и управления сложными системами. Такие управляющие комплексы обеспечивают нормальное протекание технологических процессов в управляемых объектах, поддержание безаварийного и безопасного их функционирования и дают возможность управлять движением корабля и всеми необходимыми для этого техническими средствами без непосредственного участия обслуживающего персонала.

Построение управляющих комплексов сложных корабельных систем, ориентированных на широкий класс судов различного назначения, требует разработки унифицированных магистральных систем связи, создания и совершенствования элементов измерительно-информационных систем, стандартизации и унификации интерфейсов на всех уровнях.

В основу проектирования таких комплексов могут быть положены следующие принципы: иерархичность структуры системы; централизация вычислительного процесса на уровне управления

распределением ресурсов вычислительной системы; децентрализация на уровне первичной обработки измерительной информации от датчиков; фильтрация и сжатие ее при передаче на более высокий уровень обработки и при решении задач локального регулирования и управления; модульность и относительная независимость программного обеспечения локальных подсистем и общего программного обеспечения; унификация аппаратуры, программного обеспечения и интерфейсов. Главное преимущество подобных систем состоит в том, что функциональное назначение системы и возможность ее использования для различных судов достигается в основном программными средствами. Соблюдение указанных принципов обеспечивает широкие возможности применения опыта, приобретенного в других областях автоматизации процессов управления техническими средствами и технологическими процессами.

РАЗДЕЛ I ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ СЛОЖНЫХ КОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К УПРАВЛЯЮЩИМ КОМПЛЕКСАМ СЛОЖНЫХ КОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

§ 1.1. Основные понятия об управляемом комплексе сложных корабельных систем

Являясь автономным подвижным объектом, корабль независимо от его назначения оснащен оборудованием, выполняющим ряд типовых функций: обеспечения движения, маневрирования и стабилизации координат корабля как подвижного объекта; снабжения энергией различных видов корабельных потребителей; поддержания условий обитаемости экипажа и функционирования корабельного оборудования; борьбы за живучесть корабля путем непосредственного подавления или нейтрализации внутренних или внешних возмущений (пожар, заполнение), представляющих при их развитии угрозу гибели корабля или потери его наиважнейших эксплуатационных качеств.

Совокупность корабельного оборудования, предназначенного для выполнения указанных функций, в соответствии с установленной ГОСТ 19176—79 терминологией называют техническими средствами (ТС) корабля. К ТС корабля относятся механизмы главной электроэнергетической системы (ЭЭС), вспомогательной энергетической установки (ВЭУ), источники выработки других видов энергии, двигатели рулевые, устройства систем кондиционирования воздуха, вентиляции, пожаротушения, аварийного водоотлива и другие общекорабельные механизмы, агрегаты и установки. На различных специализированных судах к ТС относят также технологическое оборудование средств целевого назначения корабля. Например, на промысловых судах — это средства погрузки, выгрузки, хранения грузов, добычи и переработки сырья.

ТС корабля представляют собой сложные системы, содержащие разнообразные механизмы, устройства и агрегаты (10^2 — 10^4 в зависимости от типа корабля). Отдельные устройства ТС корабля не имеют полной автономности. Связанные единством технологических процессов преобразования энергии, вещества или информации они образуют функциональные комплексы технических средств (ФКТС), требующие специально организованных внешних воздействий для достижения предписанных целей функционирования.

Необходимость согласованного управления многочисленными объектами, входящими в состав различных ФКТС корабля, рабо-

тающих в условиях интенсивных внешних воздействий, имеющих случайный характер, определяет сложность задач управления. Для управления функционально связанными объектами ТС корабля используются управляющие комплексы (УК), каждый из которых представляет собой совокупность устройств и систем, осуществляющих сбор и обработку информации о состоянии управляемых объектов и внешней среды, выработку решений о воздействии на объекты и их исполнение. УК обеспечивают нормальное протекание технологических процессов в управляемых объектах, безаварийность и безопасность их функционирования. Требования к составу функциональных задач и конструктивному исполнению приборов УК ТС корабля в значительной степени определяются специфическими условиями эксплуатации корабельного оборудования, связанными с особенностью корабля как автономного объекта, такими, как ограниченные материальные и энергетические ресурсы на корабле, ограниченные возможности технического обслуживания и ремонта, тяжелые последствия аварий, возникающих из-за неисправностей ТС корабля. Эти основные условия эксплуатации, в свою очередь, определяют требования: включения в состав УК ТС корабля развитых систем контроля, защиты и технического диагностирования основного оборудования ТС и систем управления; обеспечения оптимальных процессов в управляемых объектах с целью экономии материальных и энергетических ресурсов; унификации средств управления и другие.

В УК ТС корабля используются различные способы управления. Различают дистанционное управление, осуществляемое оператором путем воздействия на органы управления, программное управление, алгоритм которого предписывает изменять управляемые параметры и процессы в заранее заданной последовательности, и автоматическое регулирование с алгоритмом, предусматривающим воздействия на управляемый объект, которые формируются по результатам сравнения истинного и предписанного значений управляемой величины с целью поддержания ее на заданном уровне.

Органы управления ТС располагаются либо на пультах управления в различных помещениях судна, либо на ЦПУ — центральном пульте управления комплексной или групповой судовой системы управления. ЦПУ устанавливается или в главном командном посту, или в специальном посту, или в рубке.

В качестве управляющих устройств используются как специализированные вычислительные устройства, корректирующие работу отдельных агрегатов по одному или нескольким параметрам, так и универсальные вычислительные средства, позволяющие проводить управление и оптимизацию по многим параметрам. Автоматизация дает возможность отказаться от ночных и вечерних вахт машинной команды, приблизив условия ее труда и быта к береговым.

По «Правилам классификации и постройки морских судов»

Регистра СССР если системы и устройства автоматизации удовлетворяют изложенным в этих правилах требованиям и судно может эксплуатироваться без постоянной вахты в машинном отделении и в ЦПУ, то ему присваивается знак автоматизации А1.

Оснащение кораблей УК, обеспечивающими управление в соответствии с требованиями класса автоматизации А1, дает возможность управлять движением корабля и всеми необходимыми для этого ТС одному человеку без привлечения обслуживающего персонала. При этом оператор в ЦПУ осуществляет лишь наблюдение за ходом процессов и привлекается к участию в управлении при возникновении каких-либо отклонений от нормальных режимов работы.

На судах с периодическим обслуживанием машинного отделения, но с постоянной вахтой в ЦПУ (знак автоматизации А2) все оборудование, установленное в машинном отделении, должно иметь конструкцию, обеспечивающую его работу в предусмотренных эксплуатационных режимах без обслуживания в течение 12—24 ч.

Согласно «Правилам классификации и постройки судов» при автоматизации управления главными и вспомогательными механизмами и системами в зависимости от наличия обслуживающего персонала и порядка несения вахты должны быть предусмотрены: при постоянной вахте в машинном отделении — управление, контроль, защита и сигнализация; при постоянной вахте в ЦПУ — устройства дистанционного управления, защиты, контроля, автоматического переключения и аварийно-предупредительной сигнализации; при отсутствии постоянной вахты в машинном отделении и ЦПУ — системы автоматического и дистанционного управления, устройства централизованного контроля, защиты, сигнализации и регистрации аварийных отклонений управляемых и контролируемых параметров.

При степени автоматизации, соответствующей А1 и А2, численность обслуживающего персонала на судне должна быть достаточной для периодического технического обслуживания автоматических систем через промежутки времени, рекомендуемые изготовителями оборудования, для управления судовыми установками с местных постов в аварийных случаях до прихода судна в ближайший порт и для выполнения работ, связанных с использованием спасательных средств, обеспечением живучести судна и борьбой с пожаром.

На судах с круглосуточным несением вахты машинной командой согласно Правилам Регистра СССР должны быть автоматизированы: работа отдельных подсистем; включение резервных насосов, компрессоров; поддержание постоянных давления и температуры масла, охлаждающей воды и т. д. Контроль за работой систем и механизмов должен быть централизован в открытых ЦПУ, расположенных в машинном отделении. Дистанционное автоматизированное управление главным двигателем выносится в рулевую рубку или производится из ЦПУ.

При круглосуточном несении вахты только в ЦПУ, размещенном в отдельном звукоизолированном помещении с системой кондиционирования воздуха, оператор осуществляет все необходимые операции по управлению и контролю без выхода из ЦПУ.

На судах с высокой степенью автоматизации (A1) в зависимости от надежности работы систем возможно отсутствие вахт в машинном отделении и ЦПУ в течение 8 ч (ночная вахта), 16 ч (вечерняя и ночная вахта), 24 ч (круглосуточная вахта). На этих судах оператор осуществляет лишь периодический контроль, а обычную вахту в ЦПУ несут только при маневрировании, проходе узкостей, входе и выходе из порта и т. д.

§ 1.2. Структура комплексной системы управления техническими средствами корабля

Комплексной системой управления (КСУ) называется единая система, обеспечивающая управление всеми техническими средствами корабля.

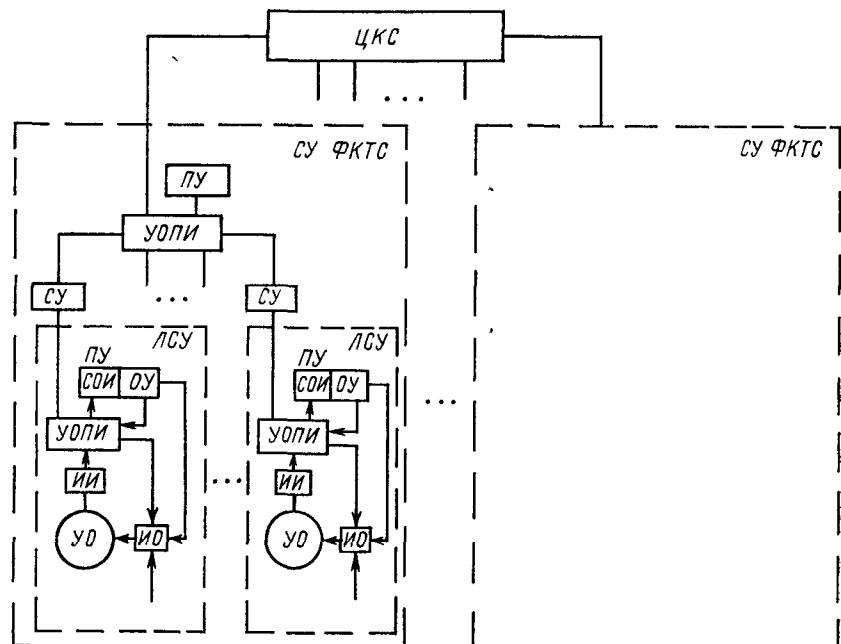


Рис. 1.1. Структура комплексной системы управления ТС корабля

Сложность ТС корабля и необходимость согласованного воздействия на управляемые объекты определяют требования к функциональной и технической структуре комплексной системы управления (рис. 1.1). В ее составе можно выделить подсистемы, реализующие различные функциональные задачи управ-

ления ТС корабля: локальные системы управления (*ЛСУ*), системы управления функциональными комплексами ТС (*СУ ФКТС*), центральную координирующую систему (*ЦКС*). *ЛСУ* является составной частью управляемого объекта (*УО*) и обеспечивает возможность нормального протекания в нем технологических процессов, безаварийность функционирования и осуществления местного управления объектом. *СУ ФКТС* обеспечивает управление совокупностью объектов, предназначенных для выполнения одной из типовых функций: движения и маневрирования корабля, обеспечения энергией, поддержания нормальных условий обитаемости и др. Управление *ФКТС* корабля осуществляется через *ЛСУ* отдельными объектами. *ЦКС* обеспечивает координированное управление ТС корабля через системы управления отдельными *ФКТС* и *ЛСУ*.

В состав *ЛСУ* входят: *УО*, нуждающийся в специально организованных внешних воздействиях, осуществляемых с помощью исполнительных органов (*ИО*) по командным сигналам управления; источники информации (*ИИ*) — устройства, преобразующие информацию о состоянии объекта или внешней среды в сигнал установленного уровня, пригодный для дальнейшей обработки в системе управления; устройства обработки и передачи информации (*УОПИ*), осуществляющие сбор и обработку информации о состоянии объекта и внешней среды, выработку решений о воздействии на объект и передачу сигналов управления. Кроме того, в *ЛСУ* может входить пульт управления (*ПУ*), на котором размещаются органы управления (*ОУ*) и средства отображения информации (*СОИ*), обеспечивающие оператору возможность управления соответствующим объектом.

Система управления *ФКТС* корабля включает в себя *ЛСУ*, *УОПИ* и согласующие устройства, обеспечивающие возможность обмена информацией между локальными системами управления. В состав *СУ ФКТС*, как правило, входит *ПУ*, на котором располагаются устройства ввода-вывода информации, позволяющие осуществлять оперативный контроль процессов и состояние объектов функциональных комплексов, при необходимости корректировать процессы управления или осуществлять дистанционное управление. В состав *ЦКС* входят устройства, обеспечивающие выдачу информации о состоянии ТС корабля, выработку управляющих команд в системы управления функциональными комплексами или *ЛСУ* и рекомендаций операторам по управлению совокупностью *ФКТС*.

Состав устройств и структура систем обработки и передачи информации, образующих УК сложных корабельных систем с большим числом функционально взаимосвязанных объектов, существенно различаются в зависимости от типа корабля, уровня автоматизации ТС, используемой элементной базы и других факторов.

Исторически системы управления корабельным оборудованием развивались от простейших систем местного управления объектами ТС, расположеннымными в помещениях с постоянной вахтой. Автоматизировались в первую очередь функции управления, требующие

непрерывного контроля состояния и воздействия на УО. Учет функциональной взаимосвязи объектов обеспечивался вахтенным персоналом путем непосредственного воздействия на исполнительные органы управляемых объектов. ТС корабля при такой организации управления представляли собой совокупность автономных автоматизированных систем (рис. 1.2). Системы, воплощающие принцип децентрализованного управления, характеризуются простотой технической реализации, невысокими требованиями к про-

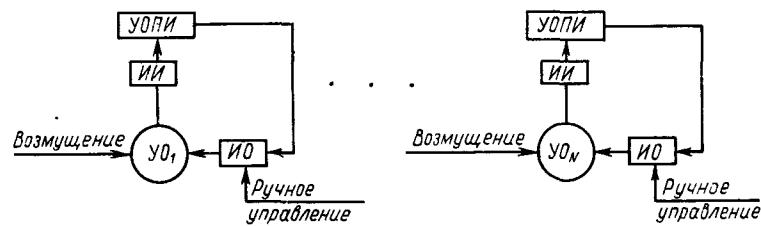


Рис. 1.2. Децентрализованная структура системы управления

изводительности устройств обработки информации. Недостатком рассматриваемого способа построения систем управления ТС корабля является трудность учета функциональных связей между объектами.

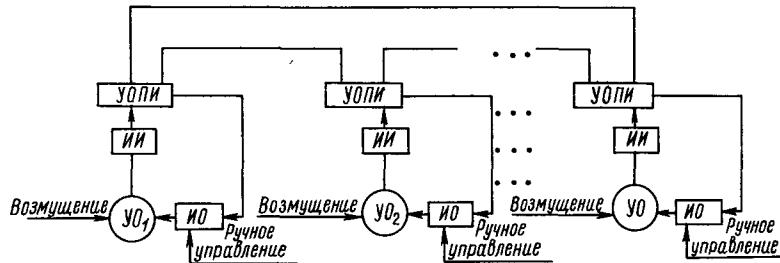


Рис. 1.3. Централизованная рассредоточенная структура системы управления

По мере повышения требований к качеству управления ТС корабля и совершенствования средств управления все более автоматизируются функции, связанные со взаимодействием объектов. Это отражается на структуре системы, для которой становятся характерными связи между ранее автономными подсистемами (рис. 1.3). Управляющие воздействия на каждый объект в такой системе вырабатываются на основе информации о состоянии всей совокупности управляемых объектов, что характерно для централизованного управления. В то же время в такой системе отсутствует локализация процессов обработки информации в едином устройстве. Алгоритм управления состоит из совокупности взаимо-

действующих алгоритмов, реализованных совокупностью взаимосвязанных устройств. Такая структура получила название централизованной рассредоточенной.

Достоинством рассматриваемой структуры является возможность реализации процессов информационного взаимодействия систем, что позволяет обеспечивать оптимальные режимы работы совокупности объектов, входящих в управляемый комплекс. Недостатками являются сложность информационных процессов в связи с необходимостью обмена данными между системами и большая протяженность каналов связи из-за территориальной рассредоточенности управляемых объектов.

Управление функционально связанными объектами проще осуществлять в системах с централизованной структурой (рис. 1.4).

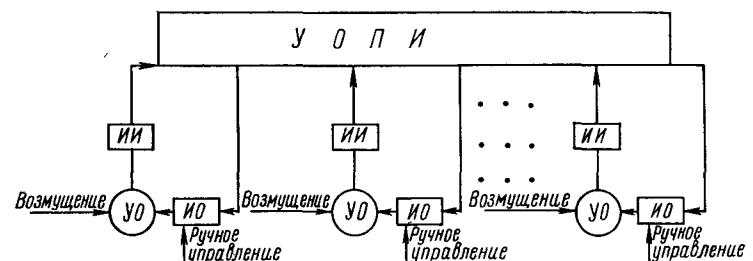


Рис. 1.4. Централизованная структура системы управления

В таких системах вся обработка информации об УО и формирование управляющих воздействий производится одним устройством. Это позволяет достаточно просто реализовать процессы информационного взаимодействия, создает принципиальную возможность оптимального управления функциональным комплексом объектов, исключает необходимость в пересылках данных между системами. Однако такие недостатки централизованной структуры управляющего комплекса, как высокие требования к производительности и надежности устройств обработки информации, низкая живучесть и большая суммарная протяженность каналов связи существенно ограничивают применение таких систем для управления ТС корабля.

С увеличением сложности управляемых объектов и задач управления ими, приводящими к резкому возрастанию объемов перерабатываемой информации и сложности алгоритмов управления, возникает противоречие между требованиями централизации управления, наилучшим образом обеспечивающей возможность согласованного принятия решений, и ограниченной производительностью и надежностью устройств обработки информации. Это противоречие может быть устранено при использовании иерархической структуры управляющего комплекса (рис. 1.5).

При иерархической организации УК представляет собой многоуровневую систему взаимодействующих устройств (подсистем), каждое из которых обрабатывает ограниченный объем информации. Взаимодействие подсистем строится таким образом, что при относительной независимости функционирования подсистем одного уровня действия их подчиняются командам систем более высокого уровня. Подсистемы высших уровней осуществляют координацию работы систем нижерасположенных уровней.

Система с иерархической структурой позволяет сосредоточить управление объектами в единой точке, т. е. обеспечивает централизацию, необходимую для согласованного управления. В то же

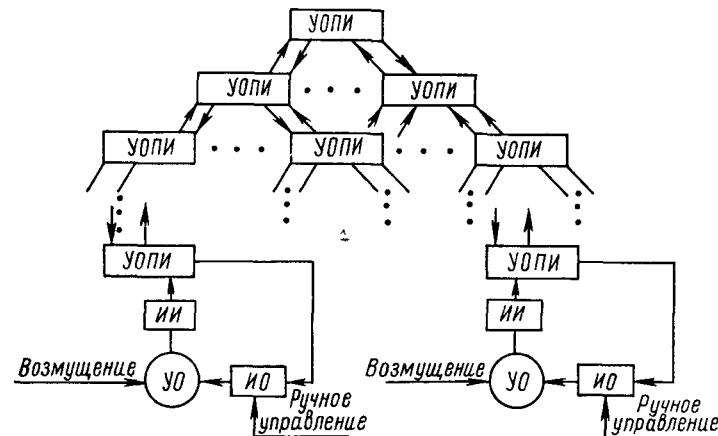


Рис. 1.5. Иерархическая структура системы управления

время для технической реализации системы не требуются устройства высокой производительности, так как каждая подсистема обрабатывает ограниченный объем информации, определяемый исходя из возможностей ее устройств. Кроме того, использование иерархической структуры обеспечивает достаточно высокие показатели надежности и живучести систем при ограниченной надежности применяемых в них устройств, что связано с относительной автономностью функционирования ее частей и возможностью передачи функций обработки информации отказавшего устройства другим подсистемам. Все эти особенности определяют иерархическое построение как основной принцип структурной организации УК сложных корабельных систем.

Реализация этого принципа в комплексных системах управления ТС корабля, построенных на микропроцессорной элементной базе, позволяет решить одну из важнейших проблем автоматизации корабельных объектов — сокращения протяженности кабельных линий связи.

Общая протяженность кабельных линий современного корабля достигает 200 тыс. м и более. При этом около 75 % кабеля исполь-

зуется для передачи информации между блоками отдельных систем или для межсистемного обмена информацией.

Практика показывает, что всякая модернизация корабля требует перекладки или замены большей части кабелей, обеспечивающих передачу информации и управление оборудованием. Каждый новый прибор, включаемый в систему управления, как правило, требует прокладки специального кабеля.

В связи с высокой стоимостью и трудоемкостью работ по прокладке кабельных трасс на корабле возникает задача построения комплексных систем управления, использующих для межблочного и межсистемного обмена информацией общие магистрали, связы-

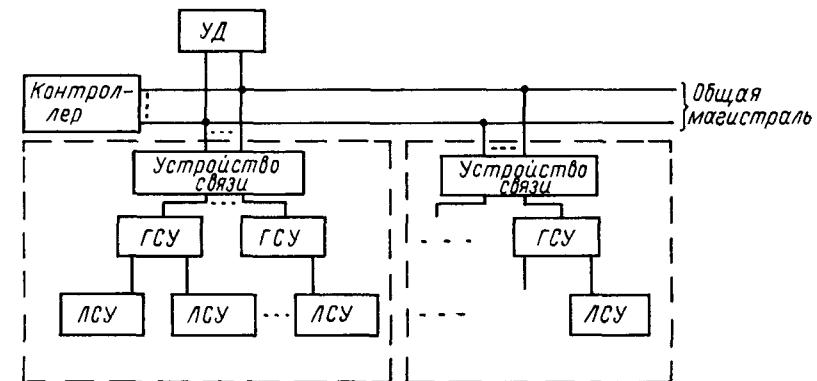


Рис. 1.6. Структура комплексной системы управления с общей магистралью

вающие источники и потребители информации всего корабля. Возможность построения таких систем появляется благодаря использованию микропроцессорной элементной базы, обеспечивающей единый способ представления, обработки и передачи информации, создающей предпосылки для унификации средств обработки и передачи данных в системах управления.

Структура комплексной системы управления ТС корабля с общей магистралью может быть различной в зависимости от принятого способа передачи данных по магистрали.

На рис. 1.6 представлен один из возможных вариантов структуры корабельной КСУ с общей магистралью. Магистраль системы включает несколько магистральных кабелей (МК), обеспечивающих резервирование каналов связи. Для поддержания нормального функционирования магистрали в системе предусматривается устройство диагностики (УД), производящее контроль исправности информационных каналов и предоставление свободного МК для передачи информации.

Подключение к магистрали осуществляется через устройства связи (УС), размещаемые в каждом из помещений корабля. УС обеспечивают преобразования, необходимые при передаче информации в магистраль, и прием данных, адресованных расположенным

ным в данном помещении системам. Информация от ЛСУ отдельными объектами и групповыми систем управления (ГСУ) обрабатывается устройствами различных уровней иерархической системы, уплотняется и при необходимости передается через общую магистраль в системы, расположенные в других помещениях корабля.

Такая структура обеспечивает высокую функциональную гибкость системы, так как расширение функций и добавление аппаратуры в ней не связаны с изменением системы передачи данных.

Всякая модернизация системы управления сопряжена лишь с перекладкой коротких участков соединительных кабелей внутри помещений корабля и изменениями в программном обеспечении систем обработки информации.

Опыт проектирования показывает, что принятая структура позволяет повысить оперативную гибкость и живучесть системы. Кроме того, значительный эффект достигается за счет существенного сокращения числа слаботочных кабелей, что позволяет снизить стоимость и время монтажных работ, резко сократить расходы при модернизации корабля.

Другим вариантом построения КСУ является система с кольцевой магистралью (рис. 1.7). В этом случае общая магистраль представляет собой информационные шины, выполненные в виде замкнутого контура, в котором данные передаются всегда в одном направлении. Для обеспечения надежности и живучести системы используются две шины, образующие различные каналы, информация в которых передается в противоположных направлениях. Подключение к магистрали производится таким же образом, как в рассмотренной ранее системе. Принципиальным отличием этой системы от предыдущего варианта является активный характер магистрали, включающей в себя УС, на которые помимо приема и передачи информации от систем управления возлагаются функции ретрансляции по магистрали данных, поступающих от устройств уплотнения информации (УУИ).

Такой принцип построения положен в основу универсальной корабельной системы передачи и распределения цифровой информации UDICON. Эта система рассчитана на передачу данных со скоростью 10 Мбит/с, что обеспечивает квазидновременный обмен цифровой информацией между любым числом источников и потребителей. В системе можно использовать устройства волоконной оптики, что обеспечивает высокую скорость и помехозащищенность передачи информации.

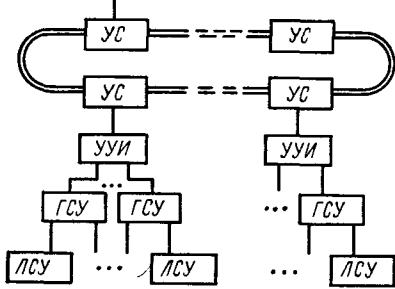


Рис. 1.7. Структура комплексной системы управления с кольцевой магистралью

зить стоимость и время монтажных работ, резко сократить расходы при модернизации корабля.

§ 1.3. Основные задачи и принципы построения управляемых комплексов сложных корабельных систем

Перед УК сложных корабельных систем ставится задача одновременного достижения нескольких целевых установок, определяемых совокупностью комплексируемых объектов. Для оценки качества разрабатываемого комплекса управления необходимо определить систему показателей, учитывающих степень достижения поставленных целей управления. В сложных системах, как правило, не удается в равной степени удовлетворить все предъявляемые к ним требования, что приводит к необходимости соизмерения их значимости и принятия компромиссных решений. Разработка системы показателей требует совместных усилий специалистов как по методике исследований и разработке технических средств, так и по управлению.

Быстрый рост числа судов с одновременной специализацией их на разные применения требует создания не уникальных УК для узкой подгруппы, а наращиваемых, реконфигурируемых и блочно-модульных систем, конструируемых на базе достижений микрэлектроники (БИС и СБИС), микропроцессорных вычислительных устройств, мультиплексных систем связи для внутрисудового электронного оборудования.

Общими принципами разработки УК, обеспечивающими возможность решения поставленных задач, являются следующие: 1) системный подход; 2) многоуровневость описания объекта управления и предъявляемых требований; 3) математическое обоснование принимаемого решения; 4) иерархичность структуры УК и отдельных его подсистем; 5) декомпозиция и агрегирование.

Системный подход, предполагающий проектирование всего УК как единой системы, призван подчинить весь процесс разработки достижению максимальной эффективности проектируемого комплекса в соответствии со сформулированными критериями. На основе системного подхода решаются следующие вопросы разработки: определение общей структуры комплекса; организация взаимодействия между его подсистемами; учет влияния внешней среды; выбор оптимальной структуры; определение необходимого объема и качества информационно-измерительного обеспечения.

Принцип многоуровневого описания является основополагающим в вопросах поиска и принятия решений, составляющих основу процесса проектирования. В соответствии с целями и задачами описания он позволяет: строить модели реальных процессов и явлений различных уровней сложности и точности; строить относительно независимые модели отдельных частей исследуемого процесса; получать практически адекватное описание сложного процесса в виде последовательности различных его моделей или моделей его частей.

Так, выбор законов управления проводится в рамках относительно простых и грубых моделей, в то время как алгоритмизация управления, учет реальных ограничений и оценка его эффектив-

ности требуют более сложных и точных описаний управляемого процесса. Таким образом, использование принципа многоуровневого описания упрощает решение сложных задач.

Разработка автоматизированных систем управления опирается сегодня на достижения в таких областях науки, как оптимальное, адаптивное, стохастическое и логическое управление, идентификация, машинное моделирование. Только количественные оценки исследуемых процессов, получаемые в процессе разработки системы математическим путем, могут быть основанием для принятия определенного проектного решения. В этом состоит принцип математического обоснования.

В основе синтеза законов управления функциональных комплексов ТС корабля должны лежать математические модели динамики УО. Поскольку необходимо построить закон, оптимально удовлетворяющий определенной группе требований, то в модель необходимо включать математическое описание динамики движения всех объектов ТС этого комплекса.

Так, например, при выполнении геофизических исследований судоводительские задачи «движение по курсу» или «движение по профилю» должны решаться с учетом требований геофизики, особенностями которых являются: необходимость удержания судна на заданном курсе при ограничении на скорость рыскания и необходимость удержания судна на заданном профиле при ограничении на скорость выполнения маневра.

Включение в модель динамики непосредственных носителей специальной аппаратуры позволяет представить группу требований в виде строго определенных соотношений на параметры вектора состояния расширенного объекта управления. Этот непростой вопрос имеет различные уровни решения.

На нижнем уровне предъявляемые требования выступают в качестве жестких ограничений, принимая форму математических неравенств, и существенно ограничивают класс управлений, допустимых для решения рассматриваемой задачи. Такие ограничения возникают в условиях, когда известны точные границы изменения некоторых управляющих или управляемых параметров работы ФКТС. В этом случае, как правило, априори неизвестно, существует ли решение поставленной задачи, удовлетворяющее всем указанным требованиям.

На высшем уровне степень выполнения требований определяется не абсолютно, а оценивается относительно путем сравнения одних требований с другими с учетом необходимых затрат на управление. Так, например, если каждое из рассматриваемых требований может быть сведено к минимизации отклонений параметров от оптимальных значений, то подобное сравнение приводит к построению единого критерия качества, в котором отражена вся иерархия предъявляемых требований. В этом случае задача синтеза управления сводится к оптимизации значения критериального функционала и может быть решена методами математической теории управления. Такой способ описания требований более

предпочтителен, так как позволяет получить решение, удовлетворяющее всей совокупности требований.

Таким образом, математическое описание и анализ требований определяют степень возможности и способ их совместного выполнения. На этой базе необходимо установить систему показателей качества для получения компромиссного решения.

Иерархический принцип построения УК предполагает наличие развитой функциональной структуры связей между его подсистемами. Обладая определенной автономностью, отдельные подсистемы в иерархической структуре УК функционируют в соответствии с локальными целями управления. Координирующие системы, расположенные на вышестоящем уровне иерархии, обеспечивают достижение более общих целей, используя для этого различные средства: изменение алгоритма функционирования нижестоящих систем, изменение системы оценок достижения локальных целей, изменение структуры связи подсистем и другие.

Так, например, задачи управления курсом и движением по заданной траектории решает система, состоящая из двух подсистем — управления курсом и формирования курсовых поправок. Независимая работа первой подсистемы решает задачу стабилизации на курсе, а совместная работа обеих подсистем решает различные задачи стабилизации на траектории. Сформированная по определенному алгоритму выходная величина второй подсистемы — курсовая поправка — поступает на вход первой подсистемы, отрабатывая которую первая подсистема возвращает судно на заданную траекторию.

Важно подчеркнуть, что иерархическая структура управляющих элементов менее всего связана с физическими исполнителями управления — управляющими органами, а определяется, главным образом, набором решаемых задач. Так, например, основной задачей якорной системы удержания полупогруженной буровой установки является стабилизация платформы в заданной точке средствами пассивного позиционирования. Включение в систему управления подсистемы автоматического изменения длины якорных связей позволяет в процессе удержания производить перераспределение натяжений в цепях, решая тем самым задачу оперативной коррекции положения установки и расширяя диапазон внешних возмущений, при которых управление сохраняет свои качественные характеристики.

Принципы декомпозиции и агрегирования позволяют произвести упрощения, обеспечивающие доведение принимаемых решений до практической реализации. Под декомпозицией понимают расчленение исходной системы на ряд относительно независимых частей, позволяющее перейти от исходной сложной задачи к нескольким более простым. Агрегирование заключается в выделении какой-либо группы переменных, характеризующих состояние объекта, и их переформировании, проясняющем качественные особенности динамического поведения объекта. Декомпозиция и агрегирование выступают как две стороны одного процесса. Разра-

батываемые на этой основе алгоритмы отличаются тем, что задачи, возлагаемые на отдельные устройства обработки информации, определяются исходя из производительности этих устройств. Реализация таких алгоритмов осуществляется на микропроцессорной элементной базе в блочно-модульных системах, что способствует унификации средств УК. Основные преимущества УК, построенных на микропроцессорной элементной базе, перед традиционными системами особенно отчетливо проявляются при построении систем с децентрализованной распределенной иерархической структурой.

Необходимость децентрализованной распределенной многопроцессорной структуры УК определяется требованиями надежности и живучести, предъявляемыми к системам управления ТС корабля.

Современная технология производства средств микропроцессорной техники не позволяет достичь приемлемых показателей надежности УК без резервирования его устройств. Обеспечить высокую надежность системы путем общего нагруженного резерва не представляется возможным по экономическим соображениям, так как для этого необходимо многократное резервирование всей системы. Практически приемлемым оказывается использование систем с избыточной структурой, которые позволяют управлять корабельными объектами при отказах отдельных устройств системы за счет возможности передачи функций отказавшего устройства другим модулям системы.

В системе из $n+m$ одинаковых процессоров, из которых m находятся в состоянии ненагруженного скользящего резерва, наработка на отказ составляет $T_0 = [(m+1)/n]/\lambda$, а вероятность безотказной работы определяется зависимостью

$$P(t) = [\exp(-\lambda nt)] \sum_{i=0}^m (n\lambda t)^i / i!,$$

где λ — интенсивность отказов одного процессора. Если восстановление отказанных устройств допускается в процессе работы системы и производится с интенсивностью $\mu \gg \lambda$, то наработка на отказ составляет

$$T_0 \approx [\mu/(n\lambda)]^m/\lambda.$$

Как показывают расчеты [3], уже при $m=2 \div 3$ и $\mu/n\lambda \geq 10^2$ наработка на отказ может быть получена $T_0 = 10^4 \div 10^6$ ч, что свидетельствует о практической осуществимости данного пути обеспечения надежности.

Важнейшим фактором, определяющим технико-экономическую целесообразность разработки распределенных управляющих комплексов, является появление дешевых и надежных микропроцессоров и микро-ЭВМ, выполненных в виде одной или нескольких БИС. Снижение стоимости и повышение технических характеристик микропроцессорных БИС позволяет проектировать системы

управления, содержащие десятки и сотни микропроцессоров и микро-ЭВМ, обеспечивающие необходимое качество управления сложными корабельными объектами.

При построении УК с распределенной структурой различают функциональную и топологическую децентрализацию.

Функциональная децентрализация предполагает расчленение функций контроля и управления корабельными объектами на составляющие — подпроцессы, каждый из которых может быть реализован на отдельном микроконтроллере или микро-ЭВМ. Это позволяет резко сократить требования к характеристикам вычислительной системы, упростить программирование, монтаж, отладку и развитие системы. Расчленение функций может производиться по различным направлениям: по технологическому процессу, когда подпроцессы относятся к отдельным устройствам управляемого объекта или отдельным контролируемым параметрам; по режимам работы управляемых объектов или фазам технологического процесса, когда подпроцессы определяются по принадлежности к относительно самостоятельному режиму, являющемуся частью общего режима (например, аварийный режим, режим пуска и останова, стационарный режим и т. п.); по продолжительности интервала времени, необходимого для выполнения конкретной функции. В целом при функциональной децентрализации необходимо стремиться к разбиению процессов на слабо взаимосвязанные подпроцессы.

Под топологической децентрализацией понимают пространственное распределение аппаратуры обработки данных: микроконтроллеров, регуляторов и других исполнительных устройств, датчиков и т. д. Оптимальная топологическая децентрализация предполагает такие число и место установки устройств обработки данных, которые минимизируют суммарную длину кабеля, необходимого для соединений устройств системы.

При построении корабельных микропроцессорных УК с децентрализованной структурой приходится объединять в единую систему большое число ЛСУ. Обладая определенной автономностью функционирования, ЛСУ тем не менее требуют координации их работы, так как при расчленении процессов на составляющие, реализуемые ЛСУ, невозможно получить независимые подпроцессы. Это обуславливает необходимость обмена данными между подсистемами.

Микропроцессоры ЛСУ работают асинхронно и выполняют различные функции: вычисление, управление, обслуживание периферийных устройств, поиск и реорганизацию данных в памяти и т. п. Наличие большого числа асинхронно работающих активных устройств, способных по собственной инициативе использовать ресурсы системы, предъявляет высокие требования к организации взаимодействия устройств. Необходимо быстро и достаточно простоими средствами коммутировать источники и приемники данных, устранять конфликтные ситуации при одновременном затребовании несколькими устройствами одного и того же ресурса,

устранять взаимные блокировки устройств. Кроме того, должна обеспечиваться высокая живучесть системы.

На надежность и живучесть УК большое влияние оказывает структура связей между системами. На практике необходимость связи между модулями устанавливается в зависимости от алгоритма функционирования системы в целом. Однако связь структуры с алгоритмом функционирования системы управления затрудняет изменение ее конфигурации относительно состава модулей и их взаимодействия.

Проведенные исследования и опыт проектирования информационно-управляющих систем показывают, что наиболее перспективной для корабельных управляющих комплексов является шин-

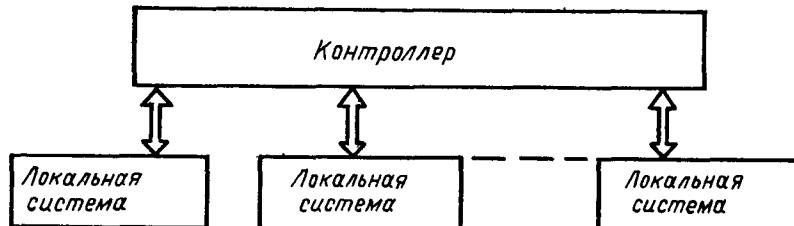


Рис. 1.8. Радиальная структура связи систем управляющего комплекса

ная организация. Все устройства такой системы подключаются к общей группе цепей, образующих информационно-управляющие шины, используемые для передачи сигналов в программно-управляемом процессе передачи данных.

Для коммутации устройств в системах с шинной организацией применяется пространственная и временная коммутация. Пространственная коммутация, как правило, приводит к радиальной структуре системы (рис. 1.8), в которой обменивающиеся информацией устройства связаны индивидуальной группой шин через центральное управляющее устройство (контроллер), осуществляющее управление обменом данными. Связь между управляющим устройством и одним из абонентов системы может устанавливаться по инициативе как контроллера, так и источника или приемника сигналов.

При временной коммутации источники информации связываются с приемниками по общей системе шин, занимая ее в различные моменты времени. Такой способ коммутации приводит к магистральной структуре системы (рис. 1.9).

Функции управления обменом в системе с общей магистралью распределяются между устройствами или выполняются контроллером. Связь между устройствами системы может устанавливаться по инициативе как контроллера, так и самих устройств. В последнем случае устройства посыпают в магистраль запрос на обслуживание, содержащий адрес того устройства, в которое должны поступить данные или от которого они запрашиваются.

Необходимость построения систем, включающих в себя большое число функциональных модулей, обуславливает иерархическую многоуровневую магистральную структуру УК ТС корабля (рис. 1.10.). Магистрали первого уровня объединяют определенное число модулей в ЛСУ, которые объединяются в групповые системы магистралью второго уровня и т. д.

Объединение систем в группы, т. е. комплексирование, производится по различным признакам: по активности систем обра-

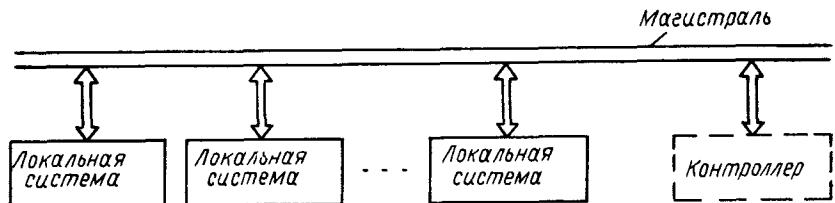


Рис. 1.9. Магистральная структура связи систем управляющего комплекса

ботки данных; по общности функциональных задач; по территориальным признакам для уплотнения информации.

Наиболее активные системы, осуществляющие интенсивную обработку и интенсивный обмен данными с окружающей средой,

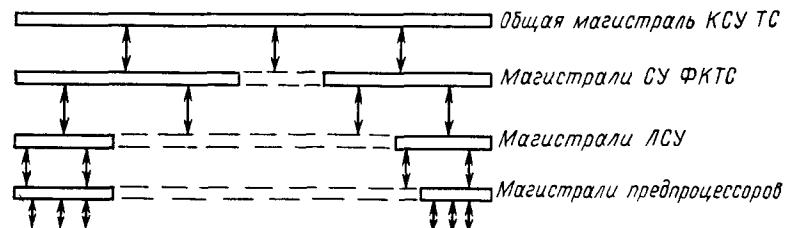


Рис. 1.10. Многоуровневая магистральная структура управляющего комплекса

располагаются на нижних иерархических уровнях управляющего комплекса. Повышение уровня иерархии характеризуется снижением интенсивности и увеличением объемов обрабатываемых и передаваемых данных.

В управляющих комплексах ТС корабля можно выделить следующие магистрали соответствующих иерархических уровней:

- магистрали системы предварительной обработки данных, объединяющие модули обработки сигналов измерительных элементов параметров УО и внешней среды;
- магистрали ЛСУ, осуществляющие управление объектами в реальном масштабе времени;
- магистрали СУ ФКТС, обеспечивающих координированное управление функционально связанными объектами, контроль,

техническое диагностирование и прогнозирование работоспособности УО и ЛСУ;

— магистраль КСУ ТС корабля, обеспечивающей согласованное управление всеми техническими средствами.

Иерархическая структура УК позволяет концентрировать обобщенную информацию в одной точке, что необходимо для управления ТС корабля из единого центра. В то же время относительная автономность систем различных уровней обеспечивает высокую живучесть всего комплекса.

Использование микропроцессорной элементной базы создает наиболее благоприятные условия для стандартизации аппаратуры корабельных систем управления. Применение микропроцессоров и микро-ЭВМ позволяет добиться такого уровня унификации, при котором организация управления различными объектами ТС корабля практически одинакова. Различие может заключаться лишь в программном обеспечении систем, которое в свою очередь содержит значительное число стандартных модулей: стандартные программные регуляторы, стандартные программы контроля и т. д. Стандартизация аппаратуры позволяет обеспечить высокую степень живучести и надежности УК за счет резервирования и возможности быстрого перепрограммирования ее устройств.

Унификация модулей системы и необходимость доступа всех устройств к различным источникам информации определяют требование единого способа обмена данными, которое выполняется путем стандартизации средств сопряжения — интерфейсов систем. Использование стандартных интерфейсов, определяющих логические, электрические и конструктивные условия связи, позволяет объединить в единый УК различные модули независимо от их функционального назначения и устройства функциональной части.

§ 1.4. Математическая модель функционирования управляющего комплекса

При системном подходе общая задача проектирования УК может быть сформулирована как задача определения способов управления и структуры системы, обеспечивающих максимальную ее эффективность. Формально эта задача представляется как определение вектора параметров структуры $S = (s_1, s_2, \dots, s_N)$, характеризующего состав устройств системы и связи между ними, и вектора способов управления $C = (c_1, c_2, \dots, c_M)$, описывающего алгоритмы решения задач управления, заданных вектором параметров задач $D = (d_1, d_2, \dots, d_k)$, которые обеспечивают максимальное значение критерия эффективности Q .

Эффективность сложных многоцелевых систем определяется совокупностью частных показателей i_1, i_2, \dots, i_N , каждый из которых представляет отдельное свойство системы (быстро действие, точность, надежность и т. д.). При этом общий показатель эффективности представляется как вектор $I = (i_1, i_2, \dots, i_N)$.

Сравнение различных вариантов построения системы при векторном критерии эффективности сводится фактически к сопоставлению соответствующих им значений набора частных показателей. Это приводит к так называемой области компромиссных решений, в которой для любых двух вариантов системы $B_1 = (S_1, C_1)$ и $B_2 = (S_2, C_2)$ оценки по одним частным показателям будут лучше для первого варианта системы, а по другим частным показателям — для второго варианта, т. е. векторы $I(B_1)$ и $I(B_2)$ оказываются несравнимы.

Дальнейшее сопоставление вариантов возможно лишь на основе некоторой схемы компромиссного решения между частными целями, т. е. требует использования условного общего критерия эффективности [1, 6]. В качестве такого критерия, как правило, используют некоторую скалярную функцию частных показателей $Q = F(A, I)$, где $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ — вектор весовых коэффициентов, определяющих относительную значимость частных показателей.

Задача синтеза, состоящая в определении параметров для заданной совокупности параметров D , обеспечивающих максимальное значение критерия Q , аналитически неразрешима, поскольку построение аналитических моделей I и Q связано с большими трудностями, но даже при наличии этих зависимостей уравнения оказываются неразрешимыми в аналитической форме. Поэтому основными методами решения являются численные методы, чем и определяется методика системного проектирования, основные этапы которого приведены на рис. 1.11. В процессе проектирования последовательно рассматриваются различные варианты построения системы, производится их оценка по заданным критериям и сравнение результатов с заданными ограничениями. Если рассматриваемый вариант оказывается неприемлемым по какому-либо показателю, то производятся некоторые изменения в системе и процесс расчета повторяется для вновь рассматриваемого варианта. Эта процедура повторяется до тех пор, пока не будут удовлетворены все ограничения по частным показателям. После этого аналогичная последовательность расчетов и изменений в системе производится с целью оптимизации системы по общему критерию эффективности.

Основным средством системного проектирования является модель функционирования УК, на основе которой определяются значения показателей эффективности системы. Трудности построения математической модели связаны со сложностями как формализации процессов различной физической природы и различного характера протекания (непрерывные и дискретные), так и описания многоуровневой иерархической структуры управляющих комплексов.

Рассмотрим формализацию функционирования двухуровневой иерархической системы (рис. 1.12), на основе которой можно построить модель функционирования системы с произвольным чис-

лом уровней, если рассматривать ее как элемент многоуровневой системы.

Пусть управляемый процесс 1-й ЛСУ описывается зависимостью

$$X_i = P_i(X_i, U_i, \Omega_i),$$

где

$X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{k_i})$ — вектор состояния 1-го УО;

$U_i = (u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^{l_i})$ — вектор управляющих воздействий на 1-й УО;

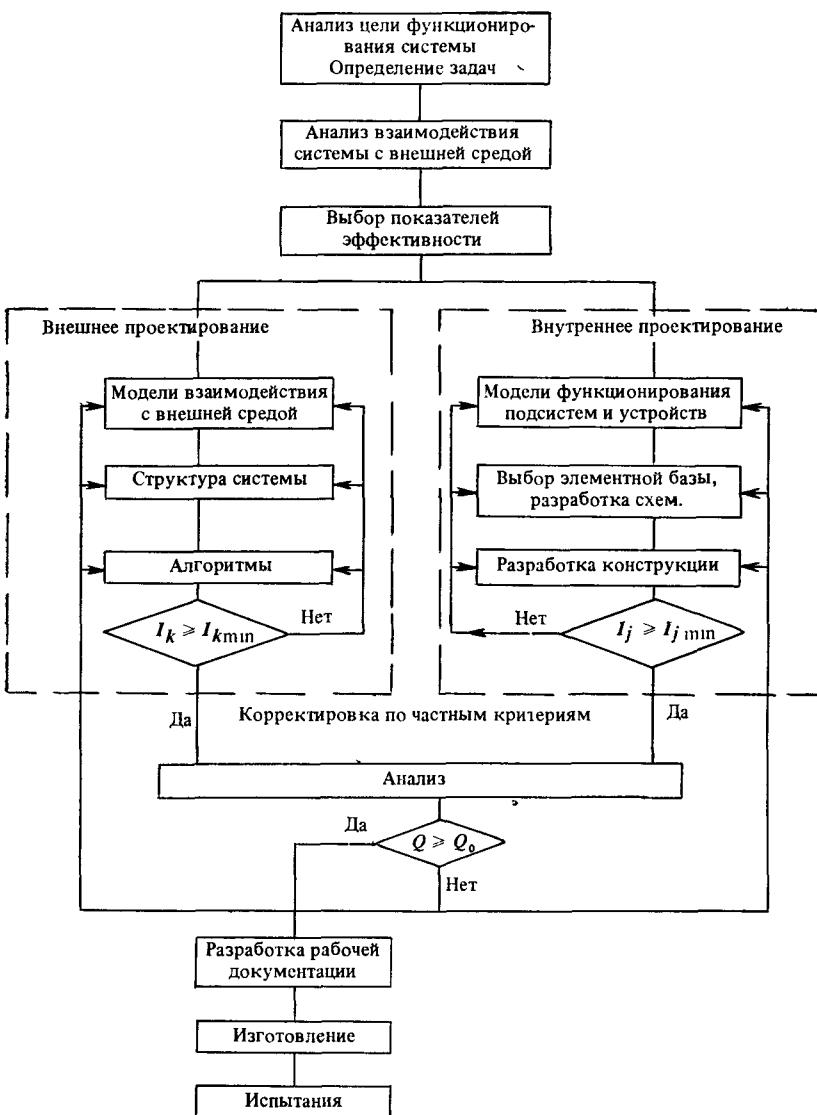


Рис. 1.11. Последовательность этапов системного проектирования управляющего комплекса

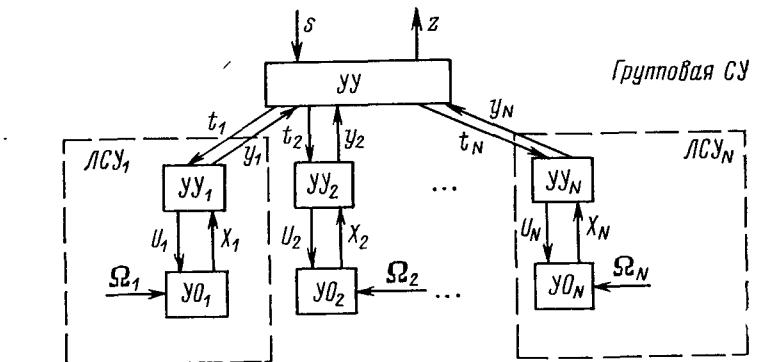


Рис. 1.12. Двухуровневая иерархическая система управления

$\Omega_i = (\omega_i^1, \omega_i^2, \dots, \omega_i^{m_i})$ — вектор возмущений, действующих на 1-й УО. Функционирование управляющего устройства i -й ЛСУ описывается зависимостями, определяющими формирование управляющих воздействий U_i и информационных сигналов, поступающих в устройства групповых систем управления, y_i :

$$U_i = F_i(X_i, t_i); \quad y_i = f_i(X_i, t_i),$$

где t_i — координирующее воздействие управляющего устройства групповой системы управления, поступающее в i -ю ЛСУ.

Функционирование устройств групповой системы управления описывается зависимостями, определяющими координирующие воздействия T на ЛСУ и информационные сигналы z в устройстве высших уровней

$$T = \Phi(Y, s); \quad z = \varphi(Y, s),$$

где $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ — вектор информационных сигналов, поступающих от ЛСУ; s — координирующий сигнал от устройства управления ($УУ$) высшего уровня иерархии.

Таким образом, двухуровневая иерархическая система управления полностью описывается функциями $P_i, F_i, f_i, \Phi, \varphi$ ($i = 1, 2, \dots, N$).

В процессе формализации на основе общих задач, стоящих перед УК ТС, выявляются необходимые параметры управления, контроля, диагностики и прогнозирования, а также информационные сигналы. Затем устанавливаются функциональные связи в системе, т. е. зависимости одних параметров и сигналов от других, что выражается рассмотренными выше функциями. В зависимости от принятых критерииев уточняется структура, в результате чего в случае необходимости вводят промежуточные устройства переработки информации, резервированные устройства и т. д. Далее на основе принятого алгоритма управления формируют конкретные функциональные зависимости в управлении системами. По сформулированным функциональным зависимостям синтезируют структуру системы на основе выбранной микропроцессорной базы.

ГЛАВА 2 МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БАЗА КОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

§ 2.1. Общая характеристика микропроцессорных средств систем управления

Появление дешевой и надежной микропроцессорной элементной базы послужило основой создания корабельных систем управления нового типа — микропроцессорных управляющих комплексов. Широкое использование микропроцессорных средств в системах управления ТС корабля обеспечивает благоприятные условия для унификации оборудования корабельных систем управления, сокращения сроков и стоимости проектирования, улучшения условий технического обслуживания систем управления в процессе эксплуатации. Такие свойства микропроцессоров, как высокое быстродействие и способность реализации сложных вычислительных процессов в сочетании с малыми габаритами и стоимостью создают возможность децентрализации вычислительных функций управления, придают корабельным системам управления новые качества: повышенную точность, адаптивность, возможность оперативной обработки результатов контроля и прогнозирования состояния корабельного оборудования, регистрации параметров, событий и т. д. Применение микропроцессорной элементной базы дает возможность использовать в УК ТС корабля унифицированные системы передачи информации, что значительно сокращает число кабельных связей, позволяет отделить разработку систем управления от прокладки кабельных трасс, т. е. от проектирования самого корабля. Это является одним из наиболее важных эффектов создания микропроцессорных управляющих комплексов, так как способствует существенному упрощению про-

ектирования систем управления и строительства корабля в целом, снижению расходов на ремонт и замену оборудования. Основным элементом микропроцессорной элементной базы является микропроцессор (МП), в котором сочетаются универсальные возможности программируемого вычислительного средства и достоинства больших интегральных схем (БИС): относительно низкая стоимость, высокая надежность и экономичность.

Под МП понимается программно-управляемое устройство, осуществляющее прием, обработку и выдачу цифровой информации, построенное на одной или нескольких интегральных микросхемах.

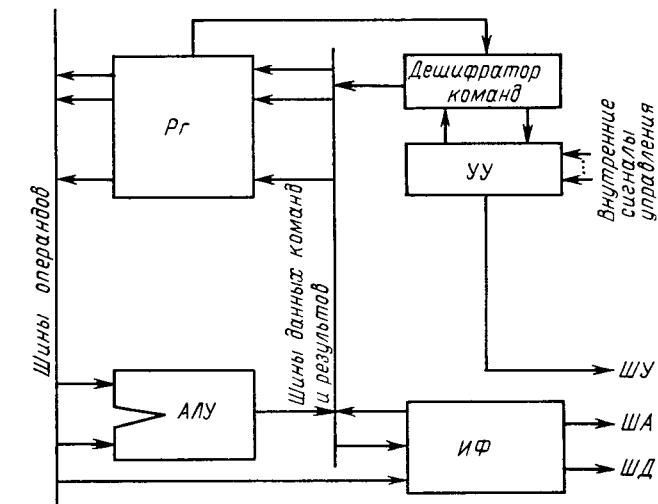


Рис. 2.1. Функциональная схема универсального микропроцессора

В настоящее время выпускается несколько десятков типов МП, позволяющих разрабатывать цифровые и цифроаналоговые устройства различного назначения и производительности.

Все разработанные и выпускаемые промышленностью МП могут быть разделены на две группы: универсальные МП, представляющие собой многофункциональные БИС с программируемой логикой, предназначенные для выполнения операций вычислительных, логических и ввода-вывода; специализированные МП, ориентированные на эффективное выполнение операций какого-либо одного типа (вычислительных, логических, ввода-вывода).

Специализация МП обеспечивает достижение высокой эффективности за счет оптимального согласования структуры МП и реализуемых ими алгоритмов и функций, а также уменьшение избыточности структур.

Функционально в состав универсального МП входят арифметико-логическое устройство (АЛУ), внутренние регистры (Рг), устройство управления (УУ) и интерфейс (ИФ). Упрощенная схема универсального МП приведена на рис. 2.1.

АЛУ микропроцессора состоит из двоичного сумматора, регистров и схем переноса. Это устройство аппаратно выполняет несколько простейших операций: сложение, вычитание, пересылку, логическое И, логическое ИЛИ, сложение по модулю два, сдвиг. Сложные действия, предусмотренные системой команд МП, выполняются по микропрограммам и подпрограммам.

Блок *R_g* образует внутреннюю память МП и содержит регистры общего назначения (РОН) и специальные регистры. Назначением РОН является хранение операндов. Специальные регистры используются для формирования адресов, образования стека, счетчика команд, формирования признаков результата и т. п.

УУ формирует внутренние сигналы управления работой блоков МП и организует выборку очередной команды.

ИФ обеспечивает сопряжение между блоками МП (внутренний интерфейс) и между МП, запоминающими и перефериейными устройствами (внешний интерфейс).

Функциональные возможности и технические характеристики МП определяются его архитектурой: конкретной логической структурой его устройств, их взаимосвязью, системой команд и взаимодействием между аппаратурой и программой. Основными характеристиками, определяющими возможности МП как функционального устройства, являются: формат обрабатываемых данных и команд; количество, тип и гибкость системы команд; метод адресации данных; число внутренних регистров; возможности организации и адресации стека; параметры виртуальной и емкость прямоадресуемой памяти; возможности системы прерываний; возможности построения развитой системы ввода-вывода и интерфейса.

В настоящее время большая часть выпускаемых МП имеет гибкую архитектуру, позволяющую ориентировать их на определенные классы задач. Достигается это за счет секционного построения МП и микропрограммного управления логическими и арифметическими операциями [2, 12]. Данные по некоторым отечественным МП приведены в табл. 2.1.

Микропроцессоры серий К580, К582 и К584 применяются при построении цифровых автоматических устройств и простейших контроллеров, но могут быть использованы и для реализации микро-ЭВМ. Микропроцессоры серии К536, К581, К587, К588 и К589 предназначены для создания микро-ЭВМ и сложных контроллеров, но они применяются и в простейших цифровых устройствах управления. На базе микропроцессорных комплектов К536 и К581 реализованы микро-ЭВМ «Электроника С5» и «Электроника 60».

Каждый микропроцессор имеет свою индивидуальную систему команд. Под воздействием команд выполняются арифметические и логические операции над данными, операции пересылок, вызова и возврата, переходов, управления вводом-выводом. Команды МП в большинстве случаев одноадресные, т. е. указывается адрес

Таблица 2.1. Характеристики наиболее распространенных МП

Тип	Разрядность, двоичных разрядов	Набор команд	Время выполнения команд, мкс	Число РОН	Напряжение питания, В	Потребляемая мощность, мВт	Рабочая температура, °С
K536ИК1	8*	149	10,0	—	-24; +1,5 +5; -5; +12	—	-10... 50
K580ИК80	8	79	2,0	5	+5; -5; +12	300—750	-10... 70
K581ИК1	16	—	1,6	—	+5; -5; +12	900	-10... 55
K584ИК1	4*	459	2,0	8	+5; -5; +12	140	-10... 70
K587ИК2	4*	169	2,0	8	+9	5	-60... 85
K588ИК2	16*	—	2,0	16	+5	5	-60... 85
K589ИК02	2*	—	0,1	10	+5	750	-10... 70

* Возможно *m*-кратное увеличение разрядности (*m*=1, 2, ...).

только одного операнда. Адресация памяти в них, как правило, косвенная по регистру.

Универсальные МП имеют системы команд, обладающие алгоритмической универсальностью. Такой состав команд позволяет выполнять преобразование информации в соответствии с любым заданным алгоритмом. Специализированные МП предназначены для решения определенного класса задач, а иногда только для решения одной конкретной задачи, что позволяет резко увеличить эффективную производительность процессора за счет ускоренного выполнения определенных функций. Среди специализированных МП можно выделить: микроконтроллеры, предназначенные для выполнения сложных последовательностей логических операций; математические МП, ориентированные на выполнение арифметических операций; МП для выполнения определенных видов статистической обработки данных; аналоговые МП, содержащие аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, позволяющие в цифровой форме выполнить функции любой аналоговой схемы. Являясь центральной частью любой микропроцессорной системы управления, МП тем не менее не может самостоятельно выполнять никаких функций управления. Для этого он должен быть дополнен средствами, обеспечивающими выполнение следующих функций: хранение и передачу команд программ выполнения конкретных алгоритмов; ввод и хранение данных о текущих состояниях управляемых объектов; ввод данных, уточняющих задачи управления в процессе функционирования системы; вывод данных, полученных в результате обработки исходной информации по заложенным в систему алгоритмам, для задания определенных управляющих воздействий на исполнительные органы.

Следовательно, всякая микропроцессорная система (МПС) управления должна содержать подсистемы связи с объектом,

ввода-вывода, обработки и хранения данных. Упрощенная структурная схема МПС управления представлена на рис. 2.2. Обработка информации о состоянии УО и внешней среды, а также формирование управляющих воздействий производится МП, который осуществляет управление передачей и обработку данных.

Для хранения команд программ используются оперативные запоминающие устройства (*ОЗУ*), постоянные запоминающие устройства (*ПЗУ*) и перепрограммируемые запоминающие устройства (*ППЗУ*), представляющие собой интегральные схемы микропроцессорных комплектов.

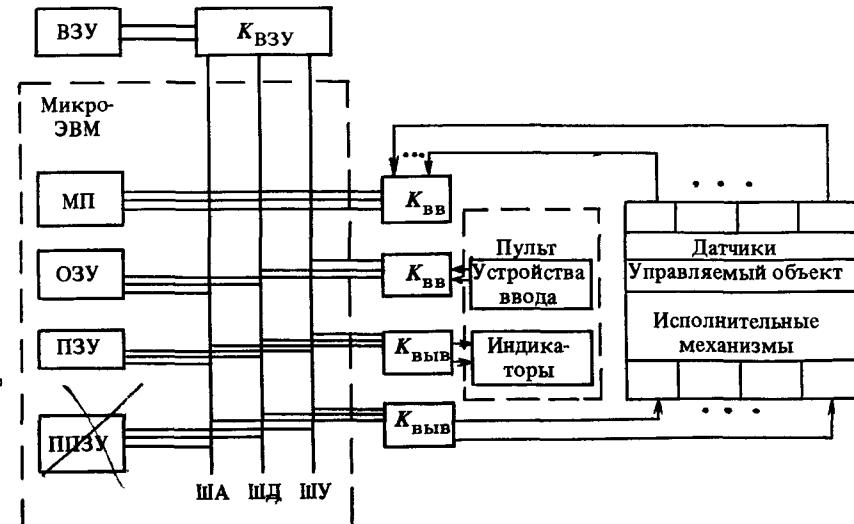


Рис. 2.2. Обобщенная структурная схема микропроцессорной системы управления

Постоянные запоминающие устройства используются для хранения констант и команд, не изменяемых в процессе эксплуатации системы программ. Такими программами являются: управляющая программа-диспетчер; программы прерываний; тестовые программы; стандартные подпрограммы; рабочие программы реализации алгоритмов управления. Часть стандартных, тестовых и рабочих программ, обращение к которым производится сравнительно редко, может храниться во внешнем запоминающем устройстве (*ВЗУ*), откуда программы переписываются в *ОЗУ* или *ППЗУ* по мере необходимости в процессе эксплуатации системы. Там же хранятся необходимые справочные и статистические данные. В качестве *ВЗУ* используются накопители информации большой емкости (на магнитных лентах или дисках).

Для хранения данных о состоянии управляемого объекта и внешней среды, получаемых от датчиков и устройств ввода информации (на магнитных носителях или дисплеях).

формации оперативным персоналом, промежуточных результатов вычислений, выходных величин и команд рабочих программ, изменяемых в процессе эксплуатации системы, используют ОЗУ.

Подсистема ввода-вывода содержит стандартные и специальные устройства ввода и вывода информации, датчики (*Д*) и исполнительные механизмы (*ИМ*). Энергетическое и информационное согласование магистралей системы с устройствами связи с объектом ввода-вывода информации обеспечивается соответствующими контроллерами ($K_{\text{вв}}$, $K_{\text{выв}}$, $K_{\text{взу}}$).

Микропроцессор с запоминающими устройствами и схемами, обеспечивающими их взаимодействие, функционально представляют собой микро-ЭВМ, которая может быть либо построена из отдельных БИС микропроцессорных комплектов и других интегральных схем, либо выбрана из числа серийно выпускаемых микро-ЭВМ. Использование серийной микро-ЭВМ существенно упрощает процесс проектирования МПС управления. Однако при построении МПС управления далеко не всегда можно воспользоваться готовой (серийной) микро-ЭВМ из-за несоответствия ее техническим и эксплуатационным требованиям, предъявляемым к корабельным системам управления. Эксплуатационные требования характеризуются, как правило, комплексом климатических, механических и других факторов воздействия.

Технические требования определяют функциональные характеристики, надежность и конструктивное исполнение устройств системы. Основными техническими параметрами при выборе серийной или разработке специализированной микро-ЭВМ, как правило, являются: разрядность и форма представления информации (фиксированная или плавающая точка); состав и число команд; производительность ЭВМ или время выполнения отдельных команд; информационный объем и возможности наращивания информационной емкости ЗУ; возможности системы прерываний.

Универсальность микро-ЭВМ обеспечивается за счет алгоритмически полных систем команд, которые делают возможным их применение для решения широкого круга задач управления. Минимальная алгоритмически полная система команд состоит из одной или нескольких простых команд. Однако применение ЭВМ с минимальными по числу операций системами команд ведет к значительным затратам времени на выполнение программ. Поэтому обычно в микро-ЭВМ предусматриваются аппаратные средства, позволяющие реализовать сложные команды. Это повышает быстродействие микро-ЭВМ, но требует значительных аппаратных затрат. Поэтому при разработке всякой микро-ЭВМ необходимо достижение компромиссного решения между аппаратно- и программно-реализуемыми функциями. Отечественной промышленностью выпускаются отдельные модели и семейства микро-ЭВМ, выполненные на основе различных микропроцессорных комплексов БИС. Конструктивное исполнение некоторых модификаций серийно выпускаемых микро-ЭВМ позволяет встраивать их в ЛСУ различными технологическими процессами.

Технические характеристики некоторых моделей наиболее развитых семейств отечественных микро-ЭВМ приведены в табл. 2.2. Практически во всех серийно выпускаемых микро-ЭВМ используются сложные развитые системы команд. Основу их составляет набор универсальных команд, реализуемых аппаратным способом в центральном МП. Специализированные части наборов системы команд реализуются вспомогательными МП.

Таблица 2.2. Характеристики наиболее распространенных микро-ЭВМ

Характеристики	*Электроника С5-11*	*Электроника С5-21*	*Электроника НЦ-03*	*Электроника 60*
Разрядность, двоичных разрядов	16	16	16	16
Производительность, 10^{-3} операций/с	10	180	160	25
Объем памяти, 16-разрядных слов	ПЗУ до 28К ОЗУ 128	ПЗУ до 32К ОЗУ 256	До 128К	До 56К
Набор команд	31	31	190	64
Число каналов ввода-вывода	8	8	32	32
Число каналов прерывания	8	8	8	
Потребляемая мощность, В·А	10	20	30	
Габаритные размеры, мм	267×270× ×28,5 1,2	308×244× ×29 1,2	483×360× ×221 28	
Масса, кг				
Конструктивное исполнение	Встраиваемая одно-платная	Встраиваемая одно-платная	Многоплатформенная	Многоплатформенная

Каждая конкретная МПС управления характеризуется определенным составом решаемых функциональных задач, требующих как ограниченного набора команд, так и вполне определенных средств связи с объектами. Серийные микро-ЭВМ, рассчитанные на универсальное применение, имеют избыток программных и аппаратных средств, которые не используются в конкретных задачах управления корабельными объектами. Кроме того, надежность и быстродействие универсальных микро-ЭВМ оказываются недостаточными. Поэтому при использовании таких ЭВМ, как правило, возникает задача разработки дополнительных устройств сопряжения с УО, так как средства ЭВМ рассчитаны на стандартные периферийные устройства.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются специализированные микро-ЭВМ, ориентированные на выполнение определенных классов задач управления. Такие микро-ЭВМ, получившие название программируемых микропроцессорных контроллеров (ПМК), как правило, содержат средства связи с управляемыми объектами. Это позволяет включать их не-

посредственно без дополнительных устройств согласования в системы управления, имеющие датчики и исполнительные механизмы со стандартными уровнями сигналов. Для программирования задач управления в ПМК используются специальные алгоритмические языки, ориентированные на выполнение определенного класса задач управления. При этом программирование производится в терминах задач управления, что освобождает разработчика систем от необходимости освоения программирования в машинных кодах.

§ 2.2. Состав и характеристики микропроцессорных средств

Возможность построения МПС управления, характеризующихся высокой надежностью, низкой стоимостью, малым потреблением энергии, небольшими габаритами и простотой реконфигурации, обеспечивается массовым производством совместимых по конструктивно-технологическому исполнению микропроцессорных и других интегральных схем. Такие совокупности элементов, предназначенные для совместного использования при построении МП, микро-ЭВМ, контроллеров и других МПС обработки и передачи информации, образуют микропроцессорные комплекты интегральных схем (МПК ИС).

Все разработанные и выпускаемые промышленностью МПК ИС могут быть разделены на две группы: универсальные МПК ИС, применяемые в различных средствах вычислительной техники и цифровой автоматики; специализированные МПК ИС, предназначенные для построения только одного типа вычислительных машин.

В настоящем параграфе рассматривается состав и приводятся характеристики интегральных схем некоторых универсальных МПК ИС, получивших в настоящее время наиболее широкое применение, в соответствии с данными справочника [12]. При рассмотрении состава МПК ИС выделяют базовый комплект — интегральные схемы, на которых строятся собственно МП и другие интегральные схемы, необходимые для построения иных устройств микропроцессорных систем: ОЗУ, ПЗУ, контроллеров связи. Базовый комплект может состоять из одной БИС — однокристальный МП, из двух или более БИС — многокристальный МП.

Характеристики некоторых широко используемых универсальных МПК ИС приведены в табл. 2.3. Рассмотрим подробнее МПК серии К580 и К589, нашедшие наиболее широкое применение.

МПК серии К580. Интегральные схемы этого комплекта предназначены для построения различных вычислительных устройств, контроллеров, микро-ЭВМ и мультипроцессорных систем обработки информации. Этот комплект получил наиболее широкое применение в самых различных областях благодаря достаточно высокому быстродействию, относительно низкой потребляемой мощности и возможности совмещения с интегральными схемами

Таблица 2.3. Характеристики некоторых универсальных МПК ИС

Тип	Число ИС		Технология	Разрядность, двоичных разрядов	Напряжение питания, В
	общее	в базовом комплекте			
K580	3	1	<i>n</i> -МОП	8	-5; +5; +12
K584	3	2	И ² Л	4*	
A587	4	2	КМОП	4*	+9
K588	3	2	КМОП	16*	+5
K589	8	2	ТТЛДШ	2*	+5

* Возможно *m*-кратное увеличение разрядности (*m*=1, 2, ...).

Таблица 2.4. Характеристики основных элементов МПК ИС серии K580

Тип	Разрядность, двоичных разрядов	Тактовая частота, МГц	Напряжение питания, В	Потребляемая мощность, мВ А
Центральный процессорный элемент параллельной обработки данных K580ИК80	8	2	+12; +5; -5	750
Программируемый последовательный интерфейс связи K580ИК51	8—1	2	+5	400
Программируемый параллельный интерфейс для периферийных устройств K580ИК55	8	2	+5	350

других комплектов (например, серии K589). Характеристики основных элементов МПК ИС приведены в табл. 2.4.

Все микросхемы МПК обеспечивают устойчивую работу при следующих условиях: интервал рабочих температур от -10 до 70 °C; относительная влажность воздуха 98 % при температуре 25 °C; вибрационные нагрузки в диапазоне частот от 1 до 600 Гц с максимальным ускорением 10g; многократные удары с ускорением до 75g.

Центральный процессорный элемент (ЦПЭ) параллельной обработки данных K580ИК80 представляет собой однокристальный 8-разрядный МП с заданной архитектурой и системой команд. БИС центрального процессорного элемента (рис. 2.3) содержит следующие функциональные блоки: АЛУ, блок регистров (БРГ), блок управления, блок синхронизации (БС), 16-разрядный буфер адреса (БФА), 8-разрядный буфер данных (БФД) и 8-разрядную внутреннюю магистраль данных.

