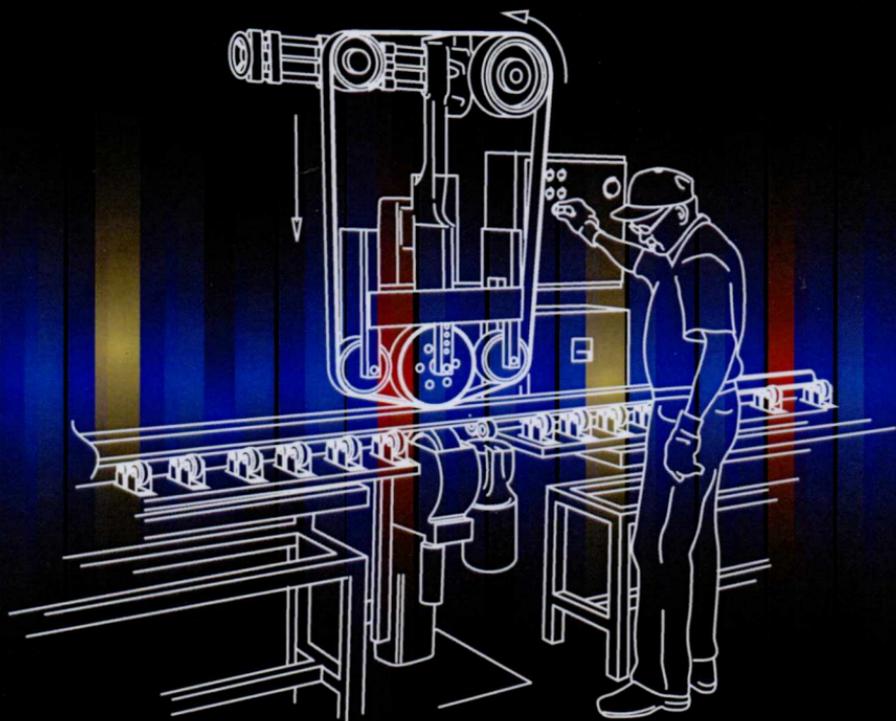


А. А. Иванов

Автоматизация технологических процессов и производств



Научная библиотека

БНТУ



★ 8 0 1 0 5 2 3 6 3 ★

А.А. Иванов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

2-е издание, исправленное и дополненное

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств (машиностроение)» (направление подготовки «Автоматизированные технологии и производства») и направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»



МОСКВА
2015

НАВУКОВАЯ БІБЛІЯТЭКА
Беларускага нацыянальнага
тэхнічнага ўніверсітэта
Інв. № **1834824**

УДК 621(075.8)

ББК 32.965я73

И20

Рецензент:

кандидат технических наук, заместитель главного конструктора
НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова *С.Л. Торохов*

Иванов А.А.

И20 Автоматизация технологических процессов и производств : учебное пособие / А.А. Иванов. — 2-е изд. испр. и доп. — М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2015. — 224 с. — (Высшее образование).

ISBN 978-5-91134-948-6 (ФОРУМ)

ISBN 978-5-16-010164-4 (ИНФРА-М)

Излагается материал по дисциплине «Автоматизация технологических процессов и производств», рассматриваются концепции комплексно-автоматизированного производства и структура интегрированной производственной системы, включающей стратегический, тактический и исполнительный уровни планирования и управления. Приводятся подробные схемы материальных и информационных потоков интегрированных систем, а также диаграммы и зоны эффективной автоматизации. Сформулированы организационно-технологические основы комплексной автоматизации массового и мелкосерийного производства. Предложена методика расчета технико-экономических показателей автоматизированных производств, таких как производительность, надежность и экономическая оценка эффективности внедрения новой техники. Представлены математические методы оптимизации основных критериев по результатам имитационного моделирования сложных технических систем.

Предназначен для студентов, обучающихся по учебным программам бакалавров, дипломированных специалистов и магистров, преподавателей технических вузов, а также конструкторов, технологов и ученых, занимающихся проблемой комплексной автоматизации сборки.

УДК 621(075.8)

ББК 32.965я73

ISBN 978-5-91134-948-6 (ФОРУМ)

ISBN 978-5-16-010164-4 (ИНФРА-М)

© Иванов А.А., 2011

© Издательство «ФОРУМ», 2011

Список принятых соеращений

- АБД — автоматизированный банк данных
АК — автоматический комплекс
АЛ — автоматическая линия
АПД — аппаратура передачи данных
АС — автоматический склад
АСД — автоматизированная система диагностирования
АСКИ — автоматизированная система контроля и испытаний
АСТППП — автоматизированная система технологической подготовки производства
АСУ — автоматизированная система управления
АСУП — автоматизированная система управления предприятием
АСУ ТП — автоматизированная система управления технологическим процессом
АУМО — автоматизированный участок механообработки
АУОО — автоматизированный участок общей обработки
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
БД — база данных
БК — базовый комплект
ГАП — гибкое автоматизированное производство
ГАУ — гибкий автоматизированный участок
ГМОП — гибкое механообрабатывающее производство
ГСП — гибкое сборочное производство
ГПМ — гибкий производственный модуль
ГПК — гибкий производственный комплекс
ГПС — гибкая производственная система
ДОС — датчик обратной связи
ДП — динамическое программирование
ЗР — загрузочный робот

Введение

Задача дальнейшего наращивания объемов производства без привлечения дополнительной рабочей силы может быть успешно решена прежде всего за счет комплексной автоматизации основных и вспомогательных операций производственного цикла. Понятие автоматизации возникло в начале двадцатого столетия и первоначально включало лишь процессы автоматизации материальных потоков на предприятиях крупносерийного и массового производства. В силу отсутствия систем автоматизации информационных потоков основу автоматизации в то время составляли различные механические средства управления, которые задавали механизмам технологических машин требуемую последовательность действий и не имели необходимой гибкости по быстрой переналадке оборудования. Только в середине XX в. с появлением в производстве ЭВМ, станков с ЧПУ и промышленных роботов, с повышением их функциональных способностей и обогащением программных средств появилась возможность комплексной обработки информации и управления ходом производства в масштабе предприятия с определенной гибкостью [1, 6].