Обозначение выводов БИС ЦПЭ приведено в табл. 2.5. АЛУ выполняет операции арифметические, логические и сдвига над данными, представленными в дополнительном коде. Обмен операндами

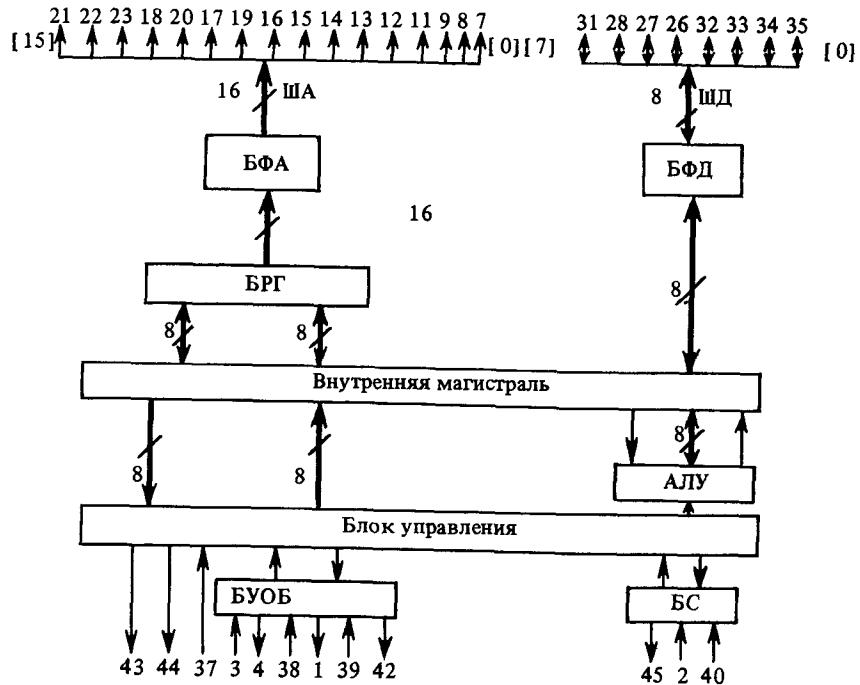


Рис. 2.3. Структурная схема центрального процессорного элемента K580ИК80

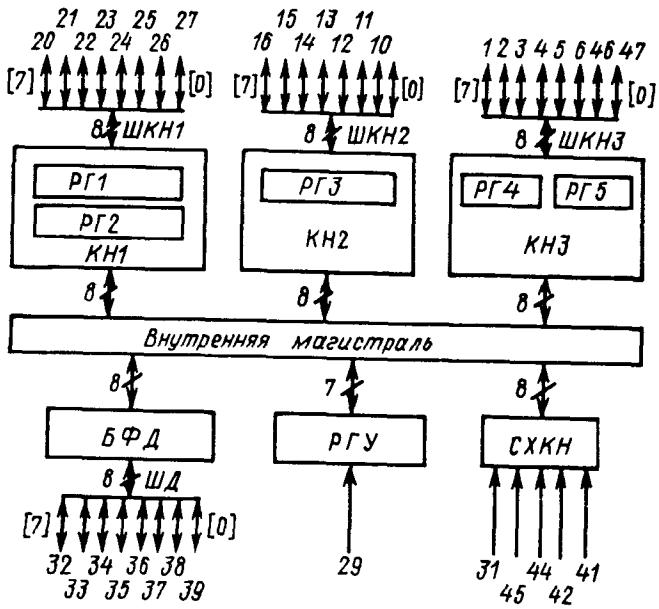


Рис. 2.4. Структурная схема БИС программируемого параллельного интерфейса K580ИК55

дами и результатами операций с внутренней магистралью данных производится с помощью входящих в состав АЛУ регистров.

Таблица 2.5. Назначение выводов БИС ЦПЭ К580ИК80

Номер вывода	Обозначение	Назначение	Примечание
1	ПЗХ	Признак допуска внешнего устройства к шинам данных и адреса	Выход
2, 40	С1, С2	Две серии неперекрывающихся фазовых импульсов	Вход
3	ГТ	Признак готовности внешнего устройства к обмену информацией	"
4	ОЖ	Признак ожидания микропроцессором готовности внешнего устройства к обмену информацией	Выход
6, 24, 48		Питание (+12, -5, +5 В)	
7—9, 11—23	ША	Шина адреса (0—15)	
25		Общий	
26—28, 31—35	ШД	Шина данных (0—7)	Вход-выход
37	СБР	Перевод БИС в исходное состояние	
38	ЗХ	Запрос внешних устройств на допуск к магистралям данных и адреса	Вход
39	ЗПР	Запрос внешних устройств на обслуживание микропроцессором	"
42	РПР	Разрешение на обслуживание микропроцессором внешнего устройства	Выход
43	ПМ	Разрешение приема информации с внешней шины	"
44	ВД	Признак выдачи информации на внешнюю шину	"
45	С	Синхронизация	"

БРГ содержит счетчик команд, указатель стека, регистр адреса, временный регистр, мультиплексоры и шесть регистров общего назначения.

Управление работой АЛУ и БРГ осуществляется блоком управления, вырабатывающим необходимую последовательность управляющих сигналов в соответствии с кодом команды, поступившим на его вход с внутренней магистралью данных.

Блок управления обменом (БУОБ) организует работу процессора в реальном масштабе времени, в режиме прямого доступа к памяти, а также с памятью и внешними устройствами любого быстродействия. Это осуществляется входящими в БУОБ схемами анализа прерываний, анализа захвата шин и анализа готовности. Центральный процессор устанавливается в исходное положение при включении питания или по программе и выполняет программу до тех пор, пока на вход ГТ поступает «1». Выполнение программы может быть остановлено по сигналу прерывания или по сигналу на входе «ЗХ», выдаваемому внешними устройствами.

Программируемый параллельный интерфейс (ПЛИ) для периферийных устройств К580ИК55 используется для сопряжения стан-

дартных периферийных устройств (телефон, дисплей, накопитель и др.) с магистралью данных центрального процессора. БИС ПЛИ представляет собой однокристальное программируемое устройство ввода-вывода параллельной информации, микросхема которого представлена на рис. 2.4. В нее входят буфер канала данных (БФД), регистр управляющего слова (РГУ), схема выбора канала (СХКН) и трех каналов данных (КН1, КН2 и КН3). Назначение выводов приведено в табл. 2.6.

Таблица 2.6 Назначение выводов БИС ПЛИ К580ИК55

Номер вывода	Обозначение	Назначение	Примечание
1—6, 46, 47	КН3	Канал 3 (0—7)	Вход-выход
9—16	КН2	Канал 2 (0—7)	"
20—27	ШКН1	Канал 1 (0—7)	"
29	СБР	Перевод БИС в исходное состояние	Вход
31	ЗП	Разрешение приема информации из шины данных	"
32—39	ШД	Шина данных 0—7	Вход-выход
41	ЧТ	Разрешение выдачи информации в шину данных	Вход
42	ВМ	Разрешение выбора устройства	"
43		Общий	
44, 45	А1, А0	Адрес (номер) канала КН1, КН2 и КН3	Вход
48	U _{пп}	Питание (+5 В)	"

БФД предназначен для подключения внутренней магистрали микросхемы к магистрали данных центрального процессорного элемента. РГУ обеспечивает прием и хранение кода команды, поступающего на него через БФД и внутреннюю магистраль. Содержимое РГУ определяет функцию и направление работы каждого из трех каналов ввода-вывода. Выбор вида передачи устанавливается в соответствии с табл. 2.7.

Таблица 2.7. Виды передач ПЛИ К580ИК55

Функция	Направление передачи данных	Сигналы на входах				
		ВУ	ЧТ	ЗП	А1	А0
Чтение	ШКН1→ШД	0	0	1	0	0
	ШКН2→ШД	0	0	1	1	1
	ШКН3→ШД	0	0	1	0	0
Запись	ШД→ШКН1	0	1	0	0	0
	ШД→ШКН2	0	1	0	1	1
	ШД→ШКН3	0	1	0	0	0
	ШД→РГУ	0	1	0	1	1

Каналы $KH1$, $KH2$ и $KH3$ предназначены для подключения внешних устройств к шине данных микропроцессора. Режимы работы каналов $KH1$ и $KH2$ определяются содержимым $РГУ$ и устанавливаются независимо, а режим канала $KH3$ зависит от режимов работы $KH1$ и $KH2$. При каждом изменении режима работы любого канала все входные и выходные регистры приводятся в состояние 0.

Программируемый последовательный интерфейс связи (ПСИ) K580ИК51 представляет собой однокристальное программируемое устройство для синхронно и асинхронно приемопередающих каналов связи, осуществляющее преобразование параллельного 8-разрядного кода в последовательный, и наоборот.

Структурная схема БИС приведена на рис. 2.5. В состав микросхемы входят: $БФД$, $РГУ$, блок передачи ($БПУ$), блок приема ($БПМ$), блок регистров синхроимпульсов ($БРГС$), блок местного

Таблица 2.8. Назначение выводов БИС ПСИ K580ИК51

Номер вывода	Обозначение	Назначение	Примечание
1—4 8—11	ШД	Шина данных (0—7)	Вход-выход
5 7, 23	ВХПМ	Вход приемника Общий	Вход
14 15	СВД РПМ	Синхронизация выхода передатчика Разрешение на прием информации из шины данных	Вход "
16 17	ВМ ПНУ/Д	Выбор микросхемы Признак «управляющие сигналы или состояние микросхемы/данные» на шине данных	" "
20 21	$U_{см}$ РВД	Напряжение смещения Разрешение на выдачу информации в шину данных	" "
22	ПГТПМ	Признак готовности приемника к передаче данных в шину данных БИС ЦПЭ	Выход
24 26	ПГТПЧ	Подложка Признак готовности передатчика к приему данных из шины данных БИС ЦПЭ	Выход
27 28	С1 ПГТ	Вид синхронизации Признак готовности внешнего приемника принять данные	Вход-выход Вход
29 33 34 38	ПВД ВЫХПЧ	Признак окончания посылки данных Передатчик Тактовая частота	" Выход Вход "
39—41	СОН1, СОН2, СОН3 СПМ	Установка БИС в выходное состояние Сигналы общего назначения	Выход
46 48	$U_{пп}$	Синхронизация входа приемника Питание (+5В)	Вход "

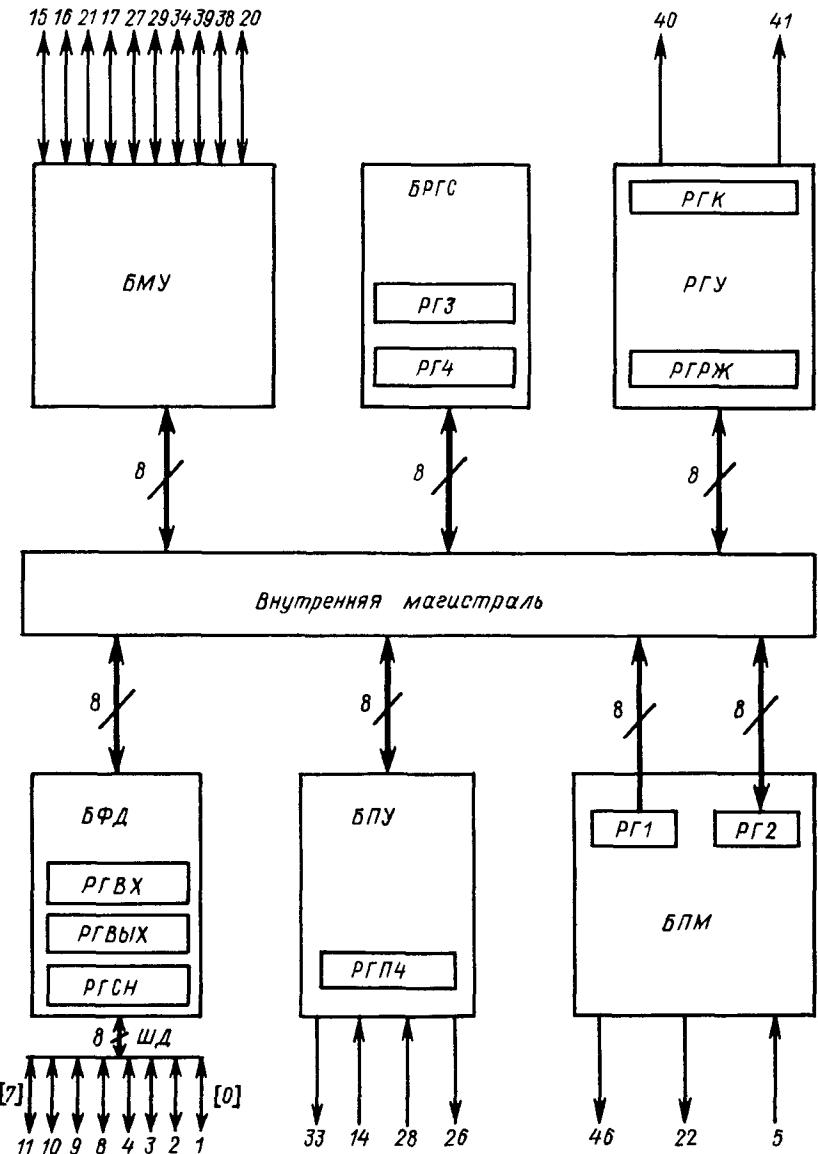


Рис. 2.5. Структурная схема программируемого последовательного интерфейса K580ИК51

управления ($БМУ$). Назначение выводов микросхемы приведено в табл. 2.8. $БФД$ представляет собой двунаправленное 8-разрядное устройство, предназначенное для связи внутренней магистрали БИС ПСИ с магистралью данных центрального процессорного элемента. В состав $БФД$ входит: входной регистр ($РГВХ$), выходной регистр данных ($РГВЫХ$), и выходной регистр состояний

(РГСП), соединенные с внутренней магистралью БИС ПСИ и с ее внешней параллельной шиной данных (ШД).

Управляющие регистры (РГУ) — регистр режима (РГРЖ) и регистр команды (РГК) — предназначены для хранения управляющего слова и инструкций команды. Выходы разрядов 1,3—5,7 и 8 РГК поступают в БМУ, а выходы разрядов 2 и 6 — через выходные формирователи на выводы СОН1 и СОН2.

БПУ предназначен для преобразования параллельного 8-разрядного кода в последовательный 13-разрядный. Входное слово, поступающее из внутренней магистрали БИС ПСИ, размещается в 4—11 разрядах регистра передачи (РГП4). Остальные разряды РГП4 являются служебными: 1,2 — для записи стоп-бита, 3 — для записи бита контроля, 12 — для формирования старт-бита, 13 — для хранения информации в течение периода синхронизации выхода передатчика.

БПМ осуществляет преобразование последовательного кода, поступающего на вход ВХПМ, в параллельный 8-разрядный код и передачу его во внутреннюю магистраль БИС ПСИ.

БРГС предназначен для сравнения синхросимволов, записанных в регистрах РГ3 и РГ4 с синхросимволами, поступающими из внутренней магистрали от регистров приемника. Результат сравнения поступает в схему управления.

БМУ обеспечивает работу БИС ПСИ в соответствии с полученными инструкциями.

БИС ПСИ может работать в нескольких режимах: асинхронной передачи; с частотой передачи последовательного хода кратной 1, $1/16$ или $1/64$ частоты синхронизации; асинхронного приема; синхронной передачи; синхронного приема с внутренней или внешней синхронизацией [12].

МПК БИС серии К589. Интегральные схемы этого комплекта предназначены для построения быстродействующих контроллеров, процессоров мини- и микро-ЭВМ и других вычислительных устройств повышенного быстродействия. Отличительными особенностями МПК серии К589 являются: возможность наращивания разрядности обрабатываемых данных; микропрограммное управление; один номинал источника питания ($+5V \pm 5\%$); совместимость по уровням сигналов со всеми серийными интегральными схемами; сравнительно небольшое время задержки прохождения сигналов.

Состав и назначение интегральных схем МПК серии К589 приведены в табл. 2.9, а электрические характеристики — в табл. 2.10. Все схемы МПК серии К589 рассчитаны на эксплуатацию при следующих условиях: интервал рабочих температур от -10 до 70°C ; относительная влажность воздуха до 98 % при температуре окружающей среды 25°C ; многократное циклическое изменение температуры от -10 до 70°C ; вибрационные нагрузки с ускорением до $10g$ в диапазоне частот от 1 до 600 Гц; линейные нагрузки с ускорением до $25g$; многократные удары с ускорением до $75g$ при длительности ударов от 2 до 6 мс.

Таблица 2.9. Характеристики корпуса элементов МПК БИС серии К589

Тип	Корпус ИС			
	Обозначение	Число выводов	Длина, мм	Ширина, мм
Центральный процессорный элемент К589ИК02	2121.28—1	28	36,5	15,0
Схема ускоренного переноса К589ИК03	2121.28—1	28	36,5	15,0
Блок микропрограммного управления К589ИК01	2123.40—1	40	51,5	15,0
Многорежимный буферный регистр К589ИР12	239.24—2	24	31,5	15,0
Блок приоритетного прерывания К589ИК14	239.24—2	24	31,5	15,0
Многофункциональное синхронизирующее устройство К589ХЛ4	238.16—2	16	21,5	7,5
Шинный формирователь К589АП16	238.16—2	16	21,5	7,5
Шинный формирователь К589АП26	238.16—2	16	21,5	7,6

Таблица 2.10. Электрические характеристики элементов МПК БИС серии К589

Тип	Напряжение, В, соответствующее		Ток потребления, мА	Средняя мощность, мВ А	Длительность цикла, нс
	логическому «0»	логической «1»			
K589ИК01	$<0,5$	$>2,4$	<240	850	<85
K589ИК02	$<0,5$	$>2,4$	<190	725	<100
K589ИК03	$<0,5$	$>2,4$	<130	450	<13
K589ИР12	$<0,5$	$>3,65$	<130	450	<35
K589ИК14	$<0,5$	$>2,4$	<130	450	<80
K589ХЛ4	$<0,5$	$>2,4$	<95	400	<50
K589АП16	$<0,7$	$>2,4$	<130	470	<65
K589АП26	$<0,7$	$>2,4$	<130	470	<65

Центральный процессорный элемент (ЦПЭ) К589ИК02 выполнен в виде двухразрядной процессорной секции в корпусе, имеет 28 выводов. Назначение выводов приведено в табл. 2.11.

ЦПЭ выполняет арифметические операции в двоичном дополнительном коде: логические операции И, ИЛИ, НЕ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ; положительные и отрицательные приращения; сдвиг влево и вправо; проверку слова, части слова или одного разряда на «0»; вырабатывает сигналы ускоренного переноса. Структурная схема ЦПЭ приведена на рис. 2.6.

В состав ЦПЭ входят АЛУ, два мультиплексора (МА и МБ), дешифратор микрокоманд (ДШМК), блок регистров общего назначения (РОН), регистр адреса памяти (РГА), регистр-аккумулятор (АК) и выходные буферные усилители (ВЫХБФУС).

Таблица 2.11. Назначение выводов БИС ЦПЭ К589ИК02

Номер вывода	Обозначение	Назначение	Примечание
1, 2	ВШ, ВШ	Внешняя шина	Вход
3, 4	МСШ ₀ , МСШ ₁	Маскирующая шина	Выход
5, 6	УПС ₀ , УПС ₁	Ускоренный перенос	”
7	ПС ₀	Перенос	”
8	СДП ₀	Сдвиг вправо	”
9	СДП ₁	Сдвиг вправо	Вход
10	ПС ₁	Перенос	”
11	РА	Разрешение адреса	Выход
12, 13	A ₁ , A ₀	Адрес памяти	”
14	1	Общий	Вход
15–17,	F ₆ – F ₀	Разряды кода микрокоманды	Вход
24–27			
18	С	Синхронизация	Вход
19, 20	D ₀ – D ₁	Разряды кода информации	Выход
21, 22	D ₁ , D ₀	То же	Вход
23	ВД	Разрешение данных	”
28	U _{ин}	Питание (+5,0 В)	

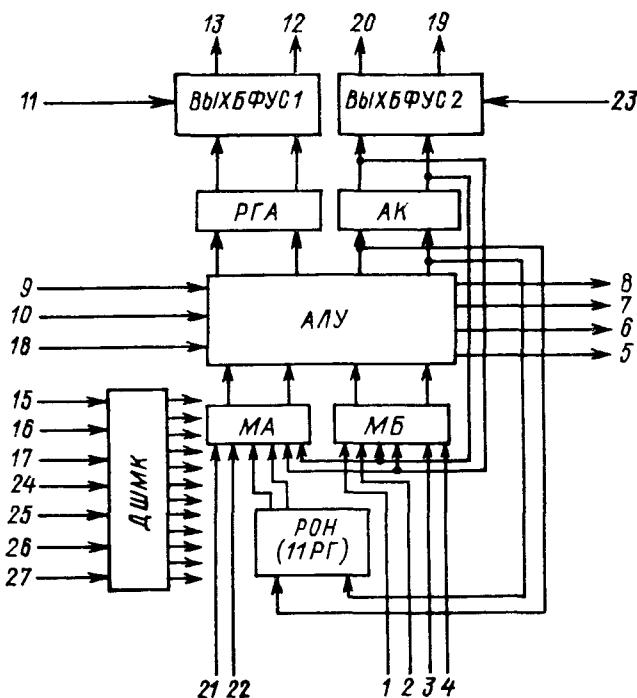


Рис. 2.6. Структурная схема БИС центрального процессорного элемента К589ИК02

Содержание выполняемой ЦПЭ микрокоманды определяется функциональной и регистровой группами разрядов. Функциональная группа определяется разрядами (F_0 – F_3), а регистровая группа — разрядами (F_4 – F_6). Дешифратор микрокоманд, принимая код микрокоманды, выдает необходимые инструкции на АЛУ, блок РОН и мультиплексоры.

Схема ускоренного переноса (СУП) К589ИК03 обеспечивает уменьшение времени сложения путем формирования групповых переносов.

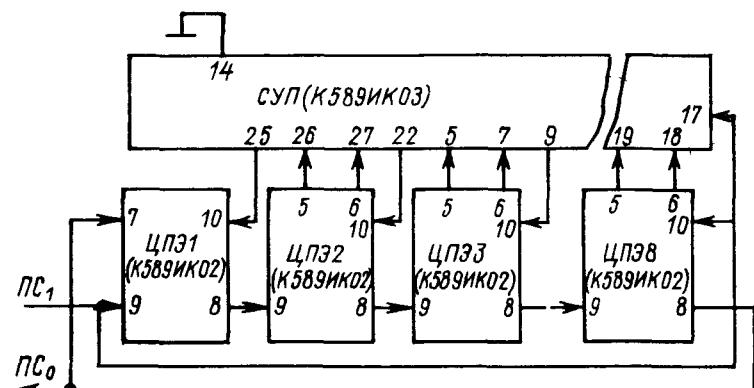


Рис. 2.7. Организация 16-разрядного процессора с использованием ИС К589ИК03

Микросхема имеет 17 информационных входов, 8 информационных выходов и один управляющий вход, позволяющий управлять выходом самого старшего переноса путем перевода его в третье состояние. Назначение выходов микросхемы приведено в табл. 2.12.

С помощью схемы ускоренного переноса, используя БИС ЦПЭ К589ИК02, можно сформировать 16-разрядный сумматор. Один из возможных вариантов организации ускоренного переноса совместным включением восьми микросхем К589ИК02 и одной микросхемы К589ИК03 приведен на рис. 2.7.

Блок микропрограммного управления (БМУ) К589ИК01 предназначен для управления последовательностью выборки микрокоманд из памяти микропрограмм и регистрами датчиков, используемых для организации условных переходов. Назначение выводов БИС БМУ дано в табл. 2.13. Структурная схема представлена на рис. 2.8. Входящий в БИС К589ИК01 блок определения следующего адреса микрокоманды (БОСАМК) обеспечивает формирование адресов микрокоманд и выполнение функций условных и безусловных переходов. Микрокоманда обычно содержит поле операций перехода, определяющее команду перехода, и следующий адрес микрокоманды.

Массив адресов микрокоманд организуется в виде матрицы, каждый элемент которой соответствует определенному адресу

Таблица 2.12 Назначение выводов ИС СУП К589ИК03

Номер вывода	Обозначение	Назначение	Примечание
19, 20, 24, 10, 6, 5, 26, 2 18, 21, 23, 11, 8, 6, 27, 1 3 4, 9, 12, 13, 15, 16, 22, 25 14 17 28	УПС ₀ 0—7 УПС ₁ 0—7 РПС _{n+8} ПС _{n+8} ПС _{n+1} — — ПС _{n+7} $\frac{1}{U_{\text{пп}}}$	Групповые переносы То же Разрешение переноса Перенос Общий Вход переноса Питание (+5 В)	Вход " " Выход Вход

Таблица 2.13. Назначение выводов БИС БМУ К589ИК01

Номер вывода	Обозначение	Назначение	Примечание
1—4	K ₄ — K ₇	Разряды первой части команды	Вход
5, 6, 8, 10	K ₀ — K ₃	Разряды второй части команды	"
7, 9, 11	РГК ₂ — РГК	Разряды регистра команд	Выход
12, 13	УФ ₃ , УФ ₂	Управление занесением и хранением флагов	Вход
14	ПН	Признак	Выход
15, 16	УФ ₀ , УФ ₁	Управление выдачей флагов	Вход
17	ПН	Признак	
18	СТР	Строб разрешения прерывания	Выход
19	С	Синхронизация	Вход
10	—	Общий	
21—24, 37—39	УА ₀ — ОА	Управление регистром адреса микрокоманды	Вход
25	ОСТР	Общий строб	"
26—29	МК ₀ — МК ₃	Адрес колонки микрокоманды	Выход
30—34	МК — МК	Адрес строки микрокоманды	"
35	РСР	Разрешение выдачи адреса строки	Вход
36	ЗМК	Загрузка адреса микрокоманды	"
40	U _{пп}	Питание (+5 В)	

микрокоманды. Адрес строки матрицы определяется пятью разрядами, а адрес колонки — четырьмя разрядами 9-разрядного кода микрокоманды. Таким образом, матрица адресов может содержать всего 512 адресов микрокоманд.

Все операции, выполняемые БИС БМУ разделяются на три группы. Первая группа определяется состоянием входов (21—24, 37—39) и содержит операции установления очередного адреса

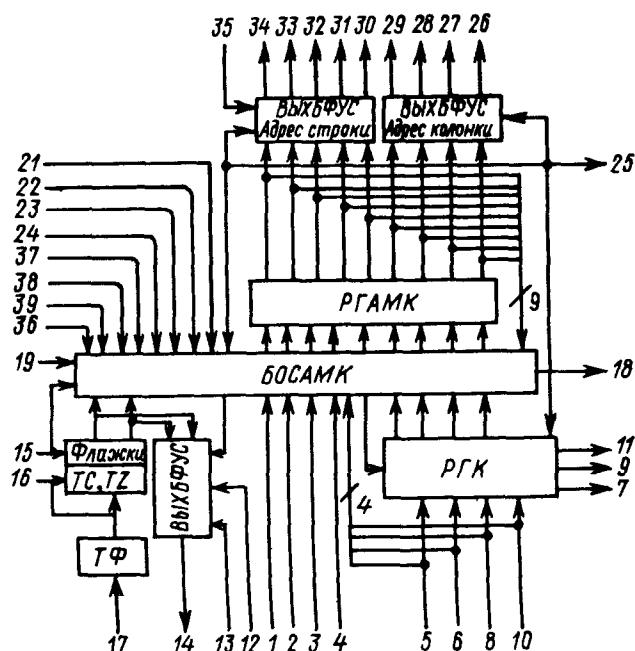


Рис. 2.8 Структурная схема БИС блока микропрограммного управления К589ИК01

микрокоманды, вторая — состоянием входов УФ₀ и УФ₁ (15, 16), третья — состоянием входов УФ₂ и УФ₃ (12, 13). Перечисленные операции обеспечивают прием, хранение и выдачу информации о признаках. Первая группа операций представлена в табл. 2.14, вторая и третья — в табл. 2.15.

В табл. 2.14 приняты обозначения: S_i — данные в i-м разряде регистра адреса микрокоманд по шине УА (21—24, 37—39), РК_i — данные в i-м разряде регистра команд, K_i — данные на i-йшине K (1—4, 5, 6, 8, 10), Ф, С, Z — содержимое триггеров Ф, С, Z соответственно.

Блок приоритетного прерывания (БПП) К589ИК14 обеспечивает асинхронный прием сигналов запроса на прерывание, прием и хранение кода уровня обрабатываемого процессором прерывания, программное осуществление приоритета и выработку вектора прерывания.

Таблица 2.14. Операции управления адресом микрокоманды БМУ

Обозна- чение	Операция	Содержание	Состояние управляющих входов						Адрес следующей строки								
			УA ₆	УA ₅	УA ₇	УA ₃	УA ₂	УA ₁	УA ₀	MK ₈	MK ₇	MK ₆	MK ₅	MK ₄	MK ₃	MK ₂	MK ₁
ICC	Переход в текущей колонке	0 0 S ₄ S ₃ S ₂ S ₁ S ₀ S ₄ S ₃ S ₂ S ₁ S ₀ M ₃ M ₂ M ₁ M ₀															
IZR	Переход в нулевую строку	0 1 0 S ₃ S ₂ S ₁ S ₀ M ₈ M ₇ M ₆ M ₅ M ₄ S ₁ S ₀ M ₃ M ₂ M ₁ M ₀															
ICR	Переход в текущей строке	0 1 1 S ₃ S ₂ S ₁ S ₀ M ₈ M ₇ S ₂ S ₁ S ₀ M ₃ M ₂ M ₁ M ₀															
ICE	Переход в текущей колонке в группе адресов строк	1 1 1 0 S ₂ S ₁ S ₀ M ₈ M ₇ S ₂ S ₁ S ₀ M ₃ 0 1 Φ															
IFL	Переход по содержанию ТГФ	1 0 0 S ₃ S ₂ S ₁ S ₀ M ₈ M ₇ S ₂ S ₁ S ₀ M ₃ 0 1 C															
ICF	Переход по содержимому С	1 0 1 0 S ₂ S ₁ S ₀ M ₈ M ₇ S ₂ S ₁ S ₀ M ₃ 0 1 Z															
IZF	Переход по содержимому Z	1 0 1 1 S ₂ S ₁ S ₀ M ₈ M ₇ S ₂ S ₁ S ₀ M ₃ 0 1 PK ₀															
IPR	Переход по содержимому РК	1 1 0 0 S ₂ S ₁ S ₀ M ₈ M ₇ S ₂ S ₁ S ₀ M ₃ 0 1 PK ₁															
ILL	Переход по левым разрядам РК	1 1 0 1 S ₂ S ₁ S ₀ M ₈ M ₇ S ₂ S ₁ S ₀ M ₃ 0 1 PK ₃															
IRL	Переход по правым разрядам РК	1 1 1 1 S ₁ 0 S ₁ S ₀ M ₈ M ₇ S ₁ S ₀ M ₃ 0 1 PK ₉															
IPX	Переход по содержимому K ₄ —K ₇	1 1 1 1 0 S ₁ S ₀ M ₈ M ₇ S ₁ S ₀ M ₃ 0 1 PK ₁₀															

Таблица 2.15. Операции управления признаками БМУ

Обозна- чение	Операция	Содержание	Код
		УФ ₀ , УФ ₁	0 0
SCZ	Установить триггеры С и Z по значению ПН	0 0 1 0	
STZ	Установить триггер Z по значению ПН	1 1 1 1	
STC	Установить триггер С по значению ПН	1 1 0 0	
HCZ	Хранить содержимое триггера С и Z УФ ₂ , УФ ₃	1 0 0 0	
FFO	Выдать на выход ПН «0»	0 0 0 0	
FFC	Выдать на выход ПН состояние триггера С	0 0 1 1	
FFZ	Выдать на выход ПН состояние триггера Z	1 1 0 0	
FFI	Выдать на выход ПН «1»	1 1 1 1	

Структурная схема БПП приведена на рис. 2.9. В нее входят: 8-разрядный регистр запросов на прерывание с дешифратором приоритета, 3-разрядный регистр хранения текущего приоритета,

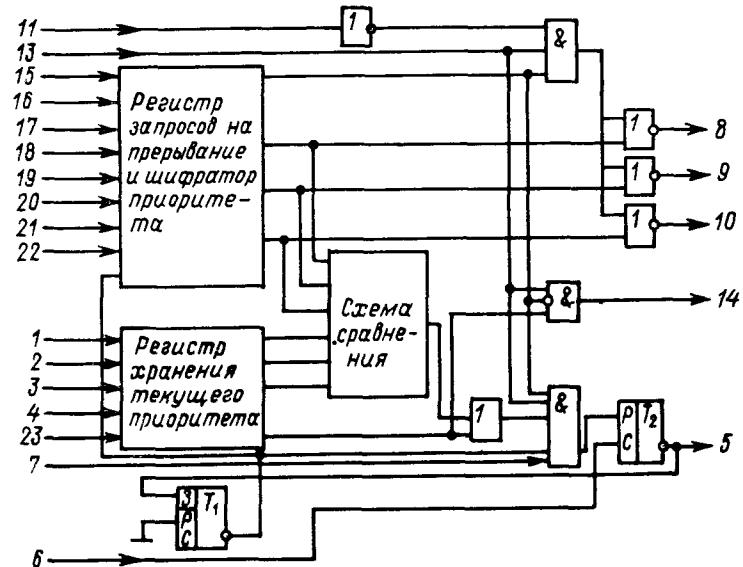


Рис. 2.9. Структурная схема ИС приоритетного прерывания K589ИК14

8-уровневая схема сравнения приоритетов и 3-разрядное устройство кодировки приоритета с открытыми коллекторными выходами.

Для определения запроса на прерывание после выполнения каждой команды производится стробирование БПП. Если преры-

вание подтверждается, БМУ переходит на микропрограммную обработку прерывания. В схеме сравнения коды приоритетов запросов сравниваются с текущими приоритетами, записываемыми в регистр хранения текущего приоритета БПП после определения уровня запроса.

Число уровней прерываний можно увеличить, используя дополнительные схемы БПП. С этой целью могут быть использованы выводы РГВ и РПР при последовательном соединении нескольких схем БПП. В этом случае одна из них может запретить прерывание для всех последующих БПП.

Микросхема К589ИК14 выполняется в корпусе с 24 выводами, назначение которых приведено в табл. 2.16.

Микро-ЭВМ. Отечественной промышленностью выпускается широкий спектр микро-ЭВМ, предназначенных для использования в устройствах и системах управления, начиная от однокристальных микро-ЭВМ для нижних уровней систем управления до встраиваемых микро-ЭВМ, успешно выполняющих такие же функции в системах, которые раньше могли быть реализованы с помощью мини-ЭВМ типа СМ-3, «Электроника 100/16И» или СМ-4, «Электроника 100/25». Основные характеристики некоторых отечественных микро-ЭВМ, предназначенных для встраивания в аппаратуру систем управления, приведены в табл. 2.17.

Однокристальные микро-ЭВМ (ОМЭВМ) серии K1814, K1820, K1816 предназначены для нижних уровней децентрализованных систем управления, где требования к производительности ЭВМ минимальны. ОМЭВМ обеспечивают максимальную простоту и дешевизну реализации ввода, хранения, обработки и вывода данных, выполняя функции контроллеров в соответствии с программой, хранящейся в ПЗУ. Структурная схема ОМЭВМ K1814 приведена на рис. 2.10. Адресное поле ЭВМ размером 1К разбито на 16 страниц по 64 байта. Команды каждой страницы задаются 6-разрядным счетчиком команд, а 4-разрядный регистр адреса адресует страницы. Система команд содержит 44 команды. Из них 9 команд пересылки, 2 — загрузки констант, 12 — арифметические операции, 5 — операции сравнения, 2 — адресации страниц ОЗУ, 4 — адресации ПЗУ. Все команды однобайтовые. ОМЭВМ K1814 выпускается в виде микросхемы в пластмассовом корпусе и имеет 40 выводов, назначение которых приведено в табл. 2.18.

Одноплатные микро-ЭВМ «Электроника МС 1201», имея малые габариты и низкую потребляемую мощность (менее 14 В·А), полностью совместимы с микро-ЭВМ типа «Электроника 60».

Встраиваемые многоплатные ЭВМ «Электроника МС 1211» и «Электроника МС 1212», сохранив программную совместимость с микро-ЭВМ «Электроника 60М» и «Электроника 100/25», имеют более высокое быстродействие, увеличенный объем памяти, возможность мультипрограммного режима работы.

Программируемые контроллеры (ПК) представляют собой специализированные микро-ЭВМ, предназначенные для выполнения определенных функций в системах управления разнообразными

Таблица 2.16. Назначение выводов ИС БПП К589ИК14

Номер вывода	Обозначение	Назначение	Примечание
1—3 4	ПТ ₀ — ПТ ₂ ВУ	Текущий приоритет Выборка группы уровней прерываний	Вход „
5 6 7	ПР С СТР	Инверсный сигнал прерывания Синхронизация Строб прерывания	Выход Вход „
8—10 11	КП ₀ — КП ₂ РКП	Код запроса на прерывание Разрешение выдачи информации на выходы	Выход Вход
12 13	РГВ	КП ₀ — КП ₂ Общий	Вход
14 15—22 23	РПР ЗПР ₀ — ЗПР ₇ РПП	Разрешение группы уровней на прерывание То же Запрос на прерывание	Выход „
24	U _{пп}	Разрешение приема текущего приоритета Питание (+5 В)	Вход

Таблица 2.17. Основные характеристики наиболее распространенных встраиваемых микро-ЭВМ

Характеристика	K1814	K1816	K1820	«Электроника МС 1201»
Разрядность	4	8	4	16
Число команд	43	96	49	64
Объем адресуемой памяти, байт	1К	4К	1К	64К
Быстродействие при выполнении операций типа сложение, 10 ⁻³ операций/с	50	400	250	400 (800)
Число уровней прерывания	1	2	1	2
Габаритные размеры, мм	—	—	—	292×256×12
Масса, кг	—	—	—	0,8
Емкость ОЗУ, байт	64	64	64	64К

Характеристика	«Электроника 60М»*	«Электроника МС 1211»*	«Электроника МС 1212»*
Разрядность	16	16	16К
Число команд	91	138	138
Объем адресуемой памяти, байт	64К	256К	4000
Быстродействие при выполнении операций типа сложение, 10 ⁻³ операций/с	250	500	580
Число уровней прерывания	1	4	4
Габаритные размеры, мм	388×100×520	483×132×626	483×132×626
Масса, кг	16	20	20
Емкость ОЗУ, байт	64К	128K	256K

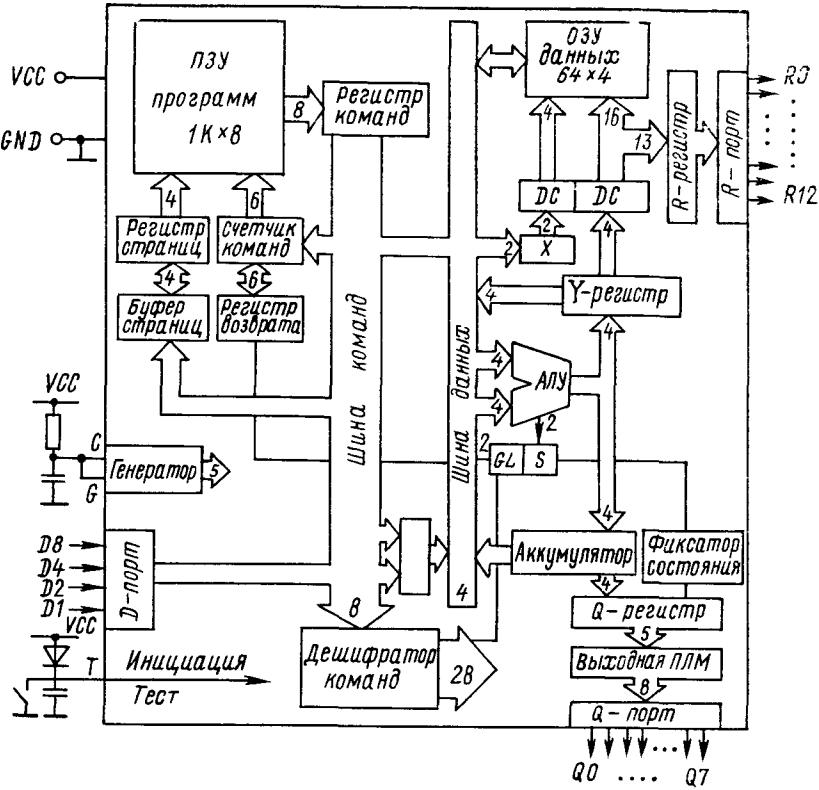


Рис 2.10 Структурная схема ОМЭВМ К1814

объектами. В отличие от универсальных микро-ЭВМ ПК имеют развитые средства ввода-вывода, обеспечивающие возможность принятия и преобразования на выходе широкой номенклатуры сигналов. Это дает возможность включать ПК в систему управления без разработки дополнительных устройств связи с объектами, что значительно упрощает процесс проектирования.

В настоящее время разрабатываются и выпускаются ПК трех классов. Первый из них предназначен для управления несложными объектами, работающими по фиксированным программам. Такие ПК имеют небольшое число входов и выходов (до 64) и небольшую емкость ОЗУ [(1—2) К байт]. Программирование задач управления в них, как правило, осуществляется на уровне кодов машинных команд. Контроллеры второго класса предназначены для управления более сложными объектами. Они обеспечивают возможность подключения большого числа входов и выходов (до 1000 и более), имеют достаточно большую емкость ОЗУ для хранения программ и данных. Программирование таких контроллеров, как правило, производится с использованием специальных языков, ориентированных на определенный класс задач управления. Третий класс образуют высокопроизводительные мультипро-

Таблица 2.18 Назначение выводов ОМЭВМ К1814

Номер вывода	Обозначение	Назначение	Номер вывода	Обозначение	Назначение
1	R8		21	—	
2	R9		22	—	
3	R10	Выход R-порт	23	Q2	
4	R11		24	Q1	
5	R12		25	Q0	
6	VCC	Напряжение питания	26	C	
7	D1		27	G	
8	D2		28	GND	
9	D4	Вход D-порта	29	R0	
10	D8		30	R1	
11	T	Сброс, тест	31	R2	
12	Q7		32	—	
13	—		33	—	
14	—		34	—	
15	—	Выход Q-порта	35	R3	
16	Q3		36	R4	
17	Q5		37	R5	
18	Q4		38	R6	
19	Q3		39	R7	
20	GND	Земля	40	—	

цессорные ПК. Такие контроллеры осуществляют сбор информации и разнообразные функции управления и взаимодействия с ЭВМ других уровней иерархии. Программирование таких контроллеров осуществляется с использованием универсальных алгоритмических языков.

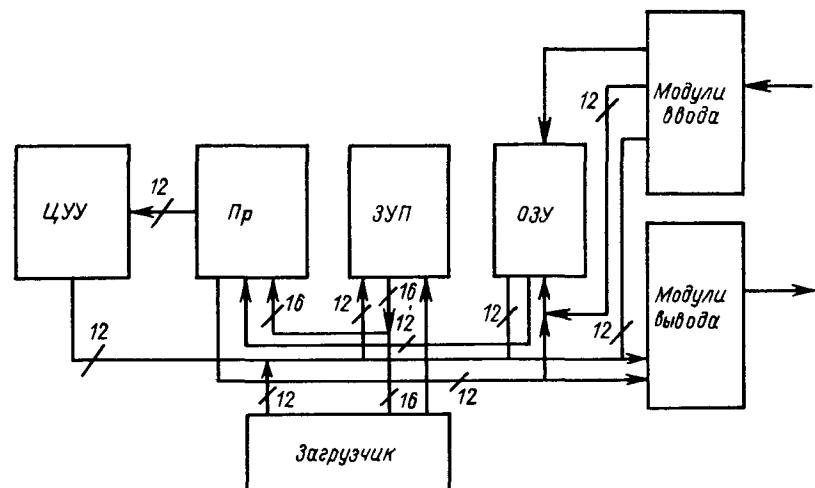


Рис 2.11 Структурная схема программируемого контроллера типа ПК-1

В качестве примера можно рассмотреть контроллер типа ПК-1, разработанный для программно-логического управления электроприводом. Структурная схема ПК-1 приведена на рис. 2.11.

Контроллер выполнен на базе МПК серии К589, имеет ОЗУ для хранения данных и запоминающее устройство программ (ЗУП) по 4К 12- и 16-разрядных слов соответственно, позволяет подключать до 1024 входов и выходов. Номенклатура сигналов предусматривает различные уровни напряжений (от 5 до 220 В) и значений постоянного и переменного токов (от 10 мА до 2 А).

Программирование осуществляется с помощью специального языка, ориентированного на выполнение задач логического управления. Язык содержит операторы булевых функций, счета событий и интервалов времени, простых вычислений. Для записи программы в ЗУП используется загрузчик, представляющий собой автономный прибор с клавиатурой и средствами индикации. Загрузчик подключается к ПК только на время загрузки и отладки программ.

Контроллер имеет блочную унифицированную конструкцию, габаритные размеры соответствуют рекомендациям МЭК.

§ 2.3. Интерфейс систем управляющего комплекса

В состав УК ТС корабля входят разнообразные по функциональному назначению и принципу действия устройства и системы. Они различаются по способам обработки информации (аналоговые и дискретные), скорости работы, используемым видам сигналов. При построении УК, объединяющего отдельные модули в единую систему, необходимо обеспечить возможность их взаимодействия (стыковки). Как правило, для совместности различных функциональных устройств и систем приходится разрабатывать специальные средства, обеспечивающие стыковку — интерфейс системы.

Под интерфейсом понимают систему связей устройств, предназначенную для передачи данных, которая характеризуется совокупностью конструктивных, электрических и логических (функциональных) условий. Такие условия могут быть сформулированы для конкретной проектируемой системы или определены стандартом для определенного класса систем.

Широкое использование микропроцессорных средств и микро-ЭВМ, открывающее возможность построения УК с общими магистралями и распределенной обработкой информации, делают особенно важной задачу стандартизации интерфейса для систем обработки и передачи данных. В настоящее время в СССР и за рубежом ведутся интенсивные работы в этом направлении. Приняты и нашли широкое применение международные и государственные стандарты для информационно-управляющих систем общего назначения, разрабатываются стандарты для судовых информационно-управляющих систем.

Стандарт определяет условия, обеспечивающие конструктивную, информационную и энергетическую совместимость функциональных устройств системы. В табл. 2.19 приведены некоторые из существующих стандартных интерфейсов.

Таблица 2.19. Перечень стандартных интерфейсов

Тип	Разработчик	Передача данных			Способ передачи		Совместимость		
		Параллельная	Последовательная	Комбинированная	Синхронный	Асинхронный	Информационная	Электрическая	Конструктивная
IMS-1	СЭВ	+	—	—	—	+	+	—	—
IMS-2	СЭВ	—	—	+	—	+	+	—	—
STAL	СЭВ	+	—	—	—	+	+	+	+
ЕИ-1	СССР	+	—	—	—	+	+	+	+
КАМАК	Евроатом	+	—	—	—	+	+	+	+
МЭК	МЭК	—	—	+	—	+	+	—	—
PDV	ФРГ	—	+	—	—	+	+	—	—
BS 4421	Великобритания	—	—	+	—	+	+	—	—

Конструктивная совместимость предполагает согласованность конструктивных параметров, позволяющих соединять функциональные устройства в единое конструктивное целое. Условия стандарта распространяются на виды конструкций, предназначенных для размещения и механической защиты устройств (например, кассеты, блока, узла, стойки, шкафа) и на размеры конструктивных элементов с допусками, обеспечивающими совместимость элементов различных видов.

Информационная совместимость определяется условиями для единообразной передачи сообщений между взаимосвязанными функциональными устройствами. Условия стандарта на интерфейс включают: вид и количество сигналов; систему кодирования; название и действие управляющих сигналов; значения напряжения для сигналов «0» и «1»; тип соединительного элемента (штекерный разъем, пайка и т. п.); распределение сигналов в соединительном элементе (например, в схеме соединений штекерного разъема).

Энергетическая совместимость обеспечивается созданием единой системы электропитания функциональных устройств. Стандартом определяются также электрические и конструктивные условия: способ питания (сеть, батарея, автономное, централизованное); значения напряжения питания и их допустимые отклонения от номиналов; максимальная токовая нагрузка; тип и устройство конструктивных соединений с источниками питания; вид проводных соединений между функциональными элементами (сетевой кабель, жгут проводов, токовые шины).

Рассмотрим в качестве примера стандартный интерфейс МЭК, который предназначается для систем поразрядной двоичной и по-

байтной передачи данных со скоростью до 1 Мбит/с. Условия стандарта МЭК были включены в рабочие материалы Комиссии по радиоэлектронике СЭВ при разработке интерфейса IMS-2. Интерфейс обеспечивает взаимодействие программируемых и непрограммируемых средств информационно-управляющих систем.

Обмен информацией в системе осуществляется под воздействием контроллера, который производит адресацию абонентов и реализацию функций управления обменом. Структура магистрали интерфейса показана на рис. 2.12. Назначение шин магистрали приведено в табл. 2.20.

Функциональное устройство в системе с магистралью МЭК состоит из двух частей — функциональной и интерфейсной. Функциональная часть устройства обеспечивает выполнение его основного назначения (измерение величин, первичную обработку сигналов, формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы и пр.). Предписания стандарта на эту часть не распространяются. Функции и сигналы интерфейсной части устройства строго регламентированы стандартом. Перечень интерфейсных функций и их символическое обозначение приведены ниже.

Условно-зависимое управление передачей данных SH	
Условно-зависимое управление приемом данных AH	
Передача данных, расширенная приемом данных T, TE	
Прием данных, расширенный приемом данных L, LE	
Приоритетное обслуживание	SR
Дистанционное или местное управление	RL
Параллельный опрос	PP
Сброс прибора	DS
Запуск прибора	DT
Управление	C

Обмен данными между источником и приемником производится асинхронным способом путем выполнения взаимозависимых интерфейсных функций SH и AH. Управление обменом происходит одновременно с проверкой выполнения ряда условий: готовности байта информации; выдержки времени, необходимой для установки сигналов на шинах данных; готовности устройств-приемников к приему байта.

Функции передачи T и приема L данных адресуются контроллером различным устройствам и обеспечивают им возможность посыпать и принимать данные через интерфейс. Адреса функций T и L кодируют пятизначным двоичным словом, что обеспечивает адресное обращение к 32 устройствам. Для увеличения числа адресуемых источников и приемников до 962 используют функции расширенных приема LE и передачи TE с двухбайтным адресным словом обращения.

Функция SR обеспечивает возможность обслуживания устройств по запросам при последовательном опросе контроллером заявок на обслуживание. Запрос передается контроллеру в виде однопроводного интерфейсного сообщения SRQ. При этом

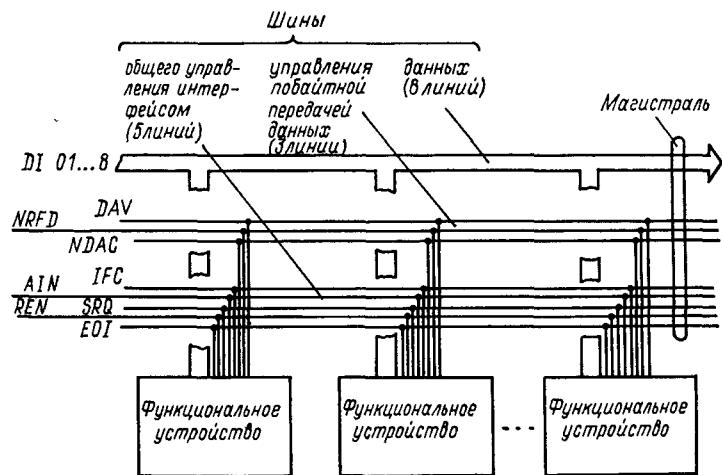


Рис. 2.12. Структура магистрали интерфейса

контроллер опрашивает устройства и анализирует причины требований.

Функция РР реализуется путем проведения контроллером циклических параллельных опросов устройств для выявления требований на обслуживание. При этом сохраняется достигнутое со-

Таблица 2.20. Назначение шин стандартного интерфейса МЭК

Группы шин	Число шин	Обозначение	Содержание сигнала	Источник сигнала
Шины данных	8	DI 01...8	Бит информации	Контроллер или передающее функциональное устройство
Шины управления побайтной передачей данных	3	DAV NRFD NDAC	Данные подготовлены К приему данных не подготовлен Данные не приняты	То же Функциональное устройство (приемник) То же
Шины общего управления интерфейсом	5	IFC ATN SRQ REN EOI	Сброс интерфейса Внимание Требование на обслуживание Разрешение на дистанционное управление Конец или идентификация	Контроллер Передающее устройство Контроллер Контроллер или передающее устройство

состояние всех интерфейсных функций, т. е. не прерывается их реализация.

Функция RL обеспечивает управление режимами приема информации. По соответствующим командам контроллера прибор может быть переключен либо в режим приема внешней информации, поступающей через интерфейс, либо в режим приема местной информации, формируемой встроенным в прибор элементами.

Функция DS обеспечивает переход устройства в определенное исходное состояние.

Функция DT дает возможность устройству начать цикл своей работы при получении соответствующего интерфейсного сообщения от контроллера.

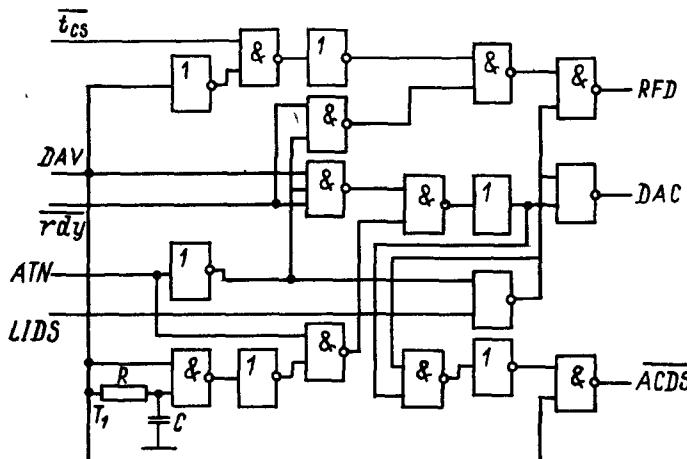


Рис. 2.13. Схема реализации интерфейсной функции АН

Функции управления С обеспечивают прибору возможность формировать различные одно- и многопроводные интерфейсные сообщения и посыпать их другим приборам с адресным или безадресным обращением.

Интерфейсная часть устройства содержит комплект схем для реализации всех интерфейсных функций и логическую схему, исключающую одновременную реализацию более чем одной интерфейсной функции. Эти схемы, как правило, реализуют на интегральных элементах ТТЛ. Условия реализации схем и типы используемых элементов стандартом не ограничиваются.

Примером реализации интерфейсной функции АН может быть схема, выполненная на элементах ТТЛ и представленная на рис. 2.13. Использование этой схемы обеспечивает прием по шинам данных интерфейсных (адресов и команд) и приборных (данных измерений, программ) сообщений.

Устройство переходит в состояние готовности для приема интерфейсных или приборных сообщений при истинных значениях

соответственно интерфейсного сообщения ATN или внутреннего сигнала готовности rdy при логическом совпадении с сообщением t_{cs} . Это сообщение является логичным лишь при реализации функции АН контроллером, который в данном случае может организовать синхронную передачу последовательности сообщений.

При поступлении сообщения DAV (готовность данных) от передающего устройства, реализующего функцию SH , схема переходит в состояние приема данных $ACDS$. Передачей $NDAC$ и $NRFD$ сообщается о неподготовленности к приему новых сообщений и о продолжающемся приеме ранее установленного сообщения. При приеме интерфейсного сообщения через время T_3 , необходимое для надежного приема и обработки сообщения, устройство переходит в состояние ожидания до поступления сообщений $ATN \vee rdy$. При этом передается сообщение DAC о завершении приема данных.

Сообщением $LIDC$ схема устанавливается в исходное состояние.

ГЛАВА 3 СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ КОРАБЛЯ

§ 3.1. Назначение и состав функциональных комплексов технических средств корабля

Совокупность объектов, выполняющих одну из типовых функций (см. § 1.1), называют функциональным комплексом технических средств корабля.

Для нормального функционирования объекты ТС корабля, как правило, нуждаются в специально организованных внешних воздействиях — управлении. Управление корабельным объектом предусматривает обеспечение необходимого протекания технологических процессов преобразования энергии, вещества и информации, поддержание работоспособности и безаварийности, или безопасности функционирования объекта, путем сбора и обработки информации о состоянии объекта и внешней среды, выработки решений о воздействии на объект и их исполнении.

В зависимости от УО, в качестве которого может рассматриваться отдельное устройство или их комплекс, выделяют такие типы корабельных систем управления, как ЛСУ, СУ ФКТС и КСУ ТС.

Как указывалось выше, объем автоматизации управления зависит от типа и назначения судна. В соответствии с выбранным объемом автоматизации в СУ ФКТС корабля можно выделить ряд уровней управления. При этом на каждом вышестоящем

уровне задачи управления решаются с большей точностью и лучшим качеством при уменьшении степени участия оператора в основном контуре управления, что снижает его утомляемость и исключает субъективные ошибки.

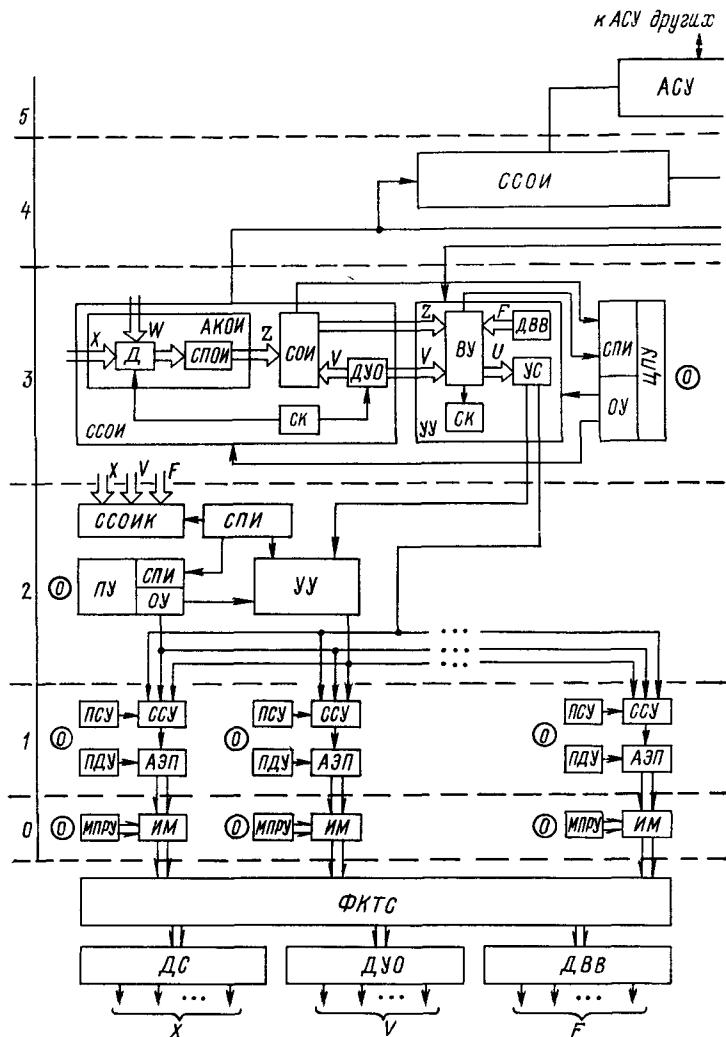


Рис. 3.1 Обобщенная структурная

Рассмотрим структурную схему СУ ФКТС корабля. В соответствии с задачами управления одна из таких возможных структур имеет вид, показанный на рис. 3.1.

Под вектором состояния объекта X в дальнейшем будем понимать совокупность контролируемых и неконтролируемых пара-

метров, однозначно характеризующих состояние координат УО. Такими параметрами могут быть, например, координаты местоположения x и y , угол дрейфа β , линейная скорость движения v_c , температура воздуха $t^{\circ}\text{C}$, производительность котла и т. д.

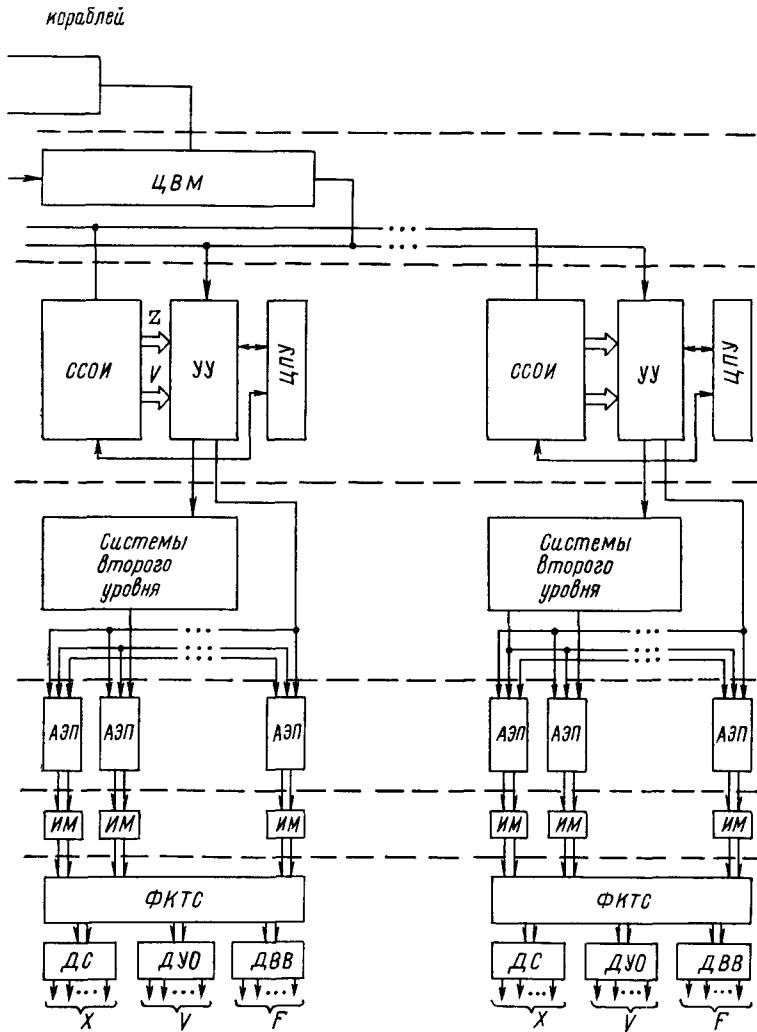


схема управления ФКТС

Под вектором состояния управляемых органов V будем понимать совокупность параметров, однозначно характеризующих состояние управляемых органов: α — угла перекладки пера руля; $\alpha_{\text{пру}}$ — угла разворота лопастей ВРШ подруливающего устройства (ПрУ); $\alpha_{\text{врш}}$ — угла разворота лопастей

ВРШ; $n_{\text{гд}}$ — частоты вращения главного двигателя (ГД) и т. д.

Под вектором возмущающих воздействий F будем понимать совокупность контролируемых и неконтролируемых возмущающих воздействий: скорости $v_{\text{вет}}$ и направления $\alpha_{\text{вет}}$ ветра, измеряемых, например, флюгерным анемометром; скорости $v_{\text{теч}}$ и направления $\alpha_{\text{теч}}$ течения, определяемых, например, с помощью относительного и абсолютного лагов; угла качки $\alpha_{\text{кач}}$ измеряемого, например, с помощью гироскопов; изменения давления и т. п.

Названные векторы могут быть записаны в следующем виде

$$X^T = (x_1, x_2, \dots, x_n); V^T = (v_1, v_2, \dots, v_m); F^T = (f_1, f_2, \dots, f_k),$$

где T — знак транспонирования.

Будем полагать, что параметры вектора X определяются с помощью датчиков состояния (DC), параметры вектора V — с помощью датчиков управляющих органов ($DУO$), а параметры вектора F — с помощью датчиков возмущающих воздействий ($ДВВ$).

В рассматриваемой схеме (рис. 3.1) можно выделить пять уровней автоматизации управления.

На нулевом уровне обеспечивается ручное управление исполнительным механизмом ($ИМ$) с помощью местного поста ручного управления ($МПРУ$). Этот уровень управления используется только в аварийных ситуациях.

На первом уровне осуществляется дистанционное управление автоматизированным электроприводом ($АЭП$). При этом возможны два режима работы: при отсутствии обратной связи положению управляющего органа организуется простое дистанционное управление с поста дистанционного управления ($ПДУ$), а при наличии обратной связи — режим следящего управления с помощью следящей системы управления ($ССУ$) и пульта следящего управления ($ПСУ$).

На втором уровне производится автоматическое управление ФКТС через ЛСУ отдельными объектами. Уровень включает в себя совокупность функционально связанных АЭП, управляющее устройство ($УУ$), систему сбора, обработки информации и контроля ($ССОИК$) и систему представления информации ($СПИ$). Оператор может в случае необходимости осуществлять непосредственное управление механизмами первого уровня через органы управления ($ОУ$), размещенные в посту управления ($ПУ$) и контролировать работу системы через $СПИ$.

На третьем уровне решаются задачи автоматического управления отдельными ФКТС, например, ФКТС стабилизации курса и положения судна, ФКТС динамического удержания бурового судна, ФКТС якорного удержания плавучей буровой установки и др. В этом случае в первую очередь необходимо решать задачу точного и непрерывного определения текущего состояния управляемого ФКТС, что реализуется с помощью автоматизированного комплекса обработки информации ($АКОИ$).

Ряд параметров вектора состояния X определяется сравнительно просто. Например, угол курса ψ определяется с помощью гиро- или магнитного компаса, а скорость v_c — с помощью лагов. Однако непосредственное измерение таких параметров вектора X , как угол дрейфа β или координаты местоположения судна x и y , не представляется возможным, поэтому их определяют с помощью косвенных измерений. Так, координаты местоположения судна могут быть определены с помощью фазовых радионавигационных систем, выходным параметром которых является разность фаз $\Delta\phi$ электромагнитных колебаний, приходящих от двух синфазных береговых передающих станций. Известны соотношения, связывающие $\Delta\phi$ с координатами судна в горизонтальной плоскости, поэтому определение параметров x и y не представляет трудности.

Искажения информации, порождаемые инструментальными погрешностями, возмущающими воздействиями окружающей внешней среды и неидеальностью каналов связи, суммируются и проявляются как ошибки измерений. Введем вектор шумов измерений W как совокупность параметров (спектральных плотностей шумов), характеризующих искажения информации в каналах связи, т. е.

$$W^T = (w_1, w_2, \dots, w_n),$$

где w_i — спектральные плотности шумов измерения координат x и y , угла дрейфа β , угла курса ψ , линейной скорости v_c и т. д.

Введем также понятие вектора измерений G как совокупности измеренных параметров состояния судна, т. е.

$$G^T = (g_1, g_2, \dots, \psi, v_c),$$

где g_i — параметры, косвенным образом характеризующие местоположение и угол дрейфа судна.

$АКОИ$ может состоять, например, из датчиков навигационной информации или гидроакустических датчиков, формирующих параметры вектора измерений G , которые в свою очередь искажаются шумами измерений W , и системы первичной обработки информации ($СПОИ$). В результате формируется так называемый вектор наблюдений Z , который определим как совокупность измеренных параметров состояния судна, т. е.

$$Z^T = (z_1, z_2, \dots, z_n).$$

$АКОИ$ является составной частью общесудовой системы сбора и обработки информации ($ССОИ$), которая кроме $АКОИ$ обычно включает в себя систему обработки информации ($СОИ$), $ДУО$ для определения параметров вектора V и систему контроля ($СК$), обеспечивающую контроль функционирования всей системы. $СОИ$ обычно реализуется на базе цифровых ЭВМ с развитыми устройствами сопряжения.

Результаты измерений в виде векторов Z и V выдаются в $УУ$, которое предназначено для решения следующих задач: получения и анализа информационных сигналов от $ССОИ$; оптимальной фильтрации результатов измерений параметров с целью получения

наилучшего приближения (оценки) \hat{X} вектора состояний X ; расчета (с учетом контролируемых возмущающих воздействий) попечерных усилий и врачающего момента, которые необходимо приложить к объекту для его удержания в заданном состоянии; распределения усилий и момента с учетом предыстории управления по функционирующему в настоящий момент управляющим органам.

Будем понимать под вектором управляющих воздействий (управлений) U совокупность параметров управляющих воздействий, которые необходимо реализовать для удержания объекта в заданном состоянии, т. е.

$$U^T = (u_1, u_2, \dots, u_m).$$

Тогда можно сказать, что основным назначением UU является формирование вектора управлений U из вектора наблюдений Z с учетом возмущающих воздействий F :

$$U = f(Z, F).$$

Для решения указанных задач UU содержит вычислительное устройство (VU) для выполнения всех математических операций, DVB и устройство сопряжения (UC) для обеспечения электрической и конструктивной совместимости VU с автоматизированными электроприводами управляющих органов.

Кроме того, в UU входит CK , обеспечивающая контроль функционирования всего управляющего устройства.

Органы управления и $СПИ$ располагаются в $ЦПУ$.

На четвертом уровне происходит формирование оптимальной стратегии управления, например, выбор маршрута, который определяется гидрометеорологическими условиями, необходимостью расхождения со встречными объектами при наличии узкостей и фарватеров и т. п. Эта стратегия реализуется с помощью соответствующей системы третьего уровня автоматизации. Для решения указанной задачи используется общесудовая $CCOI$ и $ЦВМ$.

На пятом уровне формируется общая стратегия управления судном с помощью ACU пароходства, флота или министерства.

Рассмотренная выше структура системы управления может быть построена на микропроцессорной базе. Применение МПС в управлении позволяет реализовать модульный принцип построения. Ниже будет показана возможность реализации системы управления с использованием однотипных ЭВМ на примерах различных ФКТС.

§ 3.2. Система управления функциональным комплексом технических средств стабилизации курса и положения корабля

СУ ФКТС корабля решает задачу обеспечения управления движением судна в нормальных и аварийных ситуациях путем согласованного действия всех ТС (рулевого и подруливающего

устройств, главных движителей), создающих силы и моменты на корпус судна. СУ ФКТС стабилизации курса и положения судна должна обеспечивать выполнение следующих задач: управления движением судна в соответствии с заданным маршрутом; удержания судна на заданной траектории или линии профиля; обеспечения расхождения судна с опасными объектами; удержания судна в заданной точке и т. д.

СУ ФКТС позволяет автоматизировать операции по сбору и обработке информации и управлению движением судна, что повышает безопасность плавания и обеспечивает оптимальное управление. В качестве критериев могут быть приняты критерий безопасности — минимальное уклонение от программного движения, экономический критерий — минимальная среднеквадратичная погрешность по курсу и др.

Определение объема автоматизации является, в свою очередь, задачей, требующей оптимизации. Объем должен устанавливаться для каждого типа судов в зависимости от их назначения и условий плавания.

В соответствии с правилами, предъявляемыми Регистром СССР, каждое судно должно иметь надежное устройство, обеспечивающее его поворотность и устойчивость на курсе. Такими устройствами могут быть: рулевое и подруливающее устройства, крыльчатый движитель и другие, одобренные Регистром. Для повышения надежности рулевое устройство каждого судна должно иметь два привода: основной и запасной.

Жесткие требования, предъявляемые Регистром СССР, по обеспечению управляемости судна обусловлены тем, что потеря управляемости может привести к крупной аварии вплоть до гибели судна. В связи с этим требования к надежности и качеству систем управления курсом и положением судна особенно высоки. Кроме того, эти системы должны удовлетворять требованиям ГОСТов и правилам техники безопасности.

Обобщенная структурная схема СУ ФКТС стабилизации курса и положения судна приведена на рис. 3.2.

Как указывалось выше, объем автоматизации управления курсом и положением судна зависит от его типа и назначения. В соответствии с выбранным объемом автоматизации в приведенной системе управления можно выделить ряд уровней. При этом на каждом вышестоящем уровне задачи управления решаются с большей точностью и лучшим качеством. Сложность решаемых на верхнем уровне задач обуславливает целесообразность применения средств вычислительной техники. Каждый уровень автоматизации характеризуется тем, что соответствующие ему системы могут нормально функционировать независимо от состояния более высокого уровня. Причем наличие систем последующих уровней улучшает качество управления. В зависимости от принятого объема автоматизации судна в целом могут использоваться отдельные подсистемы различных уровней. Рассмотрим уровни автоматизации управления.

Нулевой уровень — ручное управление исполнительными механизмами, осуществляющее с местных постов управления (МПУ). В приведенной схеме это — управление числом оборотов

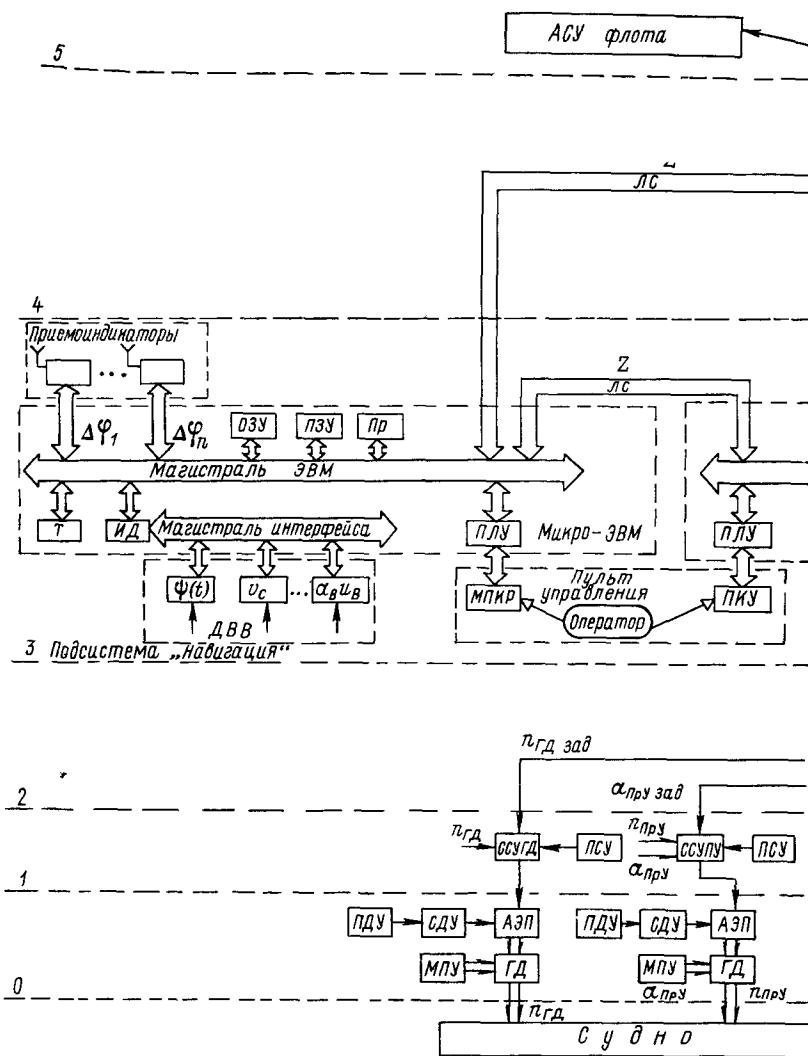
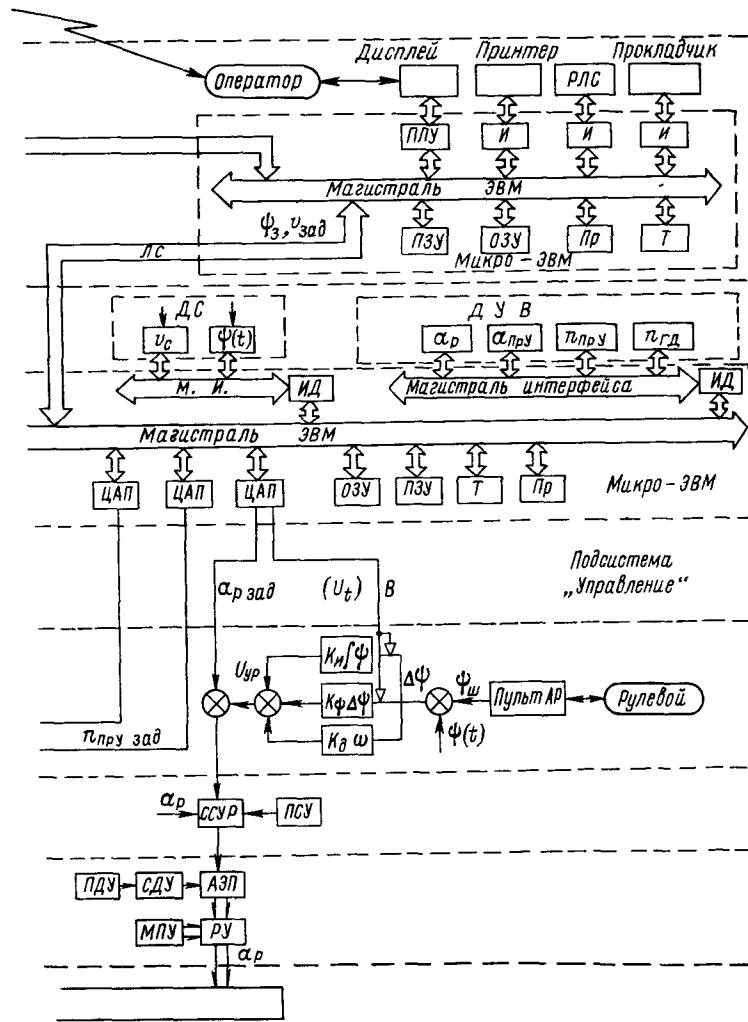


Рис. 3.2. Обобщенная структурная схема СУ ФКТС стабилизации курса

ГД ($n_{\text{гд}}$), положением пера руля ($\alpha_{\text{Р}}$), положением и числом оборотов ПрУ ($\alpha_{\text{пру}}$, $n_{\text{пру}}$). Нулевой уровень управления используется при аварийных ситуациях.

Первый уровень — дистанционное управление исполнительными механизмами, осуществляемое через АЭП. При этом воз-

можны два режима работы: при отсутствии обратной связи по выходной переменной исполнительного механизма организуется простое дистанционное управление с поста дистанционного управ-



и положения судна

ления (*ПДУ*), а при наличии обратной связи — режим следящего управления при помощи следящей системы управления (*ССУ*) и пульта следящего управления (*ПСУ*).

Второй уровень — автоматическое управление курсом судна, которое обеспечивается аналоговым авторулевым (*AP*).

Исходной моделью при построении структурной схемы авторулевого может быть принята следующая модель [5, 6]:

$$\dot{X} = AX + Ba + KF,$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} \int \Delta\psi \\ \Delta\psi \\ \omega \end{bmatrix}; \quad K^T = (0, 1, 0);$$

α — угол перекладки руля; F — внешнее возмущение; $\Delta\psi = \psi_{ш} - \psi(t)$; $\psi_{ш}$ — курс установленный на штурвале АР; $\psi(t)$ — текущий курс судна, поступающий от гирокомпаса; $\omega(t)$ — скорость изменения курса.

Гидродинамический коэффициент a_{33} характеризует инерцию массы судна и присоединенной массы воды и зависит от типа судна, скорости и осадки судна, причем $a_{33} < 0$.

Собственные числа матрицы A соответственно равны $\lambda_{1,2}=0$; $\lambda_3=a_{33}$, т. е. судно без авторулевого асимптотически устойчиво по производной, но не имеет устойчивости по курсу. Для получения асимптотической устойчивости по $\Delta\psi$ и астатизма по этой компоненте закона управления выбирается следующим образом:

$$U_{\text{ур}}(t) = K_{\text{инт}} \int_0^t \Delta\psi dt + K_\psi \Delta\psi(t) + K_{\text{диф}} \omega(t) + U(t),$$

где $K_{\text{инт}}$, K_ψ , $K_{\text{диф}}$ — коэффициенты усиления соответствующих параметров вектора состояния; $U_{\text{ур}}(t)$ — уставка следящей системы управления рулем; $U(t)$ — управляющий сигнал от внешнего цифрового контура.

Настройка аналогового АР, т. е. выбор коэффициентов $K_{\text{инт}}$, K_ψ , $K_{\text{диф}}$, происходит исходя из условий устойчивости. АР используется для обеспечения грубой устойчивости судна по курсу. Решение на этом уровне задач оптимизации движения судна, т. е. определение коэффициентов усиления K исходя из выбранного критерия оптимальности, связана с некоторыми трудностями. Так, например, величины $K_{\text{инт}}$, K_ψ , $K_{\text{диф}}$ в законе управления фиксированы и не учитывают изменения гидродинамических коэффициентов судна a_{33} и b_3 . Если предположить, что коэффициенты АР выбраны для задачи оптимизации движения при определенных балльности моря и скорости судна, то с изменением этих условий задача управления не будет иметь оптимального решения.

Решение задачи оптимизации движения судна по курсу может быть обеспечено цифровым контуром системы верхнего уровня. При совместной работе АР с внешним контуром в АР сигналом B должны быть отключены компоненты $K_{\text{инт}} \int \Delta\psi dt$ и $K_\psi \Delta\psi(t)$.

АР удерживает судно на заданном курсе без участия оператора. При этом АР решает задачи удержания судна на заданном

курсе и выполнения маневров, задаваемых оператором с ПУ. На этом уровне автоматизации использование средств цифровой вычислительной техники не всегда оправдано, что объясняется следующим. Во-первых, на втором уровне решаются задачи грубого управления и регулирования, цель которых обеспечить устойчивость или возможность регулирования, не решая при этом задач, связанных с оптимизацией. Аналоговые регуляторы позволяют решать подобные задачи, схемы регуляторов отработаны десятилетиями эксплуатации. Во-вторых, при решении задач грубого управления и регулирования работой силовых устройств с использованием средств цифровой техники возникает ряд трудноразрешимых проблем. Например, разомкнутые объекты управления могут находиться на границе устойчивости, поэтому при использовании цифровых регуляторов, помимо ошибок квантования по уровню и по времени измеряемых сигналов, существенными могут оказаться параметрические ошибки, т. е. модель системы, по которой определяется закон управления, отличается от самой системы, и такое отличие может оказаться критическим.

Третий уровень — уровень, на котором решаются задачи удержания судна на заданной траектории, на линии профиля и в заданной точке, что достигается отработкой подсистемой «Управление» курса $\varphi_{\text{зад}}$ и скорости $v_{\text{зад}}$. Элементы движения судна вырабатываются системой четвертого уровня, исходя из стратегии плавания и вектора кинематических параметров судна Z . Вектор Z вырабатывается на третьем уровне автоматизации информационно-измерительной системой, названной, исходя из решаемой ею задачи, подсистемой «Навигация», и определяет совокупность измеренных и оцененных параметров судна:

$$Z^T = (z_x, z_y, z_\varphi, z_v),$$

где компоненты z_x , z_y определяют местоположение судна в выбранной системе координат, z_φ — курс судна, z_v — скорость судна относительно используемой системы координат.

Одной из задач, решаемых подсистемой «Управление», является формирование вектора управлений U из вектора состояний X с учетом текущих управляющих воздействий:

$$U = f(X, V),$$

где f — некоторая функция, определяющая закон управления. Вектор состояний объекта X^T имеет вид

$$X^T = (\Delta\psi, \beta, \Delta v_c, v_c),$$

где $\Delta\psi = \psi_t - \psi_{\text{зад}}$; ψ_t — текущий курс; $\psi_{\text{зад}}$ — заданный курс; β — дрейф судна; $\Delta v_c = v_c - v_{\text{зад}}$; v_c — скорость судна; $v_{\text{зад}}$ — заданная скорость.

Вектор состояний управляющих воздействий можно представить в следующем виде:

$$V^T = (a_p, a_{\text{Пру}}, n_{\text{Пру}}, n_{\text{ГД}}),$$

где α_p — положение пера руля; $\alpha_{p\text{ру}}$ — угол разворота ПрУ; $n_{p\text{ру}}$ и $n_{\text{ГД}}$ — число оборотов винта ПрУ и ГД соответственно. Вектор управлений U представляет собой совокупность параметров управляющих воздействий, которые необходимо реализовать для отработки элементов движения судна:

$$U^T = (\alpha_{\text{рзад}}, \alpha_{\text{Прузад}}, n_{\text{Прузад}}, n_{\text{ГДзад}}),$$

где $\alpha_{\text{рзад}}$ — заданное положение пера руля; $\alpha_{\text{Прузад}}$ — заданный угол разворота ПрУ; $n_{\text{Прузад}}$ и $n_{\text{ГДзад}}$ — заданное число оборотов винта ПрУ и ГД соответственно.

Сложность, объем и точность решаемых на этом уровне задач определяют необходимость использования средств вычислительной техники. Для построения системы на минимальном количестве модулей разделим систему на функциональные блоки близкой вычислительной мощности, что возможно при использовании однотипных ЭВМ. В этом случае уровень можно разбить на следующие подсистемы: «Навигация» и «Управление». Рассмотрим каждую из них в отдельности и уточним задачи, которые они решают.

Подсистема «Навигация». Основное ее назначение состоит в определении вектора кинематических параметров судна Z . При нахождении компонент z_x и z_y вектора Z решается задача определения текущего местоположения судна. При движении судна по маршруту, точки которого заданы в географических координатах, его местоположение целесообразно определять также в географических координатах, где z_x — текущая широта, z_y — текущая долгота. При удержании судна в точке удобно пользоваться прямугольной системой координат x и y , где $x(y)$ — величина отклонения от заданной точки по соответствующей оси координат.

При определении местоположения судна необходимо стремиться к плавному изменению навигационных параметров, не противоречащему физическим особенностям движения судна. Такому условию удовлетворяет счисление текущего местоположения по данным лага и гирокомпаса. Однако если решать задачу автоматического удержания на профиле, опираясь только на счисление, то погрешность удержания будет складываться из систематических ошибок лага и гирокомпаса и инструментальной погрешности системы управления. Если же в этой задаче опираться на данные радионавигационных систем (РНС), то погрешность удержания на профиле будет складываться из случайных ошибок данных РНС и инструментальной погрешности системы управления. Поэтому алгоритм определения местоположения судна строится таким образом: по данным лага и гирокомпаса ведется счисление, а затем по показаниям РНС определяются поправки к счисленным координатам местоположения судна. Для реализации такого алгоритма необходимо решить следующие задачи.

Во-первых, по данным РНС, выходным параметром которых является разность фаз $\Delta\phi_i$ электромагнитных колебаний, приходящих от нескольких синфазных береговых передающих станций,

находится широта и долгота местоположения судна. Определение параметра $\Delta\phi$, и перевод его в цифровую форму осуществляют приемоиндикатор соответствующей системы. Затем через интерфейс связи (ИС) происходит передача преобразованного параметра $\Delta\phi$, в микро-ЭВМ подсистемы «Навигация», где по известным соотношениям, связывающим $\Delta\phi$, с координатами местоположения судна, производится расчет широты и долготы.

Во-вторых, величины $\Delta\phi$, определяются с ошибками как систематически, так и случайными. Необходимо по показаниям нескольких РНС стремиться к устранению систематических ошибок в определении местоположения судна по радиоизмерениям.

Используя полученные данные, уточняются счисленные координаты местоположения судна, определяются поправки к показаниям лага и гирокомпаса и находятся компоненты z_ψ , z_v вектора Z .

Исходными данными для счисления являются показания лага v_c и гирокомпаса ψ_t , которые снимаются с соответствующих датчиков состояния и возмущения и после преобразования в цифровой код через магистраль интерфейса и интерфейс датчиков (ИД) передаются в микро-ЭВМ. Данные о скорости v_b и направлении α_b ветра, течении, качке позволяют проводить более полное комплексирование, связанное с определением местоположения и элементов движения судна. Датчики этих величин также подключены к микро-ЭВМ через ИД. Контроль за работой и ввод некоторых исходных данных, необходимых для работы подсистемы осуществляется оператором с местного пульта контроля и работы (МПКР) подсистемы «Навигация». МПКР связан с микро-ЭВМ через плату управления (ПЛУ).

Алгоритмы решения задач подсистемы «Навигация» реализуются в виде программ, которые хранятся в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) микро-ЭВМ. Текущая информация, результаты вычислений, признаки, вырабатываемые подсистемой, записываются в ОЗУ. Управление работой программы, обработку команд и их выполнение осуществляется процессором (Пр).

Подсистема «Управление». Основное ее назначение состоит в определении вектора управлений U . Исходными данными для решения этой задачи является векторы состояний X и текущих воздействий V .

Значения вектора V измеряются ДУВ и после преобразования в цифровой код через ИД поступают в микро-ЭВМ. Часть элементов вектора X , например ψ_t и v_c , непосредственно измеряются ДС, а величины ω и β оцениваются по данным измерений. Следует отметить, что структура вектора X определяется исходя из типа решаемой задачи управления и структуры закона управления. Так, например, если скорость судна более 3 уз, то при решении задачи движения по профилю исключается необходимость включения в закон управления параметра β .

При выполнении ряда геофизических исследований требуется обеспечить определенную динамику движения судна. Для реше-

ния этой задачи может быть использована цифровая система управления, в которой реализован конечно-разностный полный регулятор. Структуру такого регулятора можно получить, перейдя от непрерывной формы к дискретной, а затем к каноническому описанию движения судна по каналу курса [6]:

$$A(q^{-1})\Delta\psi_t = q^{-1}B(q^{-1})a_t + C(q^{-1})v_t,$$

где

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2}; \\ B(q^{-1}) &= \beta_1 + \beta_2q^{-1} + \beta_3q^{-2}; \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + c_3q^{-3}; \end{aligned}$$

q^{-1} — оператор задержки: $x_{t-1} = q^{-1}x_t$; $\Delta\psi_t = \psi_{\text{зад}} - \psi_t$; $\psi_{\text{зад}}$ — заданный курс судна; ψ_t — текущий курс на момент времени t ; v_t — внешнее возмущающее воздействие; a_t — положение пера руля.

Закон управления выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} a_{t+1} = - (1/\beta_1) (-a_1 \Delta\psi_{t+1}) - a_2 \Delta\psi_t - a_3 \Delta\psi_{t-1} + \beta_2 a_t + \beta_3 a_{t-1} - \\ - c_1 \Delta\psi_{t+1}^* - c_2 \Delta\psi_t^* - c_3 \Delta\psi_{t-1}^* - \Delta\psi_{t+2}^*, \end{aligned}$$

где $\Delta\psi_{t+1}^*$ — желаемая траектория изменения курса, определяемая исходя из требуемого расположения корней уравнений замкнутой системы и представляющая собой оптимальный закон изменения курса; a_t , β_t , c_t — коэффициенты полиномов канонического описания движения судна по каналу курса.

Использование внешнего цифрового контура позволяет учитывать изменение условий плавания, а также, применяя алгоритмы идентификации или адаптивного управления, программно изменять коэффициенты закона управления, значения которых хранятся в ОЗУ микро-ЭВМ системы управления.

Значения вектора U после преобразования из цифровой формы в аналоговую через ЦАП поступают на систему управления соответствующего исполнительного механизма. Контроль за работой, запуск и останов системы или части программы осуществляют оператор с пульта контроля и управления (ПКУ), который связан с микро-ЭВМ системы через ПЛУ.

Алгоритмы решения задач подсистемы «Управление», в частности закон управления, реализуются в виде программ, хранящихся в ПЗУ. Управление работой программ, обработку команд и их выполнение осуществляют Пр.

Системы третьего уровня автоматизации управления — системы реального времени. Работой программного обеспечения управляет программа обработки прерывания от таймера (Т). Связь между микро-ЭВМ осуществляется через ЛС.

Функции оператора при обслуживании систем третьего уровня сводятся к наблюдению за работой системы. Вмешательство в ра-

боту системы происходит редко. Например, исходя из изменившейся обстановки оператор может запретить ввод курсовых и скоростных поправок из подсистемы четвертого уровня.

Основной задачей четвертого уровня автоматизации является формирование оптимальной стратегии плавания с учетом гидрометеорологических условий, необходимости расхождения со встречными объектами при наличии узостей, фарватеров и т. п. На четвертом уровне осуществляется также координация работы всех ТС судна. Эта стратегия реализуется подсистемой «Управление» третьего уровня автоматизации. Для решения указанной задачи используются данные подсистемы «Навигация» и данные о надводной обстановке, получаемые преимущественно от радиолокационных станций (РЛС).

Пятый уровень автоматизации — формирование общей стратегии управления судном с помощью АСУ пароходства, флота или министерства.

§ 3.3. Система управления функциональным комплексом технических средств динамического удержания бурового судна в заданном положении

Развитие морских нефтепромыслов требует проведения буровых работ на все большей глубине. Разработанные ранее конструкции морских буровых платформ, как соединенных с грунтом посредством опорных колонн, так и удерживаемых с помощью многоякорных систем, перестали удовлетворять современным требованиям по максимальной глубине моря и точности удержания, в связи с чем появилась необходимость создания и исследования систем динамического удержания бурового судна (БС) над устьем скважины. Благодаря отсутствию каких-либо материальных связей с дном моря, кроме бурильных труб, системы динамического удержания (СДУ) имеют такие существенные преимущества, как отсутствие принципиальных ограничений по глубине моря в точке удержания, возможность разворота БС относительно устья скважины для уменьшения качки судна и ослабления влияния возмущающих воздействий, возможность быстрого ухода со стоянки и возврата на нее.

Таким образом, СДУ должна обеспечивать удержание БС над устьем скважины в течение всей операции бурения. Допустимая погрешность удержания определяется, главным образом, пределом гибкости бурильных труб и составляет обычно 5—6 % глубины моря в точке бурения.

Современные БС как объекты управления можно рассматривать в виде комплекса взаимосвязанных контуров управления по продольной и поперечной осям и курсу судна. Особенность этих судов состоит в том, что процесс удержания судна осуществляется в режиме «без хода», поэтому на судно большое влияние оказывают такие возмущающие воздействия, как течение, ветер,

волнение, прилив и отлив, в связи с чем БС оборудуются специальными движителями (гребные и поворотные винты, крыльчатые движители и т. д.).

Использование в качестве ПРУ винтов регулируемого шага (ВРШ) позволяет достигать максимального КПД. Кроме того, поворотные ВРШ обеспечивают лучшую маневренность судна, так как полный разворот винта на 360° занимает около 25 с, т. е. меньше, чем реверс ВРШ, и не влияют на скорость движения БС.

Положение судна определяется с помощью акустических датчиков, отвесного кренометра и кренометра стояка. В состав акустической системы входят два комплекта датчиков. Акустические сигналы, поступающие от ответчиков, расположенных на дне, принимаются гидрофонами, расположенными в прямоугольной раме примерно в 2 м под килем судна. В акустической системе, как правило, имеется несколько типов ответчиков: СДУ, подхода и бурового инструмента.

Ответчики СДУ применяются в режиме стабилизации судна в заданной точке и подхода к скважине. Они располагаются по обе стороны буровой скважины на жесткой конструкции, установленной на устье скважины. В зависимости от глубины в месте стоянки и шума БС используется один из следующих ответчиков: малой, средней и большой глубины. Ответчики малой глубины благодаря широкой диаграмме направленности позволяют выполнять операцию подхода без каких-либо трудностей. При использовании ответчиков средней и большой глубины в режиме подхода для повышения уровня излучения необходимо применять дополнительный ответчик подхода.

Два дополнительных ответчика инструмента, обеспечивающие операции повторного введения инструмента в скважину, работают в таком режиме, чтобы отвечать на каждый запрос одного из ответчиков СДУ. Поскольку ответчики СДУ и инструмента используются одновременно, частоты их работы отличаются друг от друга. Ответчики генерируют акустические сигналы после возбуждения их опрашивающими преобразователями запроса.

Погрешность в определении положения, вызванная килевой и бортовой качкой судна, компенсируется с помощью показаний кренометра стояка, который служит для определения угла стояка по отношению к вертикали.

В процессе работы СДУ выполняет следующие операции: сбор информации о координатах судна; определение отклонений относительно точки стабилизации; расчет продольных и поперечных усилий и врачающего момента, прилагаемых к судну; формирование управляющих воздействий; распределение их по группам исполнительных механизмов. Комплексная СДУ, как правило, состоит из контрольно-измерительного блока, предназначенного для определения положения судна относительно устья скважины и для измерения параметров окружающей среды, блока автоматического управления и регулирования в комплекте с МПС и нескольких исполнительных механизмов.

Качество работы СДУ оценивается эффективностью функционирования и показателем технического уровня. Эффективность системы определяется способностью СДУ с необходимой точностью решать задачу удержания судна в требуемой точке бурения в течение заданного периода времени, а ее технический уровень — удобством работы оператора и обслуживающего персонала.

Основным критерием эффективности является показатель готовности СДУ, определяемый отношением времени проведения бурения к общему времени работы системы. При этом СДУ должна обеспечивать удержание судна внутри допустимого круга безопасности при определенном состоянии внешней среды. Косвенным критерием могут служить данные о количестве судов, оснащенных СДУ и находящихся в эксплуатации. Критериями технического уровня СДУ являются объем и уровень автоматизации процесса динамического удержания и буровых работ, а также технический уровень применяемой управляющей МПС.

Высокий показатель готовности СДУ достигается за счет применения: надежных датчиков, обеспечивающих высокую точность определения координат судна; эффективной системы проверки качества информации; фильтрации входной информации; резервирования датчиков, МПС и блоков питания; диагностических блоков; комбинированного принципа управления, связанного с учетом отклонений положения судна по продольной и поперечной осям и курсу, а также внешних возмущений (направления и силы ветра, течения, волнения и т. д.); оптимальной системы распределения управляющих воздействий между высокоэффективными исполнительными механизмами подруливающих устройств и гребных винтов.

Объем и уровень автоматизации работ на БС определяются наличием: автоматических и автоматизированных режимов стабилизации положения судна и курса, а также дистанционного управления исполнительными механизмами; системы автоматического повторного ввода бурового инструмента в скважину; алфавитно-цифровых дисплеев; блоков встроенного контроля; возможности исключения выполнения неправильных команд оператора и т. п.

Высокие требования к точности удержания БС в заданном положении в широком диапазоне изменения возмущающих воздействий не удается обеспечить методами управления по отклонению из-за сильных инерционных свойств БС при относительной слабости управляющих воздействий. Это обуславливает необходимость применения методов комбинированного управления, которые позволяют уменьшить чувствительность СДУ к возмущениям. Использование таких методов возможно только при условии прямого или косвенного измерения тех возмущений, воздействие которых на СДУ необходимо ослабить.

Исследования, проведенные в СССР и за рубежом, показали, что наибольшее дестабилизирующее влияние оказывает ветровое

воздействие, которое стохастично по своей природе и вследствие этого не поддается прогнозированию. Кроме того, ветровое воздействие характеризуется широким динамическим диапазоном изменения как интенсивности, так и направления. Скорость ветра может достигать 70—80 уз, а при порывах — 100 уз. Для измерения ветрового возмущения обычно используют флюгерные анемометры, позволяющие определять скорость и направление ветра. Результаты таких измерений должны обязательно подвергаться фильтрации и сглаживанию для уменьшения числа включений управляющих органов.

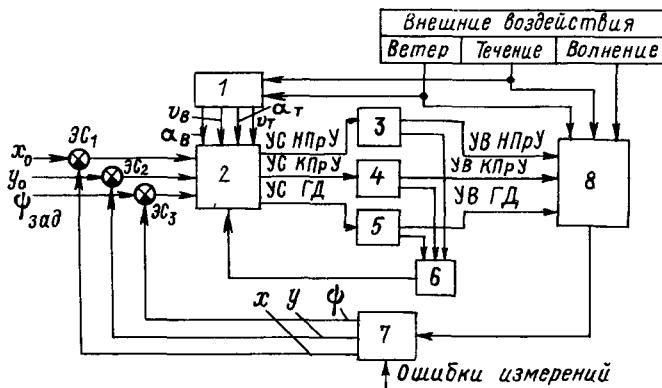


Рис. 3.3. Функциональная схема СДУ с комбинированным управлением.

1 — датчики внешних возмущений, 2 — управляющее устройство, 3 — привод НПРУ, 4 — привод КПРУ, 5 — привод ГД; 6 — датчики управляемых воздействий, 7 — датчики положения БС, 8 — будильное супностное

Морское течение оказывает значительно меньшее влияние на точностные характеристики СДУ, что объясняется следующим. На основании экспериментальных данных скорость течения представляется стационарным случайным процессом, однако с учетом большой инерционности БС можно ограничиться детерминированным подходом, т. е. считать, что скорость и направление течения постоянны. Тогда его влияние может быть учтено при выработке управляющих воздействий.

Морское волнение оказывает на СДУ наименьшее влияние, вследствие того что оператор выбирает заданный курсовой угол таким образом, чтобы это влияние минимизировать.

Функциональная схема СДУ с комбинированным управлением может быть представлена в виде, показанном на рис. 3.3. На этой схеме опущены все вспомогательные элементы СДУ, не входящие в прямую цепь управления. Управляющие воздействия ($УВ$) создаются носовыми ($НПРУ$) и кормовыми ($КПРУ$) подруливающими устройствами, а также $ГД$.

Координаты заданного положения x_0 , y_0 и заданный курсовой угол $\psi_{\text{зад}}$ выдаются оператором на входы элементов сравнения \mathcal{EC}_1 — \mathcal{EC}_3 , где происходит их сравнение с текущими координатами x , y и ψ , поступающими от датчиков 7, и формирование сигналов ошибок по положению Δx и Δy и по курсу $\Delta\psi$, которые поступают на вход управляющего устройства 2. Сюда поступают также параметры возмущающих воздействий (ветра и течения) от датчиков 1 и параметры управляющих воздействий от датчиков 6. Управляющее устройство 2 на основе поступающей информации производит расчет управляющих сигналов (YC) для $HPrU$, $KPrU$ и GD с учетом действующих в настоящий момент возмущающих воздействий.

Управляющие сигналы подаются на соответствующие электродвигатели НПрУ, КПрУ и ГД, вследствие чего последние вырабатывают управляющие воздействия, необходимые для удержания БС в заданном положении. Такая структура системы позволяет получить значительно более высокие характеристики СДУ за счет появления частично инвариантных свойств системы по отношению к измеряемым возмущающим воздействиям.

СДУ решает задачу минимизации среднеквадратичной ошибки положения судна с учетом ограничений, накладываемых на создаваемые ПрУ упоры и скорости изменения упоров. При этом выбор оптимального курса (положения) судна является одной из главных задач СДУ, так как при оптимальном курсе значительно уменьшается волновое воздействие, что в свою очередь улучшает условия работы системы. Практически все современные СДУ рассчитаны на работу в четырех режимах: автоматическом, автоматизированном по курсу, автоматизированном по перемещениям и ручном.

В первом режиме судно удерживается в заданном положении без вмешательства оператора. Второй режим характеризуется тем, что оператор воздействует на продольные и поперечные перемещения судна с помощью специальной рукоятки на пульте управления, а СДУ обеспечивает автоматическое регулирование по курсу. В третьем режиме оператор управляет курсом, в то время как СДУ обеспечивает автоматическое регулирование продольных и поперечных перемещений судна. В ручном режиме оператор непосредственно контролирует курс, а также поперечные и продольные перемещения судна.

В отличие от удержания судна на заданном курсе или на заданном профиле (заданной траектории) для удержания БС в точке бурения требуется реализовать управление по нескольким параметрам, в качестве которых обычно принимают ошибки Δx и Δy между требуемым и действительным положением БС, а также ошибку по курсу $\Delta \Phi = \varphi_{\text{зад}} - \varphi_{\text{ист}}$ — требуемое (заданное) значение курсового угла, обычно определяемое из условия наименьшего влияния на БС возмущающих воздействий, $\varphi_{\text{ист}}$ — истинное значение курсового угла. На рис. 3.4 точка $M_0(x_0, y_0)$ есть точка пересечения поверхности воды с вертикалью, проходящей

через устье скважины. Эта точка определяет требуемые координаты центра бурового устройства (ЦБУ), а также $M_1(x_{ист}, y_{ист})$ — истинные его координаты. Сигналы ошибки определяются как $\Delta x = x_0 - x_{ист}$, $\Delta y = y_0 - y_{ист}$, $\Delta\psi = \psi_{зад} - \psi_{ист}$.

Для удержания БС в точке M_0 , как следует из рис. 3.4, необходимо обеспечить возможность одновременного разворота БС относительно вертикальной оси, проходящей через ЦБУ, и движения его по радиусу-вектору R . Перемещение БС около точки M_0 происходит с очень малыми скоростями, поэтому традиционное рулевое устройство становится неэффективным даже при управлении курсом. Следовательно, для решения поставленной задачи БС должно быть оборудовано системой носовых и кормовых ПрУ, а поступательное движение может быть обеспечено обычными гребными винтами.

Таким образом, управляющими устройствами при построении СДУ являются: гребные винты регулируемой скорости или регулируемого шага; двигатели регулируемой скорости или регулируемого шага, неподвижно закрепленные на поперечных осях судов (ПрУ типа «винт в трубе»); поворотные двигатели регулируемой скорости или регулируемого шага (ПрУ типа ПДРК — поворотные движительно-рулевые колонки).

Одним из основных требований, предъявляемых к СДУ бурового судна, является обеспечение высоких надежностных характеристик в течение всего периода бурения, поскольку выход из строя системы может привести к недопустимому отклонению БС от заданного положения, срыву бурового оборудования и, как следствие, к необходимости повторного бурения. Поэтому при проектировании СДУ необходимо применять все известные методы повышения надежности функционирования, такие, как холодное и горячее параллельное и перекрестное резервирование.

При рассмотрении вопросов синтеза МПС динамического удержания возникают затруднения, связанные с наличием большого числа нелинейностей. Для применения хорошо изученного аппарата теории линейных систем автоматического управления и регулирования необходимо провести линеаризацию исходных уравнений, описывающих разомкнутую систему. Однако такое преобразование, как правило, связано с принятием ряда допущений, поэтому в процессе дальнейших исследований требуется уточнить основные характеристики и параметры спроектированной СДУ, например с помощью методов автоматизированного проектирования.

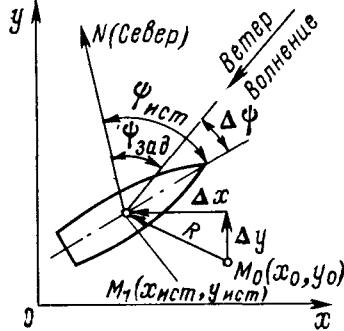


Рис. 3.4. Система координат для определения положения БС

или регулируемого шага (ПрУ типа ПДРК — поворотные движительно-рулевые колонки).

Одним из основных требований, предъявляемых к СДУ бурового судна, является обеспечение высоких надежностных характеристик в течение всего периода бурения, поскольку выход из строя системы может привести к недопустимому отклонению БС от заданного положения, срыву бурового оборудования и, как следствие, к необходимости повторного бурения. Поэтому при проектировании СДУ необходимо применять все известные методы повышения надежности функционирования, такие, как холодное и горячее параллельное и перекрестное резервирование.

При рассмотрении вопросов синтеза МПС динамического удержания возникают затруднения, связанные с наличием большого числа нелинейностей. Для применения хорошо изученного аппарата теории линейных систем автоматического управления и регулирования необходимо провести линеаризацию исходных уравнений, описывающих разомкнутую систему. Однако такое преобразование, как правило, связано с принятием ряда допущений, поэтому в процессе дальнейших исследований требуется уточнить основные характеристики и параметры спроектированной СДУ, например с помощью методов автоматизированного проектирования.

Линеаризованные уравнения, описывающие УО, могут быть представлены в следующем виде [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} a_1 \frac{d^2x}{dt^2} + a_2 \frac{dx}{dt} &= P_x - a_3 \frac{dy}{dt} - a_4 \frac{d\psi}{dt} + F_x; \\ b_1 \frac{d^2y}{dt^2} + b_2 \frac{dy}{dt} &= P_y - b_3 \frac{d\psi}{dt} - b_4 \frac{dx}{dt} + F_y; \\ c_1 \frac{d^2\psi}{dt^2} + c_2 \frac{d\psi}{dt} &= M_z - c_3 \frac{dx}{dt} - c_4 \frac{dy}{dt} + M_\psi, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где x, y, ψ — управляемые параметры; P_x, P_y, M_z — силы упора и вращающий момент, создаваемые управляющими воздействиями; F_x, F_y и M_ψ — суммарные силы и вращающий момент, обусловленные возмущающими воздействиями.

Анализ системы уравнений (3.1) показывает, что изменение одного из управляемых параметров влечет за собой изменение остальных, поэтому СДУ бурового судна относится к классу многосвязных систем автоматического регулирования.

В соответствии с (3.1) СДУ должна состоять из трех сепараторных каналов формирования управляющих сигналов (соответственно числу управляемых координат), в каждом из которых имеется отдельный регулятор.

При построении МПС прежде всего определяется алгоритм управления. Пусть поведение БС описывается уравнениями (3.1). Рассмотрим в качестве управляемой координаты y и, считая каналы автономными, получим упрощенное уравнение движения в переходный период

$$\frac{d^2y}{dt^2} = F(t), \quad (3.2)$$

где $F(t) = F_v(t) + F_y(t)$; $F_v(t)$ — проекция возмущающей силы на ось y ; $F_y(t)$ — проекция силы упора на эту же ось.

Обычно управляющее воздействие подруливающего устройства F_y определяется соотношениями

$$F_y(t) = H^2(t) \operatorname{sign} H(t) = H(t) |H(t)|; \quad (3.3)$$

$$\frac{dH}{dt} = \theta, \quad (3.4)$$

где H — шаг ВРШ подруливающего устройства; θ — скорость изменения шага ВРШ, причем H всегда лежит в пределах

$$H_{\min} \leq H \leq H_{\max}.$$

Если на объект действует постоянное возмущающее воздействие $F_v = \text{const}$, то для удержания БС в заданном положении управляющее воздействие должно быть равно $F_y = -F_v$. Соответствующий этому значению F_y шаг винта согласно (3.3) должен быть постоянным и равным

$$H = -\sqrt{|F_v|} \operatorname{sign} F_v \quad (3.5)$$

и, следовательно, $\theta = 0$.

Если на БС действует ступенчатое возмущающее воздействие, то

$$F_B(t) = \begin{cases} F_B, & \text{если } t \leq 0; \\ F_B + \Delta F_B (\Delta F_B > 0), & \text{если } t > 0. \end{cases} \quad (3.6)$$

Под воздействием приращения внешней возмущающей силы ΔF_B при сохранении прежнего значения шага ВРШ (3.5) объект уйдет из точки удержания.

Задача управления состоит в том, чтобы в случае отклонения координаты y от точки удержания больше чем на величину ε , характеризующую чувствительность системы, сохранить объект в области допустимых значений координаты y и вернуть его без перерегулирования в исходное положение. Используем для этого математическую модель управляемого БС (3.2)–(3.6) с целью выработки управляющих воздействий, предварительно опробованных на указанной модели [5, 6].

Пусть скорость θ изменения шага ВРШ принимает лишь три значения: $k, 0, -k (k > 0)$. Выработка управляющего сигнала сводится к определению значения θ в каждый момент времени в зависимости от текущих значений состояния и воздействий. Из соотношений (3.2)–(3.6) следует

$$\frac{dF}{dt} = 2|H(t)|\theta. \quad (3.7)$$

Таким образом, между ускорением и скоростью изменения шага ВРШ подруливающего устройства существует следующая связь: при $0=k$ ускорение d^2y/dt^2 возрастает, при $\theta=0$ — остается постоянным, при $\theta=-k$ — убывает.

На рис. 3.5 в плоскости координат dy/dt и y указаны возможные траектории изображающей точки в зависимости от различных законов управления переходными процессами. В случае, отображенном кривой a , объект не возвращается в заданную точку удержания, а в случае, представленном кривой c , возвращение в заданную точку происходит с перерегулированием. В случае, которому соответствует кривая b , возвращение в точку удержания происходит без перерегулирования, так как фазовая траектория

Таблица 3.1 Знаки скоростей и ускорений изменения шага ВРШ на различных участках фазовой траектории

Участок фазовой траектории (см. рис. 3.5)	Знак скорости	Знак ускорения
0—1	+	+
1—2	+	-
2—3	-	-
3—0	-	+

проходит лишь через первые два квадранта плоскости координат dy/dt и y . Именно этот оптимальный случай целесообразно реализовать при построении МПС динамического удержания БС.

Фазовая траектория, изображенная на рис. 3.5, состоит из четырех участков, различающихся знаками скорости и ускорения изменения шага ВРШ (табл. 3.1).

Рассмотрим последовательно [6] формирование управляющего сигнала на каждом из этих участков (рис. 3.6).

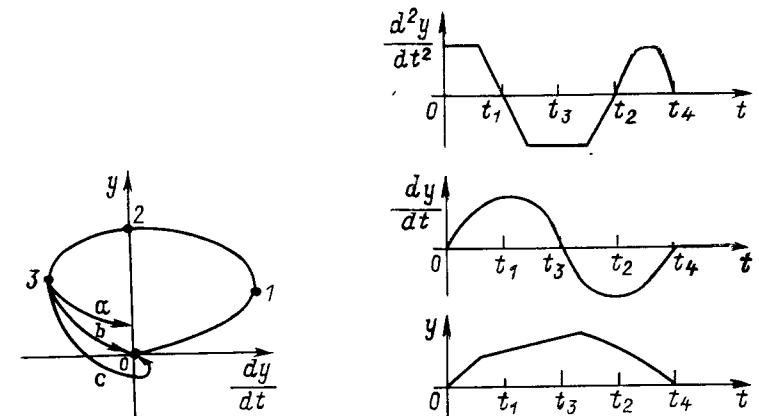


Рис. 3.5. Фазовая траектория изображающей точки

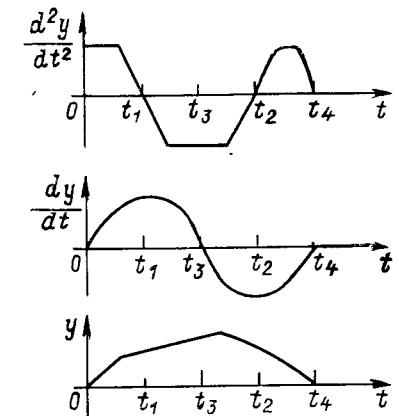


Рис. 3.6. Временные диаграммы изменения ускорения, скорости и координат БС

Участок 0—1 (см. рис. 3.5). На этом участке необходимо погасить скачок ускорения, возникающий в начальный момент времени вследствие внешнего возмущения. Это достигается лишь при управлении $\theta=-k$, которое обеспечивает убывание ускорения до нуля. Выработка такого управляющего сигнала происходит в момент t_ε выхода объекта из зоны нечувствительности $y(t_\varepsilon)=\varepsilon$. До этого момента СДУ сохраняет сигнал $\theta=0$. При прохождении участка координата y и ее скорость получают положительные приращения и принимают в точке 1 (см. рис. 3.5) соответственно значения

$$y(t_1) = y_1; \quad \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t_1} = y_1.$$

Участок 1—2. В результате управления на этом участке гасится положительная скорость y_1 . Это может быть достигнуто сначала управлением $\theta=-k$ (ускорение убывает), а затем, по желанию, и управлением $\theta=0$ (ускорение сохраняет постоянное отрицательное значение). Координата y вновь получает положительное приращение и принимает в точке 2 значение $y(t_2)=y_2$, скорость $\left. \frac{dy}{dt} \right|_{t_2}$ обращается в нуль, а ускорение становится от-

рицательным: $\frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t_2} = y_2 < 0$. Отметим, что переход от управления $\theta = -k$ к управлению $\theta = 0$ увеличивает пройденный путь y_2 и ускорение.

Участок 2—3. Здесь следует погасить отрицательное ускорение за счет управляющего сигнала $\theta = k$ (ускорение возрастает). Координата y и скорость dy/dt получают на этом участке отрицательные приращения, но y остается положительной, а скорость dy/dt отрицательной. В точке 3

$$y(t_3) = y_3 > 0; \quad \frac{dy}{dt} \Big|_{t_3} = y_3 < 0.$$

Если в некоторой части этого участка от управления $\theta = k$ перейти к управлению $\theta = 0$, то y_3 и \dot{y}_3 уменьшается, т. е. самые малые по абсолютной величине приращения координата y и ее скорость получают на этом участке при постоянном управлении $\theta = k$.

Участок 3—0. Управление на этом участке направлено на то, чтобы в точке 0 координата y , ее скорость и ускорение обратились в нуль: $y(t_4) = \dot{y}_4 = \ddot{y}_4 = 0$. В начале и конце этого участка ускорение должно быть нулевым. Чтобы скорость dy/dt от отрицательного значения перешла к нулевому, нужно, чтобы ускорение d^2y/dt^2 внутри участка было положительным и таким, что

$$\frac{dy}{dt} \Big|_{t_3} + \int_{t_3}^{t_4} \frac{d^2y}{dt^2} dt = 0.$$

Последние условия могут быть обеспечены последовательным переходом от управления $\theta = k$ к управлению $\theta = -k$, причем чем больше часть участка, на котором $\theta = 0$, тем больше отрицательное приращение получит координата y при обращении скорости в нуль.

При реализации алгоритма управления следует иметь в виду, что сигнал θ может быть равным k лишь при $H < H_{\max}$ и $-k$ при $H > H_{\min}$; координата y не может превышать допустимое значение: $|y| \leq y_{\text{доп}}$; не исключается возможность перерегулирования, т. е. случая, когда на последнем этапе $|\Delta y_2| > y_2$ и, следовательно, $y(t_4) < 0$; формирование управляющего сигнала производится лишь по текущим значениям y , dy/dt и d^2y/dt^2 .

Проведенный анализ позволяет составить математическое описание алгоритма. Прежде всего определим значение координаты объекта и ее двух производных в некоторый момент t по известному состоянию объекта $(\frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0}, \frac{dy}{dt} \Big|_{t=0}, y_0, H_0)$ в предшествующий момент t_0 и известному постоянному управлению θ на промежутке $[t_0, t]$ длины $\Delta t = t - t_0$.

Согласно выражениям (3.1), (3.7) имеем

$$\frac{d^2y}{dt^2} - \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0} = 2\theta \int_0^{\Delta t} |H_0 + \theta\tau| d\tau,$$

где τ — относительное время. На основании этого получаем следующие выражения:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = g_2 \left(\frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0}, H_0, \theta, \Delta t \right) = \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0} + 2\theta \int_0^{\Delta t} |H_0 + \theta\tau_1| d\tau_1; \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} = g_1 \left(\frac{dy}{dt} \Big|_{t=0}, \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0}, H_0, \theta, \Delta t \right) = \frac{dy}{dt} \Big|_{t=0} + \\ + \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0} \Delta t + 2\theta \int_0^{\Delta t} d\tau_2 \int_0^{\tau_2} |H_0 + \theta\tau_1| d\tau_1; \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} y(t) = g_0 \left(y_0, \frac{dy}{dt} \Big|_{t=0}, \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0}, H_0, \theta, \Delta t \right) = y_0 + \frac{dy}{dt} \Big|_{t=0} \Delta t + \\ + \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0} (\Delta t)^2 + 2\theta \int_0^{\Delta t} d\tau_3 \int_0^{\tau_3} d\tau_2 \int_0^{\tau_2} |H_0 + \theta\tau_1| d\tau_1. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Обозначения g_2 , g_1 , g_0 правых частей выражений (3.8)–(3.10) приняты для удобства записи. Последние слагаемые в (3.8)–(3.10) характеризуют влияние, оказываемое управлением θ на изменение координат. Если $\theta = 0$, то эти слагаемые отсутствуют, если же $\theta \neq 0$, то они имеют тот же знак, что и управление θ . В последнем случае выражения (3.8)–(3.10) приводятся к более удобному для вычислений виду

$$\frac{d^2y}{dt^2} = g_2 \left(\frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0}, H_0, \theta, \Delta t \right) = \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0} + H(t) |H(t)| - H_0 |H_0|; \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} = g_1 \left(\frac{dy}{dt} \Big|_{t=0}, \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0}, H_0, \theta, \Delta t \right) = \\ = \frac{dy}{dt} \Big|_{t=0} - \frac{|H_0|^3}{3\theta} + \left(\frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0} + H_0 |H_0| \right) \Delta t + \frac{|H(t)|^3}{3\theta}; \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} y(t) = g_0 \left(y_0, \frac{dy}{dt} \Big|_{t=0}, \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0}, H_0, \theta, \Delta t \right) = \\ = y_0 - \frac{H_0^3 |H_0|}{12\theta^2} + \left(\frac{dy}{dt} \Big|_{t=0} - \frac{|H_0|^3}{3\theta} \right) \Delta t + \\ + \left(\frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0} - H_0 |H_0| \right) \frac{(\Delta t)^2}{2} + \frac{H^3(t) |H(t)|}{12\theta^2}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

где

$$H(t) = H_0 + \theta \Delta t. \quad (3.14)$$

В математическом описании алгоритма часто используется сокращенная запись операции решения функциональных уравнений. Например, запись

$$\Delta t : 0 = g_1 \left(\frac{dy}{dt} \Big|_{t=0}, \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0}, H_0, 0, \Delta t \right) \quad (3.15)$$

означает, что по заданным значениям dy/dt , d^2y/dt^2 , H_0 и $\theta=0$ из указанного уравнения определяется время Δt .

На рис. 3.7 приведена схема алгоритма управления координатой y . Блок 1 — ввод исходных данных. Блоки 2 и 3 — блоки проверки условий $dy/dt > 0$, $d^2y/dt^2 > 0$. Если эти условия выполня-

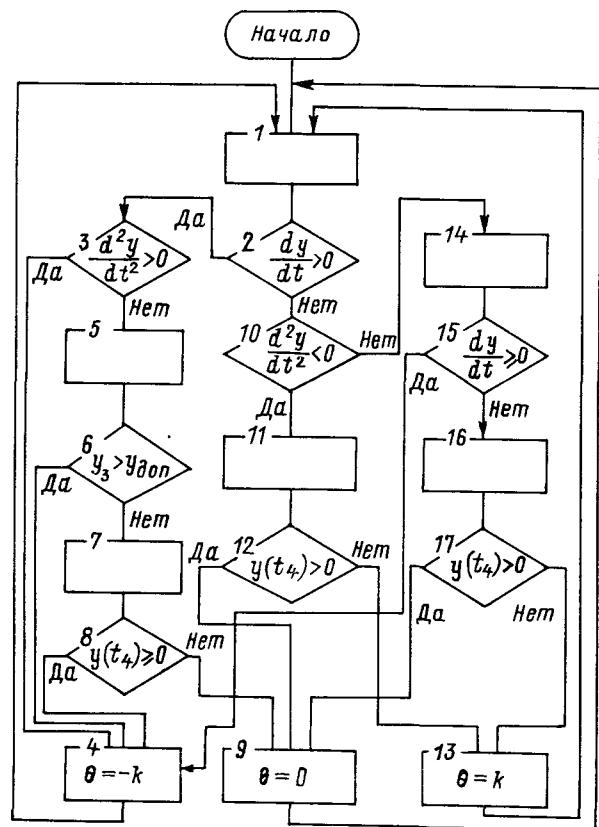


Рис. 3.7. Схема алгоритма управления координатой y

ются, то БС находится на участке $0—1$ (см. рис. 3.5). Выбор управления однозначен: $\theta = -k$ (блок 4). Если же $dy/dt > 0$, $d^2y/dt^2 < 0$, то объект находится на участке $1—2$ и нужно перейти к блоку 5, где осуществляется вычисление координаты y_2 при предположительном управлении $\theta = 0$, т. е.

$$\Delta t : 0 = g\left(\frac{dy}{dt}\Big|_{t=0}, \frac{d^2y}{dt^2}\Big|_{t=0}, H_0, 0, \Delta t\right);$$

$$y_2 = g_0\left(y_0, \frac{dy}{dt}\Big|_{t=0}, \frac{d^2y}{dt^2}\Big|_{t=0}, H_0, 0, \Delta t\right).$$

Если $y_2 > y_{\text{доп}}$ (блок 6), то необходимо выработать управляющий сигнал $\theta = -k$ (блок 4). Если $y_2 \leq y_{\text{доп}}$, то сохраняются две возможности: $\theta = -k$ и $\theta = 0$. Значение $y = y(t_4)$ на конце участка $3—0$ вычисляется в предположении, что $\theta = -k$ на оставшейся части участка $1—2$, $\theta = k$ на участке $2—3$, $\theta = k$ в первой части участка $3—0$ и $\theta = -k$ во второй части этого участка (блок 7). При таких управлениях на каждом из участков $1—2$, $2—3$, $3—0$ координата y получает наименьшее по абсолютной величине приращение.

Если окажется $y(t_4) < 0$ (блок 8), то дальнейшее управление $\theta = -k$ неизбежно приведет к перерегулированию и, следовательно, необходимо выработать сигнал $\theta = 0$ (блок 9). Если же $y(t_4) \geq 0$, то вырабатывается управляющий сигнал $\theta = -k$.

Если при реализации блоков 2 и 10 окажется $dy/dt < 0$, $d^2y/dt^2 < 0$, то это означает, что объект находится на участке $2—3$. В этом случае вычисляется значение $y(t_4)$ в предположении, что на оставшейся части участка $2—3$ $\theta = k$, а на участке $3—0$ сначала $\theta = k$, а затем $\theta = -k$ (блок 11). При таких управлениях $y(t_4)$ будет наибольшим из возможных.

Если $y(t_4) > 0$ (блок 12), то вырабатывается управляющий сигнал $\theta = 0$, в противном случае $\theta = k$ (блок 13).

Если при реализации блоков 2 и 10 окажется $dy/dt < 0$, $d^2y/dt^2 > 0$, то это означает, что объект находится на участке $3—0$. В этом случае вычисляется значение, которое скорость принимает в результате изменения ускорения d^2y/dt^2 от текущего неотрицательного значения до нуля за счет управляющего сигнала $\theta = -k$ (блок 14).

Если значение скорости неотрицательно, то принимается $\theta = -k$ (блок 15). Если же скорость осталась отрицательной, то сохраняются две возможности: $\theta = 0$ и $\theta = k$. Для окончательного выбора вычисляется значение $y(t_4)$ в конце следующего участка регулирования. Сначала принимается, что $\theta = k$, а затем $\theta = -k$, причем момент переключения и заключительная точка t_4 выбираются из следующих условий: ускорение убывает до нуля, т. е. $\frac{d^2y}{dt^2}\Big|_{t_4} = 0$, а скорость возрастает до нуля, т. е. $\frac{dy}{dt}\Big|_{t_4=0} = 0$ (блок 16).

Если $y(t_4) > 0$ (блок 17), то вырабатывается управляющий сигнал $\theta = 0$, в противном случае $\theta = k$ (блок 13).

В рассматриваемом алгоритме указаны лишь основные функции составляющих его блоков. Некоторые из блоков содержат большее число операций, последовательность которых указана выше. Причиной этого служат различия в цепях управления при прохождении отдельных участков прогнозируемой траектории. Например, основная функция блока 7 состоит в вычислении значения координаты $y_4 = y(t_4)$ в конце процесса регулирования (см. описание участка $1—2$ на рис. 3.5). Для этого необходимо последовательно вычислить все значения параметров состояния на концах участка $1—2$, $2—3$, $3—0$. Кроме того, нужно учитывать значение H_2 шага ВРШ в точке 2. Если момент T достижения шагом-

H своего наименьшего значения H_{\min} наступает до прихода объекта в точку 2, т. е. если $\frac{dy}{dt} \Big|_{t_0+T} \leqslant 0$, то прогнозирование со-

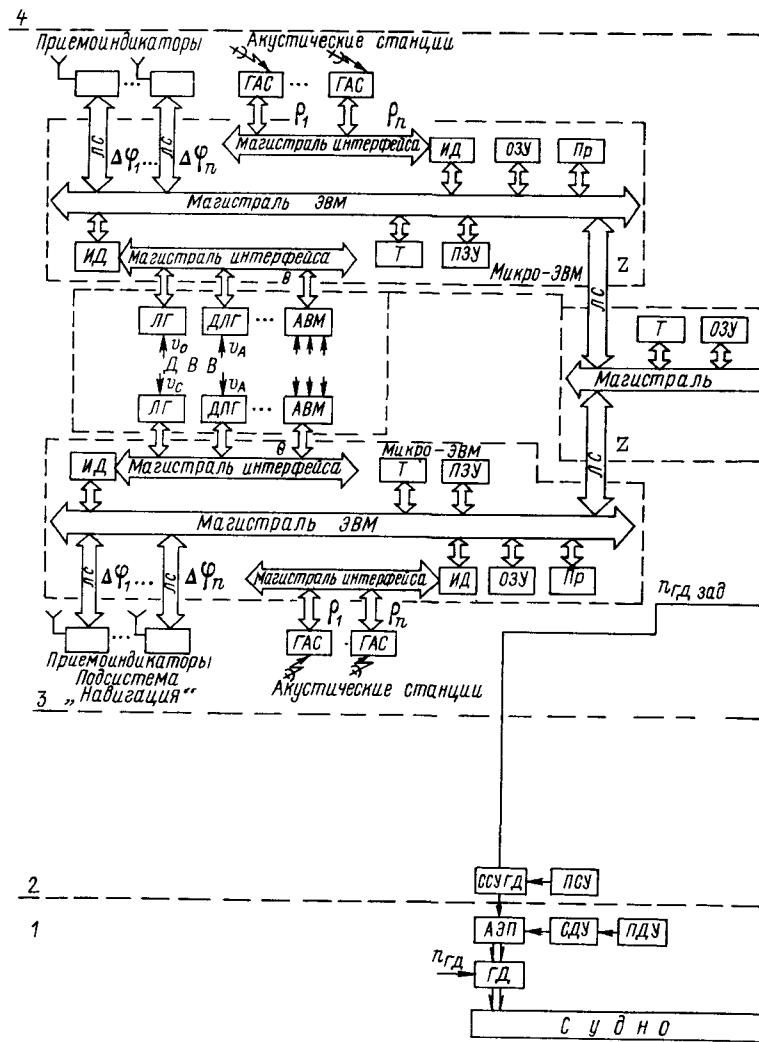
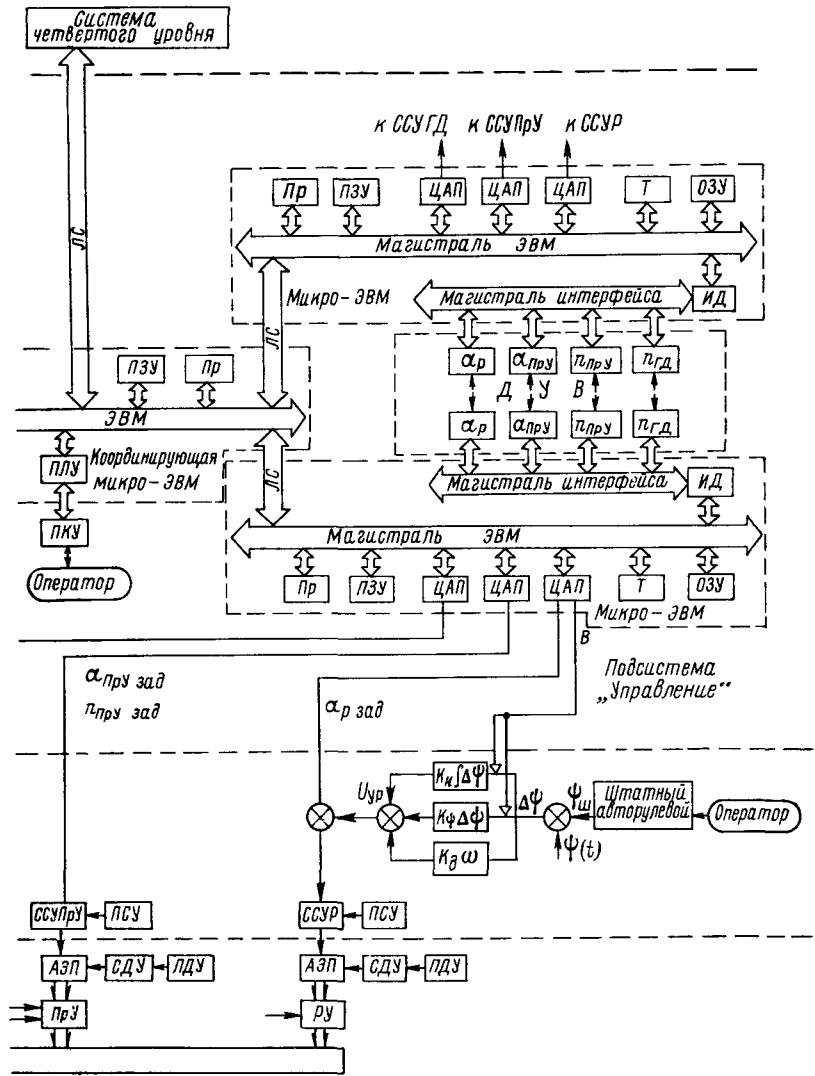


Рис. 3.8. Возможная структура МПС динамического удержания БС

стояния в точке 2 следует проводить по одним формулам, если же этот момент наступает после прихода объекта в точку 2, т. е. если $\frac{dy}{dt} \Big|_{t_0+T} \leqslant 0$, то — по другим.

Многие операции алгоритма являются операциями решения уравнений для времен достижения определенных точек траектории. Для некоторых из этих уравнений может быть получена яв-



в заданном положении

ная формула решения, другие могут быть решены лишь приближенными численными методами. Например, время достижения точки 2 (блок 5) может быть вычислено согласно (3.9) по формуле $\Delta t = -\frac{dy}{dt} \Big|_{t=0} / \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0}$, а время достижения этой же

точки, определяемое из уравнения $0 = g_1 \left(\frac{dy}{dt} \Big|_{t=0}, \frac{d^2y}{dt^2} \Big|_{t=0}, H_0, -\theta, \Delta t \right)$ (блок 7), такого представления не имеет.

Следует отметить, что в исходной постановке задачи была взята упрощенная модель движения БС. Принятое упрощение прояснило связь между ускорением и управляющим воздействием. Однако в некоторых случаях такое упрощение может привести к ошибкам прогнозирования. Тогда при разработке алгоритма управления прогнозирующую модель следует уточнить.

Для возможности построения системы на минимальном количестве модулей разобъем систему на функциональные блоки примерно одинаковой вычислительной мощности, что позволит использовать однотипные микро-ЭВМ. Такой подход приобретает особое значение при резервировании основных блоков. Система состоит из следующих функциональных блоков: информационно-измерительной системы, или подсистемы «Навигация», подсистемы «Управление».

Рассмотрим возможную структуру построения на микропроцессорной базе СДУ бурowego судна в заданном положении (рис. 3.8).

Подсистема «Навигация». Основная задача данной подсистемы состоит в определении вектора кинематических параметров судна Z

$$Z^T = (z_x, z_y, z_\psi, z_v), \quad (3.16)$$

где компоненты z_x, z_y определяют местоположение судна в выбранной системе координат, z_ψ — курс судна, z_v — скорость судна относительно используемой системы координат. При производстве буровых работ под компонентами z_x, z_y понимаются величины отклонения $\Delta x(t), \Delta y(t)$, а под z_ψ, z_v — оценка величины и направления скорости сноса относительно устья скважины. При начальной привязке к точке бурения под z_x, z_y понимаются географические координаты судна $\lambda(t), \phi(t)$. Значения вектора Z должны определяться на каждый момент времени.

Исходными данными для начальной привязки к точке бурения являются данные РНС и ДВВ. Определение разности фаз $\Delta\varphi_i$ электромагнитных колебаний, приходящих от береговых передающих станций, и перевод ее в цифровую форму осуществляется приемоиндикатором соответствующей системы. Затем через интерфейс связи происходит передача параметра $\Delta\varphi_i$ в микро-ЭВМ подсистемы «Навигация», где $\Delta\varphi_i$ пересчитывается в величины φ, λ . Используя данные датчиков доплер-лага (ДЛГ), лага (ЛГ) и гирокомпаса производится комплексирование навигационной информации, при этом устраняются систематические ошибки в определении координат φ, λ .

Для определения угла наклона судна θ используется инклинометр, датчики которого подключены к аналоговой вычислитель-

ной машине (АВМ). Значение θ после получения его в АВМ передается через преобразователь и интерфейс в ЭВМ.

Для повышения точности определения положения судна при проведении буровых работ применяются системы ближней навигации, использующие для этой цели гидроакустические станции (ГАС). Эта система считается основным источником информации о положении судна относительно устья скважины. ГАС включает в себя специализированное вычислительное устройство, определяющее разность фаз прихода звукового сигнала от нескольких гидроакустических маяков ρ_i . Каждая из станций связана с микро-ЭВМ через ИД. По значениям разности фаз ρ_i определяются величины $\Delta x, \Delta y$. Использование нескольких станций, работающих на разных частотах, позволяет выделить систематическую ошибку в определении величины отклонения судна от устья скважины. Однако вследствие акустических помех, обусловленных, например, выбросом грязи из скважины, необходимы вспомогательные источники информации, к которым относятся измеритель скорости и направления ветра, гирокомпас, лаг, абсолютный лаг. Эти датчики через магистраль интерфейса подключаются к ИД.

Подсистема «Управление». Назначение подсистемы — выработка по данным, полученным из подсистемы «Навигация» и от ДУВ, сигналов на управляющие механизмы судна с целью удержания БС в заданной точке. В подсистеме «Управление» осуществляется расчет продольных и поперечных усилий и врачающего момента, которые должны быть приложены к судну для удержания его в заданном положении, распределения полученных усилий и момента по группам управляющих органов. Этот расчет должен учитывать предысторию управления, техническое состояние управляющих органов (при неисправности одного из них должно быть произведено перераспределение необходимых усилий и момента между исправными). Исходными данными для решения этой задачи являются значения вектора Z , поступающие через ЛС от подсистемы «Навигация», вектора управляющих воздействий V , вектора состояний объекта управления X . Цель задачи — исходя из закона управления и значений векторов V, X, Z сформировать вектор управления

$$X^T = (\psi, \omega, \beta, v_c), \quad (3.17)$$

где ψ — угол сноса бурового судна; v_c — скорость сноса; β — угол дрейфа; ω — скорость изменения направления сноса. Вектор состояний управляющих воздействий

$$V^T = (\alpha_p, \alpha_{\text{ПРУ}}, n_{\text{ПРУ}}, n_{\text{ГД}}), \quad (3.18)$$

где α_p — положение пера руля; $\alpha_{\text{ПРУ}}$ — угол разворота ПРУ; $n_{\text{ПРУ}}$ и $n_{\text{ГД}}$ — число оборотов винта ПРУ и ГД соответственно.

Вектор управлений

$$U^T = (a_{\text{РЗад}}, a_{\text{ПРУЗад}}, n_{\text{ПРУЗад}}, n_{\text{ГДЗад}}), \quad (3.19)$$

где $\alpha_{Р зад}$ — заданное положение пера руля; $\alpha_{ПРУ зад}$ — заданный угол разворота ПрУ; $n_{ПРУ зад}$ и $n_{ГД зад}$ — заданное число оборотов винта ПрУ и ГД соответственно.

Компоненты вектора V определяются непосредственно измерением соответствующих величин через ДУВ. Подключение ДУВ к микро-ЭВМ аналогично включению ДВВ подсистемы «Навигация». Часть компонент вектора X определяется непосредственно — это величины ϕ и v_c . Значение ω оценивается исходя из значений измеряемых параметров.

Алгоритмы решения задач СДУ, в частности закон управления, реализуются в виде программ и хранятся в ПЗУ, текущая информация, результаты вычислений, признаки, вырабатываемые в процессе работы, записываются в ОЗУ. Управление работой программ, обработку команд и их выполнение осуществляет Пр. СДУ представляет собой систему реального времени, поэтому как в подсистеме «Навигация», так и в подсистеме «Управление» работой программного обеспечения управляет программа обработки прерывания от таймера.

Для повышения живучести и надежности функционирования ФКТС удержания БС в заданном положении производится дублирование подсистем «Навигация» и «Управление», каждая из которых содержит две идентичные ЭВМ с одинаковыми внешними устройствами ввода-вывода и датчиками, т. е. осуществляется параллельное горячее резервирование. Проверку работоспособности, выбор и подключение работающей ЭВМ или использование части данных от датчиков резервной машины производят координирующая ЭВМ (КЭВМ). Через КЭВМ осуществляется передача данных от подсистемы «Навигация» в подсистему «Управление». Взаимодействие микро-ЭВМ и КЭВМ осуществляется через ЛС.

СДУ судна в заданном положении должна вводиться в действие и контролироваться одним оператором. Для этой цели предназначен главный пост управления, который состоит из ПКУ и КЭВМ.

Информация о режимах работы СДУ и текущие данные выводятся на экран пульта контроля и управления. По этим данным оператор может производить контроль за работой и в случае необходимости через терминал ПКУ вмешиваться в работу системы. Например, осуществлять вывоз тестов для проверяемой микро-ЭВМ, ввод исходных данных для решаемых ФКТС задач, запуск или останов самих задач, выбор основных и вспомогательных источников информации о положении БС относительно устья скважины, ввод координат и величин, характеризующих заданное положение и курс и т. д.

Для выработки стратегии управления судном при переходе от одной точки бурения к другой, учитываются метеорологические условия, условия бурения, а также осуществляется координация работы всех ТС буровой платформы.

§ 3.4. Система управления функциональным комплексом технических средств якорного удержания полупогруженной плавучей буровой платформы

Основная часть нефтегазовых запасов на земном шаре сосредоточена на дне морей и океанов. Для разведки и разработки морских месторождений нефти и газа на глубинах 200—300 м применяются полупогруженные плавучие буровые установки (ППБУ).

К числу основных задач, возникающих при бурении с ППБУ, относится удержание ее над буровой скважиной с ограниченными перемещениями и разворотом относительно центра тяжести при действии ветра, волн и течения. Решение этой задачи осуществляется системой якорного удержания (СЯУ), включающей в себя якорные устройства, автоматизированные электроприводы якорных лебедок и системы управления ими. Наибольшее распространение получили платформы прямоугольной формы с СЯУ, состоящей из четырех якорных лебедок, расположенных по углам, и восьми якорных связей. Ввиду того что практически никогда не требуется тянуть или выбирать все якорные цепи одновременно, каждая лебедка обслуживает две якорные связи, для чего она снабжена специальным механизмом переключения.

Допустимая погрешность удержания ППБУ по положению составляет 5 % глубины моря в точке бурения и определяется главным образом пределом гибкости бурильных труб, а ошибка по углу разворота не должна превышать $\pm 3^\circ$. Для удержания ППБУ над устьем скважины можно создать сильно натянутую систему якорных связей, однако реализация такой системы может привести к аварийной ситуации, так как надежное удержание ППБУ с помощью якорей в значительной степени зависит от особенностей грунта. Кроме того, к якорным связям будут постоянно приложены максимальные усилия натяжения, что создаст определенную опасность их разрыва. Поэтому удержание ППБУ производится якорями на провисающих цепях. Часть каждой из них лежит на грунте, что повышает удерживающую способность якоря. Однако ввиду гибкости такой системы неизбежны отклонения ППБУ от положения равновесия (смещения относительно точки удержания) под действием сил ветра, волн и течения.

Возмущения, действующие на ППБУ и выводящие ее из равновесия, можно разделить на статические и динамические. СЯУ выбирается таким образом, что при действии статических (осредненных за длительный промежуток времени) сил ветра и течения обеспечивается самоудержание ППБУ в заданной окрестности точки бурения с неизменными длинами вытравленных якорных цепей (пассивное позиционирование). Динамическое воздействие волновых нагрузок и ветровых порывов в общем случае носит случайный характер и дает сложную картину «динамических» перемещений платформы. В этом случае пассивное позиционирование не обеспечивает стабилизацию положения ППБУ, и поэтому

необходимо проведение активных кратковременных коррекций путем изменения длины вытравленных цепей.