В машино- и приборостроении наблюдается тенденция смещения центра тяжести от производства со стабильной узкой номенклатурой изделий к многономенклатурным производствам с быстрой сменяемостью программы, в результате чего среднее время жизни изделий уменьшается с 7...8 до 2...3 лет и менее. Согласно мировым прогнозам эта тенденция сохранится и в обозримом будущем. Многономенклатурное производство будет доминировать, составляя до 80 % общего объема промышленного производства. Указанная тенденция, а также постепенный отток кадров из промышленного производства в сферу обслуживания явились важнейшими причинами, обусловившими качественно новый подход к решению вопросов комплексной автоматизации — созданию гибких производственных систем, обладающих возможностью быстрой переналадки технических средств на выпуск другого изделия. Современные достижения в области технологии, ро-

ботизации и средств вычислительной техники обеспечивают реальные предпосылки создания автоматизированных производств на базе малолюдной (а впоследствии безлюдной) технологии. Системный подход к вопросу создания переналаживаемых автоматизированных производств требует одновременного и взаимосвязанного решения ряда научно-технических, технологических и организационных задач [11, 27].

В данном учебном пособии представлено описание системного окружения гибких производств, аппаратного и программного обеспечения многоуровневых систем управления интегрированными производственными комплексами и показано взаимодействие подсистем информационной структуры гибких производств с типовыми элементами общего программного обеспечения. Определены функциональные связи между производительностью и основными параметрами систем, позволяющие проектировать средства автоматизации с максимальной производительностью и повышенными качественными характеристиками изделий.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

1.1. Понятие интегрированной производственной системы

Системный подход к решению задачи комплексной автоматизации производства реализуется путем создания интегрированных производственных систем (ИПС). ИПС решает все вопросы по производству любых изделий: от автоматизированного проектирования и технологии их изготовления до автоматического управления технологическим оборудованием и выпуска готовой продукции (ГП). ИПС включает три уровня автоматизации, планирования и управления производством (рис. 1.1).

Стратегическому уровню соответствует перспективный план предприятия, создаваемый в результате прогнозирования производства на основе изучения сбыта, спроса и экономической ситуации в целом. Кроме перспективного плана, на этом уровне разрабатываются годовая и квартальная планы, а также комплекс мероприятий по управлению производством [6, 8, 12].

Тактическому уровню соответствует оперативное планирование производства с детализацией до месячного и суточного планов. Планирование производственной деятельности включает программу выпуска изделий, планы обеспечения заготовками и покупными изделиями, планы и графики обработки и сборки деталей, узлов и изделий, план технического обслуживания производственных процессов (технология, оборудование, оснастка и инструмент). На тактическом

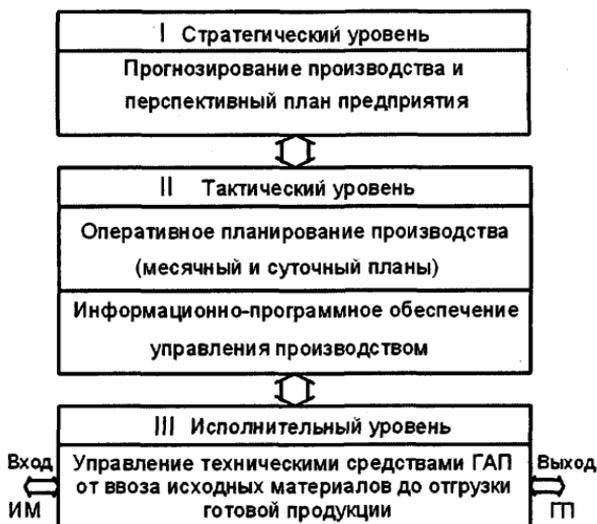


Рис. 1.1. Иерархия уровней автоматизации, планирования и управления производством в сквозной интегрированной системе

уровне осуществляется и информационно-программное обеспечение управления производством.

Исполнительный (или командный) уровень обеспечивает сквозное управление технологическим оборудованием в реальном масштабе времени от ввоза исходных материалов (ИМ) до отгрузки готовой продукции потребителям. Управление охватывает приемку, контроль и складирование заготовок и комплектующих, механическую обработку, сборку, выходной контроль, упаковку и распределение готовой продукции по заказчикам. К исполнительному уровню относятся также вопросы, связанные с эксплуатацией инженерных сетей и охраной окружающей среды.

В основу ИПС, кроме интеграции и иерархичности структуры, положены принципы автономности, модульности, инвариантности. ИПС как комплексная производственная система функционирует в тесном взаимодействии с рядом подсистем (рис. 1.2), основными из которых являются САПР, АСТПП, АСУП и АСУ ТП, автоматизированная система диагностирования АСД технических средств, автоматизированная система контроля и испытаний АСКИ, материально-техническое обеспечение МТхО. Координированная работа всех подсистем как единого организма осуществляется центральной ЭВМ с помощью общего автоматизированного банка данных АБД. Соглас-

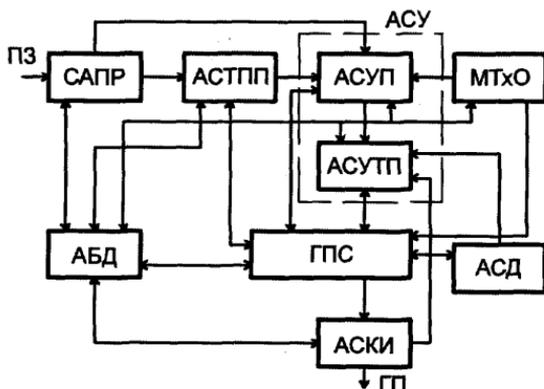


Рис. 1.2. Схема взаимодействия основных подсистем ИПС

но производственному заданию ПЗ подсистемы САПР и АСТПП работают в тесной взаимосвязи, образуя фактически единую систему проектирования изделий и технологической подготовки производства, которая использует геометрические параметры деталей для анализа вариантов конструкций и синтеза комплексной модели, данные о типовых технологических процессах и нормативно-справочную информацию. От этих подсистем необходимые данные вводятся в подсистемы АСУП и АСУ ТП, которые вырабатывают непосредственно управляющую информацию для выполнения технологических процессов изготовления изделий. Помимо автоматического оперативного управления, подсистемы АСУП и АСУ ТП предоставляют гибкой производственной системе ГПС информацию по производственным программам и календарным планам, данные по учету, контролю и регулированию процессов обеспечения материалами, инструментом и оснасткой. Важнейшей подсистемой ИПС на исполнительном уровне является АСД, имеющая распределенную сеть датчиков для анализа состояния и нормального функционирования ГПС на всех уровнях производства и управления. Подсистемы АСД и АСКИ должны иметь соответствующее метрологическое обеспечение, включающее необходимые средства измерения и контроля.