При пассивном позиционировании управление осуществляется дистанционно человеком-оператором. В случае же активных коррекций необходимо применение автоматизированной системы управления, так как только с ее помощью можно обеспечить оперативное использование текущей информации о состоянии ППБУ и якорных связей, необходимое качество переходных процессов и надежность эксплуатации установки. Эта система реализует уп-

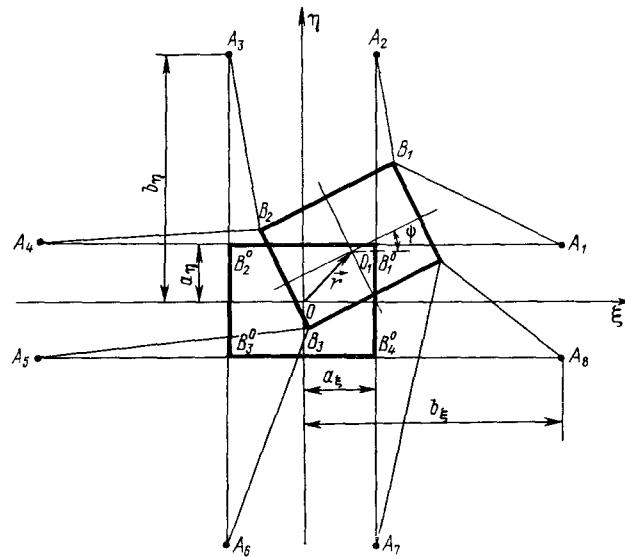


Рис. 3.9. Система координат и определение положения ППБУ

равление по трем параметрам, которыми являются отклонение по углу разворота $\Delta\varphi$ и отклонение от требуемого положения центра бурового устройства (ЦБУ) Δx и Δy (рис. 3.9). Отличительной чертой СЯУ является большое число взаимосвязанных управляющих воздействий (по числу якорных связей), что значительно усложняет построение автоматизированной системы.

Указанные выше обстоятельства определяют необходимость разработки специальных методов исследования и построения автоматизированных систем якорного удержания ППБУ в заданном положении. Режиму якорного удержания ППБУ присущ целый ряд особенностей, отличающих его от режима постановки и снятия судна с якоря. К ним относятся: необходимость получения точных координат ЦБУ относительно устья скважины, для чего ППБУ оборудуется специальными акустическими, инклинометрическими и другими системами определения управляющих параметров Δx и Δy ; большая инертность ППБУ как главного управляемого объекта по отношению к управляющим и возмущающим воздействиям; наличие трех взаимосвязанных управляемых параметров в сочетании с большим числом управляющих воздействий, что обуславливает большой объем вычислительных работ при реализации алгоритмов управления и, как следствие, необходимость применения бортовых вычислительных машин; наличие гибких кинематических связей, определяющих высокую колебательность СЯУ, вследствие чего особенное внимание должно быть обращено на устойчивость проектируемой системы; высокое требование на точности удержания при широком диапазоне изменения возмущающих воздействий; высокие требования к функционированию СЯУ в течение всего периода буровых работ.

Для построения автоматизированной системы управления положением ППБУ необходимо выбрать законы управления изменениями длин цепей. Определим основные уравнения движения в системе неподвижных координат ξ , η с началом в точке удержания O , расположенной в плоскости поверхности моря (см. рис. 3.9). Ось ξ направим вдоль диаметральной плоскости платформы при нахождении ее в требуемом (неразвернутом) положении. В этом случае требуемое положение ЦБУ будет иметь координаты $\xi=0$ и $\eta=0$, а параметрами управления станут ξ , η , ψ вместо Δx , Δy , $\Delta\varphi$ соответственно. Эти параметры определяются с помощью системы датчиков бокового и продольного сноса, представляющих собой трехосевые стабилизированные акселерометры или донные, эталонные звуковые импульсные приемопередатчики.

Кроме того, для оптимального управления необходима информация о внешних возмущениях, которая поступает от датчиков скорости и направления ветра, течения, высоты и направления волн и др. Для контроля управляющих воздействий служат датчики натяжения якорных связей, которыми снабжаются якорные механизмы.

Движение ППБУ слагается из поступательного перемещения ее центра тяжести O_1 (см. рис. 3.9) с радиусом-вектором $\vec{r} = (\xi, \eta)$ и вращения вокруг центра тяжести, характеризуемого углом поворота ψ ($\psi > 0$, если поворот осуществляется против часовой стрелки). Поступательное движение описывается векторным уравнением

$$\ddot{\vec{r}} + \vec{g}(\vec{r}) = \vec{P} + \vec{F}_{\text{вн}}, \quad (3.20)$$

а вращательное скалярным

$$J\ddot{\psi} + h(\dot{\psi}) = M_p + M_F, \quad (3.21)$$

где μ — диагональная матрица второго порядка, составленная из сумм массы ППБУ и присоединенных масс воды по соответствующим осям; J — момент инерции ППБУ с учетом присоединенного момента; функции $\vec{g}(\vec{r})$ и $h(\dot{\psi})$ характеризуют сопротивление водной среды движению ППБУ; векторы \vec{P} и $\vec{F}_{\text{вн}}$ — результирующие

сил натяжения цепей и внешних возмущений в горизонтальной плоскости; M_P и M_F — результирующие моменты.

Сила P и ее момент M_P являются функциями координат положения ППБУ r, ψ и длин вытравленных цепей L_i , внешнее воздействие $F_{\text{вн}}$ и момент M_F — функциями времени. В силу нелинейности этих зависимостей непосредственное использование уравнений (3.20), (3.21) затруднительно.

Примем следующие условия управления.

1. В каждой из четырех пар цепей (см. рис. 3.9)

$$(B_1A_1, B_2A_4), (B_4A_8, B_3A_5), (B_1A_2, B_4A_7), (B_2A_3, B_3A_6)$$

сумма длин вытравленных цепей является постоянной заданной величиной. Таким образом, если одна цепь выбирается, то вторая травится с такой же скоростью.

2. В положении равновесия при отсутствии внешних воздействий длины вытравленных цепей L_i^0 и их проекции на плоскость l_i^0 имеют следующие зависимости:

$$L_i^0 = L_\xi; \quad l_i^0 = b_\xi - a_\xi; \quad i = 1, 4, 5, 8;$$

$$L_i^0 = L_\eta; \quad l_i^0 = b_\eta - a_\eta; \quad i = 2, 3, 6, 7.$$

3. Разность приращений длин цепей, расположенных (при нахождении ППБУ в положении равновесия) вдоль оси ξ , равна разности приращений длин цепей, расположенных вдоль оси η .

Можно показать, что при соблюдении этих условий при малых отклонениях ППБУ от положения равновесия и при малых приращениях длин вытравленных цепей, справедливы линейные приближения уравнений (3.1) и (3.2) по каждой из координат ξ, η, ψ в виде

$$\mu \ddot{z} + v \dot{z} + Cz = R + F_{\text{вн}}, \quad (3.22)$$

где z заменяет любую координату ξ, η, ψ ; μ, v — постоянные гидродинамические коэффициенты, определяемые конструктивными особенностями ППБУ; C — коэффициент жесткости якорной системы, зависящий от величины отклонения установки от положения равновесия [5].

Продифференцировав уравнение (3.22) по времени и положив $U = \dot{R} + \dot{F}_{\text{вн}}$, получим

$$\mu \ddot{z} + v \dot{z} + Cz = U. \quad (3.23)$$

Для оптимальной стабилизации положения ППБУ необходимо найти закон управления уравнением (3.23), за качественную характеристику которого примем квадратичный функционал вида

$$I(U) = \int_0^\infty (\lambda_1 z^2 + \lambda_2 \dot{z}^2 + \lambda_3 \ddot{z}^2 + U^2) dt, \quad (3.24)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — весовые коэффициенты — заданные неотрицательные числа. Управление U будем считать оптимальным, если оно переводит объект из начального состояния ξ_0, η_0, ψ_0 в положение $\xi = \eta = \psi = 0$ и минимизирует квадратичный функционал качества (3.24).

Известно, что в такой постановке оптимальное управление представляет собой линейную обратную связь по всем фазовым координатам [5]:

$$U = -(K_1 z + K_2 \dot{z} + K_3 \ddot{z}), \quad (3.25)$$

коэффициенты которого определяются по следующему правилу:

1) вычисляются коэффициенты многочлена $\pi(S) = -S^6 + \pi_1 S^4 + \pi_2 S^2 + \pi_3$ по формулам

$$\pi_1 = \frac{\lambda_3}{\mu^2} - 2 \frac{C}{\mu} + \frac{v^2}{\mu^2}; \quad \pi_2 = -\frac{\lambda_2}{\mu^2} - \frac{C^2}{\mu^2}; \quad \pi_3 = \frac{\lambda_1}{\mu^2};$$

2) определяются корни S_1, S_2, S_3 многочлена $\pi(S)$, имеющие отрицательные вещественные части;

3) вычисляются коэффициенты $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ многочлена

$$\delta(S) = S^3 + \delta_1 S^2 + \delta_2 S + \delta_3 = (S - S_1)(S - S_2)(S - S_3);$$

4) вычисляются коэффициенты

$$K_1 = \mu \delta_3; \quad K_2 = \mu \delta_2 - C; \quad K_3 = \mu \delta_1 - v.$$

Таким образом, чтобы произвести синтез оптимального управления, необходимо на основе теории цепной линии вычислить текущие значения коэффициентов $C_z(z = \xi, \eta, \psi)$, исходя из глубины места бурения и характеристик цепи. В качестве исходных данных используются значения параметров ППБУ и якорной системы, хранящиеся в постоянной памяти автоматизированной системы управления, а также начальные значения координат, скоростей и ускорений установки, приращений длин цепей и скоростей их движения, информация о которых поступает от соответствующих датчиков.

Используя информацию датчиков, можно определить значения возмущающих воздействий $F_{\text{вн}}, M_F$ по каждой координате и скоростям их изменения $\dot{F}_{\text{вн}}, \dot{M}_F$, что позволит по формуле (3.25) вычислить значения скоростей изменения управляемых воздействий $\dot{R}_\xi, \dot{R}_\eta$ и \dot{M}_P .

Сигналы управления исполнительными механизмами (якорными лебедками) в виде скоростей $v_1—v_8$ травления—выбиания якорных цепей определяются исходя из принятых условий управления, согласно которым

$$\left. \begin{aligned} R_\xi &= \rho_\xi (\Delta L_1 + \Delta L_8); \\ R_\eta &= \rho_\eta (\Delta L_2 + \Delta L_3); \\ M_R &= \rho_\psi (\Delta L_1 - \Delta L_8) = \rho_\psi (\Delta L_3 - \Delta L_2), \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

где ρ_ξ , ρ_η , ρ_ψ — положительные постоянные, определяемые характеристиками цепей. Очевидно, скорости изменения управляющих воздействий \dot{R}_ξ , \dot{R}_η , \dot{R}_ψ будут пропорциональны скоростям изменения длин цепей:

$$\left. \begin{aligned} \dot{R}_\xi &= \rho_\xi (v_1 + v_8); \\ \dot{R}_\eta &= \rho_\eta (v_2 + v_3); \\ \dot{R}_\psi &= \rho_\psi (v_1 - v_8) = \rho_\psi (v_3 - v_2). \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Отсюда скорости v_1 , v_2 , v_3 , v_8 можно определить по правилу

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= (\frac{1}{2}) (\dot{R}_\xi / \rho_\xi + \dot{M}_R / \rho_\psi); \\ v_2 &= (\frac{1}{2}) (\dot{R}_\eta / \rho_\eta - \dot{M}_R / \rho_\psi); \\ v_3 &= (\frac{1}{2}) (\dot{R}_\xi / \rho_\xi - \dot{M}_R / \rho_\psi); \\ v_8 &= (\frac{1}{2}) (\dot{R}_\eta / \rho_\eta + \dot{M}_R / \rho_\psi). \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

Скорости изменения длин остальных цепей следует определять согласно принятым условиям управления

$$v_4 = -v_1; \quad v_5 = -v_8; \quad v_6 = -v_3; \quad v_7 = -v_2. \quad (3.29)$$

Управление осуществляется с помощью МПС по алгоритму, схема которого представлена на рис. 3.10. В блоке 1 производится ввод постоянных параметров, не меняющихся в процессе управления, таких, как масса ППБУ, коэффициенты присоединенных масс, коэффициенты демпфирования, коэффициенты жесткости цепей и др. В блоке 2 вводятся текущие значения координат ЦБУ ξ , η и угла разворота установки ψ . В блоках 3, 4, 5 сравниваются текущие значения ξ , η , ψ с требуемыми, и если хотя бы один из этих параметров вышел за пределы допустимых значений, то в блоках 6—10 формируются необходимые управляющие воздействия. Если же все координаты находятся в пределах допуска, то происходит возвращение в блок 2 и т. д.

Рассмотрим возможную структурную схему СЯУ ППБУ в данном положении (рис. 3.11), в которой можно выделить следующие уровни управления: дистанционное управление якорными лебедками, осуществляемое либо с местных постов управления (МПУ), либо с главного ПКУ (применяется при постановке или снятии с якоря и при бурении); автоматическое управление, используемое для проведения активных кратковременных коррекций путем изменения длин вытравленных цепей. Для обеспечения модульного принципа построения систему разобъем на следующие функциональные блоки.

Подсистема «Навигация». Основная функциональная задача подсистемы состоит в определении вектора кинематических параметров буровой платформы Z на каждый момент времени t :

$$Z^T = (\xi(t), \eta(t), v(t), \beta(t)),$$

где $\xi(t)$, $\eta(t)$ — отклонения, а $v(t)$ и $\beta(t)$ — оценки скорости и направления сноса платформы относительно устья скважины. Исходными данными для решения основной задачи подсистемы «Навигация» являются показатели ДВВ и гидроакустических станций.

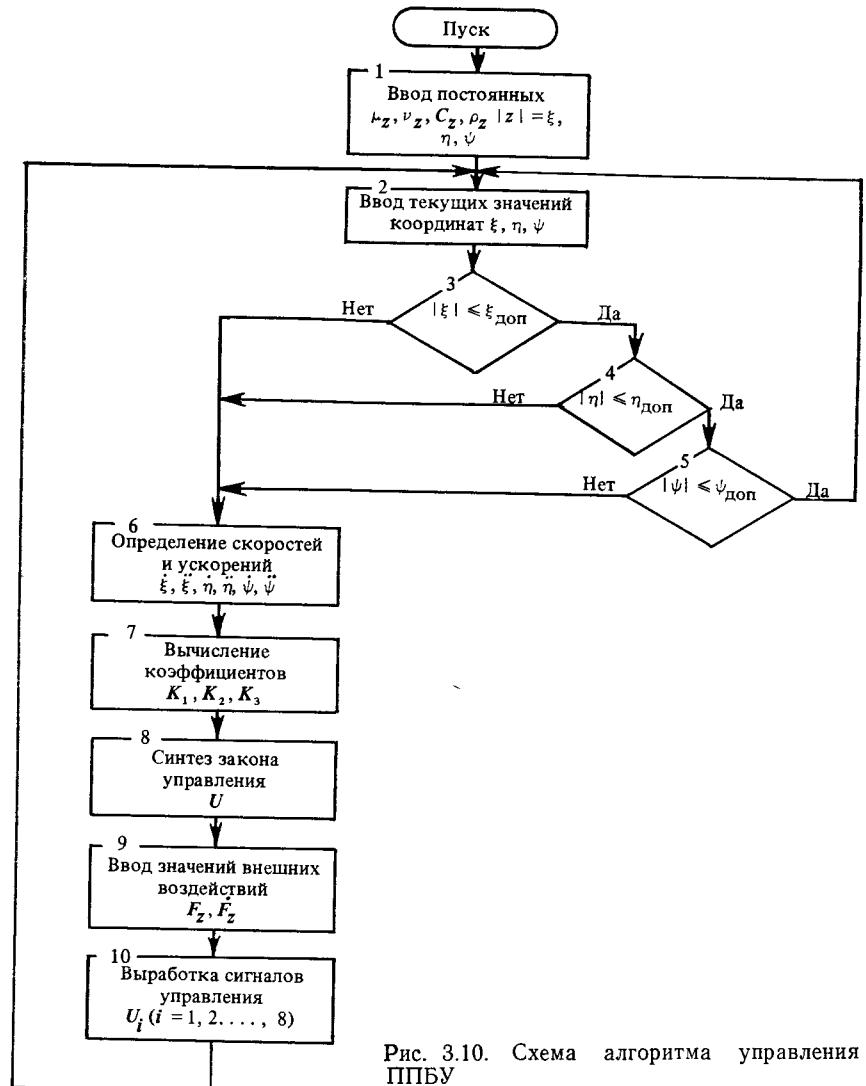


Рис. 3.10. Схема алгоритма управления ППБУ

ГАС используется для точного определения местоположения ППБУ и включает в себя специализированное вычислительное устройство. Каждая из станций связана с микро-ЭВМ через интерфейс. По данным ГАС — параметрам Δp_i — определяются отклонения от устья скважины $\xi(t)$, $\eta(t)$. Использование нескольких станций

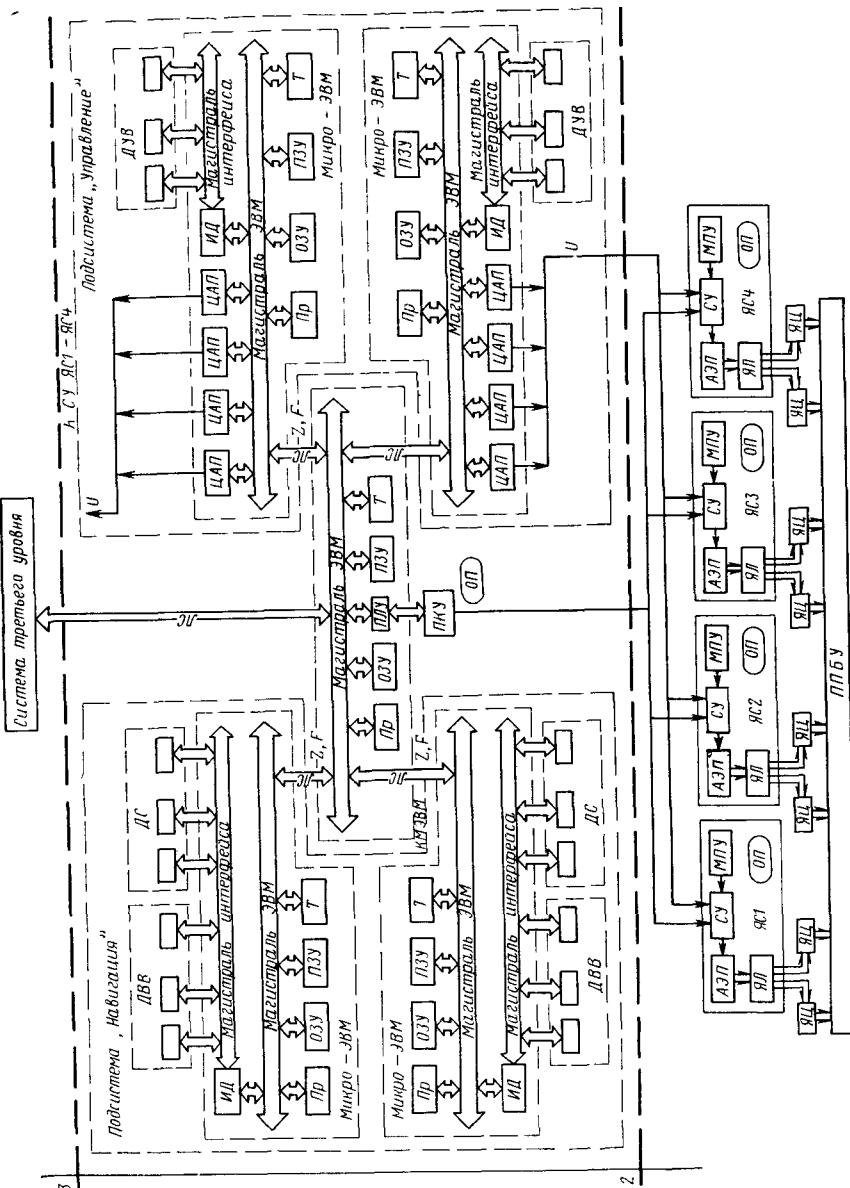


Рис. 3.11. Возможная структурная схема СЯУ ППБУ

позволяет выделить систематическую ошибку в определении отклонения ППБУ от устья скважины. ДВВ измеряют и преобразуют в машинный код скорость платформы относительно воды v_0 , скорость относительно грунта v_A , угол разворота ψ , скорость и направление ветра и некоторые другие величины. Эти датчики подключаются через магистраль интерфейса к ИД. Использование показаний ДВВ совместно с данными акустических измерений позволяет проводить более полное комплексирование информации, связанное с определением элементов движения и местоположения буровой платформы, а также контролировать работу как отдельных источников информации, так и подсистемы в целом.

Подсистема «Управление». Основной ее задачей является выработка по данным, полученным от подсистемы «Навигация», и значениям управляющих воздействий сигналов управления для каждой якорной лебедки ЯЛ1—ЯЛ4. ДУВ измеряют и преобразуют в машинный код значения скорости и направления вращения якорной цепи. Подключение ДУВ к микро-ЭВМ аналогично включению ДВВ подсистемы «Навигация». По данным векторов внешних возмущений и управляющих воздействий в микро-ЭВМ производится расчет продольных и поперечных усилий и врачающего момента, которые должны быть приложены к ППБУ для преодоления воздействия возмущающих сил и моментов, распределения полученных сил и моментов по якорным системам ЯС1—ЯС4 и выработка сигналов управления для каждой якорной лебедки ЯЛ1—ЯЛ4. Сформулированные в подсистеме «Управление» управляющие воздействия через цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) выдаются на системы управления АЭП якорных систем ЯС1—ЯС4.

В целях повышения живучести и надежности системы якорного удержания ППБУ производится дублирование подсистем «Навигация» и «Управление», каждая из которых состоит из двух идентичных микро-ЭВМ с одинаковым набором устройств ввода-вывода и датчиков, т. е. осуществляется параллельное резервирование. Проверку работоспособности, выбор и подключение работающей ЭВМ или использования части датчиков резервной машины производит КЭВМ. Через КЭВМ осуществляется также передача данных от подсистемы «Навигация» в подсистему «Управление». Взаимодействие микро-ЭВМ и КЭВМ ведется через ЛС.

Алгоритмы решения задач, входящих в СЯУ ППБУ, реализованы в виде программ и хранятся в ПЗУ, текущая информация, результаты вычислений хранятся в ОЗУ. Управление работой программы, обработку команд и их выполнение осуществляет Пр. СЯУ ППБУ представляет собой систему реального времени, поэтому организация работы программного обеспечения аналогична рассмотренному при описании СДУ судна.

Информация о режимах работы СЯУ ППБУ и текущие данные выводятся на экран ПКУ. По этим данным оператор может производить контроль за работой и в случае необходимости вмеши-

ваться в работу системы. С координирующей микро-ЭВМ ПКУ связан через ПЛУ.

На третьем уровне осуществляется координация работы всех ТС буровой платформы.

§ 3.5. Система управления функциональным комплексом технических средств обеспечения энергии, условий обитаемости и функционирования корабельного оборудования

Вспомогательные механизмы ГЭУ предназначены для обслуживания энергетических установок и общих нужд судна. Вспомогательные механизмы энергетических установок обеспечивают охлаждение машин, смазку, нагнетание топлива и воздуха в машинное и котельное отделения.

Общие нужды судна обслуживаются системами для удаления и принятия водяного балласта, удаления трюмной воды, тушения пожара, снабжения команды и пассажиров питьевой и мытьевой водой, вентиляции судовых помещений и т. п. Системы управления этими объектами включают большое число запорных клапанов и АЭП.

Судовыми системами принято называть совокупность вспомогательных механизмов: напорных средств, трубопроводов, арматуры и приводов управления, предназначенных для перемещения жидкостей и газов, поддержания заданного давления и температуры, необходимых для обеспечения всех нужд судна. Для работы вспомогательных механизмов энергетических установок и судовых систем, а также органов управления ими характерно то, что они должны находиться в одном из двух устойчивых состояний (включено—выключено, открыто—закрыто и т. п.), определяемых режимом работы установок. Управление механизмами осуществляется в соответствии с алгоритмом, определяющим заданную последовательность выполнения операций.

Процесс разработки СУ ФКТС складывается из нескольких этапов. На первом этапе анализируются УО, закон управления им и разрабатывается информационная модель, т. е. модель, отражающая информационные связи (потоки информации) во всех основных звеньях системы УО—система управления и во всех режимах (нормальных и аварийных). На этом же этапе производится обозначение датчиков, исполнительных органов, сигнализаторов и т. п. Операции, осуществляемые на этом этапе, носят неформальный характер. По сформированной информационной модели составляется словесное описание алгоритма управления УО, которое должно в лаконичном, однозначном и полном виде отражать условия и порядок выполнения операций управления в любом из режимов работы УО.

В тех случаях, когда УО имеет сложную структуру и сложный закон управления, составление полного словесного описания алгоритма представляет известные трудности. Их можно преодолеть,

составляя ряд частных словесных описаний, отражающих управление отдельными исполнительными органами или всем УО в отдельных режимах, а затем формируя из этих фрагментов полное описание.

Основные достоинства словесного описания — его наглядность и возможность применения для дискретных систем управления (ДСУ) с большим числом входов и выходов; существенный недостаток — его неформальность, в силу чего непосредственно по словесному описанию можно строить лишь простейшие ДСУ.

На следующем этапе проектирования производится нормализация словесного описания в одном из известных языков формальной записи алгоритмов логического управления. Существует целый ряд таких языков: табличные, аналитические, графические, комбинированные. Выбранный язык формализации алгоритма управления должен удовлетворять ряду требований. К ним относятся: простота описания и удобство для практического использования, возможность проверки корректности описания, наличие эффективных алгоритмов перехода от записи алгоритма в этом языке к математической модели синтезируемой ДСУ на абстрактном и структурном уровнях.

В качестве общей математической модели ДСУ принимается конечный автомат. Следует отметить, что язык формализации словесного описания алгоритма управления не должен быть привязан к конкретному типу математической модели, т. е. должен быть инвариантным к способу реализации ДСУ.

Одним из наиболее естественных является этап формализации алгоритма управления и контроля. В качестве примера рассмотрим алгоритмы управления вспомогательными механизмами транспортного судна, обеспечивающие автоматический пуск и остановку дизель-генераторной установки, а также ГД. Процесс введения в действие ГЭУ судна, как правило, начинается с запуска дизель-генератора, а затем ГД. При этом должен выдерживаться определенный порядок включения механизмов и устройств с соблюдением ряда условий. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность введения в действие резервного агрегата или установки. Так как запуск силовой установки производится без участия оператора, то необходимо составить подробные алгоритмы управления.

Рассмотрим алгоритм пуска дизель-генератора. При пуске дизель-генератора контролируется время эксплуатации $T_{\text{э}}$, причем каждая дизель-генераторная установка должна эксплуатироваться по шесть дней, и на этот период она считается основной, а другая в это время играет роль резервной. По истечении указанного срока выполняется переключение и установка становится резервной. Кроме осуществления контроля времени при пуске необходимо проконтролировать отсутствие запрещающих сигналов от датчиков уровня воды $H_{\text{в}}$, уровня масла $H_{\text{м}}$ и температуры воды $t_{\text{в}}$. Затем производится выбор приоритета и выполнение пусковой операции — включение стартера. Завершение пускового периода

контролируется через 3 с, при этом проверяется выполнение условия возбуждения генератора (напряжение возбуждения подано), после чего осуществляется выключение стартера. Когда напряжение достигнет значения, равного 80 % номинального, производится включение генератора в судовую сеть. В случае неудачи операция пуска повторяется дважды с интервалом в 10 с. Если последняя попытка оказывается неудачной, то производится выключение стартера и снятие запрещающего сигнала на пуск резервного дизель-генератора.

Словесный алгоритм выполнения операций по запуску дизель-генератора может быть записан в следующем виде: 1) проверка выполнения условия, налагаемого на $T_{\text{в}}$; 2) проверка выполнения условия, налагаемого на $H_{\text{в}}$; 3) проверка выполнения условия, налагаемого на $H_{\text{м}}$; 4) проверка выполнения условия, налагаемого на $t_{\text{в}}$; 5) выбор приоритета; 6) включение стартера; 7) выключение стартера; 8) снятие запрещающего сигнала на пуск резервного дизель-генератора; 9) проверка выполнения условия включения возбуждения и выключения стартера; 10) проверка выполнения условия $U=0,8 U_{\text{н}}$ и включение генератора в судовую сеть.

До пуска главного двигателя необходимо подготовить его к работе. Сигнал «Двигатель готов к пуску» выдается только после того, как выполнены: 1) сравнение текущего значения напряжения судовой сети с допустимыми значениями напряжения; 2) проверка отсутствия сигнала из системы пожарной безопасности; 3) сравнение текущего значения температуры топлива с допустимым значением 105°C ; 4) сравнение текущего значения температуры охлаждающей воды с допустимым для периода пуска значением 95°C ; 5) сравнение текущего значения температуры коллектора выхлопных газов с допустимым значением 550°C ; 6) проверка уровня охлаждающей воды; 7) включение циркуляционного насоса, если температура охлаждающей воды ниже 50°C ; 8) выключение циркуляционного насоса, если температура охлаждающей воды выше 60°C ; 9) сравнение текущего значения температуры охлаждающей воды с контрольным значением 40°C ; 10) выдача сигнала «Двигатель готов к пуску».

Пуск главного двигателя начинается с проверки наличия сигналов «Готов к пуску» и «Давление пускового воздуха больше 100 Н/см^2 ».

Для удобства формализации записи алгоритма управления с помощью математических символов на основе словесного алгоритма может быть составлена схема алгоритма. С этой целью в процессе формализации выделяют операции двух типов: проверки логических условий и действия.

В качестве примера рассмотрим построение схемы алгоритма запуска дизель-генератора (ДГ), представленную на рис. 3.12. На схеме обозначены: BC — включение синхронизатора, VG — включение генератора. Операции проверки логических условий в рассматриваемом алгоритме представляются логическими функци-

циями α_1 — α_6 , значения которых определяются через значения контролируемых параметров

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1 \text{ при } T_{\text{в1}} \geqslant T_{\text{в2}}; & \alpha_4 &= 1 \text{ при } t_{\text{в}} \geqslant t_{\text{вн}}; \\ \alpha_2 &= 1 \text{ при } H_{\text{в}} \geqslant H_{\text{вн}}; & \alpha_5 &= 1 \text{ при } U \geqslant U_{\text{н}}; \\ \alpha_3 &= 1 \text{ при } H_{\text{м}} \geqslant H_{\text{мн}}; & \alpha_6 &= 1 \text{ при } n < 2 \end{aligned}$$

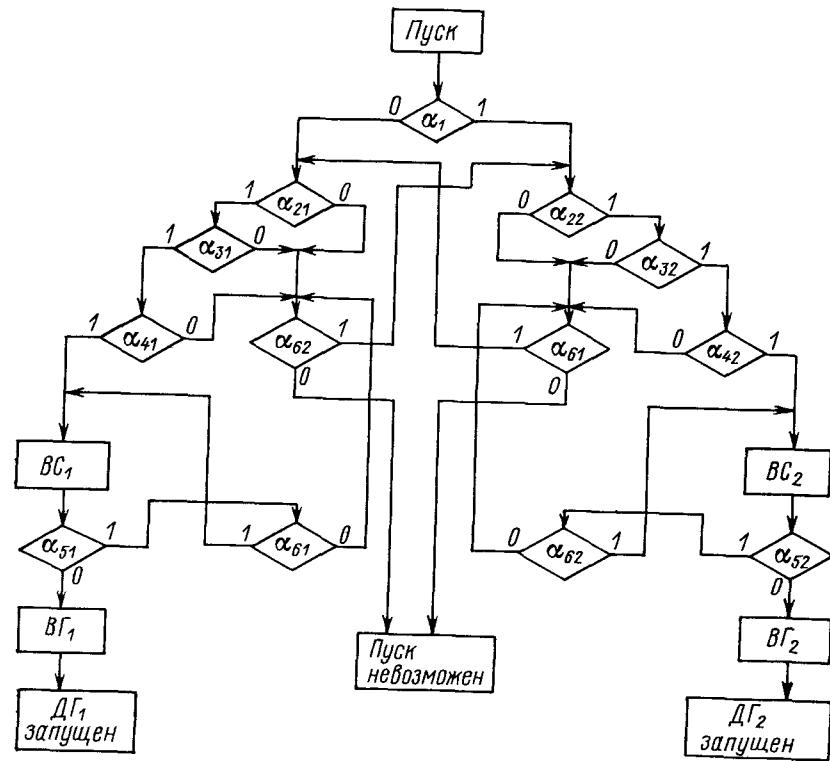


Рис. 3.12. Схема алгоритма запуска дизель-генератора

при $n=2$ (n — число попыток запуска дизель-генератора). В противном случае логические функции α_1 — α_6 принимают нулевые значения.

При построении схемы алгоритма каждая операция изображается в виде вершины (операция проверки условия — ромбом, операция действия — прямоугольником). Переход к очередной операции алгоритма изображается стрелкой. В связи с тем, что результат контроля выполнения условия можно характеризовать двумя значениями ($\alpha_i=0$ или $\alpha_i=1$), из вершин схемы, соответствующих операциям проверки логических условий, исходят две стрелки, отмеченные цифрами 0 или 1. Законченная схема алгоритма преобразуется в соответствии с принятыми критериями оп-

тимальности СУ (надежность, быстродействие, максимальное агрегатирование и т. д.). После этого выполняется структурная реализация алгоритма в выбранной элементной базе.

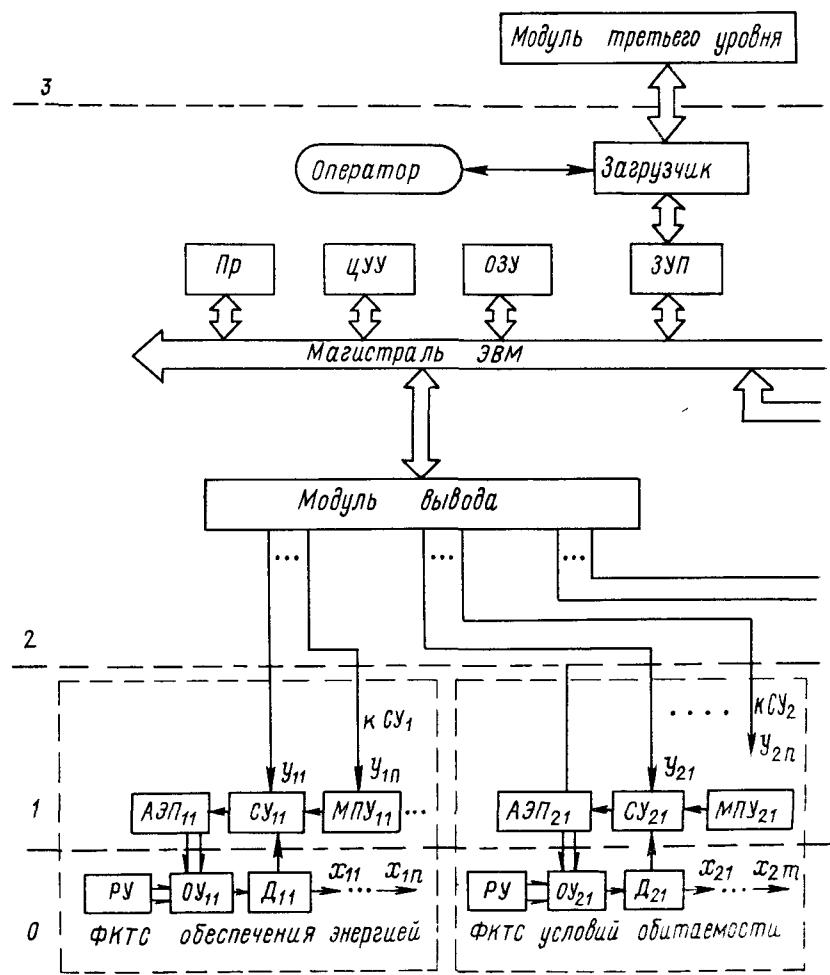
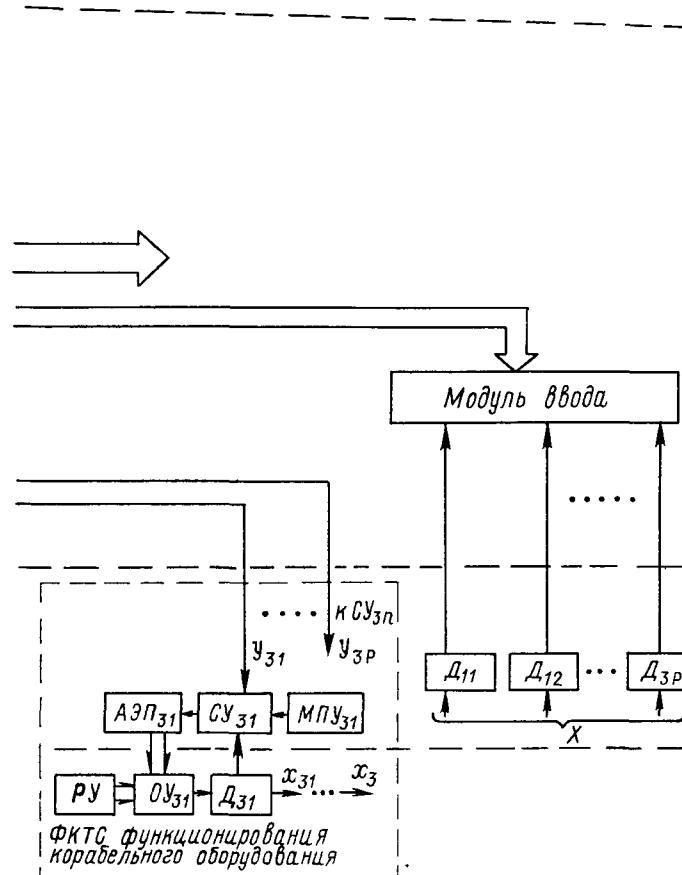


Рис. 3.13. Возможная структурная схема СУ ФКТС на базе программируемыми контроллерами

В состав групповых и локальных СУ судовых механизмов и систем в соответствии с общей структурной схемой (см. рис. 3.1) входят УО, АЭП, ССУ, ССОИ, СПИ, СК, ПУ и др. Вместе с тем состав и характеристики элементов таких систем обладают определенной спецификой. Управляемыми объектами в данном случае являются вспомогательные механизмы и системы: насосы, вентиляторы, воздуходувки, компрессоры, запорная арматура и т. п.,

распределенные по всему судну. В соответствии с возможной структурной схемой СУ ФКТС на базе ПК (рис. 3.13) можно выделить следующие уровни управления.

Нулевой уровень — ручное управление (РУ) отдельными



мого контроллера

исполнительными механизмами или УО. Этот уровень управления используется в основном в аварийных режимах. Его наличие регламентировано Правилами Регистра СССР.

Первый уровень — дистанционное управление, которое обеспечивается с помощью АЭП ФКТС. Управление приводами осуществляется с местных постов управления, оснащенных необходимой контролирующей аппаратурой. При этом возможно управ-

ление как с обратной связью по регулируемым параметрам, так и без обратной связи.

Второй уровень — автоматическое управление ФКТС через ЛСУ отдельными объектами (см. рис. 3.1). При этом обеспечивается выполнение операций в соответствии с заданными алгоритмами по управлению рядом УО, а также обработка информации в системах СОИ и контроля СК. В нормальных условиях ЛСУ может обеспечивать функционирование системы без участия оператора по сигналам от датчиков и по командам от высших уровней управления. При изменении режима или аварии ЛСУ может управляться оператором, который на основании информации, получаемой от системы представления информации СПИ подает команды с помощью органов управления (ОУ) поста управления.

Основным звеном подобных систем управления может являться ПК или микрокомпьютер с объемом памяти порядка тысячи слов и быстродействием $(10-20) \cdot 10^3$ операций/с. Такие системы управления обладают «гибкой логикой», т. е. алгоритм управления УО может быть изменен программным путем. Управление на втором уровне может носить как иерархический, так и централизованный характер. В последнем случае создаются ЦПУ в машинном отделении или в другом помещении судна.

Рассмотрим особенности реализации основных функций управления при использовании в системе программируемого контроллера типа ПК-1, характеристики которого были приведены в § 2.2.

В состав ПК входят Пр, запоминающее устройство программ (ЗУП), ОЗУ, центральное устройство управления. Связь с объектом управления происходит через модули ввода-вывода. Изменение содержимого ЗУП происходит через устройство загрузки программ. Количество и номенклатура модулей ввода-вывода определяется составом ЛСУ. Например, в зависимости от типа решаемых задач вход (выход) может быть как логическим (бинарным), так и цифровым (числовым).

Алгоритм функционирования ПК при управлении объектом можно представить как повторяющуюся последовательность следующих процедур: ввод и запоминание в соответствующих ячейках ОЗУ, значений вектора X текущего состояния объекта; выполнение программы, расположенной в ЗУП, и формирование выходных управляющих сигналов с последующей передачей их к соответствующим модулям вывода. Алгоритм функционирования ПК может содержать программы тестирования устройств ПК и УО. ЗУП позволяет производить быструю смену или перестройку программы с помощью загрузчика, что осуществляется по требованию или оператора, или ЭВМ старшего уровня автоматизации. Для обеспечения перестройки или смены программы оператором в ПК реализован достаточно универсальный язык задания алгоритмов управления.

Алфавит языка, используемого для представления программ работы контроллера, содержит следующие символы.

1. Арабские цифры 0, 1, 2, ..., 9, служащие для представления

адресов в виде целых десятичных чисел. 2. Знаки, используемые для образования элементов операторов: а) \wedge — конъюнкция; в релейных схемах соответствует нормально-открытым контактам в последовательной цепи и обозначается $\underline{\underline{|}}$; б) $\overline{\wedge}$ — конъюнкция с инверсным значением булевой переменной; в релейных схемах соответствует нормально-закрытым контактам; в) \vee — дизъюнкция; в релейных схемах соответствует нормально-открытым контактам, подключенному параллельно другим; г) $\overline{\vee}$ — дизъюнкция с инверсным значением булевой переменной; соответствует нормально-закрытым параллельным контактам; д) f — присвоение выходной булевой переменной ранее вычисленного ее значения; в релейных схемах соответствует катушке реле обтекаемой током; е) СЧ — операция счета событий; ж) ТМ — операция счета времени; з) ВН(А) — наименование вычислительной операции, причем операнд может задаваться как прямо (Н), так и косвенно (А); и) \geqslant — операция сравнения; к) $+(-)$ — знак операции сложения (вычитания) в операции В; л) \rightarrow — операция пересылки; м) КП — операция конца программы и перехода к ее началу.

Последовательности из определенных символов, перечисленных выше, образуют элементы языка, из которых затем составляются операторы языка. Каждый элемент размещается в определенной ячейке ЗУП и интерпретируется процессором устройства как команда.

Алгоритм управления объектом с помощью языка программирования можно представить в виде ограниченного числа типов операторов. Каждый оператор представляет собой определенную конструкцию и ему может быть поставлен в соответствие некоторый цифровой автомат.

В язык программирования ПК могут входить следующие операторы: 1) «Логическая цепь»; 2) счета событий «Счетчик»; 3) распределения сигналов «Распределитель»; 4) таймирования «Таймер»; 5) вычислительных операций; 6) конца программы. Рассмотрим каждый из операторов в отдельности.

Оператор «Логическая цепь» вычисляет значение булевой функции произвольного числа аргументов и ему может быть поставлен в соответствие цифровой автомат без памяти. Оператор «Логическая цепь» должен заканчиваться номером выхода. В соответствии со значением этого номера вычисленное значение булевой функции выдается либо в модуль вывода (с одновременным записыванием в ОЗУ), либо только запоминается в ячейке ОЗУ, причем номер выхода определяет адреса ячейки ОЗУ и устройства вывода.

Пример 1. Рассмотрим реализацию следующей булевой функции:

$$f_1 = x_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 x_4 \vee \bar{x}_5 \bar{x}_6.$$

Если присвоить логическим operandам x_1-x_6 адреса 0001—0006, а результат вычисления функции определить номером выхода 1000,

то оператор «Логическая цепь», реализующий функцию f_1 записывается в виде

$$\wedge 0001 \overline{\wedge} 0002 \vee (\) \sim \sim \overline{\wedge} 0003 \vee 0004 \vee (\) \sim \sim \overline{\wedge} \\ \overline{\wedge} 0005 \vee 0006 \sim f1000,$$

где $\vee (\)$ — операция открытия новой логической переменной (запоминание значения ранее вычисленного), \sim — число выходов распределителя.

Оператору «Логическая цепь» можно поставить в соответствие графическое изображение логической функции. На рис. 3.14 приведено контактно-релейное изображение цепи булевой функции f_1 . На рис. 3.15 изображена та же схема в виде одного логиче-

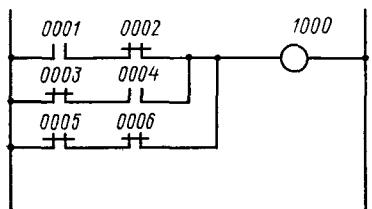


Рис. 3.14. Контактно-релейное изображение логической цепи для булевой функции f_1

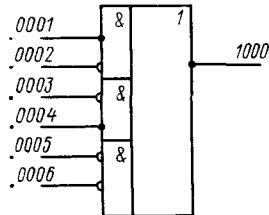


Рис. 3.15. Изображение логического элемента с базисом И—ИЛИ—НЕ для функции f_1

ского элемента с базисом И—ИЛИ—НЕ. С помощью оператора «Логическая цепь» могут быть описаны булевые функции, заданные не только в дизъюнктивной нормальной форме, но и в скобочных формах. Например,

$$f_2 = ((x_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3) x_4 \bar{x}_5 \vee x_6) \bar{x}_7.$$

Описание функции f_2 на языке программирования ПК-1 будет представлено как

$$\wedge 0001 \overline{\wedge} 0002 \vee (\) \overline{\vee} 0003 \wedge 0004 \overline{\vee} 0005 \vee (\) \vee \\ \vee 0006 \overline{\wedge} 0007 \sim f1000.$$

Оператор «Счетчик» реализует цифровой автомат для счета числа событий и включения выходного элемента после достижения заданного их числа. События представляют собой переходы булевой переменной из 0 в 1, поступающие на счетный вход T счетчика. Каждый счетчик (СЧ) имеет собственный адрес, которым он идентифицируется в программе. Счетчик можно привести в исходное состояние сигналом сброса (вход R).

Оператор «Счетчик» является составным и образуется: а) входной логической схемой; б) собственно счетчиком с номером N ; в) номером выхода.

Пример 2. При истинном значении булевой функции

$$f_3 = (x_1, \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_4) x_5$$

и значении переменной $x_6=1$ состояние счетчика должно увеличиваться на 1. При равенстве содержимого счетчика заданной величине единичный сигнал будет передан к выходу контроллера (или записан в ячейку ОЗУ) с заданным номером. Работа счетчика с номером $N=2000$ при задании величины счета 512 и номера выхода 1000 описывается оператором

$$\wedge 0001 \overline{\wedge} 0002 \vee (\) \sim \sim \overline{\wedge} 0003 \overline{\vee} 0004 \wedge 0005 \text{СЧ}2000 \sim \\ \sim 512 0006 f1000.$$

На рис. 3.16 приведено контактно-релейное изображение оператора «Счетчик».

Оператор «Распределитель» реализует функции распределения импульсов. В описание оператора входят: 1) описание входной логической схемы; 2) описание распределителя, состоящее из: а) идентификатора распределителя (РС) и его номера N ; б) числа выходов распределителя; в) номера l сбросовой переменной; г) номера выхода.

Запуском счетчика распределителя управляет логическая цепь, а его сброс осуществляется отдельного входа. При появлении сигнала сброса счетчик распределителя устанавливается в исходное состояние, при котором «1» выдается на нулевом выходе. После снятия сигнала сброса каждая смена состояния цепи запуска из 0 в 1 приводит к срабатыванию счетчика распределителя, т. е. перебрасыванию «1» на соседний выход. В отсутствие сигнала сброса распределитель работает по кольцевой схеме, т. е. после гашения «1» на последнем выходе счетчик распределителя приходит в исходное состояние.

Пример 3. Зададим номер счетчика распределителя $N=1500$, цикл счета $l=8$, номера выходов 1000—1007. Сброс происходит при переменной $x_8=1$. При истинном значении булевой функции

$$f_4 = ((\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2) x_3 \vee x_4 \bar{x}_5 \bar{x}_6) x_7$$

осуществляется переход счетчика распределителя из состояния 0 в состояние 1, затем в состояние 2 и т. д. с циклом счета 8. Выходные сигналы снимаются с выходов распределителя 1—8 и записываются в ячейки ОЗУ с адресами 1000—1007. Работа распределителя описывается оператором

$$\overline{\wedge} 0001 \vee (\) \sim \sim \overline{\vee} 0002 \wedge 0003 \vee (\) \sim \sim \wedge 0004 \overline{\wedge} 0005 \overline{\wedge} \\ \overline{\wedge} 0006 \vee 0007 \text{РС}1500 \sim 0008 \overline{\wedge} 0008 f1000.$$

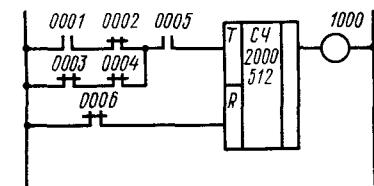


Рис. 3.16. Контактно-релейное изображение оператора «Счетчик»

На рис. 3.17 приведено контактно-релейное изображение оператора «Распределитель».

Оператор «Таймер» служит для подсчета времени существования одного события и включения выходного элемента после достижения конца заданного интервала времени. Оператор является составным и включает в себя входную логическую схему, таймер и номер выхода K .

На рис. 3.18 представлено обобщенное контактно-релейное изображение оператора «Таймер». Собственно таймер идентифициру-

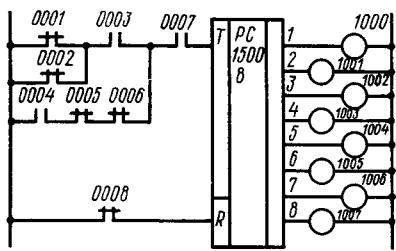


Рис. 3.17. Контактно-релейное изображение оператора «Распределитель»

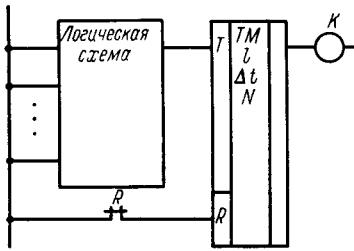


Рис. 3.18. Контактно-релейное изображение оператора «Таймер»

ется в программе именем TM и номером l . Он имеет два входа: разрешающий T и сбрасывающий R . Сигнал на входе T образуется входной логической схемой. Таймером ведется счет времени существования единичного значения этого сигнала. Масштаб времени сигнала T задается квантом таймера Δt . Интервал, с которым сравнивается накопленное таймером время, определяется целым числом этих квантов N . По достижении конца заданного интервала времени в соответствии с номером выхода K происходит либо включение выходного элемента, либо запись в ячейку ОЗУ. При $R=1$ происходит сброс показаний таймера.

Оператор «Вычислитель» задает выполнение следующих операций над двумя 12-разрядными числами: сложение, вычитание, сравнение, пересылка числа. Числа представляются в дополнительном модифицированном коде. Каждая из операций имеет две модификации, определяемые способом адресации первого операнда,— прямую или косвенную. При прямой адресации этот operand задается адресом в ОЗУ. В случае непосредственной адресации первый operand располагается в команде оператора «Вычислитель». Второй operand всегда задается косвенной адресацией — адресом в ОЗУ.

Каждый оператор «Вычислитель» является составным оператором и включает в себя логическую схему, операцию, адрес (номер) выхода. Задаваемая вычислительная операция выполняется, если образованный входной логической схемой сигнал, равен 1. Оператор «Вычислитель» можно задать в программе следующей

последовательностью команд: идентификатором и модификацией вычислителя; в зависимости от модификации операндом 01 или адресом операнда A1; операцией над operandами и адресом A2 операнда 02.

На рис. 3.19 приведено изображение вычислительного оператора, задающего пересылку содержимого ячейки ОЗУ с адреса 0007 в ячейку 0008. Пересылка выполняется при единичном значении функций

$$f_5 = x_1 \bar{x}_2 \vee x_3 \vee \bar{x}_4$$

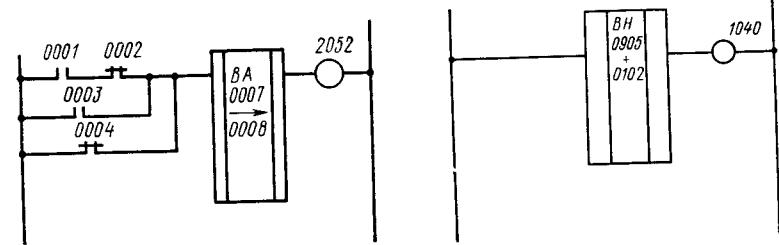


Рис 3.19. Контактно-релейное изображение оператора «Вычислитель»

Рис. 3.20. Контактно-релейное изображение оператора «Сложение»

Описание оператора представляет собой последовательность следующих команд:

$\wedge 0001 \wedge 0002 \vee (\) \sim \sim \vee 0003 \vee (\) \sim \sim \vee 0004 BA0007 \rightarrow$
 $\rightarrow 0008f2052,$

где А означает, что использован косвенный способ адресации. При отрицательном значении пересылаемого числа выход с номером 2052 устанавливается в 1.

Схеме, изображенной на рис. 3.20, соответствует следующее описание оператора:

$$\wedge \sim \text{BH}0905 + 0102f1040.$$

Такой вычислитель является безусловным, так как входная логическая схема представляет собой перемычку. При выполнении операции происходит сложение числа 0905 с содержимым ячейки 0102 ОЗУ. Результат замещает собой второй operand, при отрицательном значении результата выход с номером 1040 устанавливается в 1. Н означает, что использован прямой способ адресации.

Оператор конца программы служит для идентификации конца программы и перехода на начало программного цикла; располагается в программе последним.

В заключение рассмотрим вопрос реализации булевой функции, заданной в произвольном виде. Важность этого вопроса обусловлена достаточно большой долей логических операторов в программах управления объектами. Поэтому представление каждой

реализуемой программируемым контроллером булевой функции минимальным числом команд обеспечило бы, с одной стороны, экономию памяти, а с другой — быстродействие управляющего алгоритма.

Пример 4. Рассмотрим случай исходного представления полностью определенной функции в виде таблицы истинности. Для определения оператора, ей соответствующего, выполняют следующие действия: 1) по таблице записывают совершенную дизъюнктивную нормальную форму (СДНФ) булевой функции; 2) используя тот или иной метод минимизации, получают минимальную дизъюнктивную нормальную форму (МДНФ); 3) переходят от МДНФ к скобочной форме, содержащей минимум команд языка программирования ПК. Последнее действие заключается в вынесении за скобки из конъюнктивных термов, входящих в МДНФ, либо одной наиболее часто входящей переменной, либо общего произведения переменных. Это приводит к сокращению длин дизъюнктируемых цепочек из контактов и возможности умножения их дизъюнкций на вынесенную за скобки переменную или терм.

Рассмотрим булеву функцию вида

$$f_6 = x_1 x_2 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_1 \bar{x}_3.$$

Непосредственная реализация ее в ПК приводит к следующей записи:

$$\begin{aligned} & \wedge 0001 \wedge 0002 \vee () \sim \sim \sim \wedge 0002 \vee 0003 \sim \sim \sim \wedge \\ & \quad \wedge 0001 \vee 0003, \end{aligned}$$

содержащей восемь команд. Предварительное вынесение переменной x_1 из булевой функции

$$f_6 = x_1 (x_2 \vee \bar{x}_3) \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3$$

приводит к сокращению записи на один элемент:

$$\begin{aligned} & \wedge 0002 \vee () \sim \sim \sim \vee 0003 \wedge 0001 \vee () \sim \sim \sim \wedge \\ & \quad \wedge 0002 \vee 0003. \end{aligned}$$

ГЛАВА 4 ЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

§ 4.1. Проблемы формализации

При разработке систем логического управления (СЛУ) приходится решать ряд специфических задач, к которым прежде всего относятся задачи формализации технического за-

дания, выбора схемотехнического базиса СЛУ, реализации СЛУ в выбранном базисе, а также задача автоматизации синтеза СЛУ. Ниже мы попытаемся наметить пути преодоления некоторых трудностей, которые возникают при решении каждой из задач. В качестве схемотехнического базиса предполагается использование МПС, поэтому речь пойдет о программной реализации СЛУ. Однако предлагаемая методика может успешно применяться и при других схемотехнических базисах.

Трудность задачи формализации технического задания на разработку СЛУ обычно связана с тем, что логическая модель системы управления на начальном этапе разработки описана на языке высокого уровня или на неформальном уровне. В первом случае модель приходится транслировать на алгоритмический язык, адекватный намеченному схемотехническому базису СЛУ. Во втором, более распространенном, случае в распоряжении разработчика имеется лишь словесное описание технологического процесса, для которого разрабатывается СЛУ, а также набор инструкций по эксплуатации оборудования, входящего в состав УО. По данной информации приходится строить математически точное описание технического задания, которое может служить основой для построения алгоритма функционирования СЛУ. На этом этапе СЛУ можно представить в виде «черного ящика» с двоичным вектором входов X и двоичным вектором выходов Z . Аналогично представляется и УО. При этом входы СЛУ являются выходами УО и наоборот.

Размерность X обычно совпадает с числом двоичных датчиков УО, показания которых существенны для процесса управления, а размерность Z — с числом исполнительных механизмов УО, состояния которых должны меняться под действием СЛУ. СЛУ обычно имеет дополнительные двоичные входы, кроме входов группы X , к которым относятся входы от других СЛУ или входы, управляемые оператором. Однако в данном кратком изложении они для простоты не рассматриваются, поскольку их наличие не меняет методики синтеза.

В исходном техническом задании описание функционирования СЛУ обычно содержится в виде высказываний импликативного типа: «если F , то G », где F — логическая функция от X и Z , а G — логическая функция от Z . При этом функции F и G описаны на языке, применяемом в исходном техническом задании. Само техническое задание является описанием требований к СЛУ, которая представляет собой логический преобразователь с памятью, т. е. с математической точки зрения детерминированный конечный автомат. При достаточно больших размерностях векторов X и Z , соответствующих практически встречающимся условиям проектирования, непосредственный переход к программной или схемной реализации такого автомата весьма затруднителен. Дополнительные проблемы возникают при анализе непротиворечивости и полноты технического задания. В случае неполноты задания, который является типичным, встает задача построения корректного дооп-

ределения, согласованного с исходным заданием, и ряд оптимизационных задач, связанных с критериями качества СЛУ.

Указанные задачи весьма трудоемки и требуют применения средств автоматизации проектирования. Представление технического задания на языке высокого уровня и тем более словесное представление мало пригодны для дальнейшей машинной обработки. Таким образом, возникает потребность в языке формализации технического задания, к которому естественно предъявить следующие требования.

Простота формализации. Процедура перевода технического задания на язык формализации должна быть алгоритмически проста и давать компактные записи. Это означает, что синтаксическая структура языка формализации должна содержать необходимые грамматические формы, в частности, логические импликативные формы типа «если..., то...».

Эффективность интерпретации. Для языка формализации должна существовать полная алгоритмическая процедура интерпретации записей языка. Эта процедура призвана проверять семантическую корректность (полноту и непротиворечивость) записей языка и строить конечный автомат в выбранном элементном базисе, соответствующий данной записи. При этом сложность указанной интерпретирующей процедуры должна быть достаточно низкой, чтобы применение средств автоматизации для анализа корректности технического задания и синтеза управляющего автомата было достаточно эффективно.

Из известных в литературе формальных языков задания СЛУ перечисленным выше требованиям в наибольшей степени удовлетворяет логический язык секвенциальных описаний. В настоящее время этот язык получил широкое распространение как язык задания законов функционирования СЛУ.

Некоторая неточность семантики этого языка легко устраняется при использовании логико-арифметической интерпретации понятия секвенциального описания. Эта интерпретация строится в терминах языка слабой арифметики второго порядка (СА2). Изобразительные свойства СА2 позволяют точно проинтерпретировать как само понятие секвенциального описания СЛУ, так и многие практические важные свойства этого понятия. В частности, логико-арифметическая интерпретация оказывается полезной при обосновании правил эквивалентных преобразований секвенциальных описаний, при разработке эффективных методов проверки непротиворечивости и полноты описаний, методов доопределения частичных описаний и верификации ряда свойств проектируемой СЛУ на этапе анализа технического задания. Процесс синтеза СЛУ при подобной интерпретации можно рассматривать как процесс извлечения алгоритма управления из формализованного на языке СА2 утверждения о свойствах СЛУ. Сложность алгоритма синтеза в общем случае может быть очень высока. Однако для целей практической формализации обычно используется специальный вид секвенциальных описаний — так называемая канониче-

ская форма. Для такого фрагмента языка секвенциальных описаний синтезирующая процедура имеет низкую полиноминальную сложность и может быть эффективно реализована на ЭВМ.

§ 4.2. Язык секвенциальных описаний. Логико-арифметическая интерпретация

Понятие секвенции впервые появилось в 1934 г. в работах Г. Генцена по теории логического вывода. Генцен определял секвенцию как формальное выражение вида

$$F_1, \dots, F_k \vdash G_1, \dots, G_l,$$

где $F_1, \dots, F_k, G_1, \dots, G_l$ — формулы некоторого логического языка, а \vdash — специальный знак, названный знаком секвенции. При $k, l \geq 1$ секвенция интерпретировалась как логическая формула вида

$$(F_1 \wedge \dots \wedge F_k) \Rightarrow (G_1 \vee \dots \vee G_l),$$

где \Rightarrow — знак импликации. В работах, посвященных языку секвенциальных описаний, понятие секвенции вводится подобным образом. Запись вида $F \vdash G$, где F и G — формулы логики высказываний, называется секвенцией и интерпретируется так: если истинна формула F , то истинна формула G . В данном изложении мы будем пользоваться определением секвенции из [10] и логико-арифметической интерпретацией секвенций из [6].

Введем необходимые обозначения и определения. Основной моделью СЛУ будем считать структурный синхронный конечный автомат. Будем для простоты изложения рассматривать только автоматы Мура, т. е. автоматы, у которых выход в каждый момент совпадает с текущим состоянием. Требование синхронности автомата хорошо согласуется с программным принципом его реализации. Пусть $X = \langle X_1, \dots, X_n \rangle$ — вектор входных двоичных переменных и $Z = \langle Z_1, \dots, Z_m \rangle$ — вектор выходных двоичных переменных. Секвенцией $s(X, Z)$ будем называть запись вида

$$F(X, Z) \vdash G(Z), \quad (4.1)$$

где $F(X, Z)$ — формула логики высказываний, зависящая от переменных X и Z , а $G(Z)$ — формула логики высказываний, зависящая от Z . Секвенция $s(X, Z)$ будет интерпретироваться как утверждение следующего вида: для любого момента времени t , если значения переменных X и Z в момент t удовлетворяют условию F , то в момент $t+1$ значения переменных Z удовлетворяют условию G .

Для построения точного определения понятия интерпретации секвенции введем обозначения. Каждой двоичной переменной X_i поставим в соответствие функциональную переменную x_i ($i = 1, \dots, n$) и каждой двоичной переменной Z_j — функциональную переменную z_j ($j = 1, \dots, m$). Допустимыми значениями этих перемен-

ных являются двоичные функции натурального аргумента t . Переменные x_i, z_j называются одноместными предикатными переменными. Через x будем обозначать n -вектор предикатных переменных $\langle x_1, \dots, x_n \rangle$, через z — m -вектор $\langle z_1, \dots, z_m \rangle$; через $x(t)$ — n -вектор значений $\langle x_1(t), \dots, x_n(t) \rangle$, а через $z(t)$ — m -вектор значений $\langle z_1(t), \dots, z_m(t) \rangle$. Пусть $F(x(t), z(t))$, $G(z(t))$ — результат замены в формулах $F(X, Z)$ и $G(Z)$ каждого вхождения двоичной переменной на значение соответствующей предикатной переменной в момент t .

Логико-арифметической интерпретацией секвенции $s(X, Z)$ вида (4.1) будем называть формулу вида

$$\forall t (F(x(t), z(t)) \Rightarrow G(z(t))), \quad (4.2)$$

которую обозначим через $s^*(x, z)$. Очевидно эта формула не является формулой логики высказываний. Она записана в логическом языке СА2. При построении формул СА2 разрешается использовать предметную переменную t , предметную константу 0, операцию $\langle t+1 \rangle$, одноместные предикатные переменные, знаки логических операций и кванторы по переменным обоих типов. Заметим, в частности, что в формуле (4.2) предметная переменная t входит связанно, а предикатные переменные группы x и z входят свободно.

Пусть

$$S(X, Z) = \{s_1(X, Z), \dots, s_k(X, Z)\} \quad (4.3)$$

есть система (множество) секвенций. Систему S можно рассматривать как набор требований к поведению некоторого автомата. Систему S называют секвенциальным описанием автомата. Логико-арифметической интерпретацией системы $S(X, Z)$ будем называть формулу $S^*(x, z)$ языка СА2, имеющую вид

$$\bigwedge_{1 \leq i \leq k} s_i^*(x, z). \quad (4.4)$$

Нетрудно заметить, что $S^*(x, z)$ представляет собой условие, наложенное на рекурсию выходов некоторого автомата с n входами и m выходами. Это условие описывает класс автоматных поведений, т. е. класс операторов типа «вход-выход».

§ 4.3. Непротиворечивость и полнота секвенциальных описаний. Эквивалентность

Введенная семантика секвенциальных описаний позволяет точно сформулировать основные понятия, необходимые для разработки процедур синтеза СЛУ по их секвенциальным описаниям. К ним прежде всего относятся понятия непротиворечивости и полноты описания. Непротиворечивость секвенциального описания $S(X, Z)$ означает, что класс описываемых им автоматных поведений не пуст, т. е. существует автомат, поведение которого

удовлетворяет условию $S^*(x, z)$. Легко показать, что условие непротиворечивости может быть formalизовано в СА2. Пусть $c = \langle c_1, \dots, c_m \rangle$ — вектор двоичных констант ($c_i \in \{0, 1\}$; $i = 1, \dots, m$) и запись « $z(t) = c$ » служит сокращением следующей формулы СА2: $\bigwedge_{1 \leq i \leq m} (z_i(t) = c_i)$. Тогда формула $(z(0) = c) \wedge S^*(x, z)$ выделяет из семейства автоматных поведений, описываемых условием $S^*(x, z)$, те поведения, для которых выходной код в момент $t=0$ равен c . Другими словами, эта формула кроме условия $S^*(x, z)$, наложенного на рекурсию переходов автомата, фиксирует и начальное состояние.

Условие непротиворечивости $S(X, Z)$ можно сформулировать таким образом:

$$\forall c \forall x \exists z ((z(0) = c) \wedge S^*(x, z)). \quad (4.5)$$

Истинность этого условия означает, что найдется автомат, выход которого z при любом начальном состоянии c и входе x будет удовлетворять условию $S^*(x, z)$.

Другим важнейшим понятием является полнота секвенциального описания. Полнота описания $S(X, Z)$ означает, что существует единственный автомат, который при любых начальных условиях c и любом входе x удовлетворяет условию $S^*(x, z)$. Чтобы сформулировать понятие полноты на языке СА2, введем следующее обозначение. Запись вида « $\exists ! z A$ » будет служить обозначением для утверждения: «Существует единственное z , удовлетворяющее условию A ». Соответствующая синтаксическая конструкция в языке СА2 строится просто. Теперь условие полноты описания $S(X, Z)$ можно выразить в виде формулы

$$\forall c \forall x \exists ! z ((z(0) = c) \wedge S^*(x, z)). \quad (4.6)$$

Истинность этого условия означает, что при любых начальных условиях и любом входе условие $S^*(x, z)$ однозначно определяет значения переменных $z(t)$ при любых t . Эквивалентная формулировка этого условия в терминах формул логики высказываний F_i, G исходного секвенциального описания в общем случае достаточно громоздка. Ниже мы приведем такую формулировку для некоторого естественного сужения языка секвенциальных описаний.

Следует особо подчеркнуть, что анализ непротиворечивости и полноты являются необходимыми этапами синтеза СЛУ с использованием языка секвенциальных описаний. Нарушение условия непротиворечивости означает некорректность formalизации технического задания. Причиной могут служить как ошибки formalизации, так и некорректность самого задания. В обоих случаях необходима повторная formalизация, дающая непротиворечивое описание. Если секвенциальное описание непротиворечиво, но нарушено условие полноты, то условие $S^*(x, z)$ определяет автомат, реализующий СЛУ, неоднозначно. Можно указать не-

сколько наиболее распространенных причин неполноты описания. Возможен случай, когда не все кодовые комбинации переменных группы X и группы Z технически осмыслены. Например, если X_1 означает показание датчика «уровень в емкости выше максимального», а X_2 — «уровень в емкости ниже максимального», то сочетание $X_1 \wedge X_2$ не должно встречаться на входе СЛУ. Неполнота этого типа может быть использована для целей диагностики СЛУ, а также для оптимизации СЛУ по заданному критерию в классе автоматов, удовлетворяющих условию $S^*(x, z)$. Подобная оптимизация может быть проведена за счет добавления к исходному описанию $S(X, Z)$ новых секвенций, подходящим образом определяющих выходные значения на невозможных входных кодовых комбинациях. Сравнительно часто неполнота секвенциального описания связана с тем, что при формулировке технического задания некоторые требования к СЛУ, определяемые спецификой исполнительных механизмов УО, «упущены по умолчанию». Действительно, многие исполнительные механизмы с информационной точки зрения можно рассматривать как элементы памяти с двумя устойчивыми состояниями: включено и выключено. Будучи приведенным в одно из состояний, такой механизм остается в нем до тех пор, пока на него не поступает сигнал смены состояния. Если в исходном техническом задании подобное поведение негласно подразумевается, но не сформулировано в явном виде, то значения выходных переменных СЛУ, управляющих состоянием подобных механизмов, в некоторые моменты времени окажутся незаданными. Для устранения подобной неопределенности ниже будет введено понятие инерционности выхода СЛУ и дан простой способ доопределения описания, учитывающий «память» исполнительного механизма.

Используя семантику, введенную в § 4.2, нетрудно определить отношение эквивалентности секвенциальных описаний. Системы секвенций $S_1(X, Z)$ и $S_2(X, Z)$ будем называть эквивалентными (и писать $S_1 \sim S_2$), если выполняется условие

$$\forall x \forall z (S_1^*(x, z) \Leftrightarrow S_2^*(x, z)). \quad (4.7)$$

Истинность (4.7) означает, что системы S_1 и S_2 описывают один и тот же класс автоматных поведений, т. е. предъявляют одинаковые требования к рекурсии переходов автомата. В литературе описаны различные правила эквивалентных преобразований систем секвенций, их обоснование легко проводится на основе определения (4.7). Приведем два основных правила, использование которых необходимо в дальнейшем.

Правило 1. Пусть система секвенций S_1 содержит секвенцию s вида $F \vdash G_1 \wedge G_2$, а система S_2 получается из S_1 заменой секвенции s на пару секвенций: s_1 вида $F \vdash G_1$ и s_2 вида $F \vdash G_2$. Тогда $S_1 \sim S_2$.

Правило 2. Пусть система S_1 содержит две секвенции: s_1 вида $F_1 \vdash G$ и s_2 вида $F_2 \vdash G$, а система S_2 получается из S_1 заменой секвенций s_1 и s_2 на секвенцию $F_1 \vee F_2 \vdash G$. Тогда $S_1 \sim S_2$.

Согласно условию (4.7), для обоснования правила 1 достаточно использовать эквивалентность формулы $F \Rightarrow (G_1 \wedge G_2)$ формуле $(F \Rightarrow G_1) \wedge (F \Rightarrow G_2)$. Для обоснования правила 2 можно аналогично использовать эквивалентность формулы $(F_1 \Rightarrow G) \wedge (F_2 \Rightarrow G)$ формуле $(F_1 \vee F_2) \Rightarrow G$.

§ 4.4. Алгоритмические вопросы синтеза. Каноническая форма секвенциальных описаний

При разработке современных СЛУ объемы технических заданий достаточно велики. Практически размерность векторов X и Z и число секвенций описания имеют порядок 10^2 — 10^3 . Поэтому первостепенное значение приобретает задача разработки эффективных алгоритмов верификации технического задания и синтеза СЛУ. Под эффективными мы понимаем алгоритмы, сложность которых позволяет реализовать их на современных ЭВМ с разумными затратами средств. Ниже мы рассмотрим специальный вид секвенциальных описаний — каноническую форму. Язык канонических секвенциальных описаний обладает полнотой изобразительных свойств — любой структурный конечный автомат может быть задан на этом языке. В то же время процедура верификации свойств описаний и процедура синтеза СЛУ для этого языка имеют ограниченную вычислительную сложность.

Перейдем к точным определениям. Будем говорить, что секвенция вида (4.1) представлена в канонической форме, если $F(X, Z)$ представлена в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ), а $G(Z)$ — простая конъюнкция (т. е. конъюнкция некоторых переменных из Z или их отрицаний). Таким образом, секвенция в канонической форме представляет собой запись вида

$$F(X, Z) \vdash Z_{i_1}^{\lambda_{i_1}} \wedge \dots \wedge Z_{i_p}^{\lambda_{i_p}}, \quad (4.8)$$

где $F(X, Z)$ — ДНФ; $1 \leq i_1, \dots, i_p \leq m$; $\lambda_{i_1}, \dots, \lambda_{i_p} \in \{0, 1\}$.

Систему секвенций $S(X, Z)$ будем называть канонической, если все секвенции в ней представлены в канонической форме. В дальнейшем мы будем рассматривать только канонические системы секвенций.

Будем говорить, что каноническая система секвенций представлена в функциональной форме, если правые части всех секвенций в S имеют единичный ранг (т. е. состоят из одной переменной или ее отрицания) и попарно различны. Легко показать, что всякая каноническая система может быть преобразована в функциональную по правилам 1 и 2 эквивалентных преобразований секвенций. Сложность процедуры преобразования линейно зависит от длины задания исходной канонической системы. Согласно данному определению, всякую функциональную систему

$S(X, Z)$ можно представить в виде объединения множества пар секвенций:

$$\left. \begin{array}{l} A_i(X, Z) \vdash Z_i; \\ B_i(X, Z) \vdash \bar{Z}_i; \end{array} \right\} \quad (4.9)$$

где A_i, B_i — ДНФ; $1 \leq i \leq m$. Действительно, согласно принятой интерпретации, если какая-нибудь из секвенций вида (4.9) фактически не входит в S , можно считать, что она входит в S , но ее левая часть есть тождественно ложная формула. Воспользовавшись определением непротиворечивости (4.5), получим, что S не противоречива тогда и только тогда, когда невыполнимы (тождественно ложны) формулы $A_i \wedge B_i$ ($i = 1, \dots, m$). Действительно, выполнимость хотя бы одной из формул $A_i \wedge B_i$ дает возможность подобрать такие значения $z(0)$ и $x(0)$, при которых одновременно оказываются истинными формулы A_i и B_i . Последнее, согласно выражению (4.9), влечет одновременную истинность $z_i(1)$ и $\bar{z}_i(1)$, что невозможно. С другой стороны, невыполнимость $A_i \wedge B_i$ (для всех $i = 1, \dots, m$) позволяет для любого $z(0)$ и любого x построить вектор z , удовлетворяющий условию $S^*(x, z)$.

Как известно [8], задача проверки невыполнимости для формул логики высказываний произвольного вида лежит в сложностном классе со-NP, т. е. является переборной задачей. Однако для функциональных систем, в которых формулы A_i, B_i являются ДНФ, задача проверки невыполнимости формулы $A_i \wedge B_i$ имеет квадратичную верхнюю оценку зависимости сложности от длины формулы. Таким образом, задача проверки условия непротиворечивости для функциональных и, следовательно, для канонических систем секвенций имеет квадратичную сложность. Процесс решения этой задачи легко автоматизируется.

Рассмотрим теперь проблему полноты секвенциального описания для канонических и функциональных систем. Согласно (4.6), полная система S заведомо непротиворечива. Таким образом, для однозначного выбора необходимо и достаточно общезначимости формул $A_i \vee B_i$ ($i = 1, \dots, m$). Последнее в сочетании с условием невыполнимости $A_i \wedge B_i$ дает условие полноты функциональных систем: функциональная система вида (4.9) полна тогда и только тогда, когда общезначимы формулы вида $A_i \oplus B_i$ при $i = 1, \dots, m$ (здесь \oplus — логическая операция сложения по модулю 2). Оценим вычислительную сложность проверки условия непротиворечивости. Задача проверки общезначимости формул логики высказываний лежит в сложностном классе со-NP. Для ее решения в настоящее время неизвестны полные алгоритмы полиномиальной сложности. Обнадеживающим обстоятельством является тот факт, что длины формул $A_i \oplus B_i$ в практически встречающихся системах невелики.

В § 4.3 было указано, что неполнота секвенциального описания может иметь несколько источников. В случае, если не все кодовые комбинации вектора X технически реализуемы, следует искать

оптимальное доопределение для частично заданных выходных переменных. Методы поиска такого доопределения рассмотрены в работе [10]. Надо иметь в виду, что эта задача является NP-полной [8]. В случае, когда причина неполноты описания связана с наличием «памяти» исполнительных механизмов УО, естественно воспользоваться доопределением исходной системы секвенций, которое учитывает особенности исполнительных механизмов УО.

Пусть $S(X, Z)$ — непротиворечивая функциональная система вида (4.9). Обозначим через $A_i(t), B_i(t)$ соответственно формулы CA2 вида $A_i(x(t), z(t)), B_i(x(t), z(t))$. Знак Λ будем, как это принято в логике высказываний, заменять точкой. При этом вос-

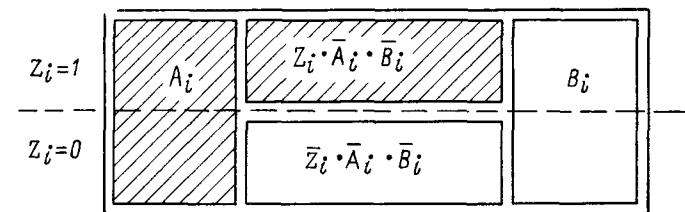


Рис. 4.1 Графическая иллюстрация построения инерциального доопределения

пользуемся обычным соглашением о порядке действий. Систему $S(X, Y)$ будем называть инерциальной, если для $i = 1, \dots, m$ выполняются условия $I_i(z)$ вида

$$\forall x \forall t (\bar{A}_i \cdot \bar{B}_i \Rightarrow (z_i(t) = z_i(t+1))). \quad (4.10)$$

Очевидно, для непротиворечивой функциональной системы выполнение условия $I_i(z)$ однозначно определяет значение $z_i(t)$ при любом t и любых начальных условиях. Таким образом, инерциальная непротиворечивая система является полной.

Введем теперь понятие инерциального доопределения. Пусть $S(X, Z)$ — непротиворечивая неполная функциональная система. Функциональную систему $S_1(X, Z)$ будем называть доопределением $S(X, Z)$, если выполняется условие

$$\forall x \forall z (S_1^*(x, z) \Rightarrow S^*(x, z)).$$

Если S_1 является к тому же инерциальной, то будем называть S_1 инерциальным доопределением S . Способ построения инерциального доопределения непротиворечивой неполной функциональной системы имеет наглядное графическое представление. На рис. 4.1 множество всех наборов значений переменных X и Z изображено условно в виде прямоугольника. Области истинности формул A_i и B_i обозначены соответствующими буквами. Эти области не пе-

пересекаются, так как система по предположению непротиворечива. Горизонтальная штриховая линия разбивает прямоугольник на подобласти с $Z_i = 1$ и $Z_i = 0$. Пусть инерциальное доопределение $S_1(X, Z)$ имеет вид

$$\begin{cases} A'_i(X, Z) \vdash Z_i; \\ B'_i(X, Z) \vdash \bar{Z}_i \quad (i = 1, \dots, m). \end{cases}$$

Тогда, согласно условию инерциальности, область истинности формулы A'_i должна получаться присоединением к области истинности A_i области, на которой истинна формула $Z_i \cdot \bar{B}_i$. Область истинности A'_i на рисунке 4.1 заштрихована. Область истинности B'_i может быть получена аналогично за счет присоединения к области истинности B_i области, где истинна формула $\bar{Z}_i \cdot \bar{A}_i$. На рисунке видно, что указанные области не пересекаются (непротиворечивость доопределения) и дают в объединении множество всех наборов значений переменных X и Z (полнота доопределения). Инерциальность следует из способа построения A'_i и B'_i . Подводя итог приведенным рассуждениям, дадим явный метод построения инерциального доопределения неполной непротиворечивой системы. Пусть S — непротиворечивая функциональная система вида (4.9). Тогда система S_1 вида

$$\left. \begin{array}{l} A_i(X, Z) \vee Z_i \cdot \bar{B}_i(X, Z) \vdash Z_i; \\ B_i(X, Z) \vee \bar{Z}_i \cdot \bar{A}_i(X, Z) \vdash \bar{Z}_i \quad (i = 1, \dots, m) \end{array} \right\} \quad (4.11)$$

является инерциальным доопределением S . Возможны также другие способы задания S , связанные с иными описаниями областей истинности формул A'_i , B'_i . Например, можно положить

$$\left. \begin{array}{l} A'_i(X, Z) = \bar{Z}_i \cdot A_i(X, Z) \vee Z_i \bar{B}_i(X, Z); \\ B'_i(X, Z) = \bar{Z}_i \cdot \bar{A}_i(X, Z) \vee Z_i \cdot B_i(X, Z), \\ \quad (i = 1, \dots, m), \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

описав те же области для A'_i и B'_i на рис. 4.1.

С алгоритмической точки зрения наибольший интерес представляет сложность вычисления переменных Z инерциального доопределения. Из анализа выражений (4.11) или (4.12) вытекает достаточно простой алгоритм вычисления значений $z_i(t+1)$ по значениям $z_i(t)$, $A_i(t)$ и $B_i(t)$ в инерциальном доопределении непротиворечивой системы.

Шаг 1. Если $z_i(t) = 1$, перейти к выполнению шага 2; в противном случае — к выполнению шага 3.

Шаг 2. Вычислить $A_i(t)$. Если $A_i(t) = 1$, перейти к вычислению шага 4; в противном случае — к выполнению шага 5.

Шаг 3. Вычислить $B_i(t)$. Если $B_i(t) = 1$, перейти к выполнению шага 5; в противном случае — к выполнению шага 4.

Шаг 4. $z_i(t+1) := 1$; перейти к выполнению шага 6.

Шаг 5. $z_i(t+1) := 0$; перейти к выполнению шага 6.

Шаг 6. Конец.

Очевидно, сложность этого процесса не превосходит максимума сложности вычисления значений A_i и B_i . Для оптимизации процесса вычисления может оказаться полезным результат, установленный в [10]. Пусть формулы логики высказываний A''_i и B''_i удовлетворяют следующим условиям:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_i \cdot A_i &\Rightarrow A''_i; \quad A''_i \Rightarrow \bar{Z}_i \cdot A_i \vee Z_i \cdot \bar{B}_i; \\ Z_i \cdot B_i &\Rightarrow B''_i; \quad B''_i \Rightarrow \bar{Z}_i \cdot \bar{A}_i \vee Z_i \cdot B_i. \end{aligned}$$

Тогда система

$$\begin{aligned} A''_i &\vdash Z_i; \\ B''_i &\vdash \bar{Z}_i \quad (i = 1, \dots, m) \end{aligned}$$

имеет то же инерциальное доопределение, что и исходная система вида (4.9). Для обоснования этого результата также используется геометрическая интерпретация, представленная на рис. 4.1.

Таким образом, если удается построить A''_i , B''_i , у которых максимум сложности ниже, чем максимум сложности A_i , B_i , то процедура вычисления инерциального доопределения упрощается.

§ 4.5. Методика разработки программной реализации на основе секвенциального описания

Характерной особенностью языка секвенциальных описаний является его логическая структура, которая позволяет описывать разрабатываемую СЛУ набором формальных требований к ее поведению. Синтез СЛУ на основе секвенциального описания сводится к извлечению алгоритма (и программы) управления из утверждения о свойствах этого алгоритма. Тем самым речь идет о логическом синтезе СЛУ. Как указывалось выше, практический интерес представляют системы, содержащие большое число секвенций. Отсюда возникает необходимость разработки диалоговых средств автоматизации синтеза СЛУ, позволяющих в разумные сроки по формализованному техническому заданию разработать алгоритм управления и реализовать его в виде управляющей программы для заданной микропроцессорной элементной базы.

Наметим основные этапы разработки СЛУ на основе ее канонического секвенциального описания и оценим вычислительную сложность каждого из них. Пусть S — заданное описание и N — длина задания S .

Этап 1. Приведение S в функциональную форму. Сложность этапа есть $O(N)$.

Этап 2. Проверка непротиворечивости описания. Сложность этапа есть $O(N^2)$.

Этап 3. Проверка полноты описания. Задача распадается на серию подзадач из класса со-NP малой размерности.

Этап 4. Построение полного доопределения. Сложность построения инерциального доопределения есть $O(N)$. Задача оптимизации секвенциального описания по длине входящих в него секвенций распадается на серию NP-полных задач малой размерности.

Этап 5. Синтез управляющей программы по полному функциональному описанию. Сложность зависит от выбранной элементной базы. Для стандартных современных микропроцессорных наборов сложность процедуры синтеза программы есть $O(N)$.

Этап 6. Исследование СЛУ. Моделирование системы СЛУ—УО на ЭВМ. Сложность этапа определяется типом исследования.

Приведенная нами методика требует разработки достаточно простых системных средств автоматизации. Диалоговый режим синтеза предусматривает «вмешательство» проектанта на этапе 2 в случае, если обнаружены противоречия в описании, и на этапе 3 с целью анализа причин неполноты и выбора типа доопределения. При построении доопределений могут быть поставлены и решены задачи диагностического типа. Действительно, появление на входе СЛУ технически неосмыслимых комбинаций свидетельствует о неисправности объекта управления, линии связи или самой СЛУ.

Результатом процесса проектирования является конкретная программа управления, реализованная на заданном языке программирования.

Мы рассмотрели лишь краткий обзор методов синтеза СЛУ, основанных на использовании логического языка секвенциальных описаний. В настоящее время на эту тему проводятся интенсивные исследования и имеется обширная журнальная литература. Как видно из изложенного, логические методы синтеза СЛУ обладают рядом очевидных достоинств, к которым относятся простота и естественность исходной формализации, простота внесения корректировок в описание СЛУ и низкая вычислительная сложность синтезирующих процедур. Логическая структура языка дает возможность описывать процессы различных уровней иерархии управления в единых терминах. Таким образом, использование языка секвенциальных описаний возможно для описания и синтеза многопроцессорных иерархических систем управления.

РАЗДЕЛ II ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ СЛОЖНЫХ КОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

ГЛАВА 5 ОРГАНИЗАЦИЯ ОБМЕНА ДАННЫМИ ПОДСИСТЕМ УПРАВЛЯЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

§ 5.1. Способы обмена данными в системах с общей магистралью

Использование в управляющих комплексах общих каналов передачи данных ставит задачу разделения канала между источниками во времени. Важнейшим требованием при этом является обеспечение бесконфликтной передачи данных по общему каналу. Возникновение конфликтов, т. е. наложение передаваемых источникам сообщений, возможно в общем канале в связи со сто-



Рис. 5.1. Общая магистраль с параллельным (а) и последовательным (б) каналами

хастическим характером потока сообщений. В таком случае, как правило, происходит искажение передаваемых сообщений, что недопустимо при управлении ТС корабля.

Характеристики каналов и способы управления доступом, обеспечивающие бесконфликтную передачу, в значительной степени определяются типом используемых каналов и способом передачи данных.

При построении УК ТС корабля могут быть использованы два типа каналов — параллельный и последовательный (рис. 5.1). В параллельном канале общая шина является пассивным элементом. Передающая среда единичная для всех абонентов, которые не имеют возможности повлиять на прохождение сигналов по каналу.

Такими каналами являются коаксиальный кабель с отводами, волоконно-оптическая линия с ответвлениями и др.

В последовательном канале общая шина разбивается на отдельные участки, разделенные аппаратурой подключения абонентов — коммутирующими элементами ретрансляторами, элементами памяти, параллельно-последовательными аппаратами. Передача осуществляется по цепочке абонентов, которые принимают и осуществляют ретрансляцию сообщений на новый участок и имеют возможность изменять проходящие по каналу сигналы.

Достоинством каналов первого типа является простота подключения новых абонентов к сети, т. е. расширение функциональных возможностей управляющего комплекса.

В последовательном канале проще осуществляется согласование приемников и источников с линией связи, имеется возможность на отдельных участках использовать различные виды сигналов и различные способы представления информации.

Способ передачи данных в общем канале определяется двумя факторами: формой представления данных и принципом взаимодействия систем.

Цифровые данные в системе могут быть представлены в параллельной или последовательной форме. При параллельной передаче сообщение, имеющее n бит информации, транслируют по n линиям. В этом случае приемник воспринимает передаваемое сообщение одновременно и полностью. Последовательная передача осуществляется всего по одной или двум линиям. Одна из них может использоваться для тактовых сигналов, другая — для передачи данных и сигналов управления передачей.

Последовательная передача характеризуется меньшей скоростью, меньшими затратами на линии связи и большими затратами на аппаратуру подключения.

По принципу взаимодействия систем общая магистраль может быть синхронного или асинхронного типа. В первом случае темп выдачи и приема информации определяется синхронизирующим устройством, которое задает моменты прохождения в линии каждого бита или группы бит. Это позволяет приемнику правильно интерпретировать поступающие сигналы. С синхронной магистралью могут работать только такие системы, которые способны принимать данные в любое время в заданном темпе.

Асинхронный принцип передачи основан на режиме запрос—ответ. Передающая система вырабатывает сигнал о выдаче данных «Запрос». При завершении приема данных принимающая система передает сигнал «Ответ», после которого передача прекращается. Таким образом, длительность передачи может быть различной в зависимости от характеристик взаимодействующих систем.

Достоинством синхронного способа обмена данными является лучшее использование канала и помехоустойчивость передачи. Однако в УК ТС корабля применяют, как правило, асинхронный способ передачи. Это обусловлено следующим: необходимостью уч-

тывать приоритетность источников при занятии магистрали связи, так как важность передаваемой по каналу связи управляющего комплекса информации и ее объемы существенно зависят от решаемых задач управления техническими средствами корабля и взаимодействующих систем; необходимостью обеспечить взаимодействие различных по быстродействию систем в процессе управления ТС корабля; упрощением сопряжения систем с магистралью при асинхронном обмене данными.

В управляющих комплексах ТС корабля с общей магистралью для обеспечения бесконфликтной передачи данных синхронным и асинхронным способами могут использоваться различные алго-

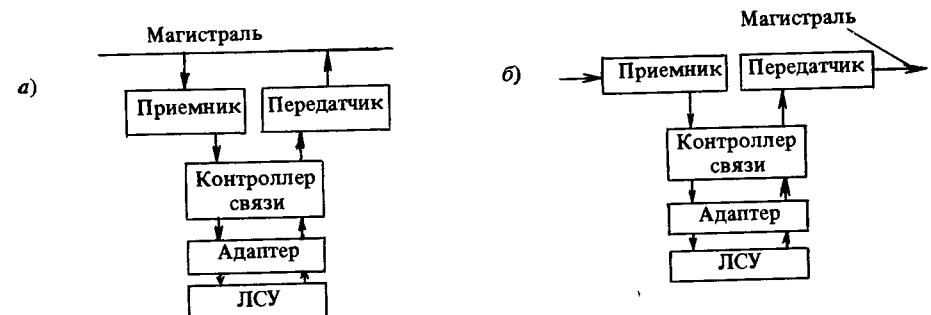


Рис. 5.2. Подключение систем к общей магистрали с параллельным (а) и последовательным (б) каналами

ритмы управления доступом. Можно выделить два основных вида организации доступа, отличающиеся способом задания очередности занятия канала: приоритетный и пропорциональный.

В первом случае перед трансляцией данных системы передают в канал управляющую информацию, задающую их приоритеты. В результате анализа сведений о взаимных приоритетах канал занимает источник с наибольшим приоритетом и блокирует занятие канала другими источниками.

Пропорциональный доступ предполагает задание очередности доступа систем к каналу связи. Такой алгоритм управления доступом используется, как правило, в каналах с синхронной передачей данных.

Управление доступом может быть централизованным и децентрализованным. В первом случае в составе управляющего комплекса предусматриваются специальные контроллеры, анализирующие состояние канала связи, потребности систем в обмене данными и выдающие разрешение на занятие канала. При децентрализованном управлении функции центрального контроллера выполняются аппаратурой подключения локальных систем, которая содержит в этом случае специальные контроллеры связи (КС). Схема подключения систем при децентрализованном управлении доступом приведена на рис. 5.2.

При проектировании УК ТС корабля стремятся обеспечить полностью или частично децентрализованное управление доступом, так как это обеспечивает более высокие характеристики надежности и живучести системы.

§ 5.2. Децентрализованное кодовое управление доступом к общей магистрали

Одним из наиболее развитых способов управления в системах с приоритетным доступом к общей магистрали является децентрализованное кодовое управление (ДКУ) [14]. В таких системах используются ненаправленные линии связи, в которых сигналы, поступающие от обменивающихся информацией устройств, распространяются в обоих направлениях и затухают на ее концах.

Основу алгоритма ДКУ составляют процессы передачи в канал управляющей информации, задающей приоритеты источников, выделения источников с младшими приоритетами и блокировки занятия ими каналов.

Всем системам, имеющим доступ к общей магистрали, присваиваются различные приоритеты, кодируемые целыми двоичными числами. Каждая система различает свободный и занятый каналы, при этом передача сигнала «0» и отсутствие передачи не различаются. Схема алгоритма децентрализованного кодового управления приведена на рис. 5.3.

Все системы, стремящиеся занять канал, ожидают наступления паузы (отсутствия сигналов) в канале на время $t_n \geq T_0$. Обнаружив такую паузу, система готовится к старший (очередной) разряд кода приоритета. Если значение очередного разряда кода равно 1, то система передает его в канал в течение времени $T_1 q$ при $0 < q < 1$ и через время $T_1(1 - q)$ переходит к передаче очередного разряда кода. В случае, когда значение очередного разряда кода равно 0, передающая система наблюдает состояние канала в течение времени T_1 . Если за это время в канале появится «1», то система прекращает передачу своего кода и возвращается к началу алгоритма (ожидания паузы), так как это означает, что идет передача кода от системы с более высоким приоритетом. Если передачи от другой системы нет, то передающая система переходит к передаче следующего разряда приоритета. После передачи последнего разряда кода система передает данные с частотой $f_a \geq 1/T_1$.

При таком алгоритме полностью передать код удается единственному источнику, имеющему старший приоритет, который и занимает канал. Источник, передающий «0» и принимающий «1», прекращает передачу кода.

Для обеспечения бит-синхронной передачи кодов приоритетов от различных систем необходимо выбирать переход передачи разрядов кода из условия $T_1 \geq 2\tau/(1 - q)$, где τ — максимальное время прохождения сигнала по передающей среде канала между двумя произвольными абонентами системы. Во время передачи

кода и данных не должно возникать паузы, синхронизирующей начало передачи, т. е. необходимо, чтобы выполнялось условие $T_0 > T_1$.

Исследование каналов связи с таким управлением показывает, что оно обеспечивает высокую эффективность передачи данных в близкодействующих системах, для которых $\alpha = \tau/B$, где B — средняя длительность сообщений.

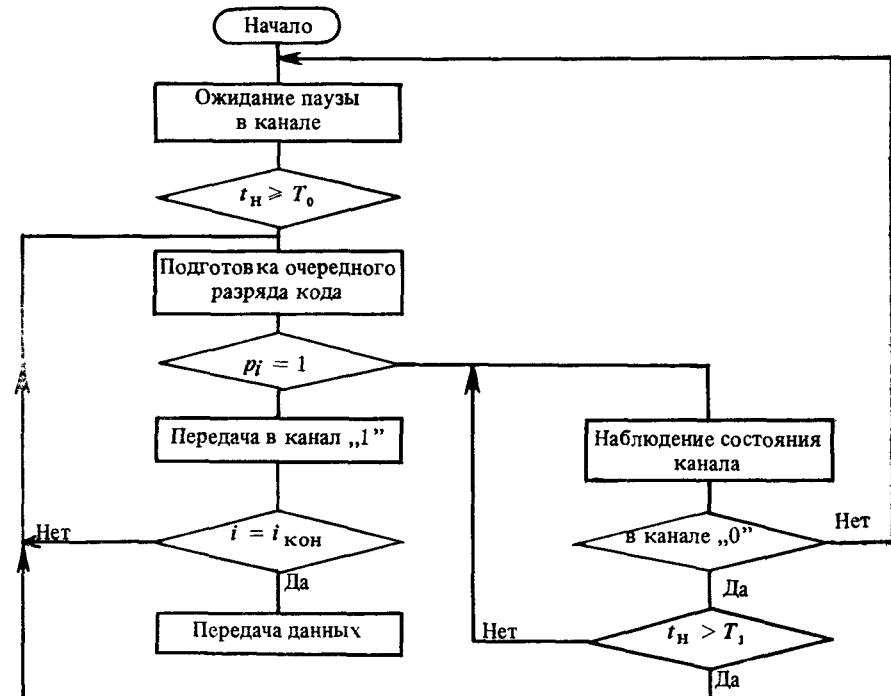


Рис 5.3. Схема алгоритма децентрализованного кодового управления

В корабельных УК параметр дальнодействия $\alpha < 10^{-2}$, что обеспечивает высокие характеристики каналов связи с ДКУ, практически не зависящие от числа абонентов комплекса.

Схема простейшего контроллера для подключения систем к магистрали управляющего комплекса с ДКУ представлена на рис. 5.4.

Контроллер принимает от системы сигнал о необходимости передачи данных (заявка), передает код приоритета, вырабатывает сигнал на разрешение занятия канала и сигнал вызова системы при поступлении по каналу адресованных ей данных. Функции вызова конкретных приемников системы и обмена информацией возлагаются на адаптер системы.

При поступлении заявки на передачу схема управления доступом ожидает сигнала от индикатора паузы. Если передача

в канале отсутствует в течение времени T_0 , то индикатор формирует сигнал и схема управления доступом запускает тактовый генератор, который с помощью сдвигового регистра хранения адреса системы поразрядно передает в канал код приоритета системы. При передаче сигнала «0» схема сравнения контролирует состояние канала в течение времени T_1 . Если за это время в канале не

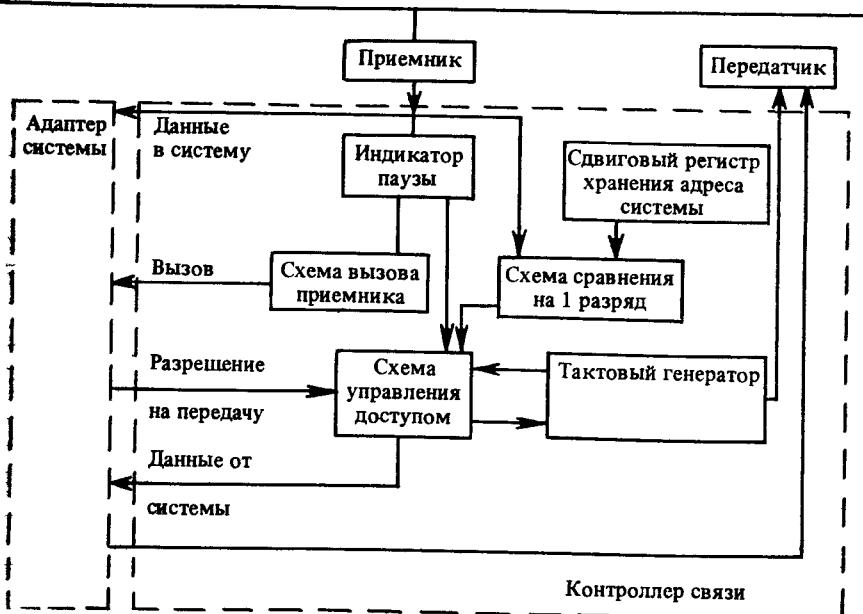


Рис. 5.4. Функциональная схема контроллера связи системы с магистралью при ДКУ

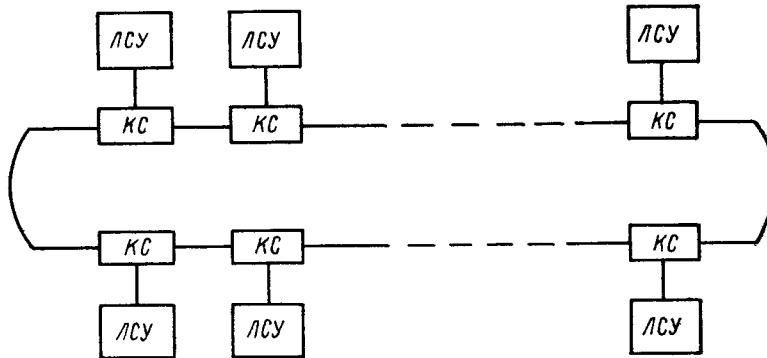
появился сигнал «1» от других источников, то значит в борьбе за канал не участвуют системы с более высоким приоритетом и в канал передается очередной разряд кода. Если контроллеру удается передать все разряды кода приоритета системы, то он формирует сигнал разрешения занятия канала. При этом система является единственной, получившей право доступа к каналу в связи с различными кодами приоритетов. После передачи всех разрядов кода во время борьбы за право доступа включается схема вызова приемника, в которой хранится адрес системы-приемника. При совпадении адреса с передаваемым по каналу адресом приемника посыпается вызов в систему.

§ 5.3. Пропорциональный доступ в общем канале

При построении УК ТС корабля для повышения их надежности стремятся упростить устройства связи систем с магистралью, компенсируя простоту организации высокой скоростью обмена и коммутации. Одним из таких путей является построение кан-

лов с пропорциональным доступом. В таких системах управление доступом осуществляется на основе задания периодической последовательности, в которой системы получают возможность занять канал.

В зависимости от характера последовательности системы пропорционального доступа могут быть с фиксированной очередностью или с изменяемой в процессе функционирования. Последние позволяют строить более гибкие системы передачи данных, способные адаптироваться к условиям функционирования. Однако такие системы требуют значительного усложнения оборудования управления и в реализованных в настоящее время системах с про-



В большинстве случаев жезл представляет собой код, передаваемый в коротком пакете — метке. Изъятие жезла — это изменение кода метки. Измененная метка обычно отмечает начало пакета данных в кольце и используется для синхронизации передачи данных.

В качестве иллюстрации принципа работы жезлового кольца рассмотрим функционирование последовательного канала с четырьмя системами (рис. 5.6). В интервале времени T_1 происходит передача данных от системы 1 к системе 3. При получении

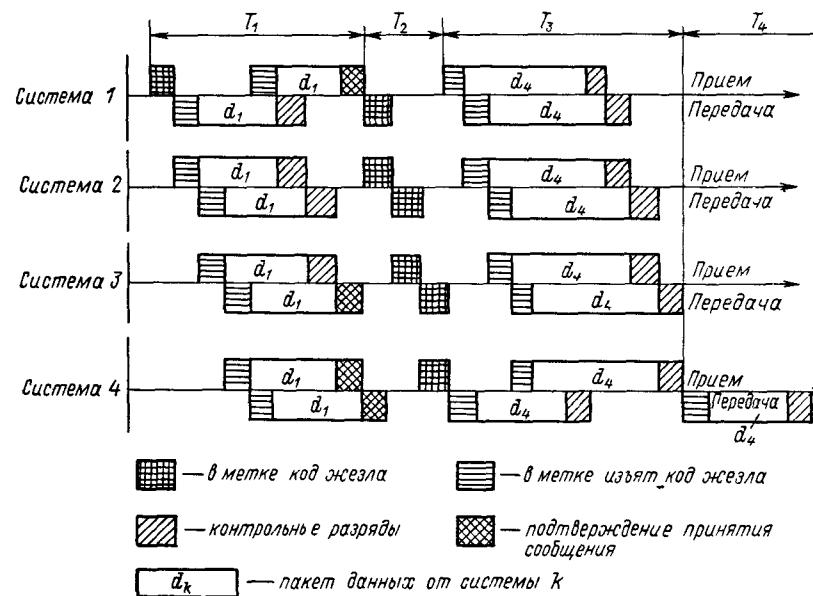


Рис. 5.6 Диаграмма передачи данных в системе типа жезловое кольцо

данных система 3 отмечает факт приема в контрольных разрядах пакета данных. Передающая система 1, получив подтверждение, снимает сообщение и запускает в кольцо жезл. В интервале T_2 по кольцу циркулирует метка с кодом жезла, так как заявки на занятие канала отсутствуют. В интервале T_3 производится передача данных от системы 4, которая, не получив подтверждения приема, повторяет передачу в интервале T_4 .

Управление с помощью жезла возможно не только в последовательном канале. В параллельном канале (жезловой шине) специальный пакет, выполняющий роль жезла, содержит адрес системы, для которой наступила очередь доступа к каналу. Принявшая пакет — жезл система передает жезл с внесением в него адреса следующей в очередности системы либо сразу после его получения, либо после передачи в канал данных.

§ 5.4. Сравнительные характеристики каналов множественного доступа

Для возможности реализации всех функций управления каналы связи УК должны обеспечивать определенные характеристики передачи данных при заданных параметрах информационных потоков. К таким параметрам относятся: число участвующих в обмене данными систем, объемы передаваемых данных, интенсивность потоков сообщений.

Различные способы организации каналов связи и управления доступом к общей магистрали характеризуются различными значениями показателей, определяющих основные функциональные свойства систем передачи данных.

В процессе проектирования УК производится оценка характеристик различных вариантов построения каналов связи и выбираются такие из них, которые удовлетворяют заданным ограничениям или обеспечивают экстремальное значение некоторого интегрального показателя качества (см. гл. 7).

Важнейшими характеристиками каналов связи УК являются средняя задержка передачи пакета данных W и емкость канала C .

Задержкой называется время от момента появления пакета данных у источника до момента окончания его передачи по каналу связи. Емкость канала — это коэффициент полезной нагрузки, определяющий относительную часть пропускной способности канала, занятую передачей пакетов данных.

Требование работы системы УК в реальном времени определяет важнейшее ограничение на характеристики канала связи $W \leq W^*$, где W^* — предельно-допустимое время задержки передачи сообщений.

Для сравнения различных вариантов систем необходимо располагать зависимостями характеристик каналов от параметров: числа систем, взаимодействующих через канал, N ; интенсивности потоков данных от систем λ ; длительности пакетов сообщений B . Такие зависимости могут быть получены аналитически или путем статистического моделирования.

Представляя модель канала в виде системы массового обслуживания с потоком заявок с интенсивностью λ и средним временем обслуживания, равным длительности пакета сообщения B , можно получить аналитические выражения для расчета средней задержки передачи сообщения W . Ниже представлены выражения для различных типов каналов, которые позволяют рассчитать среднее время задержки передачи при допущении, что все абоненты генерируют одинаковые пауссоновские потоки данных с суммарной интенсивностью λ .

Способ управления доступом
Децентрализованное кодовое управление

Средняя задержка передачи
 $W = \beta \left(\beta \frac{S}{2(1-\beta S)} + 1 \right)$

Жезловое кольцо

$$W = \frac{S}{2(1-S)} + \gamma \frac{1-S/N}{2(1-S)} + 1$$

Жезловая шина

$$W = \frac{S}{2(1-S)} + \alpha N r \frac{1-S/N}{2(1-S)} + 1$$

В этих выражениях в качестве единицы времени принята длительность передачи пакета сообщения, что позволяет получить относительные характеристики систем, не зависящие от параметров устройств передачи данных и физической среды канала. В приведенных выражениях приняты следующие обозначения: W — нормализованная средняя задержка передачи пакета, выраженная в единицах длительности пакета; B — длительность передачи пакетов сообщений; $S=\lambda B$ — нормализованная суммарная интенсивность потоков сообщений; $\alpha=\tau/B$ — нормализованное время прохождения сигнала по каналу; $\beta=[1+2\alpha(n+1)]$ — нормализованное время занятия канала и передачи пакета старшим по приоритету источникам (n — разрядность кода приоритета); $r=T_{ш}/\tau+H/\tau$ — среднее время передачи жезла (в единицах τ), где $T_{ш}$ — среднее время прохождения сигнала по шине между соседними в очередности абонентами и H — длительность пакета жезла; $\gamma=T/B$ — нормализованное время прохождения сигнала в последовательном канале, включая тактовые задержки в регистрах интерфейсных блоков.

В качестве примера исследуем зависимость среднего времени задержки передачи от числа подключаемых систем и длины передаваемых сообщений в каналах с различными способами управления доступом к общей магистрали. Примем максимальную удаленность систем друг от друга $L=500$ м, соответствующее ей время прохождения сигнала по каналу $\tau=2,5$ мкс и скорость передачи данных по каналу $V=500$ кбит/с. В последовательном канале примем длину регистра буферной памяти (тактовую задержку) $\omega=8$. В этом случае нормализованное время прохождения сигнала в последовательном канале

$$\gamma=T/B=\tau/B+8N/B.$$

При расчете характеристик жезлового кольца примем равномерное случайное распределение адресов нашине. Тогда среднее время передачи жезла $r=0,5+H/\tau$, где H — длительность пакета жезла. При числе абонентов N и скорости передачи по каналу V величина H равна ближайшему сверху целому значению числа $\log_2 N$.

Рассмотрим два варианта построения системы: 1) к магистрали подключается большое число систем, обменивающихся короткими сообщениями $b=32$ бит с интенсивностью $\lambda=100$ 1/с; 2) к маги-

Таблица 5.1. Задержка передачи при различных алгоритмах управления доступом

Вариант	Число систем	Нормализованная интенсивность	Среднее время задержки		
			жезловое кольцо	жезловая шина	ДКУ
1	20	0,128	3,944	1,819	1,639
	30	0,192	5,374	2,326	1,757
	40	0,256	7,876	2,985	2,054
	50	0,320	10,396	3,715	2,305
	60	0,384	13,441	4,596	2,678
	70	0,448	17,191	5,835	3,800
	80	0,512	21,925	7,251	5,649
	90	0,576	28,088	9,094	13,508
	100	0,640	36,443	11,592	-19,500
	110	0,704	48,410	15,170	-4,830
	4	0,205	1,168	1,136	1,146
2	6	0,307	1,288	1,235	1,252
	8	0,410	1,449	1,368	1,385
	10	0,512	1,679	1,556	1,589
	12	0,614	2,030	1,844	1,894
	14	0,717	2,636	2,341	2,440
	16	0,819	3,928	3,401	3,698
	18	0,922	8,594	7,229	10,527
	20	1,024	-26,559	-21,611	-9,016
	22	1,126	-4,755	-3,722	-2,714

страли подключается меньшее число систем, обменивающихся длинными сообщениями $b=512$ бит с меньшей интенсивностью $\lambda=50$ 1/с.

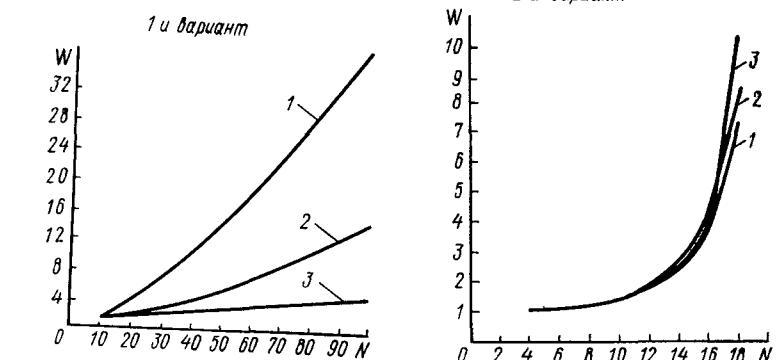


Рис 5.7 Зависимости среднего времени задержки передачи от числа систем, подключенных к магистрали

Результаты расчетов и кривые зависимости $W(N)$ для двух вариантов системы представлены в табл. 5.1 и на рис. 5.7. Как видно из кривых зависимости $W(N)$, в 1-м варианте система

с ДКУ (кривая 3) имеет лучшие характеристики. Среднее время задержки передачи в такой системе остается практически неизменным, т. е. не зависит от числа подключенных к магистрали систем до значения $N=70$. При дальнейшем увеличении числа систем относительное время задержки резко возрастает и наступает насыщение канала (при $N=100$). В системах с пропорциональным доступом время задержки передачи возрастает с увеличением числа подключенных систем (желовое кольцо — кривая 1, желловая шина — кривая 2). Во 2-м варианте расчетные характеристики магистрали в системах с различным управлением доступом практически совпадают.

ГЛАВА 6 МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ КОРАБЛЯ

§ 6.1. Общая характеристика и классификация используемых моделей

Для оценки качества проектируемых систем и принятия технических решений необходимо на ранних этапах проектирования задолго до изготовления аппаратуры располагать характеристиками системы, представляющими ее свойства. С этой целью используются модели процессов и систем, описывающие математические зависимости интересующих проектировщика характеристик от условий работы и параметров устройств системы. В процессе проектирования любой сложной системы, в том числе и УК ТС корабля, на разных его этапах используются различные виды моделей. Вначале, если это возможно, составляются аналитические модели задач управления, например в виде систем дифференциальных уравнений или логико-алгебраических выражений. Затем выбираются алгоритмы, позволяющие доводить решение задач до численных значений. С этой целью широко используются численные методы решений и численные модели задач. Для исследования на ЭВМ необходимо перевести численные модели в программы и информационные массивы, т. е. создать информационно-программные модели.

Такой путь исследования, основанный на использовании аналитических моделей, часто оказывается малопригодным из-за большой размерности и сложности получаемых моделей. Поэтому широкое развитие получили человеко-машические методы имитационного моделирования сложных систем.

Имитационные модели реализуются на ЭВМ с использованием универсальных алгоритмических языков высокого уровня АЛГОЛ,

ФОРТРАН или языков системного моделирования (СЛЭНГ, СИМУЛА и др.) и диалоговых средств общения. Имитационное моделирование заключается в проведении экспериментов с моделью, представляющей в форме совокупности алгоритмов, описывающих поведение системы, путем прогонов построенных на их основе программ на некотором множестве данных.

Основным достоинством имитационного моделирования является его универсальность и возможность обеспечения высокой адекватности исследуемой модели реальной системе. Это достигается за счет глубокой детализации алгоритмического описания, что невозможно при исследовании аналитическими методами, которые связаны с упрощениями процессов и жесткими ограничениями на условия использования модели.

Так, например, попытка учесть в модели влияние случайных факторов приводит при аналитическом исследовании систем к значительным трудностям, которые не всегда удается преодолеть. Имитационное моделирование при исследовании систем в условиях случайных воздействий не вызывает затруднений и является в настоящее время наиболее эффективным, а подчас и единственным практически доступным средством получения информации о поведении системы особенно на стадии ее проектирования.

Используемые в процессе проектирования УК ТС корабля модели можно разделить на классы, каждому из которых соответствует определенная цель исследования при проектировании (табл. 6.1).

К классу динамических моделей относятся модели, представляющие математическое описание процессов, развивающихся во времени. Эти модели широко используются при проектировании различных систем управления. Математическая форма модели зависит от принятого способа измерения координат состояния объекта и времени. В связи с цифровой реализацией систем управления все больший удельный вес приобретают дискретно-непрерывные модели, представляющие процессы в дискретном времени в форме разностных уравнений.

Оптимизация процессов является одной из основных задач проектирования любой системы управления. Модели и методы оптимизации, используемые в процессе проектирования УК ТС корабля, определяются содержанием конкретных задач управления, средствами исследования и технической реализации устройств системы.

Методы классического и «расширенного» вариационного исчисления нашли широкое применение в аналитическом конструировании регуляторов. Многие задачи по определению оптимальных значений параметров управления могут быть решены с использованием принципа максимума Понтрягина [4]. Таким методом, например, может быть решена задача построения оптимальной по быстродействию системы, обеспечивающей переход судна на заданный курс в условиях существующих ограничений на управляющие воздействия.

Таблица 6.1. Классы моделей, используемых в процессе проектирования УК ТС корабля

Класс моделей	Математическая форма модели	Моделируемые объекты	Цель использования при проектировании
Динамические модели	Дифференциальные уравнения	Процессы с непрерывными состояниями в непрерывном времени	Оценка характеристик движения при различных воздействиях
	Разностные уравнения	Непрерывные процессы в дискретном времени	
	Временные булевые функции	Дискретные процессы в дискретном времени	
	Вариационные модели	Непрерывные процессы	
	Математическое программирование	Произвольные процессы	
	Статистические решения	Вероятностные процессы	
	Модели массового обслуживания	Процессы взаимодействия с потоками случайных событий	
	Вероятностные модели	Сложные многофункциональные системы	Выбор устройств и организаций работы цифровых устройств
	Дискретные модели	Графовые Алгебраические	Оценка работоспособности и эффективности Оптимизация структуры

В связи с использованием ЭВМ большое развитие получили модели и методы оптимизации, основанные на принципах математического программирования. Так, в системах управления с ЭВМ высокой эффективностью обладают алгоритмы оптимизации траектории движения судна при расхождении со встречными объектами, основанные на принципах динамического программирования. Задачи и методы оптимизации нашли широкое освещение в литературе [4, 5, 11].

Использование вероятностных моделей обусловлено необходимостью учета в процессе проектирования систем разнообразных случайных факторов, которые во многих случаях оказывают определяющее влияние на характеристики системы.

Так, например, учет случайного характера поступления запросов от многочисленных устройств необходимо при определении требуемой производительности процессоров управляющего комплекса. Случайные значения измеряемых в процессе управления величин являются причиной недетерминированного числа операций, выполняемых процессором при реализации алгоритмов управления.

При проектировании микропроцессорных УК особо важную роль приобретают модели массового обслуживания, позволяющие определять необходимую производительность устройств обработки информации и пропускную способность каналов связи, рациональную последовательность работ в системе и разрабатывать алгоритмы управления ресурсами комплекса.

К дискретным моделям относят графовые и алгебраические модели, предназначенные для представления полной модели функционирования сложной системы при имитационном моделировании на ЭВМ.

В связи с наличием обширной литературы, посвященной различным вопросам математического описания систем управления, в дальнейшем будут рассмотрены лишь задачи построения и исследования моделей массового обслуживания, непосредственно используемых при проектировании микропроцессорных УК.

§ 6.2. Модели функционирования микропроцессорных управляющих комплексов

УК ТС корабля состоят из большого количества разнообразных устройств и систем и характеризуются наличием многочисленных внешних и внутренних случайных воздействий. Случайный характер носят ветроволновые возмущения, изменения гидродинамических характеристик судна, связанные с обрастанием корпуса, возникновения отказов элементов систем, требующие локализации неисправностей для предотвращения развития аварийных ситуаций, и др. В связи с этим потребности в решении отдельных задач обработки информации и время решения этих задач имеют также случайный характер.

Несмотря на то, что многие задачи обработки информации, связанные с контролем и управлением ТС корабля, носят циклический характер, случайные воздействия на УО приводят к тому, что обращение к устройствам, выполняющим различные функции контроля и управления, в общем случае не является регулярным. Случайной величиной является и время, затрачиваемое процессором на обработку информации в процессе управления, так как алгоритмы решения задач имеют разветвления, содержат циклы. Число процессорных операций, выполняемых при реализации подобных алгоритмов, зависит от случайных значений измеряемых величин.

Все это обуславливает необходимость использования вероятностных моделей при проектировании УК. Такие модели необходимы как при описании процессов выполнения отдельных алгоритмов задач, так и при описании систем, выполняющих определенную совокупность задач контроля и управления.

В качестве модели функционирования систем, предназначенных для решения некоторой совокупности вычислительных задач в процессе управления корабельными объектами, могут быть использованы модели массового обслуживания.

Возникающие в процессе управления потребности обработки информации процессором образуют потоки заявок z_1, z_2, \dots, z_M , соответствующие различным вычислительным задачам $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ и требующие выполнения процессором соответствующих рабочих программ $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_m$. Если процессор свободен в момент поступления заявки, то вызывается к действию соответствующая рабочая программа, выполнение которой и является обслуживанием заявки. Если заявка поступает в момент занятости процессора обслуживанием какой-либо другой заявки, то вновь поступившая заявка анализируется и в зависимости от принятой дисциплины обслуживания и приоритетности задачи либо сразу же передается на обслуживание в процессор, который в этом случае прерывает решение ранее поступившей задачи, либо устанавливается в очередь на обслуживание. При бесприоритетном обслуживании моделью системы является система массового обслуживания (СМО) с общей очередью, при обслуживании с приоритетами — СМО с индивидуальными очередями (рис. 6.1).

Магистральная структура УК ТС корабля и организация распределенных вычислительных процессов, при которых задачи разделяются на отдельные этапы, выполняемые различными процессорами, требуют представления модели функционирования УК в виде системы взаимодействующих СМО — стохастической сети (рис. 6.2). При этом отдельные системы, входящие в сеть, могут быть одноканальными или многоканальными СМО.

Задачей исследования моделей является оценка характеристик и выбор параметров, обеспечивающих требуемое качество функционирования проектируемого комплекса. Такие исследования могут производиться на основе аналитических моделей или путем имитационного (программного) моделирования.

Аналитические модели, основанные на применении аппарата теории массового обслуживания, используются на начальных этапах проектирования. Такие модели позволяют определять ориентировочные параметры устройств и организацию работ в системе для обеспечения требуемых характеристик функционирования.

Более точные оценки характеристик системы получают путем имитационного моделирования с привлечением метода статистиче-

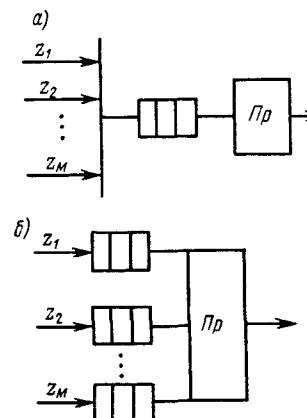


Рис. 6.1. Модели массового обслуживания с общей (а) и индивидуальной (б) очередями

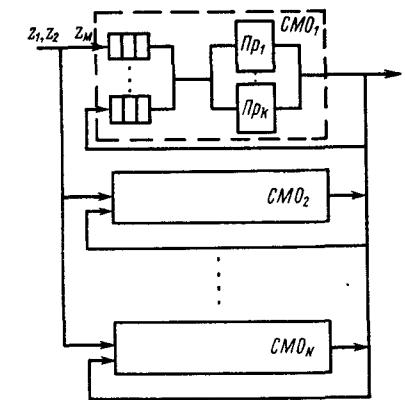


Рис. 6.2 Сеть взаимодействующих систем массового обслуживания

ских испытаний (метода Монте—Карло). Такие исследования являются сложным трудоемким процессом, требующим разработки специальных программных средств моделирования на ЭВМ. Имитационное моделирование, как правило, производится при проектировании систем, структура которых изменяется в широких пределах.

Исследование аналитических моделей является значительно менее трудоемким процессом и позволяет получать приблизительные оценки характеристик системы с достаточной для ранних стадий проектирования точностью.

§ 6.3. Аналитическое исследование моделей массового обслуживания

Функционирование всякой системы массового обслуживания характеризуется рядом показателей: средним временем пребывания заявки в системе; средним числом заявок, находящихся в системе; средним числом заявок, находящихся в очереди; средним временем пребывания заявок в очереди и др. Значения этих показателей зависят от организации системы, параметров ее устройств и параметров потоков заявок.

Модели массового обслуживания устанавливают соотношения, связывающие характеристики системы с основными ее параметрами. Принятие ряда допущений о параметрах входных потоков и характере их обслуживания позволяет построить такие модели массового обслуживания, которые поддаются аналитическому исследованию. Это в первую очередь относится к марковским системам, занимающим в теории массового обслуживания такое же место, как линейные системы в теории автоматического регулирования.

Наиболее распространенным допущением, приводящим к марковской модели массового обслуживания, является допущение о простейшем (пуассоновском) характере потоков заявок и законов обслуживания в системе.

Простейшим называют поток событий, обладающий тремя свойствами: однородностью, отсутствием последействия и стационарностью. Такой поток подчиняется пуассоновскому закону распределения

$$P_n(\tau) = (\lambda\tau)^n e^{-\lambda\tau} / n!,$$

где $P_n(\tau)$ — вероятность появления n однородных событий в интервале времени τ ; λ — постоянное положительное число, определяющее среднее число событий в единицу времени.

Интервалы времени между событиями простейшего потока распределены по показательному (экспоненциальному) закону:

$$F(t) = P\{T \leq t\} = 1 - e^{-\lambda t}$$

с плотностью распределения вероятности

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

математическим ожиданием

$$M(t) = \int_0^\infty t f(t) dt = 1/\lambda$$

и дисперсией

$$D(t) = \int_0^\infty t^2 f(t) dt = 1/\lambda^2.$$

В простейшем потоке заявки имеют тенденцию группироваться в области коротких интервалов, так как

$$P\{\tau < 1/\lambda\} = 1 - e^{-1} \approx 0,63,$$

т. е. большая часть заявок следует одна за другой с интервалом, меньшим среднего значения $1/\lambda$. Следовательно, такой поток со-

зывает наиболее тяжелый режим работы системы по сравнению с другими потоками той же интенсивности. Поэтому допущение о пуассоновском характере потоков заявок является вполне приемлемым, так как приводит к определению предельных значений характеристик качества обслуживания.

Рассматривая вероятность наступления n событий в интервале dt и осуществляя предельный переход при $dt \rightarrow 0$, простейший поток можно описать линейными дифференциальными уравнениями

$$P'_0(\tau) = -\lambda P_0(\tau);$$

$$P'_n(\tau) = -\lambda P_n(\tau) + \lambda P_{n-1}(\tau),$$

которые позволяют исследовать пуассоновский поток с помощью методов теории марковских процессов.

Марковским процессом называется такой процесс, будущее состояние которого определяется только настоящим состоянием и не зависит от предыдущего состояния. Марковский процесс с дискретными состояниями называется марковской цепью. Состояния такого процесса можно пронумеровать и обозначить через S_0, S_1, S_2, \dots , а изменение состояний во времени представить последовательностью (цепью) $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots$. Для описания марковского процесса достаточно указать начальное состояние и задать матрицу вероятностей переходов $P = \|p_{ij}\|$, где p_{ij} — вероятность перехода из состояния S_i в состояние S_j

$$P = \begin{bmatrix} S_0 & P_{00} & P_{01} & P_{02} & \dots & P_{0k} \\ S_1 & P_{10} & P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1k} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ S_k & P_{k0} & P_{k1} & P_{k2} & \dots & P_{kk} \end{bmatrix}$$

Для однородного марковского процесса, в котором вероятности переходов не зависят от времени $p_{ij}(t) = \text{const}$, имеет место следующее очевидное соотношение:

$$P_j(k+1) = \sum_i P_i(k) p_{ij},$$

или в векторной форме

$$P(k+1) = P(k)P,$$

из которого следует

$$P(l+k) = P(l)P^k.$$

Для представления пуассоновского потока в виде марковского процесса обозначим состояние системы, характеризующиеся различным числом поступивших заявок, через S_i , где $i=0, 1, 2, \dots$. В этом случае матрица P будет состоять из вероятностей переходов (изменения состояния) за время dt . При этом строки матрицы соответствуют состояниям в момент времени t , а столбцы — в момент $t+dt$.

Учитывая, что вероятность появления одной заявки в простейшем потоке на интервале dt равна $P_1(dt) = \lambda dt$, а вероятность непоявления заявки — равна $P_0(dt) = 1 - \lambda dt$, и пренебрегая величинами $p_{i,i+k}$ при $k > 1$, имеющими порядок малости меньший,

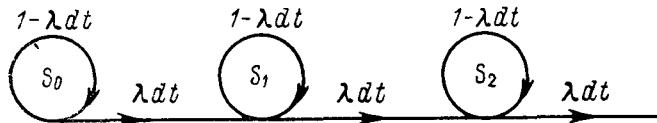


Рис. 6.3 Граф переходов марковской цепи, представляющей простейший поток

чем dt , получаем матрицу вероятностей переходов пуассоновского потока в виде

$$P = \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & S_2 & \dots & S_k \\ S_0 & 1 - \lambda dt & \lambda dt & 0 & \dots & 0 \\ S_1 & 0 & 1 - \lambda dt & \lambda dt & \dots & 0 \\ S_2 & 0 & 0 & 1 - \lambda dt & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ S_k & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 - \lambda dt \end{bmatrix}$$

На рис. 6.3 представлен график переходов такого потока

Представление потоков в виде марковских цепей — процессов с дискретными состояниями S_0, S_1, S_2, \dots и непрерывным временем t дает возможность исследовать СМО с помощью методов теории марковских процессов, позволяющих получать конечные аналитические выражения для расчета характеристик систем. Рассмотрим порядок расчета характеристик системы на примерах простейших СМО, входящих в модель УК.

Одноканальные СМО с ожиданием. Такие системы являются моделью однопроцессорных систем, входящих в УК. Рассмотрим случай, когда на вход системы поступает пуассоновский поток однородных заявок с интенсивностью λ , время обслуживания которых распределено по экспоненциальному закону с показателем μ . Обозначим через S_i состояние системы, когда в ней находится

i заявок. В интервале $[t, t+dt]$ вероятности переходов определяются матрицей

$$P = \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & & & & \\ S_0 & 1 - \lambda dt & \lambda dt & & & \\ S_1 & \lambda dt & 1 - (\lambda + \mu) dt & & & \\ S_2 & 0 & \mu dt & & & \\ S_3 & 0 & 0 & & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ S_k & 0 & 0 & & & \\ & & & S_2 & S_3 & \dots & S_k \\ & & & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & & & \lambda dt & 0 & \dots & 0 \\ & & & 1 - (\lambda + \mu) dt & \lambda dt & \dots & 0 \\ & & & \mu dt & 1 - (\lambda + \mu) dt & \dots & 0 \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & 0 & 0 & \dots & 1 - \lambda dt \end{bmatrix}.$$

Вероятность отсутствия прихода заявок в течение интервала $[t, t+dt]$, определяющая вероятность перехода $S_0 \rightarrow S_0$, равна $1 - \lambda dt$. Вероятность перехода $S_i \rightarrow S_{i+1}$ определяется вероятностью прихода одной заявки и равна λdt . Вероятность перехода $S_i \rightarrow S_{i-1}$ определяется вероятностью обслуживания за время dt одной заявки. При экспоненциальном законе обслуживания эта вероятность равна $\mu e^{-\mu dt} \approx \mu dt$. Учитывая, что $\sum_j p_{ij} = 1$ и $p_{i,i+k} = 0$ при $k > 1$, получаем вероятность перехода $S_i \rightarrow S_i$, равной $1 - (\lambda + \mu) dt$. Граф переходов такой системы представлен на рис. 6.4.

Уравнения Колмогорова, описывающие состояние системы, имеют вид

$$P(t+dt) = P(t)P,$$

или

$$\begin{aligned} P_0(t+dt) &= (1 - \lambda dt)P_0(t) + \mu dt P_1(t); \\ P_i(t+dt) &= \lambda dt P_{i-1}(t) + [1 - (\lambda + \mu) dt]P_i(t) + \mu dt P_{i+1}(t). \end{aligned}$$

После преобразований получаем уравнения состояний в виде

$$P'_0(t) = -\lambda_0 P_0(t) + \mu P_1(t);$$

$$P'_i(t) = \lambda P_{i-1}(t) - (\lambda + \mu) P_i(t) + \mu P_{i+1}(t), \quad i = 1, 2, \dots$$

Задавая начальные условия состояния системы и решая эти уравнения (например, с использованием преобразования Лапласа), можно определить зависимость изменения вероятностей состояний от времени. Однако в большинстве случаев интересны значения характеристик системы в установившемся состоянии. С этой целью для определения установившихся вероятностей необходимо в уравнениях состояний производные приравнять нулю. В результате система алгебраических уравнений будет иметь вид

$$\begin{aligned}\lambda P_0 &= \mu P_1; \\ (\lambda + \mu) P_i &= \lambda P_{i-1} + \mu P_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots\end{aligned}$$

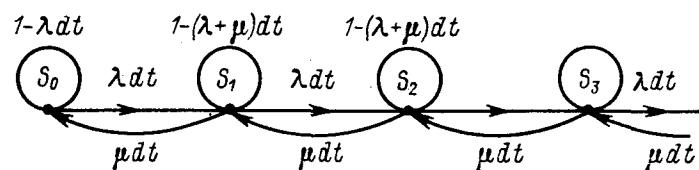


Рис. 6.4. Граф переходов одноканальной СМО

Из решения этих уравнений определяем

$$P_1 = (\lambda/\mu) P_0; \quad P_i = (\lambda/\mu)^i P_0, \quad i = 1, 2, \dots$$

Учитывая, что $\sum_{i=1}^{\infty} P_i = 1$, при $\lambda < \mu$ получим

$$P_0 = 1 - \lambda/\mu; \quad P_i = (1 - \lambda/\mu)(\lambda/\mu)^i, \quad i = 1, 2, \dots$$

Вводя обозначение $\rho = \lambda/\mu$, можно записать

$$P_i = (1 - \rho) \rho^i, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Величина ρ называется загрузкой системы и определяет коэффициент использования обслуживающего прибора. Для существования стационарного режима необходимо, чтобы выполнялось условие $\rho < 1$. В противном случае очередь растет неограниченно, так как средний интервал обслуживания заявок $1/\mu$ больше среднего интервала между поступающими заявками $1/\lambda$. Среднее число заявок в системе равно

$$\begin{aligned}\bar{n} &= \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \sum_{n=0}^{\infty} n (1 - \rho) \rho^n = \\ &= (1 - \rho) (\rho + 2\rho^2 + 3\rho^3 + \dots) = \rho / (1 - \rho).\end{aligned}$$

Так как среднее число заявок, находящихся на обслуживании в системе, равно ρ , получим среднее число заявок, находящихся в очереди

$$l_0 = \bar{n} - \rho = \rho / (1 - \rho) - \rho = \rho^2 / (1 - \rho).$$

Среднее время пребывания заявки в системе равно отношению среднего числа заявок в системе к среднему числу заявок, проходящих через систему в единицу времени. Последняя величина в стационарном режиме равна λ . Поэтому среднее время пребывания заявки в системе равно

$$U = \frac{\bar{n}}{\lambda} = \frac{\rho}{\lambda(1-\rho)} = \frac{1}{\mu(1-\rho)}.$$

Среднее время ожидания в очереди одной заявкой определяется аналогично:

$$W = \frac{l_0}{\lambda} = \frac{\rho^2}{\lambda(1-\rho)} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}.$$

Пример. Рассмотрим МПС, входящую в УК и предназначенную для первичной обработки входной информации.

Система осуществляет контроль правильности приема входной информации и фильтрацию для выявления полезных сигналов

на фоне помех, поступающих от различных УО. Обработка осуществляется по запросам периферийных устройств и локальных систем комплекса, поступающим в систему в среднем через время $\tau = 0,05$ с. Средний объем поступающих на обработку данных $d = 4$ байт. Среднее число процессорных операций, выполняемых при реализации алгоритма обработки информации, составляет $\theta = 8000$ операций.

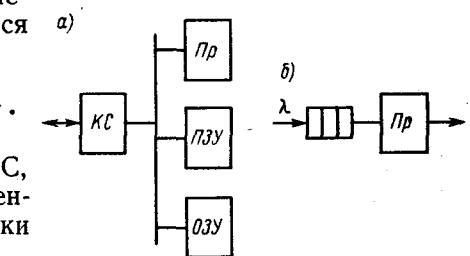
В состав системы входят: процессор (*Пр*) с быстродействием $B = 2 \cdot 10^5$ операций/с; контроллер связи с магистралью комплекса (*КС*); *ПЗУ*, хранящее программу-диспетчер и рабочую программу; *ОЗУ*, предназначенное для хранения поступающих на обработку данных и промежуточных результатов (рис. 6.5).

Определим среднее время, затрачиваемое системой на выполнение задачи (от момента поступления запроса до выдачи результатов в магистраль), и ориентировочный объем ОЗУ, необходимый для хранения поступающих на обработку данных.

Модель рассматриваемой системы представляется в виде одноканальной СМО, на вход которой поступает поток заявок с интенсивностью $\lambda = 1/\tau = 20$ 1/с. При заданном быстродействии процессора среднее время обработки информации составляет $\vartheta = \theta/B = 0,04$ с.

Определим параметры модели массового обслуживания, представляющей рассматриваемую систему, и ее характеристики при допущении о пуассоновском потоке заявок и экспоненциальном законе обслуживания.

Интенсивность обслуживания заявок и загрузка процессора системы составляют $\mu = 1/\vartheta = 25$ 1/с; $\rho = \lambda/\mu = 0,8$. Полученное



значение $\rho = 0,8$ показывает, что в системе не происходит неограниченного накопления очереди, т. е. существует стационарный режим, характеризующийся некоторым средним числом заявок в системе.

Определим среднее время пребывания заявки в системе

$$U = \frac{1}{\mu(1-\alpha)} = \frac{1}{25(1-0,8)} = 0,2 \text{ c}$$

Полученные значения $\vartheta = 0,04$ и $U = 0,2$ с показывают, что из общего времени пребывания заявок в системе большую часть составляет время ожидания начала обслуживания $W = U - \vartheta = 0,2 - 0,04 = 0,16$ с. Это связано с большой загрузкой процессора $\rho = 0,8$. При необходимости сокращения среднего времени пребывания заявок в системе нужно уменьшить загрузку процессора,

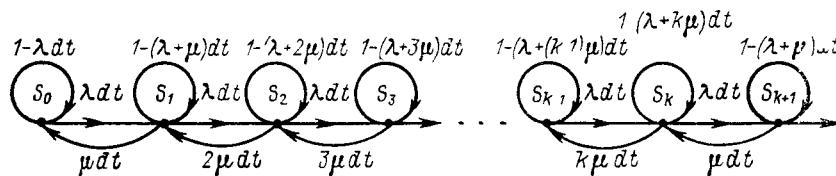


Рис 6.6 Граф переходов многоканальной СМО

выбрав его с большим быстродействием, или перейти к мультипроцессорной системе.

Ориентировочная оценка объема ОЗУ, необходимого для хранения поступающих на обработку данных, может быть получена в виде

$$V = \bar{n}d,$$

где \bar{n} — среднее число заявок, находящихся в системе, d — объем данных, поступающих в систему на обработку.

$$\bar{n} = \rho / (1 - \rho) = 0,8 / (1 - 0,8) = 4, \quad V = 4 \cdot 4 = 16 \text{ байт}$$

При необходимости более точной оценки требуемого объема ОЗУ расчет производится с учетом допустимой вероятности превышения очередью расчетного значения (допустимого риска потери заявки).

Многоканальные СМО. Эти системы представляют собой модели мультипроцессорных систем, в которых каждый процессор может выполнять любую задачу по мере возникновения потребности в них.

Рассмотрим случай, когда в системе имеется k одинаковых обслуживающих приборов с интенсивностью μ . Получим выражения, описывающие характеристики системы при пуассоновском входном потоке и экспоненциальном времени обслуживания. С этой целью представим систему в виде марковского процесса с состоя-

ниями S_0, S_1, \dots, S_{k+r} , которые соответственно означают, что в системе отсутствуют заявки (в очереди и на обслуживании), в системе находится на обслуживании одна заявка и в очереди заявок нет, в системе находится k заявок на обслуживании и r заявок в состоянии ожидания

Матрица переходов такой системы имеет вид

$$P = \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & S_2 \\ S_0 & 1 - \lambda dt & \lambda dt & 0 \\ S_1 & \mu dt & 1 - (\lambda + \mu) dt & \lambda dt \\ S_2 & 0 & 2\mu dt & 1 - (\lambda + 2\mu) dt \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots \\ S_{k-1} & 0 & 0 & 0 \\ S_k & 0 & 0 & 0 \\ S_{k+1} & 0 & 0 & 0 \\ S_3 & \dots & S_{k-1} & S_k & S_{k+1} \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \lambda dt & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \dots & 1 - [\lambda + (k-1)\mu] dt & \lambda dt & 0 \\ 0 & \dots & \mu k dt & 1 - (\lambda + k\mu) dt & \lambda dt \\ 0 & \dots & 0 & \mu k dt & 1 - (\lambda + k\mu) dt \end{bmatrix}$$

Граф переходов системы представлен на рис. 6.6.

Дифференциальные уравнения вероятностей перехода будут иметь вид

$$P_n^{'}(t) = \lambda P_{n-1}(t) - (\lambda + n\mu) P_n(t) + (n+1)\mu P_{n+1}(t), \quad 1 \leq n \leq k;$$

Рассмотрим установившийся режим системы. Полагая $P_n(t) = 0$, $n = 0, 1, \dots, k$, получим

$$\begin{aligned} \lambda P_0 &= \mu P_1; \\ (\lambda + n\mu) P_n &= \lambda P_{n-1} + (n+1)\mu P_{n+1}, \quad 1 \leq n \leq k; \\ (\lambda + k\mu) P_n &= \lambda P_{n-1} + k\mu P_{n+1}, \quad n \geq k; \\ P_n &= P_0 \rho^n / n!, \quad 0 \leq n \leq k; \\ P_n &= P_0 k^{k-n} \rho^n / k! = P_0 (k^k / k!) (0/k)^n, \quad n \geq k. \end{aligned}$$

Из этих выражений, имея в виду что $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 0$, найдем

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{\rho^n}{n!} + \sum_{n=k}^{\infty} \frac{k^k}{k!} \left(\frac{\rho}{k} \right)^n \right]^{-1} = \left[\frac{\rho^k}{k! (1 - \rho/k)} + \sum_{n=0}^{k-1} \frac{\rho^n}{n!} \right]^{-1}.$$

Определим среднее число заявок в очереди

$$l_0 = \sum_{n=k+1}^{\infty} (n-k) P_n = \sum_{n=k+1}^{\infty} (n-k) \frac{\rho^n}{k^n} \frac{k^k}{k!} P_0,$$

или

$$l_0 = \frac{k^k (\rho/k)^k (\rho/k)}{k! (1 - \rho/k)^2} P_0 = \frac{\rho^k (\rho/k)}{k! (1 - \rho/k)^2} P_0 = \frac{\rho^{k+1}}{(k-1)! (k-\rho)^2} P_0.$$

Величина $\rho = \lambda/\mu$ в многоканальной системе представляет собой среднее число занятых обслуживанием приборов. Поэтому общее среднее число заявок в системе $\bar{n} = l_0 + \rho = \frac{\rho^{k+1}}{(k-1)! (k-\rho)^2} P_0 + \rho$.

Среднее время пребывания заявки в системе и среднее время ожидания в очереди определяются выражениями

$$U = \frac{\bar{n}}{\lambda} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\rho^2}{(k-1)! (k-\rho)^2} P_0 + 1 \right];$$

$$W = \frac{l_0}{\lambda} = \frac{P_0}{\mu} \frac{\rho}{(k-1)! (k-\rho)^2}.$$

Пример Рассмотрим двухпроцессорную МПС, входящую в состав УК, выполняющую функции контроля работоспособности и технического диагностирования систем комплекса.

Система выполняет задачи контроля четырех типов объектов, требующих реализации алгоритмов трудоемкостью $\theta_1 = 8000$ операций, $\theta_2 = 10000$ операций, $\theta_3 = 20000$ операций, $\theta_4 = 6000$ операций. Задачи контроля устройств системы выполняются по их запросам, формируемым в паузах работы этих устройств. Средние интервалы между запросами составляют $\tau_1 = 0,2$ с, $\tau_2 = 0,4$ с, $\tau_3 = 0,5$ с, $\tau_4 = 0,1$ с.

Определим среднее время, затрачиваемое системой на выполнение одной задачи при использовании в системе одинаковых процессоров с быстродействием $B = 2 \cdot 10^5$ операций/с каждый. Моделью системы является двухканальная СМО (рис 6.7), на вход которой поступает суммарный поток с интенсивностью

$$\Lambda = \sum_i \lambda_i = \sum_i (1/\tau_i) = 5 + 2,5 + 2 + 10 = 19,5 \text{ 1/c.}$$

Средняя трудоемкость алгоритмов решения задач в таком потоке составляет

$$\theta = \sum_i (\lambda_i / \Lambda) \theta_i = 8460 \text{ операций.}$$

Средняя длительность обслуживания заявки процессором с быстродействием $B = 2 \cdot 10^5$ операций/с равна $\vartheta = \theta/B = 0,0423$ с, интенсивность обслуживания заявок одним процессором $\mu = 1/\vartheta = 23,64$. Загрузка процессора в многоканальной системе определяется выражением

$$R = \Lambda/\mu = \rho/N,$$

где $\mu_N = N\mu$ — суммарная интенсивность обслуживания заявок N -процессорной системой. Тогда $\rho = \Lambda/\mu = 0,825$; $R = 0,825/2 = 0,412$.