Любая ИПС решает следующие задачи: *организационные* (организация производства, обеспечение трудовыми ресурсами, охрана окружающей среды); *экономические* (расчет технико-экономических показателей, материально-технического снабжения, сбыта, учета, финансового управления); *оперативного управления производством*; *технологические* (управление процессами переработки сырья). Для

эффективного управления в ИПС необходима тесная алгоритмическая и информационная связь задач систем оперативного управления и управления технологическим процессом. Многоуровневая система управления в ИПС объединяет следующие уровни управления: технологическая машина — группа машин — цех — производство — предприятие. На каждом уровне система может работать автономно в пределах введенного технического задания. Повышение эффективности работы и ускорение обмена информацией достигаются путем сосредоточения в одном центре всех ЭВМ системы управления производством.

Автоматизированное предприятие как высшая форма автоматизации включает гибкие производственные системы, функционирующие в тесном взаимодействии с подсистемами САПР, АСТПП, АСУП и др., и представляет собой комплексную интегрированную систему проектирования и производства с определенной функциональной, технологической и информационной структурой, алгоритмическим и программным обеспечением [12, 14, 18].

Наиболее характерный автоматизированный завод (рис. 1.3), включающий два типа ГПС: механической обработки ГМОП и сборки ГСП — имеет автоматические склады материалов и заготовок АСМЗ, готовых деталей АСГД, комплектующих изделий КИ и склад готовой продукции СГП в качестве промежуточной системы на выходе. Металлообрабатывающее производство составляют обрабатывающие участки ОУ1 и ОУ2, состоящие из технологических модулей, укомплектованных станками с ЧПУ, промышленными роботами ПР и обрабатывающими центрами ОЦ с устройствами автоматической подачи спутников. Сборочное производство включает автоматические линии вспомогательной ВС, узловой УС и общей ОС сборки, испытательный И и контрольный К посты, упаковку Уп и СГП со станцией отгрузки готовой продукции. ПР сборочных линий выполняют в основном подачу деталей на сборку, съем, штабелирование и упаковку готовых изделий. Производственные участки связаны транспортно-накопительной системой, обеспечивающей автоматизацию материальных потоков (на рисунке показаны сплошными линиями). Системы управления на участке обработки СУО и на участке сборки СУС информационно связаны с ЭВМ верхнего уровня, входящей в центральную систему управления СУ. Центральная СУ ведет учет и распределение предметов труда в производственном потоке с учетом взаимодействия с предприятиями-поставщиками Пс по линии обеспечения материалами, заготовками МЗ, комплектующими и предпри-

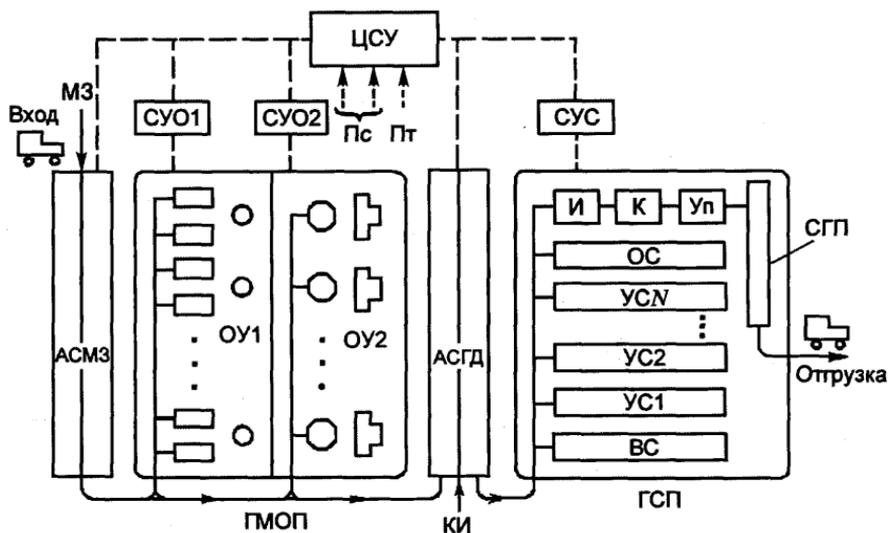


Рис. 1.3. Схема автоматизированного завода на базе ГПС обработки и сборки

тиями-потребителями Пт по линии сбыта готовой продукции (на рисунке информационные связи обозначены штриховой линией).

Зарубежный (в частности, японский) и отечественный опыт создания ИПС показывает, что технологические модули для механической обработки и сборки должны проектироваться как унифицированные единицы, являющиеся по своим функциональным возможностям основными компонентами интегрированной системы. На создаваемых в настоящее время автоматизированных предприятиях наблюдается различная степень автоматизации производственных процессов. Так, в системах обработки заготовок со спутниками в целях обеспечения работы оборудования в течение длительного периода (не менее рабочей смены) без обслуживающего персонала практикуется использование операторов в первую смену, которые осуществляют перекладку заготовок, доставленных транспортным роботом со склада, в спутники или накопитель заготовок. В частности, ИПС на заводе «Осака» (Япония), предназначенная для обработки 25 наименований деталей конвейера, работает по безлюдной технологии в ночное время (15 ч в сутки), а днем (в первую смену) один оператор выполняет установку заготовок в зажимные приспособления спутников на наладочной станции.

Примеры действующих ИПС за рубежом и в нашей стране приведены в работах [1, 3, 6, 7, 8, 11, 12, 27].

1.2. Схемы материальных и информационных потоков ИПС

Опираясь на укрупненную структуру, покажем общую схему материальных и информационных потоков ИПС (рис. 1.4). На входе системы располагается пост приемы материалов, заготовок и комплектующих ПМЗК, поступающих с предприятий-кооператоров и с заготовительного производства. Информация о приеме и размещении грузов ПРГ поступает на ЭВМ производственного контроля ПК, которая управляет порядком перемещения грузов ППГ. Одновременно информация о потребности в материалах ПМ поступает в центральную контрольную систему ЦКС, которая связана с автоматическими складами материалов, заготовок АСМЗ и готовых деталей АСГД.

Обработку данных, анализ и планирование производства осуществляет центральная ЭВМ, в которую вводится соответствующее производственное задание ПЗ. Материальные потоки заготовок, деталей и изделий замыкаются в основном между автоматическими складами, автоматическим обрабатывающим комплексом АОК, автоматическим сборочным комплексом АСК и постом финишного контроля ФК. Информация об окончании обработки КО поступает в ЦКС, а управляющая информация о плане обработки ПОБ и результате обработки РО от ЭВМ ПК — в обрабатывающий комплекс.

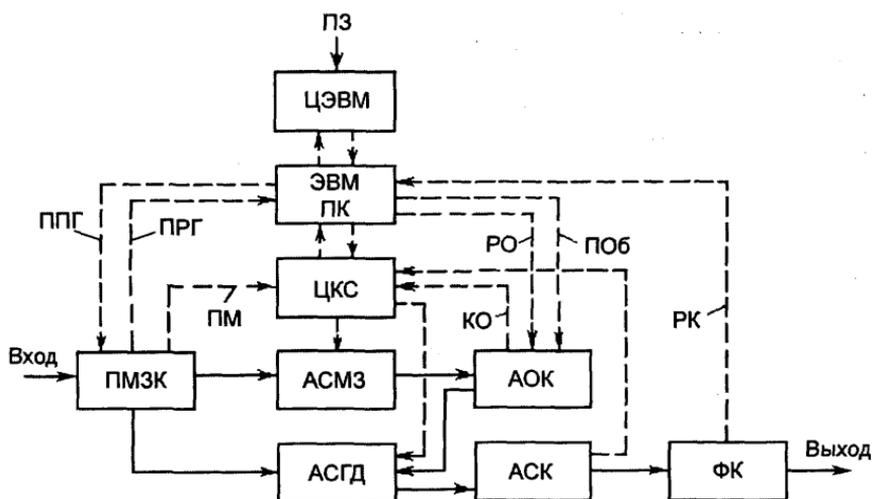


Рис. 1.4. Общая схема материальных (сплошные линии) и информационных (штриховые линии) потоков ИПС

В ЭВМ ПК поступают результаты контроля РК с поста ФК. На центральную ЭВМ, мини- и микроЭВМ возложены также функции прогнозирования и обнаружения критических ситуаций и управления ходом производственного процесса. ГПС как комплексная производственная система функционирует в тесном взаимодействии со всеми основными подсистемами (см. рис. 1.2).

Более детально схемы материальных и информационных потоков ИПС представлены на рис. 1.5. На схеме материальных потоков (рис. 1.5, а) хорошо виден сквозной характер производства на исполнительном уровне (связи по горизонтали). Исходные материалы ИМ (прутки, полосы, рулоны, листы и др.) хранятся на складе АС ИМ, откуда они по запросам подаются на производство заготовок, где производится разделение длинномерных материалов на штучные заготовки, холодная и горячая штамповка и литье.

Штучные заготовки Шт.З попадают на склад АС Шт.З и далее на участки механической обработки резанием, давлением и др. Эти участки относятся к основному производству и содержат разнообразные металлорежущие станки: токарной и фрезерной групп, зубообрабатывающие и резьбонарезные станки, сверлильные, профильно-шлифо-



Рис. 1. 5. Развернутые схемы материальных (а) и информационных (б) потоков в ИПС: ИМ — исходные материалы; Шт.З — штучные заготовки; Д и К — детали и комплектующие; ГП — готовая продукция; СИО — система инструментального обеспечения

вальные и станки для доводочных операций (хонингование, выглаживание, полировка и т. п.).

Отдельный участок выделен для покрытия деталей.

Готовые детали Д и комплектующие К хранятся на складе АС Д и К, из которого они подаются на участок сборки узлов и изделий. Собранные изделия проходят пост испытаний и контроля ОТК и транспортируются на склад готовой продукции АС ГП. Последним пунктом является участок комплектования заказов и отгрузки готовой продукции ГП потребителям. Специальная транспортно-накопительная система обеспечивает производственные участки комплектами технологической оснастки и инструмента, а также осуществляет удаление с участков брака, стружки и других отходов.

Таким образом, технические средства, обеспечивающие автоматизацию материальных потоков, представляют собой сложные механические системы, включающие обрабатывающие центры, сборочные комплексы и линии, операционные и транспортные роботы, автоматические склады-накопители, устройства инструментального обеспечения и разнообразные наборы технологической оснастки [2, 13, 14].

Схема информационных потоков (рис. 1.5, б) включает все основные подсистемы ИПС, представленные на рис. 1.2. Исходные данные ИД вводятся в объединенную САПР конструктора и технолога (САПР-К и САПР-Т), которые располагают соответствующими базами данных. САПР-К решает задачи автоматизированного проектирования объектов производства, а САПР-Т — задачи технологической подготовки производства АСТПП и создания библиотеки типовых технологических процессов. Управляющая и управляемая части ИПС связаны между собой автоматизированной системой управления АСУ и системой автоматизированного контроля и диагностирования САКД. Система управления производством АСУП решает вопросы стратегии развития предприятия, финансовые и кадровые вопросы, а также вопросы оперативно-календарного планирования. Система управления технологическими процессами АСУ ТП решает важнейшую задачу управления качеством выпускаемой продукции путем оптимального управления параметрами технологического процесса и оборудования. Необходимую информацию для решения этой задачи предоставляет САКД. По результатам альтернативного контроля и испытаний готовая продукция сортируется на группы: годные и брак (технологические потери).

Схема информационных потоков показывает, что современное машиностроительное предприятие является сложной экономической

системой, содержащей большое число взаимосвязанных элементов с организованными связями между ними для координации действий и управления системой. Информация о ходе выполнения управляющих команд и реальном состоянии объекта управления по каналам обратной связи поступает на вход управляющей системы, где сравнивается с информацией о требуемом состоянии объекта, в результате чего вырабатывается управляющее воздействие.