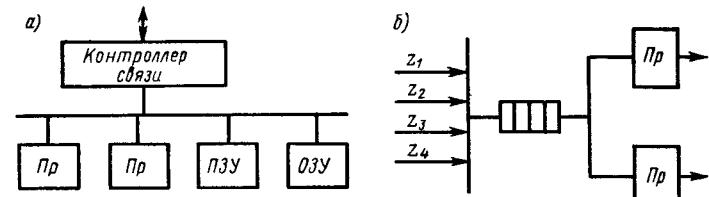


Рис 6.7 Двухпроцессорная система *а* — структура, *б* — модель

Для определения среднего времени пребывания задачи в системе рассчитаем вероятность отсутствия заявок в системе

$$P_0 = \left[\frac{\rho^N}{N! (1 - k)} + \sum_{n=0}^{k-1} \frac{\rho^n}{n!} \right]^{-1} = \\ = \left[\frac{(0,825)^2}{2 (1 - 0,412)} + 1 + 0,412 \right]^{-1} = 0,5.$$

Среднее время пребывания заявок в системе

$$U = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\rho^2}{(N+1)! (N-\rho)^2} P_0 + 1 \right] = \\ = \frac{1}{23,64} \left[\frac{(0,825)^2}{2 \cdot 3 (2 - 0,825)^2} \cdot 0,59 + 1 \right] = 0,06.$$

Экспоненциальные стохастические сети. Для представления полных моделей УК, отражающих взаимодействие входящих в него устройств и систем, используются сети СМО. Сложность анализа таких моделей заключается в том, что простейший поток заявок, поступающий на вход системы, на выходе в общем случае обладает последействием, поэтому методы расчета, основанные на использовании аппарата марковских цепей не могут быть применены. Однако если все приборы сети имеют экспоненциальное время обслуживания, то выходящие из СМО потоки заявок будут пуассоновскими. Такие сети называют экспоненциальными (показательными).

Для задания любой сети СМО необходимо определить: источник заявок, поступающих в сеть, имеющий некоторую интенсивность λ_0 ; число систем обслуживания m , входящих в сеть; вектор

состава обслуживающих систем $K = (k_1, k_2, \dots, k_m)$, где k_i — число обслуживающих приборов i -й СМО; вектор интенсивностей обслуживания $M = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$, где μ_i — интенсивность обслуживания заявок одним прибором i -й СМО; матрицу передач B , представляющую вероятности поступления заявок из одной системы в другую.

При построении матрицы передач B источник заявок можно рассматривать как некоторую систему S_0 . Заявки, выходящие из i -й системы ($i=1, 2, \dots, m$), с постоянной вероятностью β_{ij} поступают в j -ю систему ($j=1, 2, \dots, m$) или покидают сеть ($j=0$). В этом случае матрица передач имеет вид

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \beta_{01} & \beta_{02} & \dots & \beta_{0m} \\ \beta_{10} & \beta_{11} & \beta_{12} & \dots & \beta_{1m} \\ \beta_{20} & \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_{m0} & \beta_{m1} & \beta_{m2} & \dots & \beta_{mm} \end{bmatrix}.$$

Для определения характеристик сети необходимо определить интенсивности заявок в каждой из систем. В связи с тем что в установившемся режиме среднее число заявок, покидающих систему, равно среднему числу поступающих заявок, справедливо равенство

$$\lambda_i = \sum_{j=0}^m \lambda_j \beta_{ji}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m.$$

Решая систему уравнений, которая в матричной форме имеет вид $\lambda = \lambda B$, можно определить интенсивности потоков в системах сети $\lambda_i = \alpha_i \lambda_0$, где λ_0 — интенсивность входного потока. Величина α_i , называемая коэффициентом передач, определяет среднее число попадания заявки входного потока в i -ю систему.

Для обеспечения стационарного режима сети необходимо, чтобы в каждой из систем, входящих в сеть, существовал стационарный режим, т. е. выполнялось условие

$$\rho_i = \lambda_i / (k_i \mu_i) < 1,$$

где k_i — число обслуживающих приборов i -й системы.

В связи с тем что накопление очереди происходит в наиболее загруженной системе, имеющей максимальное значение ρ_i , условием существования стационарного режима сети является

$$\max_i \frac{\lambda_i}{k_i \mu_i} = \max_i \frac{\alpha_i \lambda_0}{k_i \mu_i} < 1,$$

или

$$\lambda_0 < \min_i \frac{k_i \mu_i}{\alpha_i}.$$

Зная коэффициенты передачи системы α_i и характеристики систем U_i и W_i , можно определить характеристики сети

$$U = \sum_{i=1}^m \alpha_i U_i; \quad W = \sum_{i=1}^m \alpha_i W_i.$$

Пример. Управляющий комплекс состоит из двух микропроцессорных систем $MPC1$ и $MPC2$, взаимодействующих между со-

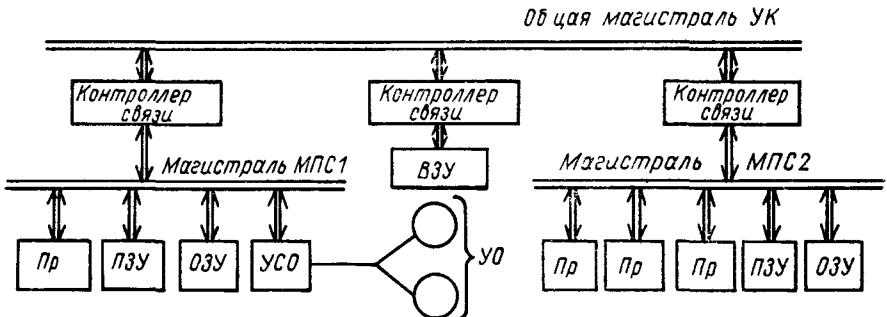


Рис. 6.8. Структура управляющего комплекса

бой и с внешним запоминающим устройством VZU через общую магистраль (рис. 6.8). Алгоритмы управления объектами различны. Одни из них полностью реализуются $MPC1$, другие требуют дополнительных трудоемких вычислений, выполняемых трех-

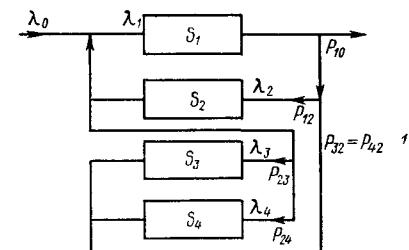


Рис. 6.9 Стохастическая сеть, представляющая модель УК
 S_1 — $MPC1$, S_2 — общая магистраль, S_3 — $MPC2$, S_4 — VZU

процессорной системой $MPC2$, и использования статистических данных, хранимых в VZU .

Трудоемкость алгоритмов, выполняемых системами $MPC1$ и $MPC2$, составляет $\theta_1 = 2000$ операций, $\theta_2 = 10000$ операций. Системы имеют одинаковые процессоры с быстродействием $B_{pp} = 2 \cdot 10^5$ операций/с. В общей магистрали комплекса производится последовательная передача информации со скоростью $B_m = 2 \cdot 10^5$ бит/с. Средняя длина сообщений составляет $b = 500$ бит. Быстродействие VZU $B_{vzu} = 10^4$ бит/с, средний объем выбираемых

данных $d=200$ бит. Требуется определить предельно допустимую суммарную интенсивность выполнения задач в УК при заданной производительности устройств и рассчитать среднее время выполнения задачи управления при интенсивности входного потока $\Lambda_0=8$ 1/с.

Модель УК представляется в виде стохастической сети, приведенной на рис. 6.9. Вероятности передач, определяемые из анализа реализуемых алгоритмов, заданы матрицей передач

$$P = S_2 = \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ S_0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ S_1 & 0,2 & 0 & 0,8 & 0 & 0 \\ S_2 & 0 & 0,4 & 0 & 0,4 & 0,2 \\ S_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ S_4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для расчета сети необходимо определить коэффициенты передачи и характеристики СМО, образующих сеть. Коэффициенты передачи определяем из уравнений

$$\lambda_j = \sum_{i=0}^M p_{ij} \lambda_i, \quad j = 1, 2, \dots, M;$$

$$\lambda_1 = \lambda_0 + p_{21}\lambda_2; \quad \lambda_1 = \lambda_0 + 0,4\lambda_2;$$

$$\lambda_2 = p_{12}\lambda_1 + p_{32}\lambda_3 + p_{42}\lambda_4; \quad \lambda_2 = 0,8\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4;$$

$$\lambda_3 = p_{23}\lambda_2; \quad \lambda_3 = 0,4\lambda_2;$$

$$\lambda_4 = p_{24}\lambda_2; \quad \lambda_4 = 0,2\lambda_2;$$

$$\lambda_1 = 5\lambda_0; \quad \lambda_2 = 10\lambda_0; \quad \lambda_3 = 4\lambda_0; \quad \lambda_4 = 2\lambda_0.$$

Параметры отдельных СМО, рассчитанные в соответствии с исходными параметрами систем, представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2 Параметры СМО, входящих в сеть

Система сети	Быстродействие устройств	Число каналов	Трудоемкость этапа	Среднее время обслуживания	Интенсивность обслуживания	Коэффициент передачи
S_1	200 000	1	2000	0,01	100	5
S_2	200 000	1	500	0,0025	400	10
S_3	200 000	3	1000	0,05	20	6
S_4	10 000	1	200	0,02	50	4

Из условия существования стационарного режима сети определим предельно допустимое значение интенсивности входного потока

$$\lambda_0 < \min_i \frac{k_i \mu_i}{a_i};$$

$$\lambda_0 < \min \{100/5; 400/10; 3 \cdot 20/4; 50/2\};$$

$$\lambda_0 < 15 \text{ 1/с.}$$

Воспользовавшись выражениями для расчета характеристик одноканальных СМО, определим время пребывания заявок в системах S_1, S_2, S_4

$$U_1 = \frac{1}{\mu_1 (1 - \rho_1)}; \quad U_1 = \frac{1}{100 (1 - 0,4)} = 0,017 \text{ с};$$

$$U_2 = \frac{1}{400 (1 - 0,2)} = 0,003 \text{ с}; \quad U_4 = \frac{1}{50 (1 - 0,32)} = 0,029 \text{ с.}$$

Для определения времени пребывания заявок в системе S_3 воспользуемся расчетными выражениями для многоканальных СМО:

$$P_0 = \left[\frac{\rho^k}{k! (1 - \rho/k)} + \sum_{n=0}^{k-1} \frac{\rho^n}{n!} \right]^{-1};$$

$$P_0 = \left[\frac{1,6^3}{2 \cdot 3 (1 - 1,6/3)} + 1 + 1,6 + \frac{1,6^2}{2} \right]^{-1} = 0,187;$$

$$U = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\rho^2}{(k-1)! (k-\rho)^2} P_0 + 1 \right];$$

$$U_4 = \frac{1}{20} \left[\frac{1,6^2}{2 \cdot (3-1,6)^2} \cdot 0,187 + 1 \right] = 0,056.$$

Учитывая коэффициенты передачи сети, определяющие среднее число попаданий заявок в каждую из систем комплекса в процессе выполнения задачи, найдем общее время пребывания заявки в системе (среднее время решения одной задачи)

$$U = \sum_i a_i U_i; \quad U = 5 \cdot 0,017 + 10 \cdot 0,03 + 4 \cdot 0,056 + 2 \cdot 0,029 = 0,667 \text{ с.}$$

§ 6.4. Имитационное моделирование систем

Широкое использование ЭВМ при проектировании и исследовании сложных систем определило развитие нового направления в моделировании, получившего название имитационного моделирования. Отличительной особенностью такого моделирования является использование вместо аналитической модели исследуемого процесса алгоритмического описания, предназначенного для реализации на ЭВМ. Алгоритмическая модель приближенно воспринимается как

изводит процесс оригинала, имитируя составляющие его элементарные явления с сохранением их логической структуры и последовательности во времени.

Основным преимуществом имитационных моделей по сравнению с аналитическими является возможность исследования систем большой сложности. Такие особенности сложных систем, как наличие нелинейных зависимостей, воздействие многочисленных случайных факторов, приводящие к значительным и не всегда преодолимым трудностям при использовании аналитических моделей, не являются препятствием для имитационного моделирования.

Имитационное моделирование систем, подверженных воздействию случайных факторов, называют статистическим моделированием. Влияние случайных факторов на моделируемый процесс имитируется при помощи случайных чисел с заданными вероятностными характеристиками, что позволяет получать случайные реализации процесса. Многократное воспроизведение такого процесса с последующей статистической обработкой дает устойчивые объективные характеристики процесса.

Теоретической базой статистического моделирования служит метод статистических испытаний (метод Монте—Карло), являющийся математической основой машинной имитации, и так называемая теория агрегатов, позволяющая строить имитационные модели различных классов систем по общей схеме.

Под агрегатом понимается достаточно общая математическая модель элементов сложной системы, позволяющая единообразно описывать детерминированные и стохастические процессы в различных объектах, функционирующих как в непрерывном, так и в дискретном времени.

Как всякая динамическая система, агрегат описывается множествами моментов времени T , состояний Z , входных X и выходных Y сигналов. Особенностью рассматриваемой модели является то, что она не накладывает ограничений на характер изменения состояния $z(t) \in Z$, входных и выходных сигналов $x(t) \in X$ и $y(t) \in Y$. Это достигается тем, что агрегат представляется в виде совокупности описаний процессов, происходящих в объекте на отдельных интервалах времени. В качестве таких интервалов рассматриваются отрезки времени между моментами поступления входных сигналов t_n или «особыми» моментами времени t^* , характеризующимися скачками состояний агрегата.

Для описания скачков состояний, которые могут происходить либо под действием входных сигналов x_n (в моменты их прихода t_n), либо по внутренним причинам («особые» моменты t^*), рассматривается состояние системы $z(t+0)$ в момент $(t+0)$. При этом поведение агрегата описывается различными операторами в моменты скачков состояний

$$z(t_n + 0) = A_1[t_n, z(t_n), x_n];$$

$$z(t^* + 0) = A_2[t^*, z(t_n)]$$

и при изменении состояний между этими моментами

$$z(t) = A_3[t, t_n, z(t_n)];$$

$$z(t) = A_4[t, t^*, z(t^*)].$$

Для описания выходных сигналов во множестве состояний Z выделяется подмножество $Z^{(Y)}$ такое, что если $z(t^*)$ достигает $Z^{(Y)}$, то время t^* является моментом выдачи выходного сигнала, определяемого оператором выходов

$$y = A_5[t^*, z(t^*)].$$

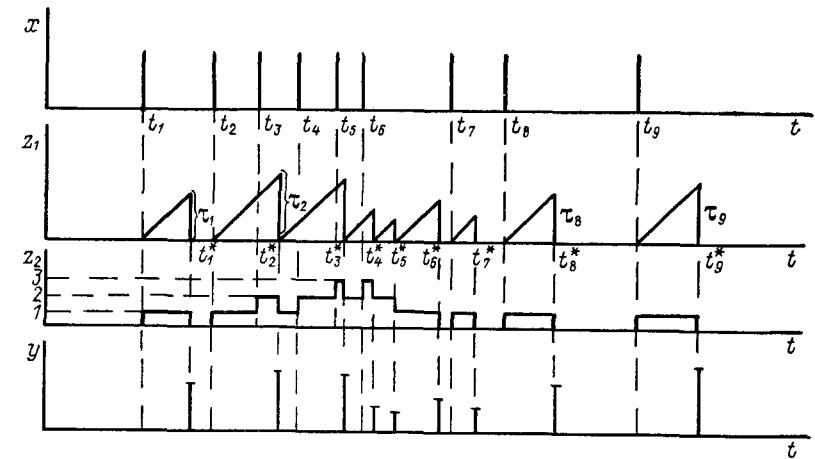


Рис. 6.10 Диаграмма изменения состояний агрегата, представляющего одноканальную СМО с ожиданием

Таким образом, агрегат описывается совокупностью множеств T, Z, X, Y и операторов A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 .

Пример. Рассмотрим модель МПС, предназначенный для управления одним процессом. Такая модель будет представлена одноканальной СМО с ожиданием, на вход которой поступает однородный поток заявок.

Для представления модели в виде агрегата опишем состояние системы следующими координатами: $z_1(t)$ — время обслуживания очередной заявки (от момента ее поступления на обслуживание до текущего момента времени t); $z_2(t)$ — число заявок в системе (в очереди и на обслуживании).

Входные сигналы (заявки) поступают в систему в случайные моменты t_n и принимают значения $x_n = t_n, n = 1, 2, \dots$

Выходные сигналы агрегата (обслуженные заявки) y_n принимают значения времени, затраченного на обслуживание заявки, покидающей систему. Это случайная величина τ с законом распределения $F(\tau)$.

На диаграмме рис. 6.10 приведена последовательность изменения состояний агрегата. Рассматривая значения координат агре-

гата в моменты скачков и на интервалах между ними, приведенные в табл. 6.3, операторы агрегата можно представить в виде

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{array}{l} z_1(t_n + 0) = z_1(t_n); \\ z_2(t_n + 0) = z_2(t_n) + 1; \end{array} \right. & \quad \left\{ \begin{array}{l} z_1(t_k^* + 0) = 0; \\ z_2(t_k^* + 0) = z_2(t_k^*) - 1; \end{array} \right. \\ z_1(t) = & \begin{cases} t - t_n & \text{при } t_n > t_{n-1}^*; \\ t - t_k^* & \text{при } t_{n-1}^* > t_n; \\ 0 & \text{при } z_2(t) = 0; \end{cases} \\ z_2(t) = & \begin{cases} z(t_n) & \text{при } t_n \geq t_k^*; \\ z(t_k) & \text{при } t_k^* \geq t_n; \end{cases} \\ y(t_k^*) = t_k^*; \quad t_k^* = & \begin{cases} t_n + \tau & \text{при } z_2(t_n) = 1; \\ t_{k-1} + \tau & \text{при } z_2(t_n) > 1, \end{cases} \end{aligned}$$

Таблица 6.3. Значения координат агрегата

Интервал [t_i, t_{i+1}]	$z_1(t_i + 0)$	$z_2(t_i + 0)$	$z_1(t)$	$z_2(t)$	$x(t)$	$y(t)$
t_1, t_1^*	0	1	$t - t_1$	1	t_1	0
t_1^*, t_2	0	0	0	0	—	τ_1
t_2, t_3	0	1	$t - t_2$	1	t_2	0
t_3, t_2^*	$t_3 - t_2$	2	$t - t_2$	2	t_3	0
t_2^*, t_4	0	1	$t - t_2^*$	1	—	τ_2
t_4, t_5	$t_4 - t_2^*$	2	$t - t_2^*$	2	t_4	0
t_5, t_3^*	$t_5 - t_2^*$	3	$t - t_2^*$	3	t_5	0
t_3^*, t_6	0	2	$t - t_3^*$	2	—	τ_3
t_6, t_4^*	$t_6 - t_3^*$	3	$t - t_3^*$	3	t_6	0
t_4^*, t_5^*	0	2	$t - t_4^*$	2	—	τ_4
t_5^*, t_6^*	0	1	$t - t_5^*$	1	—	τ_5
t_6^*, t_7	0	0	0	0	—	τ_6
t_7, t_7^*	0	1	$t - t_7$	1	t_7	0
t_7^*, t_8	0	0	0	0	—	τ_7
t_8, t_8^*	0	1	$t - t_8$	1	t_8	0
t_8^*, t_9	0	0	0	0	—	τ_8
t_9, t_9^*	0	1	$t - t_9$	1	t_9	0

где t_n — моменты поступления очередного входного сигнала (заявки), $n=1, 2, \dots, k^*$ — моменты окончания обслуживания очередной заявки, $k=1, 2, \dots$

Полученное описание агрегата позволяет построить алгоритм статистического моделирования СМО, который содержит три основные части: задание начальных условий и формирование случайных величин, имитирующих входной поток заявок $\{t_1, t_2, \dots, t_{\text{кон}}\}$ и последовательность интервалов обслуживания $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{\text{кон}}\}$; моделирование состояний агрегата, описывающего СМО; обработку и вывод результатов моделирования.

При моделировании состояний системы в соответствии с операторами агрегативного описания СМО определяются моменты начала обслуживания заявок $T_{\text{н},0}$, моменты окончания обслуживания $T_{\text{о},0}$ и координаты состояния агрегата z_2 .

В результате обработки результатов моделирования могут быть получены такие характеристики как средняя длина очереди, среднее время пребывания заявки в состоянии ожидания, среднее время пребывания заявки в системе и др. При этом модель не накладывает ограничений на характеристики входного потока и характеристики обслуживания, неизбежные при использовании аналитических моделей.

На рис. 6.11 приведена схема алгоритма статистического моделирования СМО, на которой раскрыты операторы, описывающие изменения состояний системы.

Применение аппарата агрегативного описания, единообразно представляющего различные элементы систем, позволяет строить модели сложных систем из универсальных модулей, настраиваемых на конкретные объекты. При использовании таких модулей, представляющих собой программно-реализованные агрегаты, входящие в программное обеспечение ЭВМ, моделирование конкретных систем не требует программирования. Вместо составления программ необходимо произвести «настройку» универсальных моделей на реальные объекты (заданием соответствующих чисел) и обеспечить взаимодействие между элементами системы.

Поскольку при моделировании на ЭВМ взаимодействие элементов производится программным путем, необходимо его формальное описание. Такое описание осуществляется в виде модели сопряжения элементов в сложной системе.

Модель сопряжения представляет собой формальное описание процесса обмена сигналами между элементами системы. При этом модель описывает моменты выдачи, содержание и адреса сигналов.

В модели сопряжения каждый элемент системы C_i ($i=1, 2, \dots, N$) представляется двумя векторами: входных сигналов $X^{(i)}(t) = [x_1^{(i)}(t), \dots, x_{m_i}^{(i)}(t)]$ и выходных сигналов $Y^{(i)}(t) = [y_1^{(i)}(t), \dots, y_{n_i}^{(i)}(t)]$. Составляющие этих векторов $x_j^{(i)}(t)$ и $y_j^{(i)}(t)$ являются элементарными сигналами (контактами) эле-

ментов. Элементарные сигналы передаются в системе независимо друг от друга по элементарным каналам.

Для исключения неоднозначности принимается предположение, что ко входному контакту любого элемента системы подключается

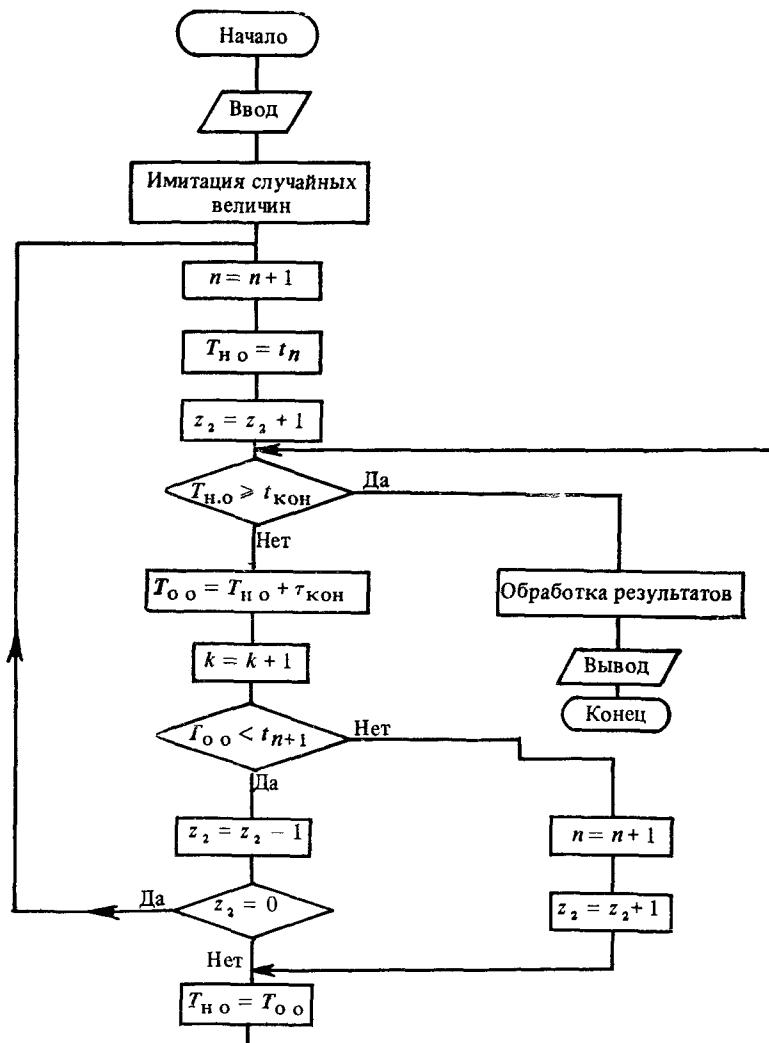


Рис. 6.11 Алгоритм статистического моделирования одноканальной СМО

не более одного элементарного сигнала. К выходному контакту может быть подключено любое число элементарных каналов.

Внешняя среда рассматривается как некоторый фиктивный элемент C_0 с входным сигналом $X^{(0)}(t) = [x_1^{(0)}(t), \dots, x_{m0}^{(0)}(t)]$ и выходным — $Y^{(0)}(t) = [y_1^{(0)}(t), \dots, y_{n0}^{(0)}(t)]$.

Для представления модели сопряжения элементов в системе предполагается, что каждый элементарный входной сигнал $x_j^{(i)}(t)$ системы C_i (в том числе и C_0) принимается контактом $X_j^{(i)}$, а элементарный выходной сигнал $y_j^{(i)}(t)$ выдается контактом $Y_j^{(i)}$. Тогда модель сопряжения можно представить множествами входных $[X_j^{(i)}]_1^m$ и выходных $[Y_j^{(i)}]_1^n$ контактов, где $m = m_i$, $n = n_i$, $i = 0, 1, \dots, N$, и оператором $Y^{(k)} = R(X^{(k)})$ с областью определения в множестве $\bigcup_{i=0}^N [X_j^{(i)}]_1^m$ и областью значений в множестве

$\bigcup_{i=0}^N [Y_j^{(i)}]_1^n$ где $i, k = 0, 1, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, n$. Оператор R , называемый оператором сопряжения элементов в системе, ставит в соответствие каждому входному контакту $X_j^{(i)} \in \bigcup_{i=0}^N [X_j^{(i)}]_1^m$

не более одного выходного контакта $Y_l^{(k)} \in \bigcup_{i=0}^N [Y_j^{(i)}]_1^n$, с которым связан элементарным каналом.

Оператор сопряжения может быть задан в виде таблицы. Например, для системы, схема которой приведена на рис. 6.12, оператор сопряжения представлен табл. 6.4. В ней на пересечении

Таблица 6.4 Задание оператора сопряжения элементов системы

j	i					
	0	1	2	3	4	5
1	(1,1)	(0,1)	(0,4)	(1,3)	(1,2)	(2,2)
2	(3,1)	(0,2)	(5,3)	(0,3)	(2,1)	(0,5)
3	(4,1)	—	—	—	(5,1)	—
4	(4,2)	—	—	—	—	—
5	(5,2)	—	—	—	—	—

строк с номерами контактов j и столбцов с номерами элементов системы i расположены пары чисел (k, l) , указывающие номер элементов k и номер контакта l , с которым соединен контакт $X_j^{(i)}$.

В некоторых случаях оператор сопряжения задают матрицей смежности ориентированного графа, вершинами которого являются контакты, а дугами — элементарные каналы. Это позволяет применять методы теории графов для изучения структуры связей между входными и выходными контактами элементов системы и внешней средой.

При отсутствии программ моделирования универсальных моделей систем (агрегатов) имитационные модели разрабатываются как обычные прикладные программы для ЭВМ.

Практика показывает, что имитационные модели любой степени сложности могут быть построены с использованием универсальных алгоритмических языков ФОРТРАН или АЛГОЛ. Имеются примеры создания имитационных моделей и на языках более низкого уровня: автокодах, ассемблерах и даже в машинном коде. В Приложении 4 приводится пример имитационной модели, построенной на языке БЕЙСИК.

Основными трудностями программирования при использовании универсальных языков в задачах имитационного моделирования являются необходимость моделирования параллельных процессов и априори на определенный объем данных, обрабатываемых в процессе моделирования. Универсальные алгоритмические языки ориентированы на описание чисто последовательных процессов. Для имитации параллельных процессов возникает задача организации псевдопараллельных вычислений, что в общем случае достаточно сложно с точки зрения программирования. Тем не менее опыт моделирования показывает, что универсальные алгоритмические языки позволяют разрабатывать имитационные модели для исследования достаточно сложных систем.

Более эффективными средствами описания сложных систем в процессе имитационного моделирования являются языки системного моделирования СИМУЛА, СЛЭНГ и др.

Такие языки предоставляют в распоряжение пользователя методологию описания и исследования систем различной природы, средства реализации многочисленных операций служебного характера и набор операторов для описания функционирования сложных систем, что сокращает объем программ и упрощает их отладку.

§ 6.5. Основы построения моделей объектов по данным эксперимента

При проектировании любой системы управления возникает проблема построения модели объекта, на основе которой выбирается алгоритм управления, соответствующий заданной цели функционирования. Традиционные алгоритмы управления, реали-

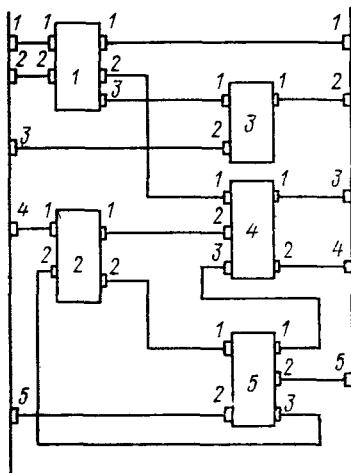


Рис. 6.12. Схема сопряжения элементов системы

зуемые аналоговыми средствами, требуют представления моделей объектов в виде дифференциальных уравнений (или передаточных функций). Построение таких моделей требует изучения внутренних свойств объектов и определения фундаментальных законов, описывающих поведение определенных классов объектов.

Применение ЭВМ в системах управления позволяет использовать более универсальные методы управления, для реализации которых информация об объекте может быть получена путем обработки ограниченного объема экспериментальных данных о входных и выходных сигналах.

В настоящем параграфе рассматриваются основы построения регрессионных моделей, которые занимают в области построения эмпирических моделей такое же доминирующее положение, как линейные динамические модели в классической теории автоматического управления.

Задачей построения эмпирической модели является определение функции $y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$, связывающей входные переменные x_1, x_2, \dots, x_n с выходной переменной y , по данным эксперимента, содержащего N совместных наблюдений входных и выходных величин. При построении модели неизвестная функция представляется в виде разложения в степенный ряд Тейлора в окрестности некоторой точки области определения независимых переменных

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i,j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (6.1)$$

где

$$\beta_i = \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}; \quad \beta_{ij} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

На основании некоторых априорных представлений об исследуемом объекте выбирается структура модели, т. е. определяется число учитываемых членов степенного ряда. Обычно стремятся выбрать простую модель в виде полинома с небольшим числом членов. Во многих случаях на практике удается ограничиться только линейной частью полинома.

При определенных статистических свойствах возмущений, прилагаемых к объекту, коэффициенты модели могут быть оценены по экспериментальным данным с помощью процедуры регрессионного анализа. Располагая данными эксперимента в N точках области определения независимых переменных, т. е. имея матрицу наблюдений X и вектор выходов Y

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{Nn} \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix},$$

модель объекта может быть построена в виде уравнения регрессии

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (6.2)$$

где b_0, b_i, b_{ij} — выборочные оценки коэффициентов уравнения (6.1); \hat{y} — оценка математического ожидания случайной величины y .

Для определения коэффициентов уравнения регрессии может быть использован метод наименьших квадратов (МНК). В этом случае критерием приближения модели к исследуемой функции является сумма квадратов отклонений выходной величины, рассчитанной с использованием построенной модели от фактических значений, полученных в эксперименте. Наилучшим приближением будет такое уравнение, коэффициенты которого определяются из условия минимума этой суммы, т. е.

$$Y = \min \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2. \quad (6.3)$$

Величину $S_R = \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2$ называют остаточной суммой квадратов.

Введя фиктивную переменную x_0 и обозначив новыми переменными $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_t$ произведения вида $x_i x_j, x_i x_j x_l, \dots$, используемые в модели, уравнение регрессии можно представить в виде

$$\hat{y} = \sum_{i=0}^t b_i x_i,$$

где t — число учитываемых членов степенного ряда. В этом случае критерий МНК принимает вид

$$Y = \min \sum_{k=1}^N \left(y_k - \sum_{i=0}^t b_i x_{ki} \right)^2. \quad (6.4)$$

Для вычисления коэффициентов уравнения регрессии, обеспечивающих минимальное значение критерия (6.4), необходимо решить систему уравнений, получаемых приравниванием нулю частных производных от остаточной суммы по неизвестным переменным b_0, b_1, \dots, b_t

$$\frac{\partial \sum_{k=1}^N \left(y_k - \sum_{i=0}^t b_i x_{ki} \right)^2}{\partial b_i} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, t.$$

Полученные таким образом уравнения называют нормальными уравнениями МНК. Решать систему удобно, если представить нормальные уравнения в матричной форме

$$(X^T X) B = X^T Y, \quad (6.5)$$

где X — матрица наблюдений независимых переменных; X^T — транспонированная матрица X , Y — вектор-столбец наблюдений зависимой переменной; B — вектор-столбец коэффициентов уравнения регрессии. Если число наблюдений больше числа неизвестных коэффициентов $N > t$ и матрица $X^T X$ неособенная, то система нормальных уравнений имеет единственное решение

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (6.6)$$

Для этого необходимо и достаточно, чтобы ранг матрицы был равен t , т. е. чтобы матрица X содержала не менее t линейно независимых строк.

Коэффициенты регрессионной модели B и рассчитываемые с ее помощью значения y являются случайными величинами, поэтому для оценки погрешностей модели и пригодности ее для описания исследуемого объекта необходима статистическая обработка результатов эксперимента.

Для системы случайных величин b_0, b_1, \dots, b_t с теоретическими средними значениями $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_t$ можно составить матрицу вторых центральных моментов, определяющую все статистические свойства коэффициентов B , а следовательно, и уравнения регрессии $\hat{Y} = XB$. Такая матрица M^{-1} , по главной диагонали которой расположены оценки дисперсий, а остальные места занимают оценки ковариаций коэффициентов уравнения регрессии называется матрицей дисперсий-ковариаций

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} s^2 \{b_0\} & \text{cov}\{b_0 b_1\} & \dots & \text{cov}\{b_0 b_m\} \\ \text{cov}\{b_1 b_0\} & s^2 \{b_1\} & \dots & \text{cov}\{b_1 b_m\} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}\{b_m b_0\} & \text{cov}\{b_m b_1\} & \dots & s^2 \{b_m\} \end{bmatrix}.$$

Матрица M^{-1} определяется как произведение обратной матрицы системы нормальных уравнений $(X^T X)^{-1} = C$ и оценки дисперсии воспроизводимости $s^2 \{y\}$

$$M^{-1} = (X^T X)^{-1} s^2 \{y\} = C s^2 \{y\}.$$

Отсюда получаем соотношения для оценок дисперсий и ковариаций коэффициентов уравнения регрессии

$$s^2 \{b_i\} = c_{ii} s^2 \{y\}; \quad \text{cov}\{b_i b_j\} = c_{ij} s^2 \{y\}.$$

Оценка дисперсии воспроизводимости $s^2 \{y\}$ определяется по формуле

$$s^2 \{y\} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{q=1}^{m_k} (y_{kq} - \bar{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^N (m_k - 1)}, \quad (6.7)$$

где \bar{y}_k — среднее значение величины y_k , определяемое по данным m_k повторяющихся опытов. Величина $f_y = \sum_{k=1}^N (m_k - 1)$ есть число степеней свободы дисперсии воспроизводимости всего эксперимента.

Оценка дисперсий коэффициентов уравнения регрессии позволяет определить значимость коэффициентов, т. е. уточнить структуру модели. Для этого с помощью t -критерия Стьюдента определяется доверительный интервал

$$\Delta b_i = \pm t(\alpha, f_y) s^2 \{b_i\}, \quad (6.8)$$

где $t(\alpha, f_y)$ — табличное значение t -критерия при выбранном уровне значимости α и числе степеней свободы f_y .

Коэффициент считается значимым, если его абсолютная величина больше доверительного интервала, т. е. $|b_i| > \Delta b_i$.

Для определения пригодности полученной модели могут быть использованы оценки дисперсии предсказанного значения выходной величины в точке k $s^2 \{\hat{y}_k\}$ и дисперсия адекватности $s^2_{\text{ад}}$, характеризующая рассеяние экспериментальных результатов относительно предсказанных уравнением регрессии значения.

Оценка дисперсии предсказанного значения отклика $s^2 \{\hat{y}_k\}$ в каждой точке эксперимента определяется на основе закона сложения ошибок

$$s^2 \{\hat{y}_k\} \approx \sum_{i=0}^t \left(\frac{\partial y}{\partial b_i} \right)_k^2 s^2 \{b_i\} + \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^t \left(\frac{\partial^2 y}{\partial b_i \partial b_j} \right) \text{cov} \{b_i b_j\},$$

или в матричной форме

$$s^2 \{\hat{y}_k\} = X_k^T (X^T X)^{-1} s^2 \{y\} X_k = X_k^T M^{-1} X_k,$$

где X_k — вектор координат k -й точки эксперимента. Оценка дисперсии адекватности определяется выражением

$$s^2_{\text{ад}} = \frac{1}{N-L} \sum_{k=1}^N (\bar{y}_k - \hat{y}_k)^2, \quad (6.9)$$

где L — число коэффициентов, входящих в уравнение регрессии после отбрасывания незначимых коэффициентов. Величина $f_{\text{ад}} =$

$= N - L$ называется числом степеней свободы дисперсии адекватности.

Для адекватной модели оценки дисперсии воспроизводимости $s^2 \{y\}$ и дисперсии адекватности $s^2_{\text{ад}}$ должны быть однородными. Для проверки статистической гипотезы об однородности дисперсий используется критерий Фишера:

$$F_3 = s^2_{\text{ад}} / s^2 \{y\}$$

Если F_3 меньше табличного значения $F_t(\alpha, f_{\text{ад}}, f_y)$ при выбранном уровне значимости α и соответствующих степенях свободы $f_{\text{ад}}, f_y$, то уравнение регрессии адекватно описывает результаты эксперимента. Если полученная модель не адекватна, то необходимо включить в уравнение дополнительные члены или сократить область изменения независимых переменных.

Пример Рассмотрим задачу определения зависимости момента сопротивления M_c на валу дизельной энергетической установки с ВРШ от числа оборотов вала n_b и шага винта H . На вид статической характеристики установки $M_c = f(n_b, H)$ оказывают влияние различные внешние факторы (волнение моря, обрастанье винта, изменение осадки и т. д.). Поэтому для обеспечения оптимальных режимов работы энергетической установки в процессе управления движением судна необходимо уточнять эту зависимость, т. е. производить идентификацию характеристики.

В табл. 6.5 для различных значений оборотов вала n_b и шага винта H приведены результаты измерения момента на валу двигателя M_b в установленныхся режимах (при $dn/dt = 0$), когда $M_b = M_c$. Все значения представлены в относительных единицах: $m_c = M_c/M_h$; $n = n_b/n_h$; $h = H/H_m$, где M_h , n_h — номинальные значения момента и оборотов двигателя; H_m — шаг, соответствующий максимальному упору винта.

Таблица 6.5 Значения оборотов вала, шага винта и момента сопротивления в различных точках эксперимента

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
n_b	0,34	0,42	0,48	0,56	0,64	0,69	0,71	0,76	0,8	0,83	0,9	0,94	0,96	1,0
h	0,6	0,95	0,01	0,3	0,6	0,01	0,95	0,96	0,3	0,6	0,95	0,01	0,3	0,6
m_c	0,16	0,34	0,06	0,11	0,38	0,07	0,66	0,74	0,21	0,55	1,08	0,10	0,30	0,76

Зависимость $M_c = f(n_b, H)$ существенно нелинейна, поэтому представим уравнение регрессии в виде

$$m_c = b_0 m_0 + b_1 n + b_2 h + b_3 nh + b_4 n^2 + b_5 h^2.$$

Введем фиктивную переменную $x_0 = 1$ и обозначим $x_1 = n$; $x_2 = h$; $x_3 = nh$; $x_4 = n^2$; $x_5 = h^2$; $y = m_c$. Тогда уравнение регрессии примет вид

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5.$$

Используя данные измерений (табл. 6.5), рассчитаем значения переменных x_3 , x_4 , x_5 и запишем матрицу условий эксперимента

$$X = \begin{bmatrix} x_{10} & x_{11} & \dots & x_{15} \\ x_{20} & x_{21} & \dots & x_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{14,0} & x_{14,1} & \dots & x_{14,5} \end{bmatrix} \quad (14 \times 6)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0,34 & 0,6 & 0,204 & 0,116 & 0,36 \\ 1 & 0,42 & 0,95 & 0,399 & 0,176 & 0,902 \\ 1 & 0,48 & 0,01 & 0,009 & 0,23 & 0,0001 \\ 1 & 0,56 & 0,3 & 0,168 & 0,314 & 0,09 \\ 1 & 0,64 & 0,6 & 0,384 & 0,41 & 0,36 \\ 1 & 0,69 & 0,01 & 0,007 & 0,47 & 0,001 \\ 1 & 0,71 & 0,95 & 0,675 & 0,504 & 0,902 \\ 1 & 0,76 & 0,95 & 0,722 & 0,577 & 0,902 \\ 1 & 0,8 & 0,3 & 0,24 & 0,64 & 0,09 \\ 1 & 0,83 & 0,6 & 0,498 & 0,689 & 0,36 \\ 1 & 0,9 & 0,95 & 0,855 & 0,81 & 0,902 \\ 1 & 0,94 & 0,01 & 0,009 & 0,88 & 0,0001 \\ 1 & 0,96 & 0,3 & 0,288 & 0,922 & 0,09 \\ 1 & 1,0 & 0,6 & 0,6 & 1,0 & 0,36 \end{bmatrix}.$$

Для решения нормальных уравнений МНК (6.6) воспользуемся программой, приведенной в Приложении 2, и определим коэффициенты уравнения $b_0 = 0,4978$, $b_1 = -1,0343$, $b_2 = -0,7485$, $b_3 = -1,6316$, $b_4 = 0,9114$, $b_5 = 0,3162$. Уравнение регрессии в этом случае примет вид

$$\hat{y} = 0,4978 - 1,0343x_1 - 0,7485x_2 + 1,6316x_3 + 0,9114x_4 + 0,3162x_5,$$

а соответствующая ему модель статической характеристики $m_c = f(n, h)$ запишется следующим образом:

$$m_c = 0,4978 - 1,0343n - 0,7485h + 1,6316nh + 0,9114n^2 + 0,3162h^2.$$

Произведем статистическую обработку полученных результатов. Представленные в табл. 6.5 значения момента сопротивления

m_c были определены путем усреднения результатов повторных опытов. В каждой из 14 точек эксперимента проводилось по три дублирующих опыта. В табл. 6.6 приведены результаты измерений в процессе эксперимента и промежуточных расчетов оценки дисперсии адекватности.

Таблица 6.6 Данные повторных опытов и результаты промежуточных расчетов оценки дисперсии адекватности

k	y_{k1}	y_{k2}	y_{k3}	\bar{v}_k	θ_k	$\bar{v}_k - \theta_k$	$(\bar{v}_k - \theta_k)^2$
1	0,13	0,17	0,18	0,16	0,1576	0,0024	0,0000
2	0,38	0,34	0,33	0,35	0,3355	0,0145	0,0002
3	0,009	0,06	0,03	0,06	0,0821	0,0221	0,0005
4	0,13	0,14	0,06	0,11	0,1316	0,0216	0,0005
5	0,39	0,40	0,35	0,38	0,3280	0,0520	0,027
6	0,03	0,09	0,08	0,07	0,0302	0,0398	0,0016
7	0,61	0,69	0,68	0,66	0,7065	0,0465	0,0022
8	0,78	0,71	0,73	0,74	0,7845	0,0445	0,0020
9	0,24	0,16	0,23	0,21	0,2331	0,0231	0,0005
10	0,53	0,58	0,54	0,55	0,5204	0,0296	0,0009
11	1,10	1,04	1,10	1,08	1,0312	0,0488	0,0024
12	0,10	0,08	0,12	0,10	0,0810	0,0190	0,0004
13	0,32	0,27	0,31	0,30	0,3598	0,0598	0,0036
14	0,79	0,77	0,72	0,76	0,7486	0,0114	0,0001

Для оценки значимости коэффициентов и адекватности полученной модели необходимо найти оценку дисперсии воспроизводимости. В рассматриваемом случае имеет место равномерное дублирование опытов $m_1 = m_2 = \dots = m = 3$ и оценка дисперсии вос-

Таблица 6.7 Значения t -критерия Стьюдента

Число степеней свободы	Уровень значимости, α				Число степеней свободы	Уровень значимости, α			
	0,1	0,05	0,025	0,01		0,2	0,05	0,025	0,01
1	6,314	12,706	25,452	63,657	12	1,782	2,179	2,56	3,054
2	2,920	4,303	6,205	9,925	14	1,761	2,145	2,510	2,977
3	2,353	3,182	4,176	5,841	16	1,746	2,120	2,473	2,921
4	2,132	2,776	3,495	4,004	18	1,743	2,101	2,445	2,878
5	2,015	2,571	3,163	4,032	20	1,725	2,086	2,423	2,845
6	1,943	2,447	2,969	3,707	25	1,708	2,059	2,385	2,787
7	1,895	2,365	2,841	3,499	30	1,697	2,042	2,36	2,750
8	1,860	2,306	2,751	3,355	40	1,684	2,000	2,329	2,705
9	1,833	2,262	2,685	3,250	60	1,671	1,980	2,299	2,660
10	1,812	2,228	2,634	3,169					

производимости находится в виде

$$s^2 \{y\} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{q=1}^m (y_{kq} - \bar{y}_k)^2}{N(m-1)} = \frac{0,0307}{14(3-1)} = 1,0964 \cdot 10^{-3}.$$

Оценим значимость полученных коэффициентов. С этой целью, пользуясь выражением (6.8), для каждого коэффициента уравнения определим доверительный интервал Δb_i , $i=0, 1, \dots, 5$.

В табл. 6.7 приведены значения t -критерия Стьюдента для различных уровней значимости при различных степенях свободы. При уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы $f_y=28$ $t(0,05; 28)=2,043$.

Для определения оценок дисперсии коэффициентов построим матрицу дисперсий-ковариаций M^{-1} , равную

$$\begin{aligned} M^{-1} &= s^2 \{y\} [X^T X]^{-1} = 1,0964 \cdot 10^{-3} \times \\ &\times \begin{bmatrix} 17,84 & -46,04 & -11,81 & 11,43 & 28,63 & 3,37 \\ -46,04 & 127,16 & 24,49 & -23,53 & -83,44 & -7,71 \\ -11,81 & 24,49 & 18,84 & -14,38 & -12,72 & -8,18 \\ 11,43 & -23,53 & -14,38 & 19,50 & 9,92 & 58,62 \\ 28,63 & -83,43 & -12,72 & 9,92 & 57,71 & 5,65 \\ 3,37 & -7,71 & -8,18 & 58,62 & 5,65 & 7,87 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 0,0196 & -0,0505 & 0,0130 & 0,0125 & 0,0314 & 0,0037 \\ -0,0505 & 0,1395 & 0,0269 & -0,0258 & -0,0915 & -0,0085 \\ 0,0130 & 0,0269 & 0,0207 & -0,0158 & -0,0140 & -0,0090 \\ 0,0125 & -0,0258 & -0,0158 & 0,0214 & 0,0109 & 0,0006 \\ 0,0314 & -0,0915 & -0,0140 & 0,0109 & 0,0633 & 0,0062 \\ 0,0037 & -0,0085 & -0,0090 & 0,0006 & 0,0062 & 0,0086 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Таким образом, $\Delta b_0 = \pm 2,043 \cdot 0,14 = 0,286$; $\Delta b_1 = \pm 0,762$; $\Delta b_2 = \pm 0,294$; $\Delta b_3 = \pm 0,296$; $\Delta b_4 = \pm 0,505$; $\Delta b_5 = \pm 0,188$. Все коэффициенты полученного уравнения значимы, так как их абсолютная величина больше доверительных интервалов.

Для проверки адекватности полученной модели рассчитаем значение F -критерия Фишера. С этой целью для каждой точки эксперимента определим отклонение расчетного значения \hat{y}_k от соответствующего результата измерения y_k (см. табл. 6.6) и получим оценку дисперсии адекватности

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (\hat{y}_k - y_k)^2}{N-L} = \frac{0,0175}{14-6} = 2,1875 \cdot 10^{-3}.$$

Вычислим значение F -критерия, соответствующее данным эксперимента

$$F_3 = s_{ad}^2 / s^2 \{y\} = 2,1875 \cdot 10^{-3} / (1,0964 \cdot 10^{-3}) = 1,99.$$

Табличное значение критерия при уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы $f_1=8$ и $f_2=28$ (табл. 6.8) составляет $F_t(0,05; 8; 28)=2,29$.

Таблица 6.8 Значения F -критерия Фишера

Число степеней свободы для знаменателя	Число степеней свободы для числителя									
	1	2	3	4	5	6	8	12	16	24
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	230,2	234,0	243,9	246,5	249,0
2	19,51	19,0	19,6	19,24	19,3	19,33	19,37	19,41	19,45	19,47
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,84	8,74	8,69	8,64
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,07	5,91	5,84	5,77
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,6	4,53
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,0	3,92	3,84
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,57	3,49	3,41
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,2	3,12
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,46	3,37	3,23	3,07	2,98	2,9
10	4,96	4,1	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,82	2,74
12	4,75	3,38	3,49	3,26	3,11	3,0	2,85	2,69	2,63	2,5
15	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,33	2,25
20	4,35	3,49	3,1	2,87	2,71	2,6	2,45	2,28	2,18	2,08
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,27	2,09	1,99	1,89
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,18	2,00	1,90	1,79
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,13	1,95	1,85	1,74

Поскольку значение F -критерия, соответствующее данным эксперимента, меньше табличного значения, следует сделать вывод, что полученное уравнение адекватно отражает существующую зависимость $m_c=f(n, k)$.

При построении модели по данным активного эксперимента можно упростить процедуру вычисления коэффициентов уравнения регрессии и получить модели с заданными свойствами. Достигается это путем планирования эксперимента с использованием так называемых ортогональных планов.

Одним из важнейших эффектов ортогонального планирования эксперимента является получение независимых оценок коэффициентов уравнения регрессии, что позволяет при необходимости усложнять модель, добавляя новые и не пересчитываая уже найденные члены уравнения

Условием ортогональности плана является следующее:

$$\sum_{k=1}^N x_{ki} x_{kj} = 0, \quad i \neq j; \quad i, j = 0, 1, \dots, t.$$

При выполнении этого условия матрица $C = X^T X$ становится диагональной:

$$C = X^T X = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N x_{k0}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sum_{k=1}^N x_{k1}^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sum_{k=1}^N x_{kt}^2 \end{bmatrix}.$$

Матрица $M^{-1} = s^2 \{y\} [X^T X]^{-1}$ также диагональна:

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} s^2 \{b_0\} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s^2 \{b_1\} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s^2 \{b_t\} \end{bmatrix},$$

что и определяет независимость оценок коэффициентов, так как $\text{cov} \{b_i b_j\} = 0$. Оценки коэффициентов уравнения находятся по выражению

$$b_i = \sum_{k=1}^N x_{ki} y_k / \sum_{k=1}^N x_{ki}^2,$$

а оценки дисперсий коэффициентов по выражению

$$s^2 \{b_i\} = s^2 \{y\} / \sum_{k=1}^N x_{ki}^2.$$

Наиболее простыми видами ортогональных планов являются полный и дробный факторные эксперименты. Такие планы не только обладают свойствами ортогональности, но и обеспечивают наибольшую точность оценок коэффициентов уравнения регрессии и высокие прогнозирующие свойства получаемой модели.

При построении ортогональных планов используются кодированные безразмерные значения независимых переменных (факторов), соответствующие выбранным уровням варьирования. Наиболее распространены планы полного факторного эксперимента (ПФЭ) с варьированием n факторов на двух уровнях, обозначаемые ПФЭ 2^n . Такие планы дают возможность получать модель объекта в виде линейной части уравнения регрессии или суммы линейной части и членов, содержащих произведения факторов в первой степени.

Кодированными значениями факторов при таком эксперименте являются $x_i = \pm 1$, которые получаются как $x_i = (\tilde{x}_i - x_{i0}) / (\Delta x_i)$, где \tilde{x}_i — натуральное значение фактора; x_{i0} — центральное значение фактора; Δx_i — интервал варьирования фактора.

Варианты опытов ПФЭ составляют полный набор комбинаций уровней факторов.

Матрица планирования ПФЭ 2^3 имеет вид

k	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
7	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1

Матрица планирования ПФЭ обладает следующими свойствами:

$$\sum_{k=1}^N x_{ki} x_{kj} = 0; \quad \sum_{k=1}^N x_{ki} = 0; \quad \sum_{k=1}^N x_{ki}^2 = N; \quad i = j; \quad i, j = 1, 2, \dots, t.$$

Следовательно, коэффициенты уравнения регрессии можно вычислить по формуле

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_{kj} y_k, \quad j = 0, 1, \dots, t,$$

а оценки дисперсий коэффициентов уравнения — по выражению

$$s^2 \{b_j\} = s^2 \{y\} / (mN),$$

где N — число вариантов опытов ПФЭ; m — число повторных опытов.

В тех случаях когда модель строится в виде уравнения, содержащего менее чем $N = 2^n$ членов, можно сократить число проводимых опытов, применяя дробный факторный эксперимент (ДФЭ). Тогда матрица планирования будет представлять собой часть матрицы ПФЭ.

Коэффициенты уравнения регрессии при ДФЭ вычисляются по тем же выражениям, что и при ПФЭ, и представляют смешанные оценки

$$b_j \rightarrow \beta_j \pm \beta_{ij} \pm \dots,$$

определенные по генерирующему соотношениям ДФЭ.

Пример. Рассмотрим задачу построения приближенной аналитической модели для определения оптимальных параметров системы уравнения. Закон управления в рассматриваемой системе имеет вид

$$U = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + k_4 x_4,$$

где x_1, \dots, x_4 — координаты системы; k_1, \dots, k_4 — параметры регулятора.

Оптимизируемым показателем является среднеквадратичное отклонение регулируемой величины Q в условиях случайных возмущающих воздействий. В сложных системах, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями высокого порядка, оптимизация возможна лишь численными методами с использованием ЭВМ. При этом вычисление оптимизируемого показателя на основе полной модели системы не целесообразно, так как приводит к неоправданно большим затратам машинного времени. Использование приближенных аналитических моделей, построенных по данным активного эксперимента, позволяет сократить трудоемкость вычислений в 10^2 — 10^3 раз.

Пользуясь схемой полного факторного эксперимента, построим линейную модель зависимости $Q = Q(k_1, \dots, k_4)$. Для обеспечения адекватности модели эксперименты производятся не во всей области изменения параметров, а в некоторой ограниченной ее части. При этом движение к экстремуму происходит последовательно с использованием моделей, построенных на каждом из этапов. Диапазоны изменения параметров приведены в табл. 6.9, матрица планирования и результаты эксперимента для одного из этапов оптимизации системы — в табл. 6.10, в которую внесены также полученные значения коэффициентов модели b_0, \dots, b_4 и рассчитанные с помощью модели значения оптимизируемого показателя \hat{Q}_k .

Таблица 6.9. Абсолютные значения изменяемых параметров

Параметр	Основной уровень	Интервал варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
k_1	0,6	0,1	0,7	0,5
k_2	1,0	0,1	1,1	0,9
k_3	2,0	0,5	2,5	1,5
k_4	10,0	20,0	12,0	8,0

Таким образом, полученное уравнение регрессии имеет вид

$$\hat{Q} = 0,4426 - 0,1013k_1 + 0,0897k_2 - 0,0284k_3 + 0,0844k_4.$$

Для проверки значимости коэффициентов построим доверительный интервал $\Delta b_i = \pm t(\alpha, f) \sqrt{s^2 \{Q\}/N}$. Табличное значение t -критерия Стьюдента (см. табл. 6.7) при числе степеней свободы $f = 2$ для уровня значимости $\alpha = 0,05$ составляет $t(0,05; 2) = 4,303$. Дисперсия воспроизводимости, определяемая из трех дублирующих опытов, равна $s^2 \{Q\} = 0,8 \cdot 10^{-3}$. Тогда $\Delta b_i = \pm 4,303 \times \sqrt{0,0008/16} = \pm 0,0304$. Коэффициент уравнения b_3 не значим, так как для него не выполняется условие $|b_i| > \Delta b_i$. Следовательно,

Таблица 6.10. Матрица планирования и результаты эксперимента

Номер опыта	Изменяемый параметр				Оптимизируемый показатель	
	k_1	k_2	k_3	k_4	Q	\hat{Q}
1	1	1	1	1	0,5315	0,4870
2	1	1	1	-1	0,3331	0,3183
3	1	1	-1	1	0,5218	0,5438
4	1	1	-1	-1	0,3148	0,3751
5	1	-1	1	1	0,3323	0,3075
6	1	-1	1	-1	0,2002	0,1388
7	1	-1	-1	1	0,2954	0,3644
8	1	-1	-1	-1	0,2014	0,1957
9	-1	1	1	1	0,6108	0,6895
10	-1	1	1	-1	0,5201	0,5208
11	-1	1	-1	1	0,8406	0,7463
12	-1	1	-1	-1	0,5857	0,5776
13	-1	-1	1	1	0,4963	0,5100
14	-1	-1	1	-1	0,2890	0,3413
15	-1	-1	-1	1	0,5868	0,5669
16	-1	-1	-1	-1	0,4214	0,3982

Коэффициенты модели: $b_0 = 0,4426$; $b_1 = -0,1013$; $b_2 = 0,0897$; $b_3 = -0,0284$; $b_4 = 0,0844$.

$\hat{Q} = 0,4426 - 0,1013k_1 + 0,0897k_2 + 0,0844k_4$. Пользуясь критерием Фишера, проверим адекватность модели:

$$s_{ad}^2 = \sum_{k=1}^N (Q_k - \hat{Q}_k)^2 / (N - L) = 0,0344 / (16 - 4) = 0,0029;$$

$$F_3 = s_{ad}^2 / s^2 \{Q\} = 0,0029 / 0,0008 = 3,625.$$

Полученная модель адекватна, так как значение F_3 меньше табличного значения $F_t(0,05; 12; 2) = 19,41$. На основе построенной модели можно производить выбор направления движения в процессе оптимизации параметров системы.

ГЛАВА 7 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И НЕОБХОДИМОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

§ 7.1. Общая характеристика задач расчета управляемых комплексов

Характерной особенностью задач управления корабельными объектами является наличие ограничений допустимого времени обработки информации. Превышение допустимых ограни-

чений приводит к снижению качества управления, а в некоторых случаях и к развитию аварийных ситуаций в УО. Так, например, превышение допустимого периода формирования управляющего воздействия на исполнительный орган в системе регулирования приводит к ухудшению динамических характеристик системы, вызывает развитие колебаний, а при больших значениях приводят к полной потере управления. Аналогичные ситуации возникают и при решении задач контроля состояний управляемых объектов. Если время обработки данных превышает допустимое значение, рассчитанное в соответствии с динамическими характеристиками объекта, теряется смысл решения задачи, так как за это время нежелательные процессы могут развиться в такой степени, что предотвращение аварийной ситуации станет уже невозможным.

Наличие ограничений допустимого времени обработки информации при решении задач управления и контроля определяет требования работы систем и устройств УК в реальном масштабе времени (РМВ).

Последовательный характер цифровой обработки информации, большое число УО и контролируемых параметров создают значительные трудности при построении УК ТС корабля, работающих в РМВ, и определяют высокие требования к производительности устройств и систем УК. Практическая возможность выполнения требований РМВ обеспечивается мультипрограммной организацией УК, позволяющей одновременно обрабатывать несколько задач или параллельно обрабатывать различные части одной задачи.

Требования РМВ, как правило, формулируются в виде ограничений на среднее время выполнения задач $\bar{t}_i \leq \bar{t}_i^*$, где \bar{t}_i^* — предельно допустимое среднее время выполнения i -й задачи контроля или управления.

Время решения задач зависит от выбранных способов и алгоритмов обработки информации, организации вычислительных работ при работе МПС в мультипрограммном режиме, числа обрабатывающих устройств и их производительности.

Задачу синтеза системы, предназначеннной для выполнения совокупности задач, характеризуемых вектором параметров $D = (d_1, d_2, \dots, d_m)$, можно сформулировать как задачу определения таких параметров структуры системы $S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ и способов обработки информации $C = (c_1, c_2, \dots, c_k)$, которые обеспечивают максимальное значение функционала $I = F(T(D, S, C))$, определяющего эффективность системы, при ограничениях $T \leq T^*$, где $T = (\bar{t}_1, \bar{t}_2, \dots, \bar{t}_m)$ — вектор средних значений времени решения задач; $T^* = (\bar{t}_1^*, \bar{t}_2^*, \dots, \bar{t}_m^*)$ — вектор предельно допустимых значений среднего времени решения задач.

Многообразие возможных структур УК, большое число параметров задач и сложность зависимостей между ними приводят к тому, что задача синтеза в общей постановке неразрешима.

Практические задачи системотехнического проектирования УК, связанные с определением структуры системы, выбором способов

обработки данных и параметров устройств, решаются путем последовательного приближения с использованием численных методов анализа математических или алгоритмических (имитационных) моделей. При этом расчет характеристик функционирования, определение необходимой производительности устройств и организация работ УК в соответствии с требованиями РМВ осуществляются с использованием моделей массового обслуживания, рассмотренных в § 6.2.

В модели все задачи управления корабельными объектами представляются в виде потоков заявок на выполнение соответствующих вычислительных работ z_1, z_2, \dots, z_m , поступающих в УК с интенсивностями $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$. Выполнение каждой задачи $z_i, i = 1, 2, \dots, M$ требует реализации соответствующего алгоритма преобразования информации A_i , характеризующегося трудоемкостью θ_i , которая определяет среднее число элементарных операций алгоритма.

Для выполнения требований РМВ характеристики модели должны удовлетворять условию $u_i \leq t_i^*$, где u_i — среднее время пребывания заявки в системе. В связи с тем, что заявки могут находиться в состоянии ожидания обслуживания, время пребывания u_i складывается из времени ожидания w_i и среднего времени обслуживания ϑ_i , т. е.

$$u_i = w_i + \vartheta_i.$$

При выбранных способах решения задач и заданной структуре УК величина ϑ_i определяется трудоемкостью алгоритма и быстродействием устройств системы $\vartheta_i = \theta_i / B$, где B — среднее быстродействие устройств.

Если учитывать многофазность системы обслуживания, отражающую последовательную обработку информации различными устройствами УК, то

$$\vartheta_i = \sum_{j=1}^N (\alpha_j \theta_{ij} / B_j),$$

где α_j — коэффициент передачи стохастической сети; B_j — быстродействие обслуживающего устройства на j -м этапе обслуживания; θ_{ij} — трудоемкость i -го этапа обработки.

Среднее время пребывания заявок в состоянии ожидания зависит от выбранной дисциплины обслуживания, производительности (быстродействия) устройств, интенсивности входных потоков и трудоемкости алгоритмов.

В процессе проектирования УК из условия заданных ограничений $u_i \leq t_i^*$ производится расчет минимальной производительности устройств $B_{j, \min}, j = 1, 2, \dots, m$ и выбираются дисциплины обслуживания заявок в системах. После выбора дисциплин рассчитываются характеристики функционирования УК, быстродействие устройств которых удовлетворяет условию $B_j \geq B_{j, \min}$, и проверяется выполнение заданных ограничений $u_i \leq t_i^*$.

Если принятая структура УК позволяет выбрать устройства необходимой производительности и дисциплины обслуживания, обеспечивающие выполнение ограничений РМВ, то дальнейшие изменения в системе производятся с целью оптимизации ее структуры.

Для интегральной оценки качества функционирования УК может быть использован критерий эффективности, учитывающий потери C_1 из-за простого устройств комплекса и потери C_2 , связанные с задержками в процессе выполнения задач:

$$I = C_1 + C_2.$$

Потери C_1 зависят от коэффициентов загрузки устройств:

$$C_1 = \sum_{i=1}^m a_i (1 - \rho_i) = \sum_{i=1}^m a_i \left(1 - \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \frac{\theta_{ij}}{B_j} \right),$$

где a_i — весовые коэффициенты, учитывающие потери в системах из-за простого устройств; λ_{ij} — интенсивность потока заявок i -го типа в j -й системе; θ_{ij} — трудоемкость j -го этапа i -й задачи; B_j — быстродействие устройств j -й системы.

Потери C_2 связаны с пребыванием заявок в состоянии ожидания, поэтому их можно разделить на две составляющие:

$$C_2 = C_{21} + C_{22},$$

где $C_{21} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^M \beta_i \lambda_{ij} w_{ij}$ — потери, определяемые абсолютными значениями времени ожидания; C_{22} — потери, возникающие из-за превышения отдельными заявками потоков предельно допустимых значений времени ожидания. Потери C_{22} определяются вероятностью превышения отдельными заявками допустимого времени $P(t_0 > w^*)$ при выполнении ограничений для средних значений времени ожидания $w_i \leq w^*$. Исследования показывают, что распределение времени ожидания потока заявок можно аппроксимировать выражением вида

$$P(t_0 \leq T) = 1 - Re^{-RT/W},$$

где W — среднее время пребывания заявок в состоянии ожидания, R — суммарная загрузка устройства. В этом случае вероятность превышения предельно допустимого времени ожидания

$$P(t_0 > W^*) = 1 - P(t_0 \leq W^*) = Re^{-RW^*/W}.$$

Потери C_{22} , связанные с превышением допустимого времени ожидания, определяются выражением

$$C_{22} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^M \gamma_i \lambda_{ij} R_j e^{-R_j w^*/w_{ij}}.$$

В результате общий критерий эффективности принимает вид

$$I = \sum_{i=1}^m \left[a_i \left(1 - \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} \frac{\theta_{ij}}{B_j} \right) + \sum_{j=1}^M \beta_i \lambda_{ij} w_{ij} + \sum_{j=1}^M \gamma_i \lambda_{ij} R_j e^{-R_j w^*/w_{ij}} \right],$$

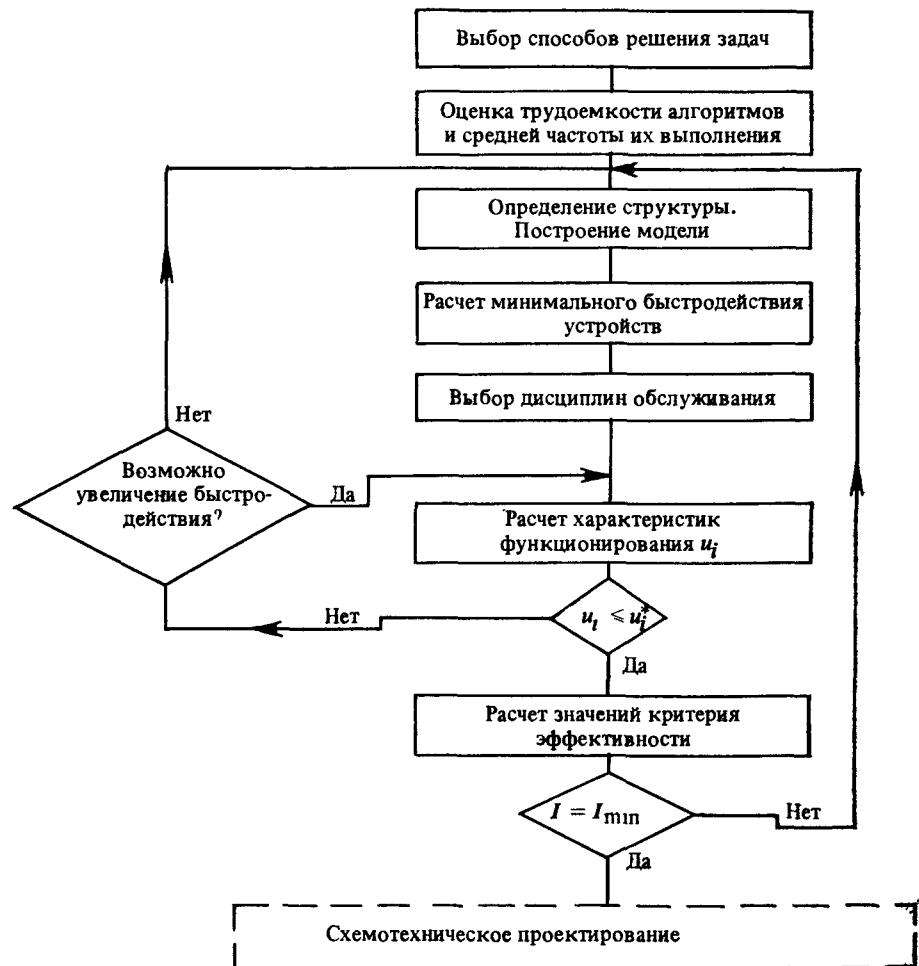


Рис. 7.1 Этапы и последовательность расчетов при проектировании управляющего комплекса

где $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ — весовые коэффициенты, учитывающие требования, предъявляемые к системе.

Задача оптимизации состоит в определении таких параметров системы (быстродействия и числа устройств обработки информации, дисциплины обслуживания заявок), которые обеспечивают

минимальное значение принятого критерия. Решение такой задачи возможно лишь путем последовательного приближения с использованием численных методов.

Таким образом, в процессе проектирования УК требуется выполнение следующих расчетов: параметров задач УК (трудоемкости алгоритмов, интенсивности потоков) и соответствующих им параметров модели; минимального быстродействия устройств, обеспечивающего выполнение заданных ограничений; характеристик функционирования УК для выбранных устройств и дисциплин обслуживания; значений критерия эффективности системы. Основные этапы и общая последовательность расчетов в процессе проектирования УК представлены схемой (рис. 7.1).

§ 7.2. Определение трудоемкости алгоритмов задач управления и контроля

Важнейшей характеристикой, необходимой для расчета и проектирования УК, является трудоемкость алгоритмов задач управления и контроля, определяющая потребность во времени использования устройств комплекса, необходимых для его реализации. Оценивается трудоемкость алгоритма количеством операций, выполняемых в процессе ввода-вывода и обработки информации при решении задачи.

Каждая реализация алгоритма характеризуется случайным числом выполняемых операций, так как исходные данные, поступающие от УО, представляют собой случайные выборки из множества возможных значений параметров, описывающих их состояния. Описание трудоемкости в виде законов распределения числа операций в реализации алгоритма, являющихся наиболее полной характеристикой случайной величины, связано с выполнением сложных и продолжительных испытаний алгоритмов. Поэтому при проектировании УК обычно используют приближенные характеристики трудоемкости, например, математическое ожидание и дисперсию числа выполняемых операций.