Таким образом, управление предприятием представляет собой процесс непрерывного обмена информацией между всеми структурными подразделениями. Потоки производственной информации, передаваемые в определенные промежутки времени по каналам связи, отражают материальные процессы, протекающие в системе на уровне предприятия (или производства). Структура информации включает различные комбинации информационных совокупностей, измеряемых номенклатурами, которые состоят из позиций, предварительно сгруппированных по какому-либо признаку качественной однородности. При автоматической обработке информации позициям присваивается условное сокращенное обозначение: код или индекс (идентификатор). Информационные совокупности подразделяются на реквизиты, показатели, документы и массивы [18, 19]. По периодичности поступающая информация делится на оперативную (квартальную) и перспективную (годовую), а по времени хранения и пользования — на постоянную (например, нормативно-справочная) и переменную, отражающую непрерывные текущие изменения в производстве.

1.3. Концепция комплексной автоматизации в массовом производстве

В зависимости от объема выпуска (размера производственной программы) и характера изготавливаемой продукции различают три основных типа производства: единичное, серийное и массовое. Тип производства определяется коэффициентом закрепления операций:

$$k_{30} = \frac{n_0}{n_p},$$

где n_0 , n_p — число технологических операций и число рабочих на производственном участке соответственно (n_p принимается для планового периода, равного одному месяцу).

В соответствии с типом производства коэффициент k_{30} принимает следующие приблизительные значения: $1 \leq k_{30} < 10$ — массовое или крупносерийное; $10 < k_{30} < 20$ — серийное; $20 < k_{30} < 40$ — мелкосерийное. Если коэффициент k_{30} не регламентируется, то производство считается единичным.

Массовое производство характеризуется узкой номенклатурой (1...5 типоразмеров), большим объемом выпуска (сотни тысяч и миллионы штук в год), стабильностью программы (3...5 лет). Примерами массового производства являются: автомобиле- и тракторостроение, сельскохозяйственное машиностроение, приборостроение (например, производство печатных плат), производство подшипников и т. п.

Основные организационные особенности массового производства: узкая специализация рабочих мест, за каждым из которых закреплена только одна постоянно повторяющаяся операция, сравнительно низкая квалификация рабочих, расположение оборудования по ходу технологического процесса в порядке выполнения операций. Указанные особенности определяют *поточный* метод работы, являющийся наиболее эффективной формой организации производства. Поточный метод обеспечивает: значительное сокращение производственного цикла (в несколько раз), межоперационных заделов и объемов незавершенного производства; возможность применения высокопроизводительного оборудования; снижение трудоемкости и себестоимости изготовления продукции; простоту планирования движения заготовок и управления производством; возможность комплексной автоматизации производственных процессов.

Организационной основой поточного производства является поточная линия. В массовом производстве применяется, как правило, узкоспециализированное оборудование, технологическая оснастка и инструмент. Поэтому основным принципом автоматизации массового и крупносерийного производства является создание *специализированных* комплексно-механизированных поточных линий и их высшей формы — автоматических линий (АЛ), настроенных на выпуск определенного вида продукции. Для специализированных линий характерна высокая производительность и надежность при низкой технологической гибкости, так как в конструкции таких линий обычно не предусматривается возможность переналадки на другие типоразмеры изделий. Транспортные системы поточных линий выполняют или в виде непрерывно движущегося конвейера (например, в линиях сборки автомобилей), или в виде тактового конвейера. Выбор типа кон-

БЕЛАРУСКАЯ БІБЛІЯТЭКА

Беларускага нацыянальнага

тэхнічнага ўніверсітэта

№ №

1834824

вейера определяется комплексными характеристиками производства. Структура поточной линии во многом определяется ее компоновкой: линейная, круговая, линейно-круговая (определяет структуру роторных линий) [3, 14, 23].

При проектировании автоматизированной поточной линии необходимо решить две важные задачи:

- 1) провести синхронизацию оборудования линии по производительности;
- 2) реализовать мероприятия по повышению коэффициента использования линии.

Синхронизация по производительности достигается за счет дублирования оборудования на операциях с максимальной длительностью (t_{\max}). Дублирование можно осуществлять по параллельной (рис. 1.6, *а*) или по последовательной (рис. 1.6, *б*) схемам. При дублировании на операциях с t_{\max} необходимо установить $n = t_{\max}/t_T$ единиц оборудования (здесь t_T — тактовое время линии). Дублирование по параллельной схеме существенно усложняет конструкции транспортной системы за счет устройств разделения и соединения потоков. Дублирование по последовательной схеме неизбежно увеличивает длину линии. При этом время выполнения операции разделяется между станками-дублерами.

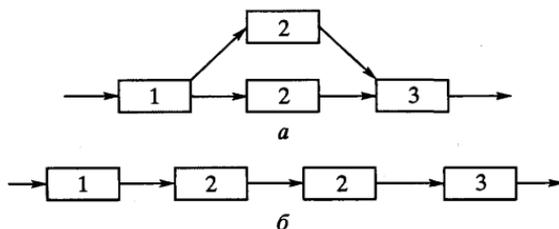


Рис. 1.6. Схемы синхронизации оборудования поточной линии по производительности: *а* — с разветвлением транспортного потока; *б* — без разветвления

Тактовое время, или регламентированный промежуток времени выпуска с поточной линии единицы продукции, вычисляют по формуле

$$t_T = \frac{60 \Phi i}{\Pi_T},$$

где Φ — годовое время с учетом потерь на ремонт оборудования (при односменном режиме работы $\Phi = 2000$ ч);

i — число смен;

Π_r — годовая программа выпуска изделий с учетом запчастей и среднего процента нормированного брака.

Годовая программа определяется по формуле, шт.,

$$\Pi_r = \Pi_n m_d (1 + \beta/100 + \alpha/100),$$

где Π_n — программа выпуска изделий;

m_d — число деталей в одном изделии;

$\beta = 10\%$ — доля запчастей;

$\alpha = 0,5\%$ — доля брака по механической обработке (по литью α до 10%).

Повышение коэффициента использования η линии достигается за счет встраивания в транспортную систему межоперационных накопителей (МН) деталей. Для этого линию разделяют на участки, между которыми устанавливают МН. Разделение на участки производят из условия равновеликих внецикловых потерь [3, 11]. Каждый МН представляет собой емкость, на $1/2$ заполненную деталями (рис. 1.7). В случае отказа оборудования перед МН питание последующего оборудования осуществляется из МН. В случае отказа оборудования за

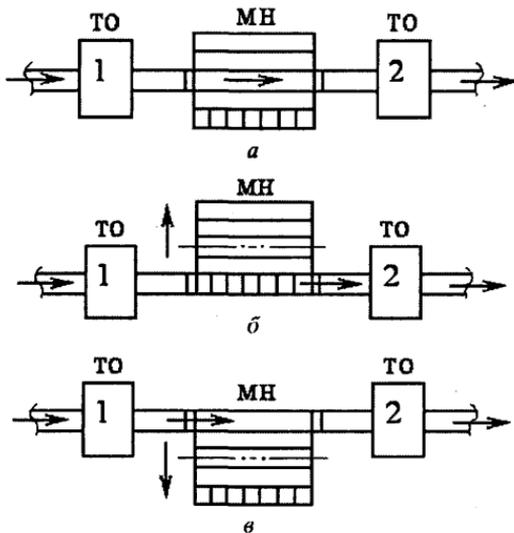


Рис. 1.7. Схема работы межоперационного накопителя в поточной линии несинхронного типа:

a — МН не включен (штатная работа линии); b — МН включен на питание Т02 (отказ Т01); c — МН включен на заполнение (отказ Т02); Т0 — технологическое оборудование

МН детали из предыдущего оборудования поступают в свободную емкость накопителя. В обоих случаях линия не останавливается, пока идет ремонт оборудования. Поскольку емкость МН конструктивно ограничена, то эффективность МН обычно максимальна при времени устранения отказа порядка 10...15 мин. Во время штатной работы линии МН выключен.

Поточные линии со встроенными МН относятся к линиям несинхронного (нежесткого) типа. Линии без МН являются синхронными (жесткими) линиями, коэффициент использования которых меньше, чем у несинхронных линий, так как эти линии полностью останавливаются при любом сбое и отказе. Характерным примером линий синхронного типа являются роторные линии, у которых технологические и транспортные роторы жестко связаны единой зубчатой передачей (рис. 1.8) [23].

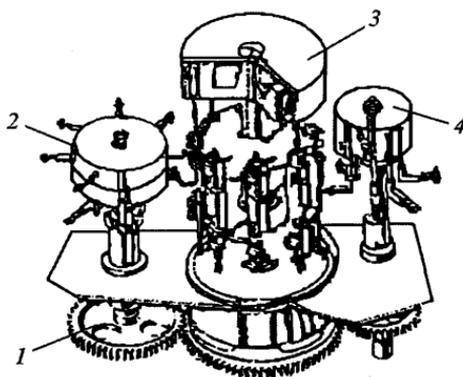


Рис. 1.8. Зубчатая передача 1, связывающая загрузочный 2, технологический 3 и транспортный 4 роторы линии (фрагмент)

1.4. Концепция комплексной автоматизации в мелкосерийном производстве

Серийное производство характеризуется увеличенной номенклатурой изделий, изготавливаемых периодически повторяющимися партиями с меняющимся объемом выпуска. Размер партии m одновременно обрабатываемых заготовок с учетом бесперебойной работы оборудования рассчитывают по формуле

$$m = a_{\text{пз}} Q,$$

где Q — производительность технологического оборудования в шт/ч;

$a_{пз} = 8in_c$ — периодичность запуска партии в часах;

i — число смен (берется 8-часовая смена);

$n_c = 3, 6, 12, 24$ — число суток (рекомендуемая периодичность запуска партии продукции).

Значение n_c зависит от годовой программы Π_r деталей. Нижняя граница числа заготовок m_r , которые должны быть обработаны за один час, равна, шт/ч:

$$m_r = \Pi_r / \Phi.$$

В зависимости от размера партии запуска m различают: крупно-, средне- и мелкосерийное производства. К серийному производству можно отнести станкостроение, транспортное машиностроение, производство прессов, насосов, оборудование легкой и пищевой промышленности. В зависимости от объема выпуска продукции серийное производство может быть организовано по поточному и непоточному принципам. Непоточный принцип предполагает обработку заготовок партиями на каждой операции, при этом станки располагаются группами (по типам) без связи с последовательностью операций. Недостатком непоточного производства является увеличенное время на вспомогательные операции, в частности на транспортирование деталей от одной группы станков к другой, в комплектовочную кладовую, на мерительный пост и т. д.

В условиях бурного развития технологий и резко возрастающей потребности в новых видах изделий с быстрой сменяемостью моделей доля мелкосерийного многономенклатурного производства в общем объеме промышленной продукции во всем мире стала преобладающей. До недавнего времени мелкосерийное производство характеризовалось низкой степенью автоматизации и высокой трудоемкостью изготовления изделий. Это объяснялось основным недостатком традиционных средств автоматизации — узкой специализацией, связанной с изготовлением определенного вида изделий. При переходе на новый вид продукции сложнейшие автоматические комплексы приходилось существенно изменять или разрабатывать заново, что приводило к резкому возрастанию стоимости и сроков подготовки производства. Требовалось сформулировать *концепцию* комплексной автоматизации в мелкосерийном производстве с учетом его особенностей:

- большая номенклатура выпускаемых изделий (от 25 до 500 и более типоразмеров);
- относительно небольшие размеры партий по типам изделий (от 10 до 10^4 шт.);

- нестабильность годовой программы из-за быстрой сменяемости моделей изделий (от нескольких дней до нескольких месяцев).

В то же время годовые объемы выпуска изделий в мелкосерийном производстве могут быть сравнимы с объемами выпуска продукции массового или крупносерийного производства. Указанные особенности мелкосерийного производства требовали создания систем автоматизации, обладающих технологической *гибкостью*, т. е. возможностью переналадки оборудования при смене типа изделия в пределах научно обоснованного типоразмерного ряда. В настоящее время основу систем автоматизации в мелкосерийном производстве составляет *гибкий производственный модуль* (ГПМ). На базе ГПМ формируются гибкие производственные системы (ГПС), комплексы и участки с использованием оборудования с ЧПУ, промышленных роботов, информационно-вычислительных систем с объединением их в единую диспетчерскую службу. Обеспечение технологической гибкости очень трудоемкое и дорогое мероприятие, и для облегчения этой инженерной задачи используют принцип модульного конструирования технических средств и стандартизации оснастки, инструмента, заготовок. При переналадке ГПС заменяются: управляющие программы, захватные устройства роботов (при необходимости), инструментальные блоки, устройства загрузки-выгрузки деталей, при необходимости технологические спутники и элементы транспортно-накопительной системы. Среднее время переналадки оборудования должно быть по возможности минимальным, так как это позволяет снизить разницу в производительности по сравнению со специализированными поточными линиями в массовом производстве. Основу ГПМ составляет базовый комплект (БК), который инвариантен к переналадкам в пределах принятого типоразмерного ряда изделий (рис. 1.9).