Используя числовые характеристики, трудоемкость алгоритма можно представить в виде вектора $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$, где θ_i — среднее число операций, выполняемых i -м устройством в процессе реализации алгоритма. Составляющие вектора $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ могут быть определены путем анализа марковской модели алгоритма. Такая модель может быть построена при допущении об отсутствии последействия в процессе изменения состояний алгоритма, каждое из которых характеризуется различными этапами обработки информации устройствами комплекса. Принятое допущение означает, что очередное состояние алгоритма зависит только от текущего состояния и не зависит от предыдущих состояний. В этом случае модель алгоритма может быть представлена стохастической матрицей, каждый элемент которой p_{ij} определяет ве-

роятность перехода процесса из состояния S_i в состояние S_j :

$$P = \begin{bmatrix} S_0 & p_{00} & p_{01} & p_{02} & \dots & p_{0N} \\ S_1 & p_{10} & p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ S_2 & p_{20} & p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_N & p_{N0} & p_{N1} & p_{N2} & \dots & p_{NN} \end{bmatrix}.$$

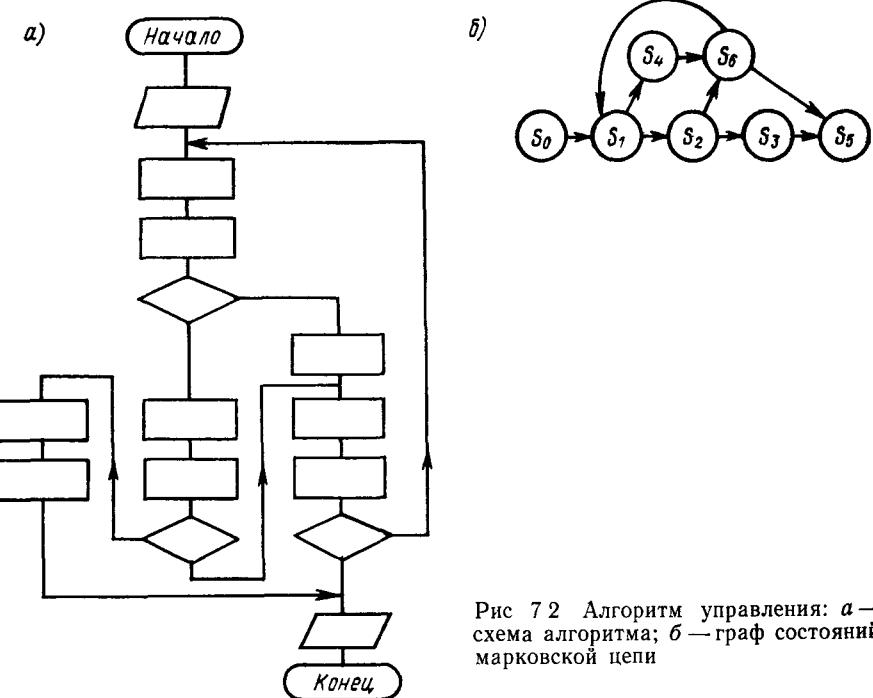


Рис. 7.2 Алгоритм управления: а — схема алгоритма; б — граф состояний марковской цепи

Для построений матрицы вероятности переходов удобно воспользоваться графическим представлением алгоритма — схемой алгоритма, которая путем несложных построений может быть преобразована в граф марковского процесса. С этой целью в рассматриваемой схеме алгоритма каждая последовательность функциональных операторов, задающих преобразования информации и не имеющих между собой подходящих ветвей алгоритма, а также следующий непосредственно за ней оператор перехода заменяются состоянием марковского процесса. На рис. 7.2 изображена схема алгоритма и соответствующий ей граф марковского процесса.

Число операций, выполняемых при реализации функциональных операторов, не зависит от исходных данных, поэтому трудо-

емкость алгоритма может быть определена в виде $\theta = \sum_{i=1}^N n_i l_i$, где n_i — среднее число выполнений i -го оператора; l_i — число операций i -го оператора.

Среднее число выполнений каждого оператора алгоритма находится из решения системы линейных алгебраических уравнений, корни которого определяют среднее число попаданий марковского процесса в состояния S_i , $i = 1, 2, \dots, N$:

$$n_i = \sum_{j=1}^N n_j p_{ji} + \delta_i,$$

где $\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{если процесс начинается из состояния } S_i; \\ 0, & \text{если } S_i \text{ не является начальным состоянием процесса.} \end{cases}$

Если в процессе расчета систем УК для характеристики трудоемкости алгоритма кроме математического ожидания числа выполняемых операций требуется значение дисперсии числа операций, то для ее определения можно воспользоваться методами теории марковских цепей [3].

Для дискретной марковской цепи, представленной матрицей вероятностей переходов P , дисперсия числа попаданий процесса в состояние S_j при начальном состоянии процесса S_i определяется элементом d_{ij} матрицы

$$D_{(n)} = N (2N_{dg} - I) - N_{sq},$$

где $N = (I - P)^{-1}$, I — единичная матрица m -го порядка. Матрицы N_{dg} , N_{sq} получаются из элементов матрицы N в виде

$$N_{dg} = \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & n_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & n_{mm} \end{bmatrix}; \quad N_{sq} = \begin{bmatrix} n_{11}^2 & n_{12}^2 & n_{13}^2 & \dots & n_{1m}^2 \\ n_{21}^2 & n_{22}^2 & n_{23}^2 & \dots & n_{2m}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{m1}^2 & n_{m2}^2 & n_{m3}^2 & \dots & n_{mm}^2 \end{bmatrix}.$$

Элементы матрицы N имеют смысл среднего числа попаданий процесса в состояния S_j , $j = 1, 2, \dots, m$, если процесс начался из состояния S_i , $i = 1, 2, \dots, m$.

В этом случае математическое ожидание и дисперсия числа выполняемых при реализации алгоритма операций определяются выражениями

$$\theta = NL; \quad D = D_{(n)}L_{sq},$$

где L — вектор-столбец, определяющий число операций функциональных операторов алгоритма; L_{sq} — вектор-столбец, получае-

мый из квадратов элементов вектора L ;

$$L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_m \end{bmatrix}; \quad L_{sq} = \begin{bmatrix} l_1^2 \\ l_2^2 \\ \vdots \\ l_m^2 \end{bmatrix}.$$

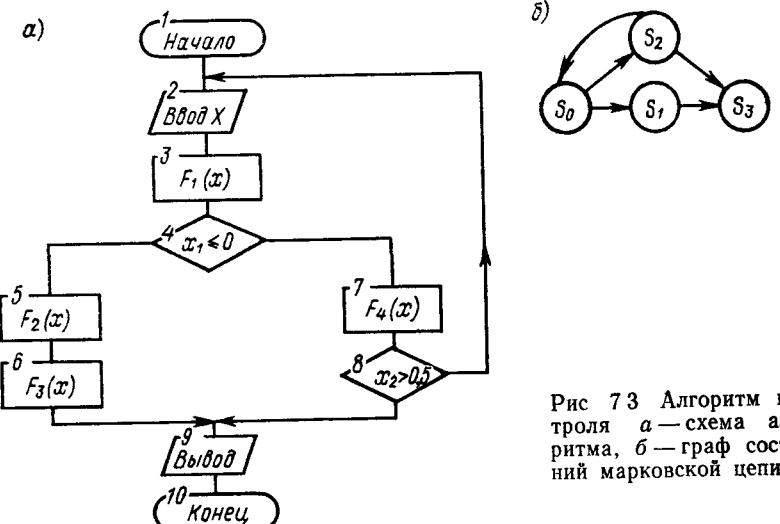


Рис. 7.3 Алгоритм контроля *a* — схема алгоритма, *b* — граф состояний марковской цепи

Элементы вектор-столбцов θ , D определяют математическое ожидание и дисперсию числа выполняемых при реализации алгоритма операций, если номер начального оператора $i = 1, 2, \dots, m$.

Пример 1. Определим математическое ожидание и дисперсию числа процессорных операций, выполняемых при реализации алгоритма контроля работоспособности устройства УК, заданного схемой, приведенной на рис. 7.3. Вероятности переходов, определенные путем анализа значений данных, обрабатываемых в процессе выполнения алгоритма, представлены матрицей

$$P = \begin{bmatrix} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ S_0 & 0 & 0,6 & 0,4 & 0 \\ S_1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ S_2 & 0,3 & 0 & 0 & 0,7 \\ S_3 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Трудоемкость операторов алгоритма приведена в табл. 7.1.

Таблица 7.1. Трудоемкость операторов алгоритма управления

Состояние	Операторы	Число операций
S_0	1	—
	2	20
	3	80
	4	—
S_1	5	100
	6	150
S_2	7	180
	8	—
S_3	9	60
	10	—

Определим матрицу N , необходимую для расчета среднего значения и дисперсии числа попаданий алгоритма в различные состояния, по формуле $N = (I - P)^{-1}$:

$$N = \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0,6 & 0,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0,3 & 0 & 0 & 0,7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right]^{-1} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -0,6 & 0,4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0,3 & 0 & 1 & -0,7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1,136 & 0,681 & 0,451 & 1 \\ 1,136 & 1,0 & 0 & 1 \\ 0,341 & 0,204 & 1,136 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица дисперсий числа попаданий алгоритмов в различные состояния равна $D_{(n)} = N(2N_{dg} - I) - N_{sq}$,

$$D_{(n)} = \begin{bmatrix} 1,136 & 0,681 & 0,451 & 1 \\ 1,136 & 1,0 & 0 & 1 \\ 0,341 & 0,204 & 1,136 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left[\begin{bmatrix} 2,272 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2,272 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} - \right.$$

$$\left. - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1,29 & 0,46 & 0,21 & 1 \\ 1,29 & 1,0 & 0 & 1 \\ 0,12 & 0,04 & 1,29 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right] = \begin{bmatrix} 0,15 & 0,22 & 0,37 & 0 \\ 0,15 & 0 & 0 & 0 \\ 0,31 & 0,20 & 0,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Учитывая число операций, выполняемых в различных состояниях алгоритма, определяем среднее значение и дисперсию числа процессорных операций при реализации алгоритма $\theta = NL; D = D_{(n)}L_{sq}$:

$$\theta = \begin{bmatrix} 1,136 & 0,681 & 0,451 & 1,0 \\ 1,136 & 1,0 & 0 & 1,0 \\ 0,341 & 0,204 & 1,136 & 1,0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 \\ 250 \\ 180 \\ 60 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 426 \\ 424 \\ 349 \\ 60 \end{bmatrix};$$

$$D = \begin{bmatrix} 0,15 & 0,22 & 0,37 & 0 \\ 0,15 & 0 & 0 & 0 \\ 0,31 & 0,20 & 0,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 10\ 000 \\ 62\ 500 \\ 32\ 400 \\ 3\ 600 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 27\ 238 \\ 1\ 500 \\ 20\ 460 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Произведенный расчет показывает, что рассматриваемый алгоритм при реализации его из начального оператора характеризуется средним значением числа процессорных операций $\theta = 426$ и дисперсией $D = 27\ 238$.

Вероятности переходов в алгоритмах определяются параметрами операторов перехода и распределением значений переменных, входящих в операторы перехода.

Если переход в алгоритме определяется значением независимой переменной (значениями данных, поступающих в систему от управляемых объектов), то вероятность перехода вычисляется непосредственно с помощью функции распределения контролируемой величины $P\{X < x\} = F(x)$.

При задании условий переходов в виде ограничений на значения вычисляемых в процессе выполнения алгоритма функций $Y = \phi(x)$ для расчета вероятностей перехода необходимо выполнить преобразования, выразив условия перехода через независимые переменные с известными функциями распределения.

Пример 2. Рассмотрим алгоритм контроля, приведенный на рис. 7.3. Пусть переменная x_1 распределена равномерно в интервале $[-0,6; 0,4]$, а переменная x_2 имеет экспоненциальное распределение $F_2(x) = 1 - e^{-0,713x}$.

Определим вероятности переходов, задаваемых операторами алгоритма:

$$p_{01} = P\{x_1 < 0\} = F_1(x_1) = (x_1 - x_{11})/(x_{12} - x_{11});$$

где x_{11}, x_{12} — границы интервала значений переменной x_1 ;

$$p_{01} = [0 - (-0,6)]/[0,4 - (-0,6)] = 0,6; p_{02} = 1 - p_{01} = 0,4;$$

$$p_{20} = P\{x_2 < 0,5\} = F_2(x_2);$$

$$p_{20} = 1 - e^{-0,713 \cdot 0,5} = 0,3; p_{23} = 1 - p_{20} = 0,7.$$

Аналитические методы оценки трудоемкости алгоритмов, основанные на теории марковских цепей, позволяют определить числовые характеристики случайной величины — математическое ожидание θ и дисперсию числа выполняемых операций D . Эти характеристики дают возможность аппроксимировать время выполнения программ различными статистическими моделями распределения.

В общем случае время выполнения программы аппроксимируется гамма-распределением, для которого сравнительно легко могут быть получены аналитические зависимости.

Плотность вероятности гамма-распределения имеет вид

$$f(\tau, k) = \begin{cases} \frac{(k/\theta)^k \tau^{k-1} e^{-k\tau/\theta}}{\Gamma(k)} & \text{при } \tau \geq 0; k > 0; \theta > 0; \\ 0 & \text{во всех остальных случаях,} \end{cases}$$

где θ — математическое ожидание времени выполнения программы; $\Gamma(k) = \int_0^\infty \tau^{k-1} e^{-\tau} d\tau$ — гамма-функция; $k = \theta/D$ — параметр распределения; D — дисперсия времени выполнения программы.

Таким образом, любым значениям математического ожидания и дисперсии, полученным в результате анализа трудоемкости алгоритма, может быть поставлено в соответствие гамма-распределение.

В некоторых случаях при расчете характеристик функционирования и параметров устройств УК требуется значение еще одной числовой характеристики распределения времени выполнения программы — второго начального момента $\theta^{(2)}$. Эта характеристика может быть определена из значений математического ожидания и дисперсии случайной величины

$$\theta^{(2)} = \theta^2 + D = \theta^2 (1 + v^2),$$

где $v = \sigma/\theta$ — коэффициент вариации; σ — среднеквадратичное отклонение времени выполнения алгоритма.

В распределении времени выполнения программ коэффициент вариации принимает значения от 0 до 1 и зависит от разветвленности выполняемого алгоритма. В линейном алгоритме, не имеющем операторов перехода, длительность обслуживания постоянна, т. е. $D=0$ и коэффициент вариации $v=0$. При большой разветвленности алгоритма $v \rightarrow 1$, что соответствует экспоненциальному распределению времени обслуживания.

При необходимости более точной оценки трудоемкости алгоритмов и получения закона распределения числа выполняемых операций производится статистическое моделирование алгоритма. Процесс статистического моделирования состоит в многоократной

имитации прохождения алгоритма при различных значениях исходных данных, выбираемых в процессе моделирования в соответствии с заданными законами распределения, подсчете числа выполняемых при этих реализациях алгоритма операций и статисти-

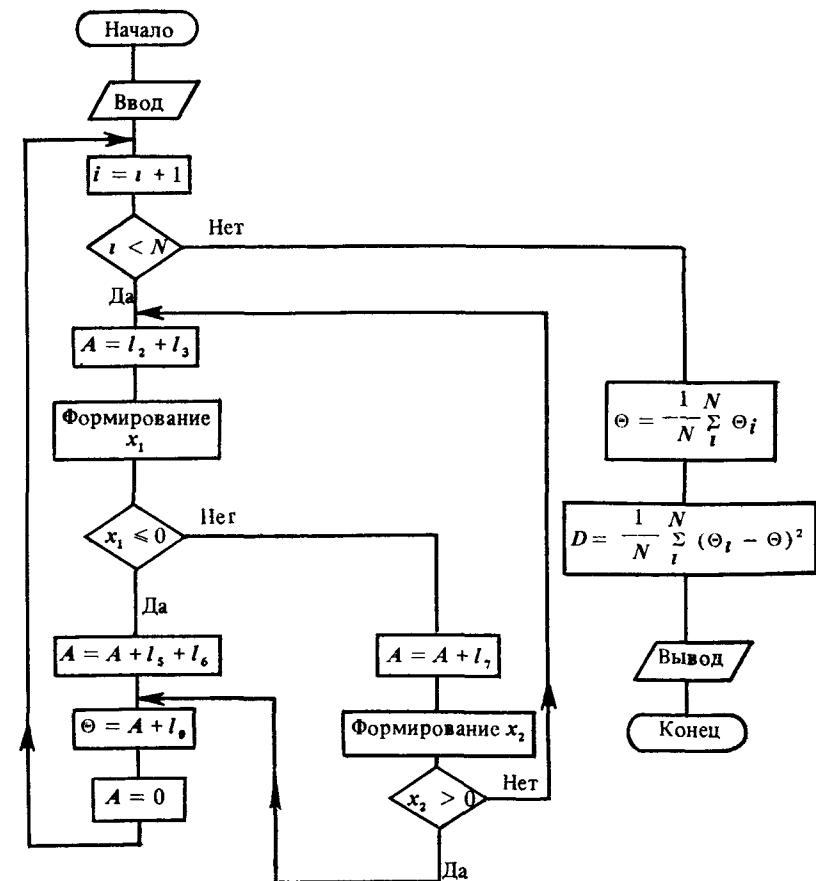


Рис. 7.4 Схема алгоритма статистического моделирования

ческой обработке полученных результатов с целью получения желаемых характеристик трудоемкости (моментов, функций, аппроксимирующих распределение, и др.).

На рис. 7.4 представлена схема алгоритма статистического моделирования для оценки трудоемкости алгоритма контроля, рассмотренного в приведенном выше примере 2. Программа моделирования (на языке БЕЙСИК) дана в Приложении 4. Резуль-

Таблица 7.2. Результаты статистического моделирования алгоритма

Номер опыта	Число операций	Номер опыта	Число операций	Номер опыта	Число операций
1	410	14	410	27	410
2	340	15	410	28	410
3	410	16	410	29	410
4	340	17	340	30	410
5	410	18	340	31	340
6	410	19	410	32	410
7	410	20	340	33	410
8	410	21	340	34	410
9	410	22	410	35	410
10	410	23	410	36	340
11	340	24	410	37	410
12	410	25	410	38	340
13	410	26	410	39	410

Среднее число операций $\theta = 433$
Дисперсия числа процессорных операций $D = 24022$

таты статистического моделирования, представленные в табл. 7.2, показывают, что полученные аналитическим путем оценки трудоемкости алгоритма хорошо согласуются с данными эксперимента.

§ 7.3. Определение требуемого быстродействия устройств управляющего комплекса

Под быстродействием устройства понимается число элементарных операций, выполняемых в единицу времени. Если устройство, например процессор, выполняет разнотипные операции, характеризующиеся различным временем их выполнения, то под быстродействием понимается средняя величина, определяемая с учетом длительности и средней частоты выполнения каждой операции. Корректный выбор быстродействия устройств является одной из важнейших задач проектирования УК.

Децентрализованная распределенная структура УК и многоэтапный характер решения задач управления корабельными объектами требуют согласованного быстродействия устройств, выполняющих обработку информации на различных этапах. Недостаточное быстродействие устройств может привести к накоплению очередей на отдельных участках системы и увеличению общего времени решения задач. Использование же устройств, имеющих быстродействие, значительно превышающее требуемое значение, приводит к неоправданному увеличению стоимости системы.

Для определения быстродействия, обеспечивающего согласованную работу всех устройств комплекса, производится анализ сетевой модели УК, в результате которого определяются коэффициенты передач α_i , трудоемкости этапов обработки задач θ_i для

всех СМО, образующих сеть, и ограничения, накладываемые на время выполнения задач, u_i^* .

Все системы УК целесообразно разделить на две группы. Одну из них образуют системы, решающие задачи обработки информации, не имеющие ограничений. Устройства этих систем должны обслуживать заявки за конечное время, предельное значение которого не задается. Для этого необходимо обеспечить стационарный режим системы, исключающий неограниченное накопление очереди.

Условием существования стационарного режима СМО, на вход которой поступает поток заявок с интенсивностью λ , является $\rho = \lambda/\mu < 1$, где μ — интенсивность обслуживания заявок.

Учитывая, что системы УК обрабатывают информацию в процессе выполнения различных задач управления, при определении условий стационарного режима необходимо учитывать многомерность входного потока, т. е. общую загрузку R , созданную всеми потоками заявок z_1, z_2, \dots, z_m с интенсивностями $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$. В этом случае условием существования стационарного режима является $R = \sum_{i=1}^M \rho_i = \sum_{i=1}^M (\lambda_i/\mu_i) < 1$, где λ_i — интенсивность потока задач i -го типа; μ_i — интенсивность обслуживания задач j -го типа.

Для систем УК $\mu_i = 1/\theta_i = B/\theta_i$. Тогда условие существования стационарного режима принимает вид

$$\sum_{i=1}^M \lambda_i \frac{\theta_i}{B} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i < 1,$$

из которого определяется минимальное быстродействие устройства при отсутствии ограничений на время пребывания заявок в системе

$$B > \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i.$$

Определение быстродействия устройств второй группы системы, выполняющих задачи с ограничениями времени, производится из условия удовлетворения предельно допустимых ограничений $u_i \leq u_i^*$, где u_i — среднее время пребывания i -й задачи в системе; u_i^* — предельно допустимое значение среднего времени пребывания в системе задачи i -го типа.

Для определения быстродействия устройств, удовлетворяющих предельно допустимым ограничениям, можно воспользоваться законом сохранения времени ожидания, в соответствии с которым независимо от принятой в системе дисциплины обслуживания заявок имеет место следующее:

$$\sum_{i=1}^M \rho_i w_i = \text{const},$$

где ρ_i — загрузка устройства со стороны i -го потока заявок; w_i — среднее время ожидания заявками i -го типа.

Представим предельно допустимые ограничения в виде ограничений на среднее время ожидания заявок $w_i \leq w_i^*$, $i = 1, 2, \dots, M$. При выполнении этих условий справедливо неравенство

$$\sum_{i=1}^M \rho_i w_i^* > \sum_{i=1}^M \rho_i w_i, \text{ или } \sum_{i=1}^M (w_i^* - w_i) \rho_i > 0.$$

Из последнего условия может быть определено быстродействие устройства, необходимое для удовлетворения заданных ограничений. Подставив в полученное неравенство выражение для определения времени ожидания при бесприоритетном обслуживании заявок

$$w_i = W^{\text{БП}} = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^{(2)}}{2 \left(1 - \sum_{i=1}^M \rho_i \right)} = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^{(2)}}{2B \left(B - \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i \right)},$$

получим

$$\sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i \theta_i}{B} \left[w_i^* - \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^{(2)}}{2B \left(B - \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i \right)} \right] > 0.$$

Это неравенство можно рассматривать как необходимое условие существования дисциплины обслуживания при быстродействии устройства B , обеспечивающее выполнение заданных ограничений $w_i \leq w_i^*$, $i = 1, 2, \dots, M$.

Решая неравенство относительно B , получим

$$B > 0,5 \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i + \left[0,25 \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i \left(\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i + \frac{2 \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^{(2)}}{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i w_i^*} \right) \right]^{1/2}.$$

Полученное выражение позволяет определить минимальное быстродействие устройства, необходимое для выполнения заданных ограничений на время ожидания заявок в системе. На практике быстродействие устройства выбирается из условия $B > B_{\min}$. При этом с увеличением разности $B - B_{\min}$ уменьшается коэффициент загрузки устройства и упрощается определение дисциплины обслуживания.

Пример. УК, сетевая модель которого приведена на рис. 7.5, выполняет 6 задач управления и контроля. Интенсивности выпол-

Таблица 7.3. Параметры процессов при выполнении различных этапов задач управления в системах S_j

Задача управления z_i	Интенсивность λ_{i0}	S_1			S_2			S_3			S_4		
		α_{i1}	θ_{i1}	w_{i1}^*	α_{i2}	θ_{i2}	w_{i2}^*	α_{i3}	θ_{i3}	w_{i3}^*	α_{i4}	θ_{i4}	w_{i4}^*
z_1	1,0	2	4 000	0,8	1	4 000	0,3	4	3 000	0,1	5	2 000	—
z_2	5,0	1	2 400	0,3	2	2 000	0,1	2	2 500	0,1	1	3 000	—
z_3	2,0	2	4 000	0,4	3	5 000	0,2	1	15 000	0,2	2	5 000	—
z_4	0,1	6	30 000	1,5	2	25 000	0,4	4	30 000	0,3	2	125 000	—
z_5	0,5	4	10 000	0,7	4	10 000	0,3	2	20 000	0,4	1	30 000	—
z_6	0,3	8	12 500	0,5	6	10 000	0,15	1	25 000	0,2	4	12 500	—

нения задач λ_{i0} , коэффициенты передачи α_{ij} системы УК, осуществляющие отдельные этапы обработки информации, трудоемкость этапов θ_{ij} и предельно допустимые времена ожидания w_{ij}^* в системах приведены в табл. 7.3. Требуется определить быстродействие

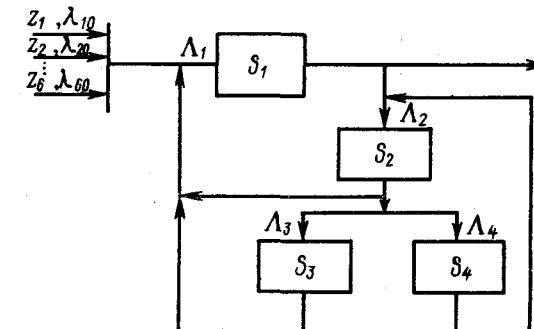


Рис. 7.5. Сетевая модель управляющего комплекса

вие устройств в системах, обеспечивающее выполнение всех задач в условиях заданных ограничений.

В системе S_4 обработка данных производится без ограничения допустимого времени ожидания, поэтому быстродействие этой системы определяется из условия существования стационарного режима

$$\begin{aligned} B_4 > \sum_i \lambda_{i4} \theta_{i4} = \sum_i \lambda_{i0} \alpha_{i4} \theta_{i4}; \quad B > 1 \cdot 5 \cdot 2000 + 1 \cdot 5 \cdot 3000 + \\ + 2 \cdot 2 \cdot 5000 + 0,1 \cdot 2 \cdot 125 000 + 0,5 \cdot 1 \cdot 3000 + 0,3 \cdot 4 \cdot 12 500 = \\ = 100 000; \quad B_{4 \min} = 10^5 \text{ операций/с}; \end{aligned}$$

В системах S_1, S_2, S_3 быстродействие устройств определяется из условия выполнения предельно допустимых ограничений $w_i \leq w_i^*$, $i = 1, 2, \dots, 6$.

$$B_j > 0,5 \sum_i \lambda_{ij} \theta_{ij} + \left[0,25 \sum_i \lambda_{ij} \theta_{ij} \left(\sum_i \lambda_{ij} \theta_{ij} + \frac{2 \sum_i \lambda_{ij} \theta_{ij}^{(2)}}{\sum_i \lambda_{ij} \theta_{ij} w_{ij}} \right) \right]^{1/2},$$

$$j = 1, 2, 3.$$

Подставив значения параметров задач, получаем $B_1 \min = 118\,960$ операций/с; $B_2 \min = 124\,775$ операций/с; $B_3 \min = 152\,363$ операций/с.

§ 7.4. Выбор дисциплин обслуживания заявок и расчет характеристик функционирования систем управляющего комплекса

Дисциплиной обслуживания цифровой управляющей системы называют правило, определяющее порядок поступления заявок на обслуживание. Реализация заданных дисциплин обеспечивается специальной управляющей программой-диспетчер, которая осуществляет прием и постановку заявок в очередь, выбор заявок из очередей и организацию их обслуживания.

Существуют различные способы организации последовательности обслуживания заявок, от рационального выбора которых за-

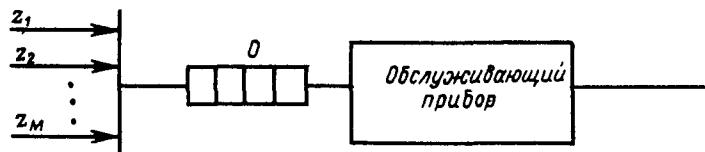


Рис. 7.6. Схема обслуживания при бесприоритетной дисциплине

висят характеристики функционирования и эффективность всей системы.

В зависимости от параметров задач, быстродействия устройств и предельных ограничений на время пребывания заявок в системе может быть использовано бесприоритетное обслуживание, обслуживание с относительными или абсолютными приоритетами или смешанный режим обслуживания.

Бесприоритетной дисциплиной называют такое обслуживание заявок, при котором заявки различных типов не имеют прав на досрочное обслуживание. Наиболее часто такое обслуживание производится в порядке поступления заявок. В этом случае заявки различных типов z_1, z_2, \dots, z_M организуют общую очередь (рис. 7.6), и вновь поступающая заявка заносится в конец очереди (O). Заявки выбираются на обслуживание из начала очереди.

Бесприоритетные дисциплины обслуживания используются в тех случаях, когда различные задачи управления, реализуемые системой, имеют примерно одинаковые ограничения на допустимое время ожидания. Определим характеристики системы с бесприоритетной дисциплиной обслуживания.

Среднее время пребывания заявки в системе u_i складывается из среднего времени решения задачи θ_i и средств времени ожидания в очереди w_i :

$$u_i = \theta_i + w_i.$$

Время решения задачи определяется трудоемкостью алгоритма θ_i и быстродействием устройств B :

$$\theta_i = \theta_i / B.$$

Среднее время ожидания при бесприоритетном обслуживании может быть определено с помощью выражения для расчета одноканальной СМО

$$W = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)},$$

где ρ — загрузка обслуживающего прибора; μ — интенсивность обслуживания заявок.

Многомерный поток, состоящий из заявок различного типа z_1, z_2, \dots, z_M с интенсивностями $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$, при допущении о пуссоновском характере входных потоков можно рассматривать как однородный пуссоновский поток с интенсивностью $\Lambda = \sum_{i=1}^M \lambda_i$. Средняя трудоемкость алгоритмов в суммарном потоке составляет

$$\theta = \sum_{i=1}^M \theta_i \frac{\lambda_i}{\Lambda}.$$

В таком случае при обслуживании заявки устройством с быстродействием B средняя длительность обслуживания заявки равна $\Phi = \theta/B$ и интенсивность обслуживания заявок составляет $\mu = 1/\Phi$. Загрузка устройства определяется выражением

$$R = \frac{\Lambda}{\mu} = \Lambda \Phi = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i.$$

Таким образом, среднее время ожидания и среднее время пребывания заявок в системе с бесприоритетным обслуживанием определяются выражениями

$$W^{\text{БП}} = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i}{B \left(B - \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i \right)}; \quad U^{\text{БП}} = \frac{\theta_i}{B} + W^{\text{БП}}.$$

Полученные выражения справедливы при принятии допущений об однородности суммарного потока и экспоненциальном распределении длительности обслуживания заявок, при котором коэффициент вариации $v=1$ и второй начальный момент распределения времени обслуживания $\theta_i^{(2)}=\theta_i^{(2)}(1+v^2)=2\theta_i^2$.

При решении ряда задач управления алгоритмы обработки данных имеют мало разветвлений и коэффициент вариации времени решения таких задач $v<1$.

Выражения для расчета характеристик системы с учетом известных значений вторых начальных моментов распределения времени обслуживания заявок могут быть получены, если рассматривать среднее время ожидания как сумму среднего времени окончания обслуживания заявки уже поступившей в устройство (время дообслуживания T_0) и среднего времени обслуживания заявок k -го типа T_k , поступивших в систему ранее рассматриваемой заявки:

$$W^{\text{БП}} = M(T_0) + \sum_{k=1}^M M(T_k).$$

В общем случае при известном распределении длительности обслуживания заявок $F_i(t)$ в суммарном потоке математическое ожидание времени дообслуживания может быть найдено по выражению

$$M(T_0) = \frac{\Lambda}{2} \int_0^\infty t^2 dF(t).$$

В суммарном потоке

$$F(t) = \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^M \lambda_i F_i(t),$$

поэтому

$$\begin{aligned} M(T_0) &= \frac{\Lambda}{2} \int_0^\infty t^2 \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^M \lambda_i dF_i(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \lambda_i \int_0^\infty t^2 dF_i(t) = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^{(2)}, \end{aligned}$$

где $\theta_i^{(2)}$ — второй начальный момент распределения времени обслуживания заявок i -го типа, $i=1, 2, \dots, M$.

Подставляя полученное выражение для $M(T_0)$, а также имея в виду, что $M(T_k) = \theta_k \cdot \lambda_k \cdot w_k = \rho_k w_k$; $w_k = w_i = W^{\text{БП}}$, где ρ_k — загрузка, создаваемая потоком заявок k -го типа, получаем

$$W^{\text{БП}} = \frac{\sum_{i=1}^M (\lambda_i \theta_i^{(2)})}{2(1-R)},$$

где $R = \sum_{k=1}^M \rho_k$ — суммарная загрузка системы.

Таким образом, при известных значениях математического ожидания и коэффициента вариации (или дисперсии) числа выполняемых при реализации алгоритма операций характеристики системы с бесприоритетным обслуживанием определяются в виде

$$\begin{aligned} U^{\text{БП}} &= \theta_i + W^{\text{БП}} = \frac{\theta_i}{B} + \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i \theta_i^{(2)}}{2 \left(1 - \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i \right)} = \frac{\theta_i}{B} + \\ &+ \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^2 (1 + v_i^2)}{2 \left(1 - \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i \right)} = \frac{\theta_i}{B} + \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^2 (1 + v_i)^2}{2B \left(B - \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i \right)}. \end{aligned}$$



Рис. 7.7 Схема обслуживания с относительными приоритетами

Дисциплинами обслуживания с приоритетами называется такое обслуживание, при котором заявки некоторых типов имеют преимущественное право на обслуживание. В системах с приоритетным обслуживанием заявки различных типов образуют отдельные очереди. Выбор заявок на обслуживание производится из начала очередей в соответствии с назначенными им приоритетами. Приоритеты характеризуются целыми положительными числами $1, 2, 3, \dots$, причем более высокому приоритету соответствует меньшее число.

Различают дисциплины с относительными и абсолютными приоритетами. Обслуживание с относительными приоритетами предполагает учет приоритетов только в момент выбора заявки на обслуживание, т. е. сравниваются только приоритеты заявок, находящихся в состоянии ожидания, и не учитываются приоритеты заявок, находящихся на обслуживании (рис. 7.7).

В дисциплинах с абсолютными приоритетами производится сравнение приоритетов всех заявок: вновь поступивших, находящихся в состоянии ожидания и на обслуживании. Если при этом вновь поступившая заявка имеет более высокий приоритет, чем находящаяся в этот момент на обслуживании, то обслуживание последней прерывается, прерванная заявка устанавливается в начале очереди с соответствующим ей приоритетом и начинается обслуживание вновь поступившей заявки (рис. 7.8).

Дисциплины обслуживания с приоритетами используются в тех случаях, когда для некоторых типов заявок требуется обеспечить

меньшее время ожидания, чем для заявок других типов. Если при этом необходимо сократить время ожидания в такой степени, которая не может быть достигнута при использовании относительных приоритетов, то используется дисциплина с абсолютными приоритетами.

При изменении дисциплины обслуживания время ожидания заявок одних типов сокращается за счет увеличения времени ожидания заявок других типов. В соответствии с законом сохранения времени ожидания в системах с одним обслуживающим прибором независимо от дисциплины обслуживания $\sum_{i=1}^M \rho_i w_i = \text{const}$. Закон



Рис. 7.8 Схема обслуживания с абсолютными приоритетами

сохранения справедлив, если все заявки образуют независимые пуссоновские потоки, длительность обслуживания заявок имеет экспоненциальное распределение и отсутствуют отказы в обслуживании заявок. Константа закона может быть определена, если воспользоваться выражением для определения времени ожидания при простейшей (бесприоритетной) дисциплине обслуживания $W_{\text{БП}} = \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^{(2)} / [2(1 - R)]$. Тогда закон сохранения времени ожидания может быть записан в виде

$$\sum_{i=1}^M \rho_i w_i = \frac{R}{2(1 - R)} \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^{(2)}.$$

Полученное выражение может быть использовано для оценки достоверности результатов расчетов и моделирования систем УК.

Рассмотрим характеристики дисциплины обслуживания с относительными приоритетами. Время ожидания в очереди заявок k -го приоритета T_k состоит из времени дообслуживания уже выбранной заявки T_0 , времени обслуживания T_{1i} ($i = 1, 2, \dots, k$) поступивших ранее заявок данного и более высокого приоритета и времени обслуживания заявок с более высоким приоритетом, дополнительно поступившими в систему за время ожидания T_{2i} ($i = 1, 2, \dots, k-1$), т. е.

$$T_k = T_0 + \sum_{i=1}^k T_{1i} + \sum_{i=1}^{k-1} T_{2i},$$

или, переходя к математическому ожиданию, получаем

$$W_k^{\text{оп}} = M(T_0) + \sum_{i=1}^k M(T_{1i}) + \sum_{i=1}^{k-1} M(T_{2i}).$$

Учитывая, что

$$M(T_{1i}) = \lambda_i \theta_i w_i = \rho_i w_i; \quad M(T_{2i}) = \lambda_i \theta_i w_k = \rho_i w_k,$$

получим

$$W_k^{\text{оп}} = M(T_0) + \sum_{i=1}^k \rho_i w_i + \sum_{i=1}^{k-1} \rho_i w_k,$$

или

$$W_k^{\text{оп}} = \frac{M(T_0) + \sum_{i=1}^k \rho_i w_i}{1 - \sum_{i=1}^{k-1} \rho_i}.$$

Используя метод математической индукции, можно записать

$$W_k^{\text{оп}} = \frac{M(T_0)}{\left(1 - \sum_{i=1}^{k-1} \rho_i\right) \left(1 - \sum_{i=1}^k \rho_i\right)}$$

Подставляя полученное ранее выражение для определения времени дообслуживания, получаем

$$W_k^{\text{оп}} = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^{(2)}}{2(1 - R_{k-1})(1 - R_k)},$$

где $R_{k-1} = \sum_{i=1}^{k-1} \rho_i$; $R_k = \sum_{i=1}^k \rho_i$ — загрузки, создаваемые потоками Z_1, Z_2, \dots, Z_{k-1} и Z_1, Z_2, \dots, Z_k соответственно, или

$$W_k^{\text{оп}} = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^{(2)}}{2 \left(B - \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i \theta_i \right) \left(B - \sum_{i=1}^k \lambda_i \theta_i \right)} = \\ = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^{(2)} (1 + v_i^2)}{2 \left(B - \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i \theta_i \right) \left(B - \sum_{i=1}^k \lambda_i \theta_i \right)}.$$

В дисциплинах с абсолютными приоритетами при поступлении высокоприоритетной заявки обслуживание ранее поступившей заявки с низшим приоритетом прерывается и обслуживающее устройство тут же предоставляется высокоприоритетной заявке.

Это позволяет значительно сократить время ожидания заявок с высоким приоритетом.

В общем случае время ожидания заявок k -го приоритета складывается из времени ожидания начала обслуживания w_k^h и времени ожидания в прерванном состоянии w_k^{np} : $w_k = w_k^h + w_k^{np}$. В связи с тем, что заявки k -го приоритета имеют более высокий абсолютный приоритет по отношению к заявкам с приоритетами $k+1, k+2, \dots, M$, последние не оказывают влияния на время ожидания заявок k -го приоритета, так как прерываются высокоприоритетными заявками. Поэтому среднее время ожидания начала обслуживания заявки k -го абсолютного приоритета можно рассматривать как среднее время ожидания заявки низшего приоритета в системе с относительными приоритетами, обслуживающей k потоков заявок:

$$w_k^h = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i \vartheta_i^{(2)}}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)}.$$

За время обслуживания заявки k -го абсолютного приоритета в систему могут поступить заявки, имеющие более высокий приоритет ($1, 2, 3, \dots, k-1$), которые будут обслуживаться ранее рассматриваемой заявки в течение времени в среднем равном

$$\tau_1 = \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i \vartheta_i \vartheta_k = \sum_{i=1}^{k-1} \rho_i \vartheta_k = R_{k-1} \vartheta_k.$$

За это время в систему дополнительно поступят заявки с более высоким приоритетом ($1, 2, \dots, k-1$), чем k , которые будут обслуживаться в среднем за время

$$\tau_2 = \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i \tau_1 \vartheta_i = \sum_{i=1}^{k-1} \rho_i R_{k-1} \vartheta_k = R_{k-1}^2 \vartheta_k.$$

На j -м шаге $\tau_j = R_{k-1}^j \vartheta_k$.

Тогда среднее время обслуживания всех заявок с приоритетом выше чем k , поступивших в систему за время обслуживания заявки k -го приоритета, определяющее среднее время ожидания в прерванном состоянии, будет равно

$$w_k^{np} = \sum_{j=1}^{\infty} \tau_j = \sum_{j=1}^{\infty} R_{k-1}^j \vartheta_k = \frac{R_{k-1} \vartheta_k}{1 - R_{k-1}}.$$

Общее время ожидания заявки k -го абсолютного приоритета

$$W_k^{\text{AP}} = \frac{R_{k-1} \vartheta_k}{1 - R_{k-1}} + \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i \vartheta_i^{(2)}}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)}.$$

Смешанным режимом обслуживания называется такое обслуживание, при котором разным группам заявок присваиваются раз-

личные виды приоритетов. В таких системах наряду с абсолютными приоритетами некоторые типы заявок имеют относительные приоритеты, а остальные заявки обслуживаются без приоритетов (рис. 7.9).

Пусть абсолютные приоритеты присвоены заявкам типа $1, 2, \dots, M_1$, относительные — заявкам M_1+1, M_1+M_2 , а заявки M_1+M_2+1, \dots, M обслуживаются бесприоритетно, т. е. в порядке поступления.

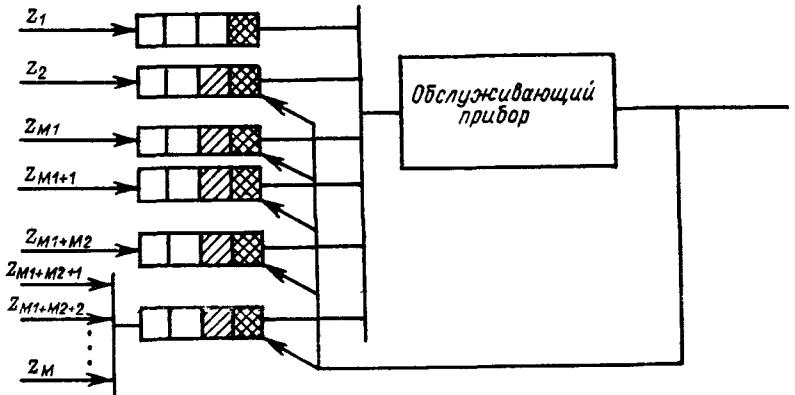


Рис. 7.9 Схема обслуживания в смешанном режиме

Среднее время ожидания заявок, обслуживаемых с абсолютными приоритетами, не зависит от времени обслуживания заявок других типов, и поэтому будет равно среднему времени ожидания заявок при использовании чистой дисциплины обслуживания с абсолютными приоритетами. Для остальных типов заявок время ожидания увеличится за счет прерывания заявками с абсолютными приоритетами. Средние значения времени ожидания заявок различных типов определяются выражениями

$$w_k = \begin{cases} \frac{R_{k-1} \vartheta_k}{1 - R_{k-1}} + \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i \vartheta_i^{(2)}}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)}, & k = 1, 2, \dots, M_1; \\ \frac{R_{M_1} \vartheta_k}{1 - R_{M_1}} + \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \vartheta_i^{(2)}}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)}, & k = M_1 + 1, \dots, M_1 + M_2, \\ \frac{R_{M_1+M_2} \vartheta_k}{1 - R_{M_1+M_2}} + \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \vartheta_i^{(2)}}{2(1-R_{M_1+M_2})(1-R)}, & k = M_1 + M_2 + 1, \dots, M. \end{cases}$$

Полученные выражения позволяют определить характеристики систем при различных дисциплинах обслуживания и выбрать дисциплины, обеспечивающие выполнение ограничений режима реального времени.

Характер изменения среднего времени ожидания при различных дисциплинах обслуживания показан на рис. 7.10, из которого видно, что при использовании чистой дисциплины с абсолютными приоритетами сокращение времени ожидания высокоприоритетных заявок приводит к резкому увеличению времени ожидания заявок

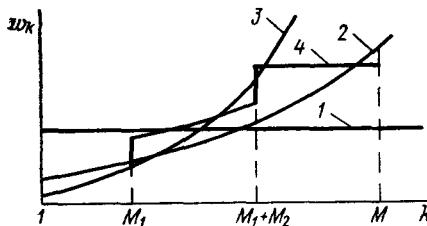


Рис. 7.10 Зависимость времени ожидания от приоритета при различных дисциплинах обслуживания

1 — бесприоритетная дисциплина; 2 — относительные приоритеты; 3 — абсолютные приоритеты; 4 — смешанный режим

с низким приоритетом, что может быть недопустимо в связи с наложенными ограничениями. Имеющийся у некоторых заявок запас по времени ожидания может быть использован для сокращения времени ожидания низкоприоритетных заявок при смешанной дисциплине обслуживания.

Пример. Выбрать дисциплину обслуживания и рассчитать среднее время ожидания при различных дисциплинах для однопроцессорной системы с быстродействием $B = 2,8 \cdot 10^5$ операций/с, выполняющей задачи с характеристиками и ограничениями, приведенными в табл. 7.4.

Полученные в результате расчета значения среднего времени ожидания, представленные в табл. 7.5, показывают, что в рассматриваемой системе требуется смешанный режим обслуживания, так как ни одна чистая дисциплина не обеспечивает выполнения за-

Таблица 7.4 Параметры процессов, выполняемых УК

Процесс	Трудоемкость алгоритма θ_t , операций	Интенсивность λ_t , 1/с	Коэффициент вариации v_t	Ограничения w_t , с
z_1	10^5	0,2	0,8	1,5
z_2	10^5	0,5	0,6	1,5
z_3	650	4	0,4	0,2
z_4	$2,25 \cdot 10^5$	0,4	0,4	3,0
z_5	450	3	0,3	0,2
z_6	500	3	0,6	0,1
z_7	$3 \cdot 10^5$	0,2	0,3	3,0
z_8	250	6	1	0,15

Таблица 7.5 Среднее время ожидания при различных дисциплинах обслуживания заявок

Процесс	Бесприоритетное обслуживание $W_{k=1}^{БП}$, с	Относительные приоритеты		Абсолютные приоритеты		Смешанный режим	
		Приоритет	W_k^{OP} , с	Приоритет	W_k^{AP} , с	Приоритет	W_k^{CP} , с
z_1	1,7906	6	0,587	6	0,203	40П	0,115
z_2	1,7906	5	0,437	5	0,0649	30П	0,086
z_3	1,7906	4	0,353	4	$6,58 \cdot 10^{-5}$	20П	0,0709
z_4	1,7906	7	1,1587	7	1,0358	БП	2,4779
z_5	1,7906	3	0,348	3	$3,33 \cdot 10^{-5}$	10П	0,0699
z_6	1,7906	1	0,341	1	$6,54 \cdot 10^{-6}$	1AP	$6,54 \cdot 10^{-6}$
z_7	1,7906	8	4,4349	8	6,0171	БП	2,4808
z_8	1,7906	2	0,345	2	$1,63 \cdot 10^{-5}$	2AP	$1,63 \cdot 10^{-5}$

данных ограничений. Для обеспечения требований РМВ при заданном быстродействии необходимо обслуживать задачи z_6, z_8 с абсолютным приоритетом; z_1, z_2, z_3, z_5 с относительными приоритетами; z_4, z_7 бесприоритетно.

ГЛАВА 8 РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЕКТИРУЕМЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРСОНАЛЬНЫХ МИКРО-ЭВМ

§ 8.1. Общая характеристика задач исследования проектируемых систем с использованием ЭВМ индивидуального пользования

Процесс проектирования корабельных систем управления, как и проектирование всякой технической системы, немыслим без выполнения расчетов и получения количественных оценок принимаемых решений. При этом по мере увеличения сложности проектируемых систем возрастают объем и трудоемкость вычислительных работ.

Проектирование УК ТС корабля связано с выполнением таких объемов проектных и конструкторских работ, которые не могут быть выполнены в приемлемые сроки без использования вычислительной техники. В настоящее время ЭВМ используются на самых различных этапах разработки систем, начиная от подготовки технического задания на проектирование до выпуска проектно-конструкторской документации. Развитие математических методов и средств вычислительной техники открывает большие возможности

повышения темпов и качества проектирования путем его комплексной автоматизации.

Системы автоматизированного проектирования (САПР), базирующиеся на достаточно мощных ЭВМ с развитым периферийным оборудованием, способны комплексно решать задачи на всех этапах разработки проекта, обеспечивая обработку исходной информации, содержащейся в задании на проектирование, поиск и восприятие релевантной информации в информационном поле, анализ и выбор вариантов, отображение информации и документирование результатов.

Однако на начальных этапах, предшествующих техническому проектированию, как правило, возникает потребность в выполнении предварительного анализа, в процессе которого исследуются различные способы функционирования системы, определении влияния основных параметров на характеристики системы и др. Решение этих задач в большинстве случаев не требует привлечения мощных ЭВМ, так как системы на данных этапах исследуются по частям. Такие исследования обычно представляют собой итеративную последовательность циклов задание—вычисление—анализ, для реализации которой наилучшим образом подходят ЭВМ, работающие в диалоговом режиме. Это, как правило, ЭВМ индивидуального пользования, к периферийному оборудованию и производительности которых предъявляются невысокие требования.

Отечественной промышленностью выпускаются более десяти типов микро-ЭВМ индивидуального пользования. Наиболее простые из них—программируемые калькуляторы—предназначены для решения в диалоговом режиме задач, не требующих запоминания больших массивов данных, программы решения которых содержат небольшое число шагов (до 10^2). Наиболее производительные микро-ЭВМ по своим вычислительным возможностям приближаются к большим вычислительным машинам и применяются в тех случаях, когда необходимость в одновременном доступе к ЭВМ со стороны многих абонентов отсутствует.

Микро-ЭВМ индивидуального пользования представляет собой эффективный настольный инструмент, обеспечивающий режим «один на один» взаимодействия с машиной при решении достаточно сложных вычислительных задач. Такие особенности микро-ЭВМ, как малые габариты, низкая стоимость, высокая надежность, простота обслуживания, возможность решения задач пользователем непосредственно на своем рабочем месте, обусловливают широкое внедрение микро-ЭВМ и практику проектирования и открывают большие возможности повышения производительности труда квалифицированных специалистов и качества проектируемых систем.

Прикладное программное обеспечение ЭВМ индивидуального пользования проектируется таким образом, чтобы от пользователя не требовалось усилий, не связанных с предметом исследования. Такая возможность обеспечивается доступом пользователя к ресурсам ЭВМ на языке высокого уровня. Как правило, это си-

стема БЕЙСИК, освобождающая пользователя от сложности языков управления заданиями, командных процедур и т. д.

В настоящей главе на примере некоторых задач, решаемых в процессе проектирования УК ТС корабля, показаны возможности и особенности исследования системы с использованием ЭВМ двух классов—программируемых микрокалькуляторов и «БЕЙСИК-ориентированных» микро-ЭВМ.

§ 8.2. Исследование систем с использованием программируемых микрокалькуляторов

Выпускаемые отечественной промышленностью программируемые микрокалькуляторы «Электроника Б3-34», «Электроника МК-54» и другие программно совместимы и имеют примерно одинаковые характеристики. Они имеют до 15 регистров для хранения десятичных чисел, программную память, позволяющую хранить программы длиной до 105 шагов, систему команд, включающую до 65 операций, в том числе вычисление некоторых элементарных функций. В настоящее время имеется опыт использования программируемых микрокалькуляторов для решения различных инженерных задач, опубликовано большое число прикладных программ.

Программируемые микрокалькуляторы являются диалоговыми вычислительными системами, обеспечивающими достаточно высокую производительность при использовании итерационных методов решения задач. Для таких систем быстродействие не имеет принципиального значения, так как ЭВМ значительное время находится в состоянии ожидания.

Основными ограничениями при использовании программируемых микрокалькуляторов являются ресурсы памяти. Поэтому при постановке задач исследования систем необходимо организовать вычислительный процесс таким образом, чтобы длина программы и объем хранимых на каждой итерации данных не превышали объема программной памяти и числа адресуемых регистров ЭВМ.

Несмотря на указанные ограничения программируемые микрокалькуляторы позволяют автоматизировать расчеты при выполнении ряда задач исследования характеристик микропроцессорных систем управления и проектирования УК ТС корабля.

Оценка трудоемкости алгоритмов управления корабельными объектами. При расчете характеристик функционирования и выборе устройств УК необходимо располагать оценками трудоемкости алгоритмов, определяющими временные затраты, связанные с реализацией задач управления. На стадии проектирования системы оценка числа элементарных операций, выполняемых при реализации алгоритма, может производиться аналитически или путем статистического моделирования (см. гл. 7). Аналитические методы дают возможность оценить среднее значение и дисперсию числа выполняемых операций. Статистическое моделирование по-

зволяет получить более полные характеристики, включая закон распределения случайной величины.

Алгоритмы управления корабельными объектами (рис. 8.1) содержат блоки ввода 2, операторы переходов 3, 5, блоки вычислений 4, 6, 7 и блоки вывода 8. Блок ввода обеспечивает получение необходимой для формирования управляемых воздействий информации от управляемых объектов, задающих органов и внешней среды. Операторы перехода осуществляют логическую обработку измеряемых и вычисляемых в процессе выполнения алгоритма величин (анализ пороговых значений), в результате которой определяется порядок дальнейшего прохождения алгоритма. осуществляется повторный ввод, выполняется необходимый блок вычислений и т.д. В результате последовательного выполнения блоков алгоритма формируется управляющее воздействие, которое передается блоком вывода к устройствам связи с объектом.

Такие алгоритмы характеризуются малой разветвленностью, т.е. содержат небольшое число операторов перехода, что позволяет оценивать их трудоемкость методом статистического моделирования, используя программируемые микрокалькуляторы.

Общий вид алгоритма статистического моделирования, позволяющего получить различные характеристики распределения числа выполняемых элементарных операций, приведен на рис. 8.2.

Алгоритм разделяется на две части, каждая из которых может быть реализована автономной программой. В первой части производится имитация реализации исследуемого алгоритма и опреде-

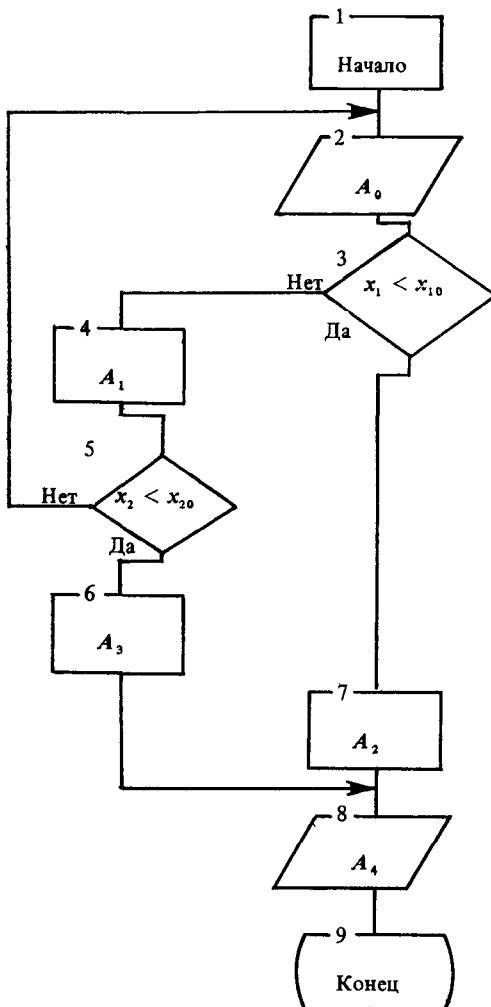


Рис. 8.1 Обобщенная схема алгоритма управления

чить различные характеристики распределения числа выполняемых элементарных операций, приведен на рис. 8.2.

Алгоритм разделяется на две части, каждая из которых может быть реализована автономной программой. В первой части производится имитация реализации исследуемого алгоритма и опреде-

ляется число элементарных операций на каждой реализации. На втором этапе производится статистическая обработка полученных данных.

Составим программу статистического моделирования для определения оценок математического ожидания и дисперсии числа процессорных операций алгоритма управления, схема которого приведена на рис. 8.1. В этом алгоритме величина x_1 имеет экспоненциальное распределение с математическим ожиданием $M\{x\} = T$, величина x_2 распределена равномерно в интервале

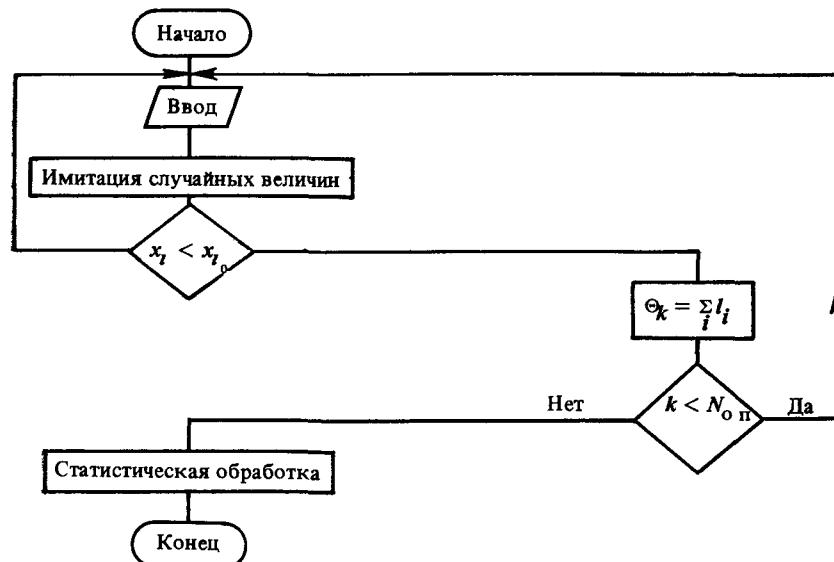


Рис. 8.2 Общий вид алгоритма статистического моделирования

(x_{21}, x_{22}) . Для реализации операторов $A_0 - A_4$ требуется выполнить соответственно $l_0 - l_4$ элементарных операций.

Схема первой части алгоритма моделирования (имитации реализаций исследуемого алгоритма) приведена на рис. 8.3.

Параметры исследуемого алгоритма будем вводить в регистры: l_0 в Р0, l_1 в Р1, $l_2 + l_4$ в Р2, $l_3 + l_4$ в Р3, T в Р4, x_{10} в Р5, x_{21} в Р6, x_{22} в Р7, x_{20} в Р8. В регистре Рa будем задавать число выполняемых экспериментов N .

Для получения случайных величин x_1, x_2 с заданными законами распределения построим подпрограмму, реализующую генератор псевдослучайных чисел, равномерно распределенных в диапазоне $[0, 1]$. С этой целью может быть использована последовательность значений величины y , вычисляемой по формуле

$$y_{k+1} = 10^{y_k} - \text{INT}(10^{y_k}),$$

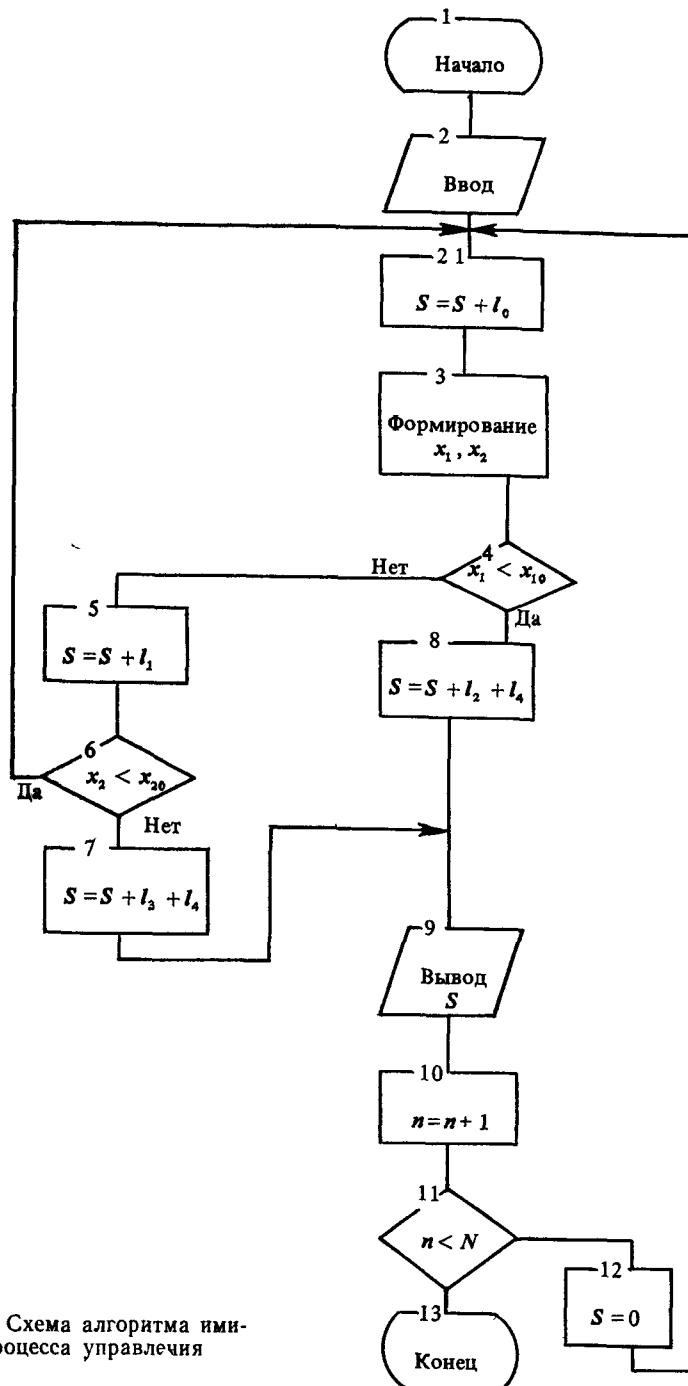


Рис. 8.3 Схема алгоритма имитации процесса управления

где $INT(z)$ — целая часть числа z . Тогда случайные величины x_1 и x_2 получаются в виде

$$x_1 = -T \ln y; \quad x_2 = x_{21} + y(x_{22} - x_{21}).$$

Текст программы приведен в табл. 8.1.

Таблица 8.1 Программа статистического моделирования и оценки трудоемкости алгоритма

Шаг программы	Операция	Комментарии	Шаг программы	Операции	Комментарии
00	ИПб	S	32	37	
01	ИП0	l_0	33	ИПб	
02	+	$S \rightarrow P_b$	34	+	
03	Пб	$S \rightarrow P_b$	35		
04	ПП	Переход к подпрограмме случайных чисел $\ln(y_k)$	36	С/П	
05	80		37	ИПГ	
06	Fln		38	1	
07	ИП4		39	+	
08	×		40	П9	
09	ИП5	Проверка условия алгоритма $Fx < 0$	41	ИПа	
10	+		42	—	
11	fx < 0		43	$Fx < 0$	
12	33		44	48	
13	ИПб		45	0	
14	ИП1	Обнуление P_b и переход к $k+1$ эксперименту	46	П	
15	+		47	БП	
16	Пб		48	00	
17	ПП		49	0	
18	80		50	F/x	
19	ИП6	Переход к подпрограмме $x_{22} - x_{21}$	51	ИПс	
20	×		52	$y_k (x_{22} - x_{21})$	
21	ИП7		53	x_{21}	
22	+		54	$x_{21} +$	
23	ИП8		55	x_{20}	
24	—	Проверка условия алгоритма $Fx < 0$	56	$F \cdot 10^x$	
25	00		57	Пс	
26	ИПв		58	КИПс	
27	ИП2		59	\leftrightarrow	
28	С/П		60	ИПс	
29	БП	Останов $y_k = 10^{y_{k-1}} -$ $- INT(10^{y_{k-1}})$	61	—	
30			62	P_c	
31			63	В/О	
			64		
			65		
			66		
			67		
			68		
			69		
			70		
			71		
			72		
			73		
			74		
			75		
			76		
			77		
			78		
			79		
			80		
			81		
			82		
			83		
			84		
			85		
			86		
			87		
			88		

После ввода программы необходимо записать в регистры Р0—Р8 параметры алгоритма, в регистр Pa числа выполняемых опытов, в Рс произвольное начальное значение $0 < y_0 < 1$. Нажатием клавиши С/П задается команда очередной i -й имитации про-

хождения алгоритма — вычисление θ_i . По окончании вычисления θ_i выводится на индикатор микрокалькулятора и программа переходит в состояние готовности к очередному вычислению. После выполнения заданной серии опытов (при $i > N$) на табло выводится индикация ЕГГОГ.

Для статистической обработки результатов необходимо перейти к 52 шагу программы (выполнить БП 52), после чего последовательно вводить в регистр X полученные на этапе 1 результаты θ_i ($i = 1, 2, \dots, N$) и нажимать клавишу С/П. Среднее значение θ_k и оценка дисперсии числа элементарных операций $D_{(k)}$ по заданной выборке значений θ_i ($i = 1, 2, \dots, k$) на каждой итерации k программно записываются в регистры Р3 и Р5 соответственно.

Пример. В алгоритме (см. рис. 8.1) заданы параметры операторов: $l_0 = 100$ операций, $l_1 = 150$ операций, $l_2 + l_4 = 80$ операций, $l_3 + l_4 = 70$ операций; условия переходов $x_{10} = 0,4$, $x_{20} = 0,7$; параметры распределения x_1, x_2 : $T = 0,6$, $x_{21} = 0,1$, $x_{22} = 1,0$.

Результаты первых 39 имитаций прохождения алгоритма (при $y_0 = 0,1$) представлены в табл. 8.2. Среднее значение и оценка дисперсии числа операций по этой выборке составляют $\theta = 217$, $D = 4266$.

Таблица 8.2. Результаты статистического моделирования алгоритма

Номер опыта	Число операций	Номер опыта	Число операций	Номер опыта	Число операций
1	180	14	320	27	180
2	180	15	180	28	180
3	180	16	180	29	180
4	180	17	180	30	180
5	320	18	180	31	180
6	180	19	180	32	180
7	180	20	180	33	180
8	180	21	320	34	430
9	180	22	180	35	180
10	180	23	180	36	180
11	180	24	320	37	320
12	320	25	180	38	320
13	180	26	180	39	180

Среднее число операций $\theta = 217$.
Дисперсия числа операций $D = 4266$.

Оценка минимального быстродействия и допустимой загрузки МПС. В процессе проектирования УК ТС корабля для выбора оптимальной структуры системы приходится рассматривать различные варианты состава локальных систем комплекса и распределения задач между ними. При этом выполняются многократные вычисления, связанные с оценкой минимального быстродействия системы или определения допустимой загрузки при выбранном быстродействии.

Задача расчета состоит в том, чтобы для заданной совокупности процессов $1, 2, \dots, M$, каждый из которых характеризуется вектором $z_i = (\theta_i, \lambda_i, v_i, w_i^*)$, где θ_i — трудоемкость алгоритма реализации процесса; λ_i — интенсивность выполнения задач i -го типа; v_i — коэффициент вариации распределения времени реализации алгоритма; w_i^* — предельно допустимое время ожидания начала выполнения задачи, определить минимальное быстродействие системы B_{\min} , обеспечивающее выполнение ограничений $w_i \leq w_i^*$ или, выполняя эти ограничения, распределить процессы по системам с заданным быстродействием B_a .

Минимальное быстродействие системы, обеспечивающее выполнение ограничений $w_i \leq w_i^*$, определяется выражением

$$B_{\min} = 0,5 \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i + \left[0,25 \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i \left(\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i + \frac{2 \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i (1 + v_i^2)}{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i w_i^*} \right)^{1/2} \right].$$

Составим программу вычисления B_{\min} , позволяющую определить минимальное быстродействие системы для любого числа процессов с заданными характеристиками. Введем обозначения промежуточных величин, получаемых на каждой итерации

$$\begin{aligned} a_k &= \lambda_k \theta_k; & A_k &= A_{k-1} + a_k; \\ b_k &= \lambda_k \theta_k^2 (1 + v_k^2); & B_k &= B_{k-1} + b_k; \\ c_k &= \lambda_k \theta_k w_k^*; & C_k &= C_{k-1} + c_k. \end{aligned}$$

Тогда вычисление $B_k \min$ на k -й итерации можно представить в виде

$$B_k \min = \frac{A_k}{2} + \left[\left(\frac{A_k}{2} \right)^2 + \frac{A_k B_k}{2 C_k} \right]^{1/2}.$$

На каждой итерации $k = 1, 2, \dots, M$ задаются (записываются в регистры) характеристики очередного процесса $z_k = (\theta_k, \lambda_k, v_k, w_k^*)$ и производится вычисление минимального быстродействия для всех процессов, включая z_k . Текст программы приведен в табл. 8.3.

Для записи параметров процессов используются регистры Р0—Р3, регистры Р4—Р9 используются для хранения промежуточных результатов вычислений.

При определении допустимого состава задач системы с заданным быстродействием B_a вычисления производятся до тех пор

Таблица 8.3 Программа расчета минимального быстродействия процессора

Шаг программы	Операция	Комментарии	Шаг программы	Операция	Комментарии
00	ИП0	λ_k	21	+	$1 + v_k^2$
01	ИП1	θ_k	22	ИП4	a_k
02	\times	$a_k = \lambda_k \theta_k$	23	\times	$a_k (1 + v_k^2)$
03	П4	$a_k \rightarrow P4$	24	ИП1	θ_k
04	ИП7	A_{k-1}	25	\times	$b_k = a_k \theta_k (1 + v_k^2)$
05	+	A_k	26	ИП8	B_{k-1}
06	П7	$A_k \rightarrow P7$	27	+	B_k
07	2	$A_k/2$	28	П8	$B_k \rightarrow P8$
08	.	$(A_k/2)^2$	29	ИП5	$A_k/2$
09	П5	$A_k/2 \rightarrow P5$	30	\times	$A_k B_k/2$
10	Fx^2	$(A_k/2)^2$	31	ИП9	C_k
11	П6	$(A_k/2)^2 \rightarrow P6$	32		$A_k B_k/(2C_k)$
12	ИП4	a_k	33	П4	$A_k B_k/(2C_k) \rightarrow P4$
13	ИП3	w_k^*	34	ИП5	$A_k/2$
14	\times	$c_k = a_k w_k^*$	35	Fx^2	$(A_k/2)^2$
15	ИП9	C_{k-1}	36	ИП4	$A_k B_k/(2C_k)$
16	+	C_k	37	+	$A_k/2 + A_k B_k/(2C_k)$
17	П9	$C_k \rightarrow P9$	38	$F\sqrt{x}$	$\sqrt{A_k/2 + A_k B_k/(2C_k)}$
18	ИП2	v_k	39	ИП5	$A_k/2$
19	Fx^2	v_k^2	40	+	$B_{k \min}$
20	1	1	41	С/П	Останов

Примечание. При записи программы использованы обозначения операций, принятые в микрокалькуляторе «Б3-34». В микрокалькуляторах других марок операции ИП соответствует П→x, операции П — x→П.

пока $B_{k \min} < B_3$. При $B_{k \min} \geq B_3$ вычисления прекращаются. Процессы, заданные на 1, 2, ..., k — 1 итерациях определяют состав задач системы.

Пример. Пользуясь приведенной программой, определим минимальное быстродействие системы, необходимое для реализации процессов, параметры которых приведены в табл. 8.4, и рас-

Таблица 8.4. Параметры процессов системы

Процесс z_i	Интенсивность λ_i , 1/с	Трудоемкость θ_i , операций	Коэффициенты вариации v_i	Допустимое время ожидания w_i^* , с
z_1	2	4 000	0,6	0,2
z_2	4	12 000	0,5	0,1
z_3	3	8 000	0,7	0,15
z_4	5	15 000	0,8	0,1
z_5	2	10 000	0,8	0,25
z_6	4	15 000	0,6	0,15

пределим процессы по системам с быстродействием $B_3 = 180 000$ операций/с.

Результаты расчетов приведены в табл. 8.5. В ней показана последовательность вычислений и результаты, получаемые на каждой итерации.

Таблица 8.5 Расчеты минимального быстродействия процессора $B_{k \min}$

Итерация k	Процессы, вводимые на k ой итерации	Заданный состав процессов	$B_{k \min}$, операций/с
1	z_1	z_1	15 171
	z_2	z_1, z_2	92 221
	z_3	z_1, z_2, z_3	116 147
	z_4	z_1, z_2, z_3, z_4	214 704
	z_5	z_1, z_2, z_3, z_4, z_5	229 586
	z_6	$z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6$	291 835
2	z_1	z_1	15 171
	z_2	z_1, z_2	92 221
	z_5	z_1, z_2, z_5	109 290
	z_6	z_1, z_2, z_5, z_6	179 096
3	z_3	z_3	45 130
	z_4	z_3, z_4	158 833

Минимальное быстродействие системы, необходимое для реализации всех процессов, составляет $B_{\min} = 291 835$ операций/с. Если быстродействие будет $B_3 = 180 000$ операций/с, то потребуется две системы. Процессы в них могут быть распределены следующим образом: система 1 — процессы z_1, z_2, z_5, z_6 ; система 2 — процессы z_3, z_4 .