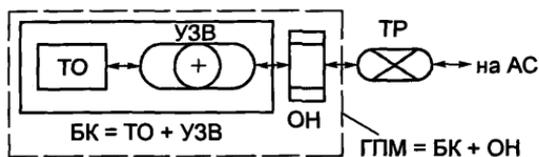


Рис. 1.9. Схема гибкого производственного модуля

Базовый комплект является непереналаживаемой частью ГПМ и составляет 70...85 % от его объема. БК включает: единицу технологического оборудования (ТО) и устройство загрузки-выгрузки деталей (УЗВ). Добавив к БК операционный накопитель (ОН) заготовок и де-

талей, получим ГПМ, который связан с автоматическим складом (АС) и другими ГПМ с помощью транспортного робота (ТР). ГПМ является автономной единицей автоматизированной системы, которая может функционировать в трехсменном режиме без участия человека. Примеры ГПМ показаны на рис. 1.10.

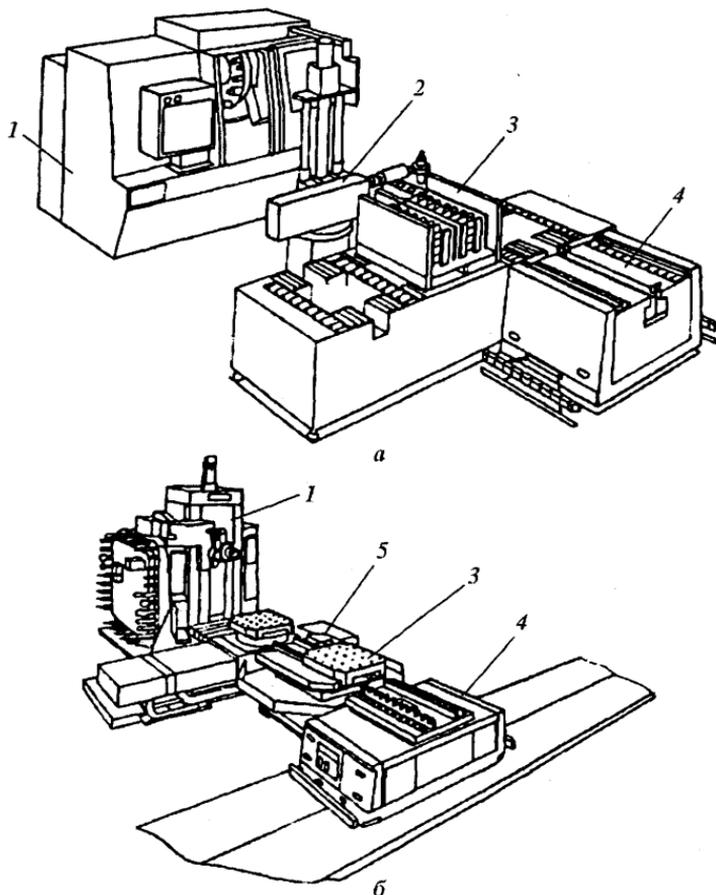


Рис. 1.10. Общий вид ГПМ на базе токарного (а) и фрезерного (б) обрабатывающих центров:

1 — ОЦ; 2 — обслуживающий робот; 3 — ОН; 4 — ТР; 5 — загрузочное устройство

На рис. 1.11 приведены структурные схемы обрабатывающего и сборочного комплексов ГПС на основе ГПМ.

Пример структуры механообрабатывающего производства, включающего заготовительные и основные гибкие автоматизированные

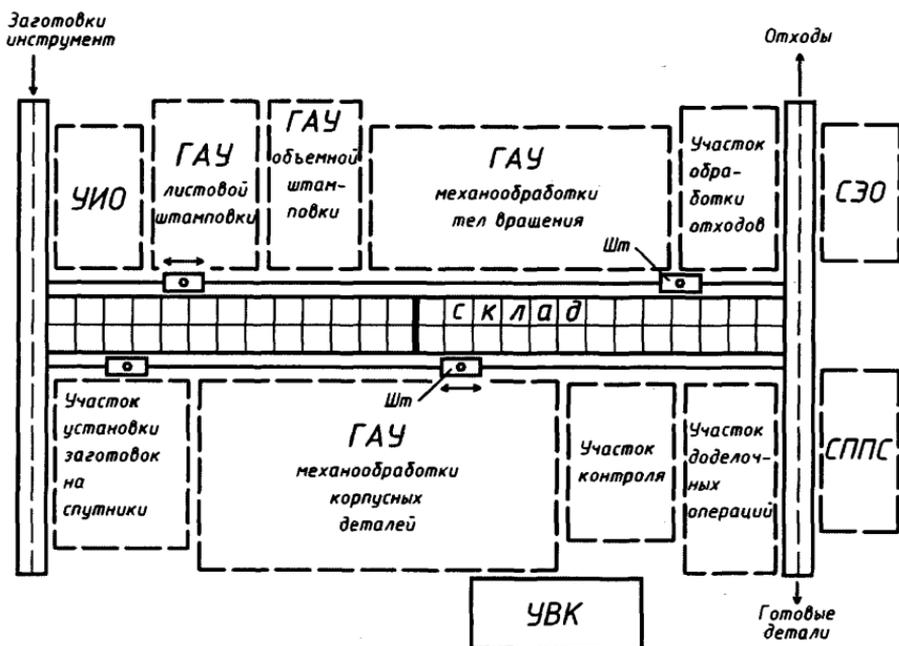


Рис. 1.12. Структура механообрабатывающего производства, включающего заготовительные и основные гибкие автоматизированные участки:

УИО — участок инструментального обеспечения; СЭО — система энергообеспечения; СППС — система поддержания параметров среды