Расчет характеристик функционирования систем УК. Варианты построения УК характеризуются различными значениями показателей качества функционирования отдельных систем и всего комплекса в целом. На начальных этапах проектирования необходимо иметь предварительные оценки таких характеристик, как среднее время ожидания W и среднее время выполнения задач U . Эти характеристики могут быть рассчитаны с помощью программируемых микрокалькуляторов.

В табл. 8.6 приводится программа вычисления времени ожидания при бесприоритетной дисциплине обслуживания заявок

$$W^{БП} = \frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i^2 (1 + v_i^2)}{2B \left(B - \sum_{i=1}^M \lambda_i \theta_i \right)}.$$

Вычисления имеют итеративный характер. На каждой итерации в регистры Р0—Р2 записываются параметры очередного процесса.

Таблица 8.6. Программа вычисления среднего времени ожидания при бесприоритетном обслуживании заявок

Шаг программы	Операция	Комментарии	Шаг программы	Операция	Комментарии
00	ИП0	λ_k	15	ИП8	$\sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i \theta_i^2 (1 + v_i^2)$
01	ИП1	θ_k	16	+	$\sum_{i=1}^k \lambda_i \theta_i^2 (1 + v_i^2)$
02	×	$\lambda_k \theta_k$	17	П8	$\sum_{i=1}^k \lambda_i \theta_i^2 (1 + v_i^2) \rightarrow P8$
03	П4	$\lambda_k \theta_k \rightarrow P4$	18	ИП3	B
04	ИП7	$\sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i \theta_i$	19	ИП7	$\sum_{i=1}^k \lambda_i \theta_i$
05	+	$\sum_{i=1}^k \lambda_i \theta_i$	20	—	$B - \sum_{i=1}^k \lambda_i \theta_i$
06	П7	$\sum_{i=1}^b \lambda_i \theta_i \rightarrow P7$	21	ИП3	B
07	ИП2	v_k	22	×	$B \left(B - \sum_{i=1}^k \lambda_i \theta_i \right)$
08	Fx ²	v_k^2	23	2	2
09	1	1	24	×	$2B \left(B - \sum_{i=1}^k \lambda_i \theta_i \right)$
10	+	$1 + v_k^2$	25	ИП8	$\sum_{i=1}^k \lambda_i \theta_i^2 (1 + v_i^2)$
11	ИП4	$\lambda_k \theta_k$	26	↔	
12	×	$\lambda_k \theta_k (1 + v_k^2)$	27		$W_k^{\text{БП}}$
13	ИП1	θ_k	28	С/П	Останов
14	×	$\lambda_k \theta_k^2 (1 + v_k^2)$			

Полученные результаты представляют среднее время ожидания для различного состава реализуемых системой процессов.

Аналогичным образом могут быть составлены программы вычисления среднего времени ожидания при других дисциплинах обслуживания заявок.

§ 8.3. Использование диалоговых средств вычислительной техники

Персональные микро-ЭВМ (ПЭВМ), обеспечивающие возможность использования алгоритмических языков программирования и взаимодействия с персоналом с помощью электронно-лучевых дисплеев, позволяет в значительной степени автоматизировать различные этапы проектирования систем управления. Достаточно большая информационная емкость ОЗУ [(32—128) К байт] и возможность использования внешних запоминающих устройств (кассетных магнитофонов, накопителей на гибких магнитных дисках) позволяют применять ПЭВМ для выполнения сложных расчетов, имитационного моделирования систем, хранения справочных данных и поиска информации, подготовки текстовых документов и других работ.

ПЭВМ ориентированы на разработку и выполнение прикладных программ не программистом-профессионалом, а специалистом в прикладной области. Поэтому наиболее популярным языком программирования ПЭВМ является БЕЙСИК, хотя большая емкость ОЗУ позволяет применять и такие языки высокого уровня, как ПАСКАЛЬ, ФОРТРАН, КОБОЛ и другие. БЕЙСИК позволяет программировать большой круг задач, сочетая в себе простоту и легкость для изучения и понимания с достаточными для многих приложений возможностями.

Использование для программирования задач языка БЕЙСИК позволяет построить программы таким образом, что проектировщику не приходится заниматься программированием задач в процессе взаимодействия с ЭВМ. Располагая пакетом программ проектирования, обеспечивающих ввод заданий и параметров задач, выполнение необходимых расчетов и предварительный анализ получаемых результатов, разработчик системы на естественном языке получает инструкции для уточнения заданий, результаты расчетов и их анализа. Ввод задач расчета и их параметров в ЭВМ, как правило, требует от разработчика лишь задания числовых информации без какого-либо ее кодирования или другой предварительной обработки. В настоящем параграфе рассматриваются особенности использования ПЭВМ в процессе проектирования УК сложных корабельных систем на примерах задач распределения процессов и организации работы УК, построения регрессионных моделей УО и статистического моделирования алгоритмов управления и контроля. Программное обеспечение, приводимое в Приложениях, разработано для микро-ЭВМ «Электроника Д3-28», работающей в комплекте с электронно-лучевым дисплеем или пи-

шущей машиной, позволяющими использовать БЭИСИК-интерпретатор (вариант ЗА). При использовании микро-ЭВМ с другими вариантами системы БЭИСИК (например, БЭИСИК-программ микро-ЭВМ «Электроника-60») приведенные программы требуют незначительных изменений.

Распределение процессов и организация работ УК Общая задача проектирования микропроцессорного УК формулируется следующим образом. На УК возлагается задача реализации M процессоров управления и контроля за группой корабельных объектов. В результате алгоритмизации процессов управления и анализа динамики объектов для каждой задачи $i = 1, 2, \dots, M$ должны быть определены: трудоемкости алгоритмов обработки, информации при реализации на процессорах различных типов ($j = 1, 2, \dots, k$) θ_{ij} , коэффициенты вариации числа выполняемых процессорных операций v_{ij} ; интенсивности потоков заявок на выполнение задач λ_i , предельно допустимое среднее время ожидания w_i^* . Быстродействие процессоров различных типов $j = 1, 2, \dots, k$ различно и составляет соответственно B_1, B_2, \dots, B_k .

Требуется рассмотреть варианты построения УК на процессорах различного типа. Для каждого варианта определить минимальное число процессоров, обеспечивающих работу системы в реальном времени, распределить задачи управления по процессорам и определить порядок выполнения задач в подсистемах (выбрать дисциплины обслуживания). Весь процесс решения поставленной задачи разбивается на ряд этапов, общую последовательность которых можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 8.4

На первом этапе производится оценка минимального быстродействия процессора, необходимого для выполнения всех M процессов в условиях заданных ограничений.

Если быстродействие имеющихся процессоров больше полученного значения B_{min} , то производится выбор дисциплины, обеспечивающей выполнение ограничений $w_i < w_i^*, i = 1, 2, \dots, M$.

Если такую дисциплину удается отыскать, то проектирование заканчивается — получена однопроцессорная система, выполняющая в реальном времени все M процессов. Если же быстродействие процессоров B меньше рассчитанного для всех процессов B_{min} или не удается определить дисциплину обслуживания, обеспечивающую выполнение ограничений реального времени, то однопроцессорная система не может быть построена и необходимо рассмотреть варианты мультипроцессорных комплексов. С этой целью все множество процессов M разбивается на непересекающиеся подмножества M_1, M_2, \dots, M_t таким образом, чтобы для каждого из них выполнялось условие $B_j \min < B, j = 1, 2, \dots, t$.

После разделения процессов на группы (распределения по процессорам) для каждой из них необходимо определить дисциплину обслуживания, обеспечивающую работу системы в реальном времени. Если для какой-либо подсистемы $j = 1, 2, \dots, t$ такую дисциплину найти не удается, то необходимо перераспределить про-

цессы (изменить состав или число групп). Этапы распределения процессов и выбора дисциплины обслуживания трудно формализуемы, поэтому их выполнение производится в режиме диалога разработчика с ЭВМ. При этом трудоемкую вычислительную работу выполняет ЭВМ, а на разработчика возлагается задача принятия решений о выборе состава групп, дисциплины обслуживания и другие задачи творческого характера.

Программное обеспечение ПЭВМ, предназначенное для решения этих задач (Приложение 1) содержит ряд программ, обеспе-

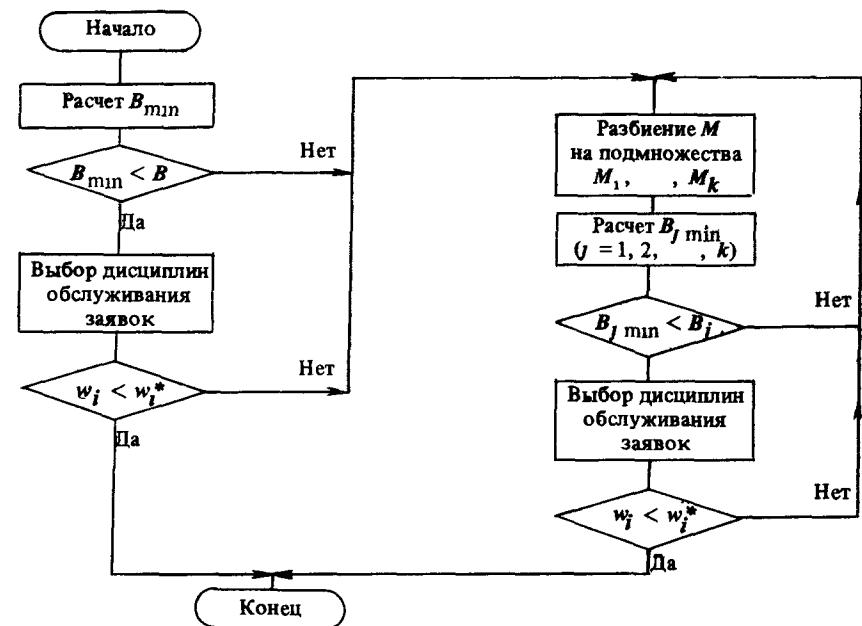


Рис. 8.4 Последовательность этапов проектирования УК с использованием персональной микро ЭВМ

чивающих выполнение расчетов и диалог с разработчиком. Выполнение программ (при задании оператора RUN) начинается с диалога, в процессе которого задаются общие параметры задачи проектирования — число вариантов, определяемое числом различных типов рассматриваемых процессоров k , и число процессов M , возлагаемых на проектируемый комплекс. После ответа на вопросы ЭВМ «Число вариантов проектирования?» и «Число процессов?» разработчику выводится перечень программ, предоставляемых в его распоряжение. 1. Задание параметров процессов. 2. Задание состава процессов. 3. Задание приоритетов процессов. 4. Расчет минимального быстродействия процессора. 5. Расчет среднего времени ожидания при бесприоритетном обслуживании. 6. Расчет среднего времени ожидания в системе с относительными приоритетами $W_k(\text{ОП})$. 7. Расчет среднего времени ожидания

в системе с абсолютными приоритетами W_k (АП). 8. Расчет среднего времени ожидания в системе со смешанными приоритетами W_k (СП). Для обращения к какой-либо программе необходимо указать номер программы и вариант проектирования.

Исходные данные для расчетов записываются в память ЭВМ с помощью программы 1 «Задание параметров процессов». Используя клавиатуру, разработчик последовательно задает значения параметров процессов, выполняя поступающие от ЭВМ инструкции:

Процесс 1

Введите значение Q (трудоемкость алгоритма)
 " " L (интенсивность потока)
 " " N (коэффициент вариации)
 " " W (ограничение времени ожидания)

Процесс 2

.....
 Процесс M

Завершается программа задания параметров выводом перечня программ и переходом ЭВМ в состояние ожидания номера очередной программы. При необходимости рассмотрения нескольких вариантов задач проектирования программа 1 повторяется с указанием номера очередного варианта. После задания параметров процессов проектируемой системы можно приступить к выполнению необходимых расчетов.

Расчеты минимального быстродействия процессора и среднего времени ожидания по программам 4, 5, 6, 7, 8 могут производиться для любого состава из числа процессов, заданных по программе 1. С этой целью предусмотрена программа 2 «Задание состава процессов». При обращении к программам 4—8 расчеты производятся с использованием параметров тех процессов, состав которых был задан последний раз.

Для расчета времени ожидания в системах с приоритетным обслуживанием необходимо предварительно обратиться к программме 3 «Задание приоритетов процессов». Указание групп процессов в системе со смешанными приоритетами производится в процессе выполнения программы 8 «Расчет времени ожидания при смешанных приоритетах». С этой целью разработчику выводятся вопросы: «Общее число процессов в системе со смешанными приоритетами?», «Число процессов с абсолютными приоритетами?», «Число процессов с относительными приоритетами?». Отвечая на эти вопросы, разработчик полностью определяет задачу расчета для системы со смешанными приоритетами.

Выполнение каждой программы 1—8 заканчивается выводом перечня программ и переходом ЭВМ в состояние ожидания задания очередной программы.

Построение регрессионных моделей УО. Формулировка задачи и методика построения регрессионных моделей приведены в § 6.5. Рассмотрим задачу построения модели в условиях пассивного экс-

перимента, связанную с наиболее трудоемкими процессами расчета и анализа.

Процесс построения модели по данным эксперимента можно представить в виде последовательности этапов, приведенной на рис. 8.5. Построение начальной модели предполагает представление исследуемого объекта в виде так называемого «черного ящика» (рис. 8.6). Целью этого этапа является определение со-

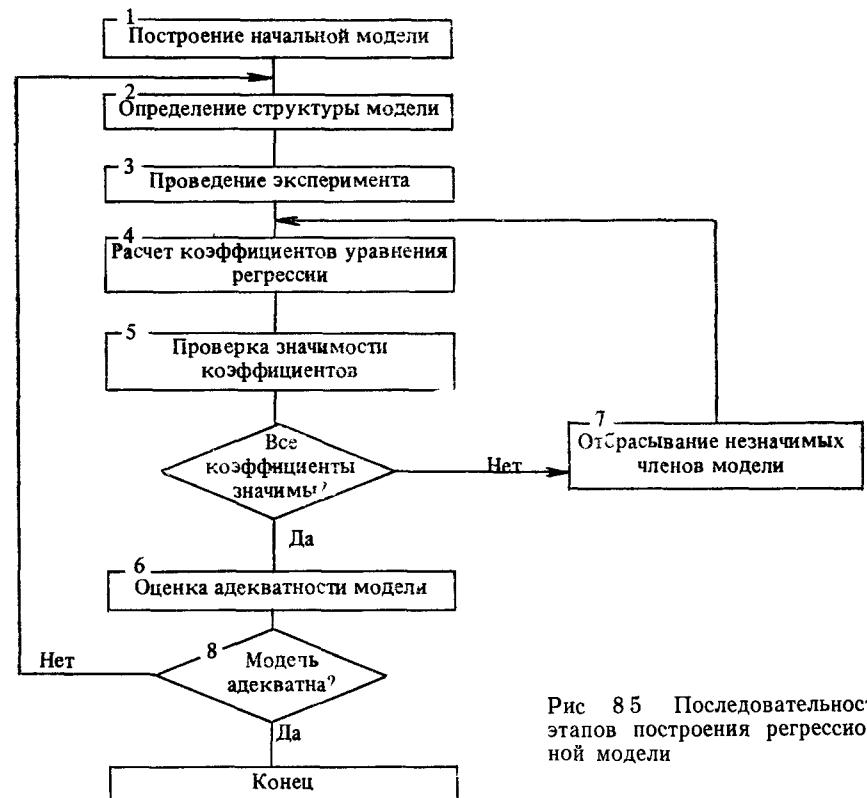


Рис 8.5 Последовательность этапов построения регрессионной модели

ства входных и выходных величин, аналитическую зависимость между которыми предстоит отыскать в процессе построения модели.

На втором этапе определяется структура модели, т. е. выбирается число и состав членов аппроксимирующего полинома. После выбора структуры модели, определяющей минимальное число необходимых опытов, возможно проведение экспериментов и расчет коэффициентов управления регрессии (этапы 3, 4).

На этапах 5 и 6 производится статистическая обработка результатов расчета, имеющая целью определение значимости полученных коэффициентов и адекватности модели. Если среди найденных коэффициентов уравнения оказываются статистически

незначимые, то возможно упрощение модели путем отбрасывания незначимых членов уравнения. В условиях пассивного эксперимента такое упрощение модели требует повторного расчета коэффициентов уравнения.

Проверка адекватности позволяет оценить пригодность полученной модели. Если полученная оценка свидетельствует о неадекватности модели, то требуется уточнение аппроксимирующего полинома и повторение всего процесса исследования.

Этапы 1 и 2 трудно формализуемы, поэтому в диалоговой процедуре построения регрессионных моделей с использованием ПЭВМ

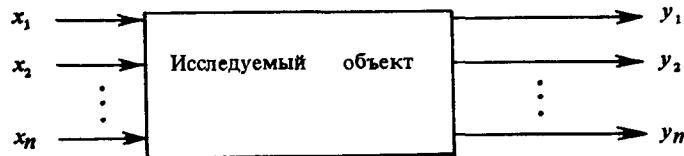


Рис 8.6 Начальная модель объекта

они выполняются исследователем с учетом требований к разрабатываемой модели, априорной информации об исследуемом объекте, возможности получения экспериментальных данных и т. п. На ПЭВМ возлагаются задачи расчета и анализа, связанные с выполнением этапов 4, 5, 6, и обеспечение диалога при вводе в память ЭВМ необходимых для расчета данных. Программа построения регрессионных моделей с использованием ПЭВМ приведена в Приложении 2.

Перед началом работы в текст программы через оператор построчно записывается матрица условий опыта X (см. § 6.5). Таблицы значений t -критерия Стьюдента и F -критерия Фишера, используемые в процессе статистической обработки результатов расчета, вводятся с магнитной ленты по запросам ЭВМ (строки 1517, 1518, 1571).

В процессе диалога по запросам ЭВМ указываются: число экспериментов (строка 5), число независимых переменных (строка 6), число параллельных опытов (строка 8), полученные в эксперименте значения выходной величины (элементы повторяющихся опытов — строки 1384—1388). Для проверки правильности ввода данных на экран дисплея выводятся таблицы значений выходной величины «Результаты опытов» и входных величин «Матрица условий опыта». При этом исследователю предоставляется возможность корректировки данных в режиме повторного ввода.

В Приложениях 2 и 3 приводятся текст программы и распечатка результатов вывода на экран дисплея при решении рассмотренной в § 6.5 задачи построения зависимости момента сопротивления на валу судовой энергетической установки с ВРШ от числа оборотов вала и шага винта.

Статистическое моделирование алгоритмов управления и контроля. Целью моделирования является оценка трудоемкости алгоритмов (см. § 7.2). В Приложении 4 приводится текст программы моделирования при расчетах среднего значения и дисперсии числа процессорных операций для алгоритма, рассмотренного в примере § 7.2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в учебнике принципы построения и методы расчета систем управления корабельными объектами представляют собой лишь часть средств, используемых в процессе системного проектирования управляющих комплексов сложных корабельных систем. Вместе с тем они являются основой построения комплексных корабельных систем управления на базе микропроцессорных средств обработки информации.

Благодаря расширению номенклатуры микропроцессорных комплектов БИС, созданию унифицированных функциональных модулей, встраиваемых микро-ЭВМ и запоминающих устройств большой емкости, МПС в самом ближайшем будущем займут ведущее положение среди устройств и систем, применяемых для решения задач управления, контроля, диагностики и прогнозирования состояния судовых технических средств. Для построения на их основе перспективных децентрализованных и распределенных систем обработки данных и управления корабельными объектами необходимо взаимодействующие подсистемы управления отдельными объектами рассматривать как единое целое — управляющий комплекс.

Основу системного проектирования управляющих комплексов сложных корабельных систем составляют вычислительные методы, ориентированные на широкое использование ЭВМ. Внедрению таких методов в значительной степени способствует использование ЭВМ индивидуального пользования, сочетающих высокую производительность с простотой доступа для широкого круга разработчиков систем.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

```

50 INPUT'ЧИСЛО ВАРИАНТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ? 'C
51 LETC=C-1
52 PRINT'INPUT' ЧИСЛО ПРОЦЕССОВ ? 'N
53 LETH=H-1
58 DIM Y1(H),Y2(H),Y3(H),Y4(H)
59 DIM A(H,C),V1(H)
60 DIM L(H,C),Q(H,C),N(H,C),W(H,C),K(H),L1(H,C),Q1(H,C),N1(H,C),W1(H,C)
61 DIM Z1(J,C),F1(J),F2(J)
65 GOTO1300
160 REM ПОДПРОГРАММА ВВОДА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ СТРОКИ 200-250
105 PRINT!2.0!
119 FORI=0TOH
120 PRINT:PRINT
122 PRINT'ПРОЦЕСС Z''I+1
123 PRINT
128 NEXT I
129 GOTO1300
140 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT'ПРОГРАММА ЗАДАНИЯ СОСТАВА ПРОЦЕССОВ'
141 PRINT:PRINT:PRINT
148 PRINT'УКАЗАТЕ СОСТАВ ПРОЦЕССОВ':PRINT
149 PRINT'ЕСЛИ ПРОЦЕСС I ВХОДИТ В СОСТАВ ПРОЦЕССОВ, ТО A=1, ЕСЛИ НЕТ, ТО A=0'
150 LETV=-1
151 PRINT!2.0!
152 FORI=0TOH
153 PRINT
154 PRINT'ПРОЦЕСС Z''I+1
155 INPUT'A=?' A1
156 LETA(I,B)=A1
157 IF A1=0 GOTO170
173 PRINT'ПРОВЕРЬТЕ ПРАВИЛЬНОСТЬ ЗАДАНИЯ СОСТАВА ПРОЦЕССОВ':PRINT
174 GOSUB1100
182 PRINT
185 INPUT'ЕСТЬ ОШИБКИ ? (ДА-1,НЕТ-0)'V
186 IFV=1GOTO 148
190 GOTO1300
301 LETM=V1(B)+1
303 PRINT:PRINT:PRINT'ПРОГРАММА ЗАДАНИЯ ПРИОРИТЕТОВ ПРОЦЕССОВ':PRINT:PRINT
304 FORI=0TOH-1
305 LETY1(I)=Q1(I,B):LETY2(I)=L1(I,B):LETY3(I)=N1(I,B):LETY4(I)=W1(I,B)
306 NXFTI
310 PRINT:PRINT
312 PRINT' ПРОЦЕСС Q L N W*:PRINT
313 FORI=0TOV1(B)
315 PRINT'2.0!';I+1;;;;;16.0!Y1(I);;12.2!Y2(I);;11.3!Y3(I);;Y4(I)
317 NEXTI
319 PRINT:PRINT
320 PRINT'УКАЗАТЕ ПРИОРИТЕТЫ ПРОЦЕССОВ'
328 PRINT'PRINT!2.0!
330 INPUT'ВСЕГО ПРОЦЕССОВ M= ? 'M
332 FOR I=0TOH-1
335 PRINT' ПРОЦЕСС Z''I+1:INPUT' K= ? 'Y
357 PRINT'ПРОВЕРЬТЕ ПРАВИЛЬНОСТЬ ЗАДАНИЯ ПРИОРИТЕТОВ'
360 GOSUB1100
370 PRINT'INPUT'ЕСТЬ ЛИ ОШИБКИ ? (ДА-1,НЕТ-0)'V
375 IFV=1GOTO310
380 RETURN
400 LETS1=0:LETS2=0:LETS3=0
410 PRINT
420 PRINT!3.3!
430 FOR I=0TOV1(B)
440 LETK1=L1(I,B)*Q1(I,B)
450 LETS2=S2+(L1(I,B)*Q1(I,B)-2)*(1+N1(I,B)-2)
460 LETS1=S1+K1
470 LETS3=S3+K1*W1(I,B)
480 NEXTI
485 LETV=.5*S1+SQR(.25*S1*(S1+2*S2/S3))
490 PRINT:PRINT!F1.3!B(MIN)='V
495 GOTO1300
500 PRINT:PRINT:PRINT
505 PRINT'ПРОГРАММА ВЫЧИСЛЕНИЯ W(FIFO)'
515 PRINT:PRINT:PFINT
518 PRINT:PRINT'ПРОГРАММА ВЫЧИСЛЕНИЯ W(ОН)'
524 PRINT:PRINT
525 PFINT'K
526 PRINT
528 LETD4=V1(B)
530 FORJ=0TOV1(B)
540 LETD3=V1(B):LETD4=V1(B):GOSUB1600
545 PRINT:PRINT:PRINT
550 PRINT!F1.4!' W(FIFO)='W2,'R2=R2
555 PRINT:PRINT
560 GOTO1300
565 PRINT:PRINT'ПРОГРАММА ВЫЧИСЛЕНИЯ W(ОН)'
570 PRINT:PRINT
575 LETD4=V1(B)
580 GOTO1300
585 PRINT:PRINT:PRINT'ПРОГРАММА ВЫЧИСЛЕНИЯ W(ОН)'
590 PRINT:PRINT
595 PRINT!2.0!J+1,!F1.4!W2;;;'ОН'
600 PRINT:PRINT:PRINT'ПРОГРАММА ВЫЧИСЛЕНИЯ W(ОН)'
605 PRINT:PRINT
610 PRINT:PRINT
615 PRINT:PRINT:PRINT
620 PRINT:PRINT
625 PRINT:PRINT
628 LETD4=V1(B)
630 FORJ=0TOV1(B)
640 GOSUB1270
645 PRINT!2.0!J+1,!F1.4!W7;;;;;'ОН'
650 PRINT:PRINT
655 PRINT:PRINT
660 PRINT:PRINT:PRINT
665 PRINT:PRINT
670 GOTO1300
675 PRINT:PRINT
680 GOTO1300
685 PRINT:PRINT:PRINT'ПРОГРАММА ВЫЧИСЛЕНИЯ W(ОН)'
690 GOSUB1200
695 PRINT!2.0!J+1,!F1.4!W7;;;;;'ОН'
700 PRINT:PRINT:PRINT
705 PRINT:PRINT:PRINT
710 PRINT:PRINT
715 PRINT:PRINT
720 LETD3=V1(B):LETD4=V1(B):GOSUB1600
724 PRINT:PRINT
728 INPUT'ВВЕДИТЕ B2 'B2
729 PRINT:PRINT
730 FORJ=0TOV1(B)
734 PRINT:PRINT
738 INPUT'ВВЕДИТЕ B2 'B2
742 PRINT:PRINT
746 INPUT'ВВЕДИТЕ B2 'B2
750 GOTO1300
754 PRINT:PRINT
758 INPUT'ВСЕГО ПРОЦЕССОВ M= ? 'M
762 PRINT:PRINT:PRINT
766 INPUT'ЧИСЛО ПРОЦЕССОВ С АБСОЛЮТНЫМИ ПРИОРИТЕТАМИ M1= ? 'M1
770 INPUT'ЧИСЛО ПРОЦЕССОВ С ОТНОСИТЕЛЬНЫМИ ПРИОРИТЕТАМИ M2= ? 'M2
774 PRINT:PRINT
778 INPUT'ВСЕГО ПРОЦЕССОВ M= ? 'M
782 PRINT:PRINT:PRINT
786 INPUT'ЗНАЧЕНИЯ К ПРИ СМЕЩАННЫХ ДИСКИПЛИНАХ ОБСЛУЖИВАНИЯ'
790 PRINT:PRINT
794 INPUT'ЗНАЧЕНИЯ К - ОТ 1 ДО M1 - ДЛЯ АБСОЛЮТНЫХ ПРИОРИТЕТОВ'
798 PRINT:PRINT
802 INPUT'ЗНАЧЕНИЯ К - ОТ M1+1 ДО M1+M2 - ДЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПРИОРИТЕТОВ'
806 PRINT:PRINT
810 PRINT:PRINT:PRINT
814 INPUT'ОШИБКА ПРИ ВВЕДЕНИИ':PRINT:GOTO810
818 PRINT:PRINT
822 PRINT:PRINT
826 PRINT:PRINT
830 PRINT:PRINT
834 INPUT'M1+M2=M THEN PRINT:PRINT' ОШИБКА ПРИ ВВЕДЕНИИ':PRINT:GOTO810
838 PRINT:PRINT
842 PRINT:PRINT
846 PRINT:PRINT
850 PRINT:PRINT
854 PRINT:PRINT
858 PRINT:PRINT
862 PRINT:PRINT
866 PRINT:PRINT
870 PRINT:PRINT
874 PRINT:PRINT
878 PRINT:PRINT
882 PRINT:PRINT
886 PRINT:PRINT
890 GOSUB1200
894 PRINT'2.0!J+1,!F1.4!W7;;;;;'ОН'
898 LETD3=M1:GOSUB1600:LETR3=R1
902 LETD3=M1+M2:GOSUB1600:LETR4=R1
906 LETD3=M-1:GOSUB1600:LETR5=R2
910 LETD4=R3*Q1(I,B)+W2
914 LETD3=V1(B):LETD4=V1(B):GOSUB1675
918 LETD3=M1:LETR3=R1/(1-R1)/B2
922 LETD3=W3/2/(1-R4)/(1-R5)
926 LETD3=R3/(1-R3)/B2
930 LETD3=M1:LETR3=R1/(1-R1)/B2
934 LETD3=R3*Q1(J,B)+W3
938 LETD4=M1+M2-1
942 LETD4=M1+M2-1
946 FORJ=M1+M2-1
950 FORJ=M1+M2-1
954 FORJ=M1+M2-1
958 FORJ=M1+M2-1
962 FORJ=M1+M2-1
966 FORJ=M1+M2-1
970 FORJ=M1+M2-1
974 FORJ=M1+M2-1
978 FORJ=M1+M2-1
982 FORJ=M1+M2-1
986 FORJ=M1+M2-1
990 FORJ=M1+M2-1
994 FORJ=M1+M2-1
998 FORJ=M1+M2-1
1002 FORJ=M1+M2-1
1006 FORJ=M1+M2-1
1010 FORJ=M1+M2-1
1014 FORJ=M1+M2-1
1018 FORJ=M1+M2-1
1022 FORJ=M1+M2-1
1026 FORJ=M1+M2-1
1030 FORJ=M1+M2-1
1034 FORJ=M1+M2-1
1038 FORJ=M1+M2-1
1042 FORJ=M1+M2-1
1046 FORJ=M1+M2-1
1050 FORI=0TOH
1054 PRINT'ПРОЦЕСС Q L N W*'
1058 PRINT:PRINT
1062 PRINT'2.0!I+1;;;;;16.0!Q(I,B);;12.3!L(I,B),,N(I,B);;W(I,B):COTO1062
1066 NEXTI
1070 INPUT'ЗАПИСАВ ДАННЫЕ , НАЙМите 2ПС2'V
1075 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:RETURN
1100 PRINT:PRINT:PRINT'СОСТАВ ПРОЦЕССОВ'
1105 IFV1(B)<0 THEN GOTO1135
1110 PRINT:PRINT
1115 PRINT'ПРОЦЕСС Q L N W*'
1120 PRINT
1125 FORI=0TOV1(B)
1130 PRINT'2.0!I+1;;;;;16.0!Q1(I,B);;12.3!L1(I,B);;N1(I,B);;W1(I,B)
1135 NEXTI
1140 RETURN
1210 LETD3=J:GOSUB1600
1220 LETD4=J:GOSUB1675
1230 LETW7=A2+W3/(2*(1-R1)*(1-R2))
1240 LETD3=J:GOSUB1600
1250 LETD3=V1(B):LETD4=V1(B):GOSUB1675
1260 LETD3=V1(B):LETD4=V1(B):GOSUB1600
1275 LETD3=V1(B):LETD4=V1(B):GOSUB1675
1280 LETW2=W3/(2*(1-R1)*(1-R2))
1285 RETURN
1304 PRINT

```

```

1305 PRINT' АДРЕСА ПРОГРАММ ПАКЕТА'
1306 PRINT
1308 PRINT
1309 PRINT' 1. ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ'
1310 PRINT' 2. ЗАДАНИЕ СОСТАВА ПРОЦЕССОВ'
1312 PRINT' 3. ЗАДАНИЕ ПРИОРИТЕТОВ ПРОЦЕССОВ'
1313 PRINT' 4. РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОРА'
1314 PRINT' 5. РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ W(FIFO)'
1315 PRINT' 6. РАСЧЕТ W(ОН/К)'
1316 PRINT' 7. РАСЧЕТ W(АН/К)'
1320 PRINT' 8. РАСЧЕТ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПРИ СМЕШАННЫХ ПРИОРИТЕТАХ'
1348 PRINT
1349 PRINT
1350 INPUT' УКАЗИТЕ НОМЕР ПРОГРАММЫ 'V
1355 PRINT:INPUT' УКАЗИТЕ НОМЕР ВАРИАНТА 'B
1356 LETE=B-1
1360 ON 1360+V
1361 GOTO100
1362 GOTO140
1363 GOSUB300:GOTO1360
1364 GOTO400
1365 GOTO500
1366 GOSUB357:GOTO600
1367 GOSUB357:GOTO700
1368 GOTO800
1610 LETR1=0
1620 IFD3=0GOTO1650
1625 FORI=0TO3-1
1730 LETW7=A2+W3/(2*(1-R1)*(1-R2))
1760 RETURN
1770 LETD3=J:GOSUB1600
1775 GOSUB1675
1630 LETR1=R1+L1(I,B)*Q1(I,B)/B2
1640 NEXTI
1650 LETR2=R1+L1(D3,B)*Q1(D3,B)/B2
1660 LETA2=(R1*Q1(J,B)/B2)/(1-R1)
1670 RETURN
1675 LETW3=0
1680 FORI=0TO4
1685 LETW3=W3+L1(I,B)*Q1(I,B)-2*(1+N1(I,B)-2)
1687 NEXTI
1690 LETW3=W3/B2-2
1695 RETURN
1710 LETD3=J:GOSUB1600
1720 LETD4=J:GOSUB1675
1780 LETW2=W3/(2*(1-R1)*(1-R2))
1785 RETURN

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

```

5 INPUT 'ЧИСЛО ЭКСПЕРИМЕНТОВ M=' M
6 INPUT' ВВЕДИТЕ ЧИСЛО ПЕРЕМЕННЫХ N=' N
7 LETM=M-1
8 INPUT 'ЧИСЛО ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ОПЫТОВ K=' K1
9 LETK1=K1-1
10 DIM Y2 (K1,M)
11 LETO9 = K1
15 DIM Y(N,N+N1)
20 DIM X(M,M),X1(M,M),X2(M,M)
25 DIM X3(M,M),X4(M,M)
26 DIM Y1(M)
27 DIM G(M)
28 DIM S2(M),B1(M),T(50)
29 DIM T1(30,12)
30 FOR I=0TO M
32 FORJ=0 TO N
34 READ X(I,J)
36 NEXT J
38 NEXTI
40 GOSUB 1380
41 PRINT 'ПРОВЕРЬТЕ ПРАВИЛЬНОСТЬ ВВОДА. ЕСЛИ ПРАВИЛЬНО -1, НЕ ПРАВИЛЬНО -0'
42 FOR I=0 TO M: FOR J=0 TO K1:PRINT !2.3! Y2(J,I) !2.3!:NEXT J:PRINT: NEXT I
43 INPUT W: IF W=0 THEN 48
44 PRINT 'ПОВТОРИТЕ ВВОД'
45 GOTO 40
48 GOSUB 1396
49 FOR I=0 TO M
50 FORJ=0 TO N
50 LETX1(J,I)=X(I,J)
70 NEXT J
81 PRINT:PRINT 'ТРАНСПОНИРОВАННАЯ МАТРИЦА X(I,J)'
82 FOR J=0 TO N
83 FOR J=0TO N
84 PRINT '3.4' X1(I,J),
85 NEXT J
86 PRINT
87 NFYT I
88 PRINT:PRINT
90 FORI=0 TO N
91 LETK1=K1-1
92 FOR I=0 TO M
93 FOR J=0 TO N
94 LETA1=0
95 LETA2=0
96 LETA3=0
97 LETA4=0
98 LETA5=0
99 LETA6=0
100 LETA7=0
101 LETA8=0
102 LETA9=0
103 LETA10=0
104 LETA11=0
105 LETA12=0
106 LETA13=0
107 LETA14=0
108 LETA15=0
109 LETA16=0
110 LETA17=0
111 LETA18=0
112 LETA19=0
113 LETA20=0
114 LETA21=0
115 LETA22=0
116 LETA23=0
117 LETA24=0
118 LETA25=0
119 LETA26=0
120 LETA27=0
121 LETA28=0
122 LETA29=0
123 LETA30=0
124 LETA31=0
125 LETA32=0
126 LETA33=0
127 LETA34=0
128 LETA35=0
129 LETA36=0
130 LETA37=0
131 LETA38=0
132 LETA39=0
133 LETA40=0
134 LETA41=0
135 LETA42=0
136 LETA43=0
137 LETA44=0
138 LETA45=0
139 LETA46=0
140 LETA47=0
141 LETA48=0
142 LETA49=0
143 LETA50=0
144 LETA51=0
145 LETA52=0
146 LETA53=0
147 LETA54=0
148 LETA55=0
149 LETA56=0
150 LETA57=0
151 LETA58=0
152 LETA59=0
153 LETA60=0
154 LETA61=0
155 LETA62=0
156 LETA63=0
157 LETA64=0
158 LETA65=0
159 LETA66=0
160 LETA67=0
161 LETA68=0
162 LETA69=0
163 LETA70=0
164 LETA71=0
165 LETA72=0
166 LETA73=0
167 LETA74=0
168 LETA75=0
169 LETA76=0
170 LETA77=0
171 LETA78=0
172 LETA79=0
173 LETA80=0
174 LETA81=0
175 LETA82=0
176 LETA83=0
177 LETA84=0
178 LETA85=0
179 LETA86=0
180 LETA87=0
181 LETA88=0
182 LETA89=0
183 LETA90=0
184 LETA91=0
185 LETA92=0
186 LETA93=0
187 LETA94=0
188 LETA95=0
189 LETA96=0
190 LETA97=0
191 LETA98=0
192 LETA99=0
193 LETA100=0
194 LETA101=0
195 LETA102=0
196 LETA103=0
197 LETA104=0
198 LETA105=0
199 LETA106=0
200 LETA107=0
201 LETA108=0
202 LETA109=0
203 LETA110=0
204 LETA111=0
205 LETA112=0
206 LETA113=0
207 LETA114=0
208 LETA115=0
209 LETA116=0
210 LETA117=0
211 LETA118=0
212 LETA119=0
213 LETA120=0
214 LETA121=0
215 LETA122=0
216 LETA123=0
217 LETA124=0
218 LETA125=0
219 LETA126=0
220 LETA127=0
221 LETA128=0
222 LETA129=0
223 LETA130=0
224 LETA131=0
225 LETA132=0
226 LETA133=0
227 LETA134=0
228 LETA135=0
229 LETA136=0
230 LETA137=0
231 LETA138=0
232 LETA139=0
233 LETA140=0
234 LETA141=0
235 LETA142=0
236 LETA143=0
237 LETA144=0
238 LETA145=0
239 LETA146=0
240 LETA147=0
241 LETA148=0
242 LETA149=0
243 LETA150=0
244 LETA151=0
245 LETA152=0
246 LETA153=0
247 LETA154=0
248 LETA155=0
249 LETA156=0
250 LETA157=0
251 LETA158=0
252 LETA159=0
253 LETA160=0
254 LETA161=0
255 LETA162=0
256 LETA163=0
257 LETA164=0
258 LETA165=0
259 LETA166=0
260 LETA167=0
261 LETA168=0
262 LETA169=0
263 LETA170=0
264 LETA171=0
265 LETA172=0
266 LETA173=0
267 LETA174=0
268 LETA175=0
269 LETA176=0
270 LETA177=0
271 LETA178=0
272 LETA179=0
273 LETA180=0
274 LETA181=0
275 LETA182=0
276 LETA183=0
277 LETA184=0
278 LETA185=0
279 LETA186=0
280 LETA187=0
281 LETA188=0
282 LETA189=0
283 LETA190=0
284 LETA191=0
285 LETA192=0
286 LETA193=0
287 LETA194=0
288 LETA195=0
289 LETA196=0
290 LETA197=0
291 LETA198=0
292 LETA199=0
293 LETA200=0
294 LETA201=0
295 LETA202=0
296 LETA203=0
297 LETA204=0
298 LETA205=0
299 LETA206=0
300 LETA207=0
301 LETA208=0
302 LETA209=0
303 LETA210=0
304 LETA211=0
305 LETA212=0
306 LETA213=0
307 LETA214=0
308 LETA215=0
309 LETA216=0
310 LETA217=0
311 LETA218=0
312 LETA219=0
313 LETA220=0
314 LETA221=0
315 LETA222=0
316 LETA223=0
317 LETA224=0
318 LETA225=0
319 LETA226=0
320 LETA227=0
321 LETA228=0
322 LETA229=0
323 LETA230=0
324 LETA231=0
325 LETA232=0
326 LETA233=0
327 LETA234=0
328 LETA235=0
329 LETA236=0
330 LETA237=0
331 LETA238=0
332 LETA239=0
333 LETA240=0
334 LETA241=0
335 LETA242=0
336 LETA243=0
337 LETA244=0
338 LETA245=0
339 LETA246=0
340 LETA247=0
341 LETA248=0
342 LETA249=0
343 LETA250=0
344 LETA251=0
345 LETA252=0
346 LETA253=0
347 LETA254=0
348 LETA255=0
349 LETA256=0
350 LETA257=0
351 LETA258=0
352 LETA259=0
353 LETA260=0
354 LETA261=0
355 LETA262=0
356 LETA263=0
357 LETA264=0
358 LETA265=0
359 LETA266=0
360 LETA267=0
361 LETA268=0
362 LETA269=0
363 LETA270=0
364 LETA271=0
365 LETA272=0
366 LETA273=0
367 LETA274=0
368 LETA275=0
369 LETA276=0
370 LETA277=0
371 LETA278=0
372 LETA279=0
373 LETA280=0
374 LETA281=0
375 LETA282=0
376 LETA283=0
377 LETA284=0
378 LETA285=0
379 LETA286=0
380 LETA287=0
381 LETA288=0
382 LETA289=0
383 LETA290=0
384 LETA291=0
385 LETA292=0
386 LETA293=0
387 LETA294=0
388 LETA295=0
389 LETA296=0
390 LETA297=0
391 LETA298=0
392 LETA299=0
393 LETA200=0
394 LETA201=0
395 LETA202=0
396 LETA203=0
397 LETA204=0
398 LETA205=0
399 LETA206=0
400 LETA207=0
401 LETA208=0
402 LETA209=0
403 LETA2010=0
404 LETA2011=0
405 LETA2012=0
406 LETA2013=0
407 LETA2014=0
408 LETA2015=0
409 LETA2016=0
410 LETA2017=0
411 LETA2018=0
412 LETA2019=0
413 LETA2020=0
414 LETA2021=0
415 LETA2022=0
416 LETA2023=0
417 LETA2024=0
418 LETA2025=0
419 LETA2026=0
420 LETA2027=0
421 LETA2028=0
422 LETA2029=0
423 LETA2030=0
424 LETA2031=0
425 LETA2032=0
426 LETA2033=0
427 LETA2034=0
428 LETA2035=0
429 LETA2036=0
430 LETA2037=0
431 LETA2038=0
432 LETA2039=0
433 LETA2040=0
434 LETA2041=0
435 LETA2042=0
436 LETA2043=0
437 LETA2044=0
438 LETA2045=0
439 LETA2046=0
440 LETA2047=0
441 LETA2048=0
442 LETA2049=0
443 LETA2050=0
444 LETA2051=0
445 LETA2052=0
446 LETA2053=0
447 LETA2054=0
448 LETA2055=0
449 LETA2056=0
450 LETA2057=0
451 LETA2058=0
452 LETA2059=0
453 LETA2060=0
454 LETA2061=0
455 LETA2062=0
456 LETA2063=0
457 LETA2064=0
458 LETA2065=0
459 LETA2066=0
460 LETA2067=0
461 LETA2068=0
462 LETA2069=0
463 LETA2070=0
464 LETA2071=0
465 LETA2072=0
466 LETA2073=0
467 LETA2074=0
468 LETA2075=0
469 LETA2076=0
470 LETA2077=0
471 LETA2078=0
472 LETA2079=0
473 LETA2070=0
474 LETA2071=0
475 LETA2072=0
476 LETA2073=0
477 LETA2074=0
478 LETA2075=0
479 LETA2076=0
480 LETA2077=0
481 LETA2078=0
482 LETA2079=0
483 LETA2080=0
484 LETA2081=0
485 LETA2082=0
486 LETA2083=0
487 LETA2084=0
488 LETA2085=0
489 LETA2086=0
490 LETA2087=0
491 LETA2088=0
492 LETA2089=0
493 LETA2080=0
494 LETA2081=0
495 LETA2082=0
496 LETA2083=0
497 LETA2084=0
498 LETA2085=0
499 LETA2086=0
500 LETA2087=0
501 LETA2088=0
502 LETA2089=0
503 LETA2080=0
504 LETA2081=0
505 LETA2082=0
506 LETA2083=0
507 LETA2084=0
508 LETA2085=0
509 LETA2086=0
510 LETA2087=0
511 LETA2088=0
512 LETA2089=0
513 LETA2080=0
514 LETA2081=0
515 LETA2082=0
516 LETA2083=0
517 LETA2084=0
518 LETA2085=0
519 LETA2086=0
520 LETA2087=0
521 LETA2088=0
522 LETA2089=0
523 LETA2080=0
524 LETA2081=0
525 LETA2082=0
526 LETA2083=0
527 LETA2084=0
528 LETA2085=0
529 LETA2086=0
530 LETA2087=0
531 LETA2088=0
532 LETA2089=0
533 LETA2080=0
534 LETA2081=0
535 LETA2082=0
536 LETA2083=0
537 LETA2084=0
538 LETA2085=0
539 LETA2086=0
540 LETA2087=0
541 LETA2088=0
542 LETA2089=0
543 LETA2080=0
544 LETA2081=0
545 LETA2082=0
546 LETA2083=0
547 LETA2084=0
548 LETA2085=0
549 LETA2086=0
550 LETA2087=0
551 LETA2088=0
552 LETA2089=0
553 LETA2080=0
554 LETA2081=0
555 LETA2082=0
556 LETA2083=0
557 LETA2084=0
558 LETA2085=0
559 LETA2086=0
560 LETA2087=0
561 LETA2088=0
562 LETA2089=0
563 LETA2080=0
564 LETA2081=0
565 LETA2082=0
566 LETA2083=0
567 LETA2084=0
568 LETA2085=0
569 LETA2086=0
570 LETA2087=0
571 LETA2088=0
572 LETA2089=0
573 LETA2080=0
574 LETA2081=0
575 LETA2082=0
576 LETA2083=0
577 LETA2084=0
578 LETA2085=0
579 LETA2086=0
580 LETA2087=0
581 LETA2088=0
582 LETA2089=0
583 LETA2080=0
584 LETA2081=0
585 LETA2082=0
586 LETA2083=0
587 LETA2084=0
588 LETA2085=0
589 LETA2086=0
590 LETA2087=0
591 LETA2088=0
592 LETA2089=0
593 LETA2080=0
594 LETA2081=0
595 LETA2082=0
596 LETA2083=0
597 LETA2084=0
598 LETA2085=0
599 LETA2086=0
600 LETA2087=0
601 LETA2088=0
602 LETA2089=0
603 LETA2080=0
604 LETA2081=0
605 LETA2082=0
606 LETA2083=0
607 LETA2084=0
608 LETA2085=0
609 LETA2086=0
610 LETA2087=0
611 LETA2088=0
612 LETA2089=0
613 LETA2080=0
614 LETA2081=0
615 LETA2082=0
616 LETA2083=0
617 LETA2084=0
618 LETA2085=0
619 LETA2086=0
620 LETA2087=0
621 LETA2088=0
622 LETA2089=0
623 LETA2080=0
624 LETA2081=0
625 LETA2082=0
626 LETA2083=0
627 LETA2084=0
628 LETA2085=0
629 LETA2086=0
630 LETA2087=0
631 LETA2088=0
632 LETA2089=0
633 LETA2080=0
634 LETA2081=0
635 LETA2082=0
636 LETA2083=0
637 LETA2084=0
638 LETA2085=0
639 LETA2086=0
640 LETA2087=0
641 LETA2088=0
642 LETA2089=0
643 LETA2080=0
644 LETA2081=0
645 LETA2082=0
646 LETA2083=0
647 LETA2084=0
648 LETA2085=0
649 LETA2086=0
650 LETA2087=0
651 LETA2088=0
652 LETA2089=0
653 LETA2080=0
654 LETA2081=0
655 LETA2082=0
656 LETA2083=0
657 LETA2084=0
658 LETA2085=0
659 LETA2086=0
660 LETA2087=0
661 LETA2088=0
662 LETA2089=0
663 LETA2080=0
664 LETA2081=0
665 LETA2082=0
666 LETA2083=0
667 LETA2084=0
668 LETA2085=0
669 LETA2086=0
670 LETA2087=0
671 LETA2088=0
672 LETA2089=0
673 LETA2080=0
674 LETA2081=0
675 LETA2082=0
676 LETA2083=0
677 LETA2084=0
678 LETA2085=0
679 LETA2086=0
680 LETA2087=0
681 LETA2088=0
682 LETA2089=0
683 LETA2080=0
684 LETA2081=0
685 LETA2082=0
686 LETA2083=0
687 LETA2084=0
688 LETA2085=0
689 LETA2086=0
690 LETA2087=0
691 LETA2088=0
692 LETA2089=0
693 LETA2080=0
694 LETA2081=0
695 LETA2082=0
696 LETA2083=0
697 LETA2084=0
698 LETA2085=0
699 LETA2086=0
700 LETA2087=0
701 LETA2088=0
702 LETA2089=0
703 LETA2080=0
704 LETA2081=0
705 LETA2082=0
706 LETA2083=0
707 LETA2084=0
708 LETA2085=0
709 LETA2086=0
710 LETA2087=0
711 LETA2088=0
712 LETA2089=0
713 LETA2080=0
714 LETA2081=0
715 LETA2082=0
716 LETA2083=0
717 LETA2084=0
718 LETA2085=0
719 LETA2086=0
720 LETA2087=0
721 LETA2088=0
722 LETA2089=0
723 LETA2080=0
724 LETA2081=0
725 LETA2082=0
726 LETA2083=0
727 LETA2084=0
728 LETA2085=0
729 LETA2086=0
730 LETA2087=0
731 LETA2088=0
732 LETA2089=0
733 LETA2080=0
734 LETA2081=0
735 LETA2082=0
736 LETA2083=0
737 LETA2084=0
738 LETA2085=0
739 LETA2086=0
740 LETA2087=0
741 LETA2088=0
742 LETA2089=0
743 LETA2080=0
744 LETA2081=0
745 LETA2082=0
746 LETA2083=0
747 LETA2084=0
748 LETA2085=0
749 LETA2086=0
750 LETA2087=0
751 LETA2088=0
752 LETA2089=0
753 LETA2080=0
754 LETA2081=0
755 LETA2082=0
756 LETA2083=0
757 LETA2084=0
758 LETA2085=0
759 LETA2086=0
760 LETA2087=0
761 LETA2088=0
762 LETA2089=0
763 LETA2080=0
764 LETA2081=0
765 LETA2082=0
766 LETA2083=0
767 LETA2084=0
768 LETA2085=0
769 LETA2086=0
770 LETA2087=0
771 LETA2088=0
772 LETA2089=0
773 LETA2080=0
774 LETA2081=0
775 LETA2082=0
776 LETA2083=0
777 LETA2084=0
778 LETA2085=0
779 LETA2086=0
780 LETA2087=0
781 LETA2088=0
782 LETA2089=0
783 LETA2080=0
784 LETA2081=0
785 LETA2082=0
786 LETA2083=0
787 LETA2084=0
788 LETA2085=0
789 LETA2086=0
790 LETA2087=0
791 LETA2088=0
792 LETA2089=0
793 LETA2080=0
794 LETA2081=0
795 LETA2082=0
796 LETA2083=0
797 LETA2084=0
798 LETA2085=0
799 LETA2086=0
800 LETA2087=0
801 LETA2088=0
802 LETA2089=0
803 LETA2080=0
804 LETA2081=0
805 LETA2082=0
806 LETA2083=0
807 LETA2084=0
808 LETA2085=0
809 LETA2086=0
810 LETA2087=0
811 LETA2088=0
812 LETA2089=0
813 LETA2080=0
814 LETA2081=0
815 LETA2082=0
816 LETA2083=0
817 LETA2084=0
818 LETA2085=0
819 LETA2086=0
820 LETA2087=0
821 LETA2088=0
822 LETA2089=0
823 LETA2080=0
824 LETA2081=0
825 LETA2082=0
826 LETA2083=0
827 LETA2084=0
828 LETA2085=0
829 LETA2086=0
830 LETA2087=0
831 LETA2088=0
832 LETA2089=0
833 LETA2080=0
834 LETA2081=0
835 LETA2082=0
836 LETA2083=0
837 LETA2084=0
838 LETA2085=0
839 LETA2086=0
840 LETA2087=0
841 LETA2088=0
842 LETA2089=0
843 LETA2080=0
844 LETA2081=0
845 LETA2082=0
846 LETA2083=0
847 LETA2084=0
848 LETA2085=0
849 LETA2086=0
850 LETA2087=0
851 LETA2088=0
852 LETA2089=0
853 LETA2080=0
854 LETA2081=0
855 LETA2082=0
856 LETA2083=0
857 LETA2084=0
858 LETA2085=0
859 LETA2086=0
860 LETA2087=0
861 LETA2088=0
862 LETA2089=0
863 LETA2080=0
864 LETA2081=0
865 LETA2082=0
866 LETA2083=0
867 LETA2084=0
868 LETA2085=0
869 LETA2086=0
870 LETA2087=0
871 LETA2088=0
872 LETA2089=0
873 LETA2080=0
874 LETA2081=0
875 LETA2082=0
876 LETA2083=0
877 LETA2084=0
878 LETA2085=0
879 LETA2086=0
880 LETA2087=0
881 LETA2088=0
882 LETA2089=0
883 LETA2080=0
884 LETA2081=0
885 LETA2082=0
886 LETA2083=0
887 LETA2084=0
888 LETA2085=0
889 LETA2086=0
890 LETA2087=0
891 LETA2088=0
892 LETA2089=0
893 LETA2080=0
894 LETA2081=0
895 LETA2082=0
896 LETA2083=0
897 LETA2084=0
898 LETA2085=0
899 LETA2086=0
900 LETA2087=0
901 LETA2088=0
902 LETA2089=0
903 LETA2080=0
904 LETA2081=0
905 LETA2082=0
906 LETA2083=0
907 LETA2084=0
908 LETA2085=0
909 LETA2086=0
910 LETA2087=0
911 LETA2088=0
912 LETA2089=0
913 LETA2080=0
914 LETA2081=0
915 LETA2082=0
916 LETA2083=0
917 LETA2084=0
918 LETA2085=0
919 LETA2086=0
920 LETA2087=0
921 LETA2088=0
922 LETA2089=0
923 LETA2080=0
924 LETA2081=0
925 LETA2082=0
926 LETA2083=0
927 LETA2084=0
928 LETA2085=0
929 LETA2086=0
930 LETA2087=0
931 LETA2088=0
932 LETA2089=0
933 LETA2080=0
934 LETA2081=0
935 LETA2082=0
936 LETA2083=0
937 LETA2084=0
938 LETA2085=0
939 LETA2086=0
940 LETA2087=0
941 LETA2088=0
942 LETA2089=0
943 LETA2080=0
944 LETA2081=0
945 LETA2082=0
946 LETA2083=0
947 LETA2084=0
948 LETA2085=0
949 LETA2086=0
950 LETA2087=0
951 LETA2088=0
952 LETA2089=0
953 LETA2080=0
954 LETA2081=0
955 LETA2082=0
956 LETA2083=0
957 LETA2084=0
958 LETA2085=0
959 LETA2086=0
960 LETA2087=0
961 LETA20
```

ПРИЛОЖЕНИЕ З

ВВЕДИТЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ОПЫТОВ

Y(1, 1)	Y(2, 1)
Y(1, 2)	Y(2, 2)
Y(1, 3)	Y(2, 3)
Y(1, 4)	Y(2, 4)
Y(1, 5)	Y(2, 5)
Y(1, 6)	Y(2, 6)
Y(1, 7)	Y(2, 7)
Y(1, 8)	Y(2, 8)
Y(1, 9)	Y(2, 9)
Y(1, 10)	Y(2, 10)
Y(1, 11)	Y(2, 11)
Y(1, 12)	Y(2, 12)
Y(1, 13)	Y(2, 13)
Y(1, 14)	Y(2, 14)

ПРОВЕРЬТЕ ПРАВИЛЬНОСТЬ ВВОДА.
ЕСЛИ ПРАВИЛЬНО - 1, НЕ ПРАВИЛЬНО - 0.

ЕСЛИ ПРАВИЛЬНО -1, НЕ ПРАВИЛЬНО -0 СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

α	β	γ	δ	ϵ	ζ
.130	.170	.180		1	1.600E-01
.380	.340	.330		2	3.500E-01
.090	.060	.030		3	6.000E-02
.130	.140	.060		4	1.100E-01
.390	.400	.350		5	3.800E-01
.030	.090	.080		6	6.667E-02
.610	.690	.680		7	6.600E-01
.780	.710	.730		8	7.400E-01
.240	.160	.230		9	2.100E-01
.530	.580	.540		10	5.500E-01
1.100	1.040	1.100		11	1.080
.100	.080	.120		12	1.000E-01
.320	.270	.310		13	3.000E-01
.790	.770	.720		14	7.600E-01

МАТЕРИАЛ УСЛОВИЙ ОПЫТА Х(Т, Ј)

МАТЕРИАЛ	УСЛОВНА СИГНАЛ X (кг)	УСЛОВНА СИГНАЛ Y (кг)	УСЛОВНА СИГНАЛ Z (кг)	УСЛОВНА СИГНАЛ W (кг)	УСЛОВНА СИГНАЛ V (кг)
1.0000	.3400	.6000	.2040	.1160	.3600
1.0000	.4200	.9500	.3990	.1760	.9020
1.0000	.4800	.0100	.0050	.2300	.0001
1.0000	.5600	.3000	.1680	.3140	.0900
1.0000	.6400	.6000	.3840	.4100	.3600
1.0000	.6900	.8100	.0070	.4700	.0010
1.0000	.7100	.9500	.6750	.5040	.9020
1.0000	.7600	.9500	.7220	.5770	.9020
1.0700	.8000	.3000	.2400	.6400	.0900
1.0000	.8300	.6000	.4980	.6890	.3600
1.0000	.9000	.9500	.8550	.8100	.9020
1.0000	.9400	.0100	.0090	.8800	.0001
1.0000	.9600	.3000	.2880	.9220	.0900
1.0000	.9900	.6000	.6000	1.0000	.3600

ТРАНСПОНИРОВАННАЯ МАТРИЦА X^T .

ГЛАВНОЙ СВЯТОЙ МАТРИЦА X(%,)							
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	.6400	.6900	.7100
.3400	.4200	.4800	.5600	.6400	.6900	.7100	
.7600	.8000	.8300					
.9000	.9400	.9600	1.0000				
.6000	.9500	.0100	.3000	.6000	.0100	.9500	
.9500	.3000	.6000					
.9500	.0100	.3000	.6000				
2040	.3990	.0050	.1680	.3840	.0070	.6750	
.7220	.2400	.4980					
.8550	.0090	.2880	.6000				
1160	.1760	.2300	.3140	.4100	.4700	.5040	

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

.5770	.6400	.6890				
.8100	.8800	.9220	1.0000			
.3690	.9020	.9001		.0900	.3600	.0010
.9020	.0900	.3600			.3600	.9020
						.0001
						.0900

ОБРАТНАЯ МАТРИЦА Y(I,J)

$Y(I,J)$	0.0000	3.0000				
1	17.84473	-46.05461	-11.81553	11.43609		
2	-46.05461	127.20509	24.51310	-29.53440		
3	-11.81553	24.51310	18.82557	-14.38345		
4	11.43609	-23.53440	-14.38345	19.50504		
5	28.64114	-83.46237	-12.73355	9.92483		
6	3.36952	-7.72788	-8.16834	.58691		
$Y(I,J)$	4.00000	5.00000				
1	28.64114	3.36952	4	9.92483	.58691	
2	-83.46237	-7.72788	5	57.72710	5.65678	
3	-12.73355	-8.16834	6	5.65678	7.86570	

КОЭФФИЦИЕНТЫ УРАВНЕНИЯ

.4997			
-1.3138			
-.7459			
1.6321			
.9184			
.3142			
K1=1 = 2.000	M= 14.000		
ЧИСЛО СТЕПЕНЕЙ СВЕБОДЫ D			
D= 28			

ДИСПЕРСИЯ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ

1.095E-03

ДИСПЕРСИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ УРАВНЕНИЯ	
I	ДИСПЕРСИЯ $B(I)$
1	1.954E-02
2	1.393E-01
3	2.062E-02
4	2.136E-02
5	6.322E-02
6	8.615E-03

```

10 READ A0, A1, A2, A3, A4, A5, Z1, Z2
20 DATA 20, 80, 100, 150, 180, 60, -0.6, 0.4
25 INPUT 'N=' N
30 LETX1=RND(0)
40 FOR I=0 TO 13
50 LETX1=RND(1)
79 PRINT ' X1           X2      ЧИСЛО ОПЕРАЦИЙ
80 FOR I=0 TO N
90 LETS=0
100 LETS=S+A0+A1
110 LETX1=Z1+(Z2-Z1)*RND(1)
111 LETX2=-LOG(1-RND(1))/.713
112 PRINT '0.2!;,;Y1'1.2!;,;;;;;; Y2!4.0!
114 IF X2>0.5 THEN LETU=U+1: GOTO 120
116 LETU1=U+1
120 IF X1<0 THEN LETK=K+1: GOTO 180
125 LETK1=K+1
130 LETS=S+A4
150 IF X2>0.5 THEN 185
160 PRINT. GOTO 100
180 LETS=S+A2+A3
185 LETS=S+A5
190 LETO(I)=S
275 LETU3=U+U1: LETK3=K+K1: LETP1=U/U3: LETP2=U1/U3: LETP3=K/K3: LETP4=K1,
276 PRINT!0.4!'P1='P1, 'P2=' P2; 'P3='P3; 'P4='P4
280 LETD=Q2/N
290 PRINT !8.0! 'D='D
300 END
200 PRINT !4.0!,;;;;;; S'3.0!;;; I
210 LETQ1=Q1+S
220 NEXT I
230 LETM=Q1/N
240 PRINT 'M=' M
245 LETQ2=0
250 FOR I=0 TO N
260 LETQ2=Q2+(M-Q(I))-2
270 NFXT I

```

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Агрегат 156
- Агрегирование 17, 19
- Алгоритм децентрализованного кодового управления 128, 133
 - пропорционального доступа 130
 - статистического моделирования 159, 209
 - управления дизель-генератором 102
- Адекватность модели 167
- Булева функция 107
- Быстродействие устройств 188
- Вектор внешних возмущений 62
 - измерений 63
 - состояния 63, 69
 - управлений 64, 69
- Воздействие возмущающее 63, 80
 - управляющее 64, 69, 79
- Декомпозиция 17, 19
- Децентрализация топологическая 21
 - функциональная 21
- Дисперсия адекватности 166
 - воспроизводимости 166
 - числа операций 182, 186
- Дисциплина обслуживания
 - бесприоритетная 192
 - с абсолютными приоритетами 195, 198
 - смешанная 198
 - с относительными приоритетами 195, 197
- Доопределение инерциальное 121
- Загрузка процессора 148, 151, 189
 - СМО 146
- Закон
 - распределения 142
 - сохранения времени ожидания 189

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

- управления 68, 72
— движением 68
— системы динамического управления ППБУ 94
Заявка 140
- Иерархия 17, 27
Интенсивность потока заявок 142, 189
— обслуживания 145, 189
— отказов 20
Источник информации 11
- Канал множественного доступа 128, 133
— параллельный 125, 132
— передачи данных 125
— последовательный 130
— связи 125
- Комплекс управляющий 8
— функциональный 7, 59
- Комплексирование 17
- Контроллер программируемый 50, 106
— связи 129
- Критерий оптимальности 94
— эффективности 24, 178
- Магистраль общая 15, 125
Метод наименьших квадратов 164
- Микропроцессор 29
- Микро-ЭВМ 33, 50
— координирующая 90, 99
— многоплатная 50
— одноплатная 50
— персональная 201
- Модель аналитическая 136, 141
— имитационная 137, 155
— массового обслуживания 141
— регрессионная 163
— сопряжения агрегатов 161
— функционирования УК 139
— математическая
 движение ППБУ 93
 системы динамического управления БС 79
 системы управления курсом судна 68
- Моделирование имитационное 137, 155
— статистическое 186, 204
- Оператор вычисления 204
— логический 181, 204
— сопряжения агрегатов 161
- Описание системы логического управления
- непротиворечивость 116
полнота 117
секвенциальное 115
эквивалентность 118
- Ортогональность плана 171
- Планирование эксперимента 171
Показатели качества функционирования 24, 25
Поток заявок 140
Проектирование системное 25, 175
Процесс марковский 143
— проектирования КСУ 25, 175
- Секвенция 115
Сеть стохастическая 151
Синтез системы управления 25, 175
— логического управления 119
- Система автоматизированного проектирования 202
— команд 31, 33
— логического управления 112
— массового обслуживания 140
— микропроцессорная 32
— нормальных уравнений МНК 165
— управления комплексная 10
— локальная 11
— функциональным комплексом 11, 64, 73, 91, 100
- Сопряжение агрегатов 161
- Средства микропроцессорные 28
— технические 7
- Стандартизация
 аппаратуры систем 24
 интерфейсов 24, 54
- Структура децентрализованная 20
- Трудоемкость алгоритма 180
- Управление автоматическое 62
— вспомогательными механизмами 100
— движением 59
— дистанционное 62
— доступом к магистрали 127
— местное 11, 62
- Уравнение Колмогорова 145
— регрессии 164
- Устройство запоминающее внешнее 32
— оперативное 32
— постоянное 32
— связи 15
- Шины информационно-управляющие 22
- Эффективность системы 24, 178

Основная литература

1. Золотов В. В. Управляющие комплексы сложных корабельных систем. Л, ЛЭТИ, 1975
2. Микропроцессоры/Под ред. Л. Н. Преснухина. М., Высш. школа, 1984
3. Основы теории вычислительных систем/Под ред. С. А. Майорова. М., Высш. школа, 1978.
4. Управление морскими подвижными объектами/Лернер Д. М., Лукомский Ю. А., Михайлов В. А., Попов О. С. Л., Судостроение, 1979
5. Фрейдзон И. Р. Судовые автоматизированные электроприводы и системы. Л., Судостроение, 1980
6. Фрейдзон И. Р., Филиппов Л. Г., Фрейдзон Р. И. Микропроцессорные системы управления техническими средствами судов. Л., Судостроение, 1985.
7. Бекаревич Ю. Б., Золотов В. В., Филиппов Л. Г. Управляющие машины в судовых устройствах Л, ЛЭТИ, 1977
8. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. Пер. с англ. М., Мир, 1982.
9. Денисов А. А., Колесников Д. Н. Теория больших систем управления Л, Энергоиздат, 1982.
10. Закревский А. Д. Оптимизация секвенциальных автоматов — В кн: Оптимизация в проектировании дискретных устройств Л, ЛДНТП, 1976, с 34—42
11. Катханов М. Н. Теория судовых автоматических систем. Л, Судостроение, 1985
12. Микропроцессорные комплексы интегральных схем/Под ред А. А. Варенкова, В. А. Шахнова. М., Радио и связь, 1982
13. Михайлов В. А., Федосов К. М. Планирование экспериментов в судостроении Л, Судостроение, 1978
14. Прангисвили И. В., Подлазов Б. С., Стециора Г. Г. Локальные микропроцессорные вычислительные сети М, Наука, 1984
15. Судовые электроприводы. Справочник В 2-х т/Под ред И. Р. Фрейдзона, Л, Судостроение, 1975.

Дополнительная литература

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	1
Принятые сокращения	2
Введение	3

РАЗДЕЛ I ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ СЛОЖНЫХ КОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Глава 1. Основные требования к управляющим комплексам сложных корабельных систем

§ 1.1. Основные понятия об управляющем комплексе сложных корабельных систем	7
§ 1.2. Структура комплексной системы управления техническими средствами корабля	10
§ 1.3. Основные задачи и принципы построения управляющих комплексов сложных корабельных систем	17
§ 1.4. Математическая модель функционирования управляющего комплекса	24

Глава 2 Микропроцессорная элементная база корабельных систем управления

§ 2.1. Общая характеристика микропроцессорных средств систем управления	28
§ 2.2. Состав и характеристики микропроцессорных средств	35
§ 2.3. Интерфейс систем управляющего комплекса	54

Глава 3 Системы управления функциональными комплексами технических средств корабля

§ 3.1. Назначение и состав функциональных комплексов технических средств корабля	59
§ 3.2. Система управления функциональным комплексом технических средств стабилизации курса и положения корабля	64
§ 3.3. Система управления функциональным комплексом технических средств динамического удержания бурового судна в заданном положении	73
§ 3.4. Система управления функциональным комплексом технических средств якорного удержания полупогруженной плавучей буровой платформы	91
§ 3.5. Система управления функциональным комплексом технических средств обеспечения энергией, условий обитаемости и функционирования корабельного оборудования	100

Глава 4 Логические методы проектирования дискретных систем управления

§ 4.1. Проблемы формализации	112
§ 4.2. Язык секвенциальных описаний. Логико-арифметическая интерпретация	115

§ 4.3. Непротиворечивость и полнота секвенциальных описаний	116
Эквивалентность	119
§ 4.4. Алгоритмические вопросы синтеза. Каноническая форма секвенциальных описаний	123
§ 4.5 Методика разработки программной реализации на основе секвенциального описания	

РАЗДЕЛ II ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ СЛОЖНЫХ КОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Глава 5. Организация обмена данными подсистем управляющего комплекса

§ 5.1. Способы обмена данными в системах с общей магистралью	125
§ 5.2. Децентрализованное кодовое управление доступом к общей магистрали	128
§ 5.3. Пропорциональный доступ в общем канале	130
§ 5.4. Сравнительные характеристики каналов множественного доступа	133

Глава 6 Модели процессов и систем управляющих комплексов технических средств корабля

§ 6.1. Общая характеристика и классификация используемых моделей	136
§ 6.2. Модели функционирования микропроцессорных управляющих комплексов	139
§ 6.3. Аналитическое исследование моделей массового обслуживания	141
§ 6.4. Имитационное моделирование систем	155
§ 6.5. Основы построения моделей объектов по данным эксперимента	162

Глава 7 Расчет характеристик функционирования и необходимого быстродействия устройств управляющих комплексов

§ 7.1. Общая характеристика задач расчета управляющих комплексов	175
§ 7.2. Определение трудоемкости алгоритмов задач управления и контроля	180
§ 7.3. Определение требуемого быстродействия устройств управляющего комплекса	188
§ 7.4. Выбор дисциплин обслуживания заявок и расчет характеристик функционирования систем управляющего комплекса	192

Глава 8 Расчет и исследование проектируемых систем с использованием персональных микро-ЭВМ

§ 8.1. Общая характеристика задач исследования проектируемых систем с использованием ЭВМ индивидуального пользования	201
§ 8.2. Исследование систем с использованием программируемых микрокалькуляторов	203
§ 8.3. Использование диалоговых средств вычислительной техники	213

Заключение

Приложения

Предметный указатель

Указатель литературы

**Золотов Владислав Васильевич
Фрейдзон Исаак Рубинович**

**УПРАВЛЯЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ
СЛОЖНЫХ КОРАБЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ**

Заведующий редакцией *А. Д. Старков*

Редактор *А. А. Ивановская*

Художественный редактор *О. П. Андреев*

Технические редакторы *Т. Н. Павлюк, Р. К. Чистякова*

Корректор *Т. С. Александрова*

ИБ 1085

Сдано в набор 21 04 86 Подписано в печать 23 07 86 М 35482 Формат
издания 60×90^{1/16} Бумага типографская № 2 Гарнитура шрифта лите-
ратурная Печать высокая Усл. печ. л. 14,5 Усл. кр. отт. 14,5
Уч. изд. л. 15,9 Тираж 2300 экз Изд. № 4006—84 Заказ № 349
Цена 85 коп

Издательство «Судостроение», 191065 Ленинград, ул. Гоголя, 8
Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградского объединения «Техническая книга» им Евгении Соко-
ловской Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6