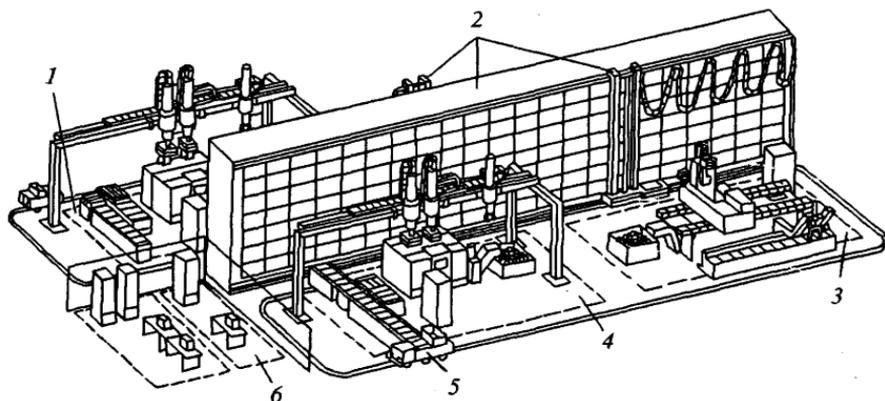


Рис. 1.13. Общий вид ГПС механообработки (пример):

1, 4 — модули токарной обработки; 2 — АС; 3 — модуль фрезерной обработки; 5 — ТР; 6 — УВК

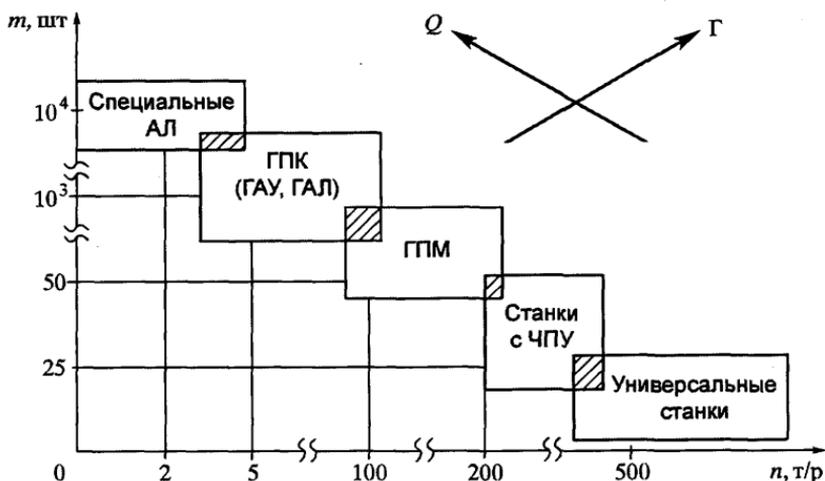


Рис. 1.14. Зоны эффективной автоматизации в зависимости от типа производства:
 m — размер партии заготовок; n — число типоразмеров

диаграмма, на которой изображены зоны эффективной автоматизации в зависимости от типа производства (рис. 1.14).

1.5. Организационно-технологические основы комплексной автоматизации массового и мелкосерийного производства

Организационно-технологической основой создания поточных линий и ГПС является *классификация* предметов обработки и *типизация* технологических процессов. Классификация заготовок и деталей имеет целью распределить предметы обработки и сборки на группы по родственным конструктивно-технологическим признакам и создать базу данных для конструкторов, проектирующих автоматизированные системы уровня переналаживаемых поточных линий и ГПС. Конструкторская база данных необходима и технологам для разработки библиотеки типовых технологических процессов [1, 6, 8, 12, 27].

Классификация деталей на группы производится в основном двумя методами (рис. 1.15):

- методом визуального контроля, т. е. простым осмотром деталей и выявлением их подобия по форме и габаритам, качеству поверхности и точности изготовления;
- методом анализа технологических маршрутных карт.

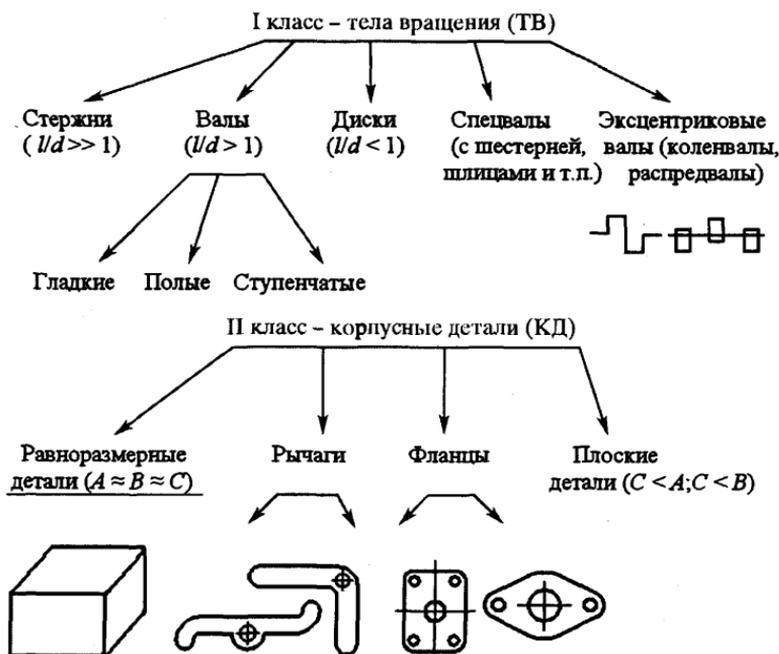


Рис. 1.15. Пример классификации предметов обработки

Число групп при классификации предметов обработки во многом зависит от опыта конкретного технолога. Однако для приближенной оценки оптимального числа групп n можно пользоваться неравенством

$$\sum_{i=1}^n t_{штi} m_i \geq T_n,$$

где $t_{штi}$ — штучно-калькуляционное время обработки заготовок i -й партии;

m_i — объем i -й партии, шт.;

T_n — нормативная загрузка оборудования ГПС в нормо-часах (паспортные данные).

Для создания технологической базы данных в каждой классификационной группе выделяют *деталь-лидер*, или комплексную деталь (Код), которая содержит все поверхности обработки совокупности деталей, имеющих одинаковый план операций, осуществляемых в основном едиными методами с использованием унифицированного оборудования, приспособлений и инструментов (рис. 1.16).

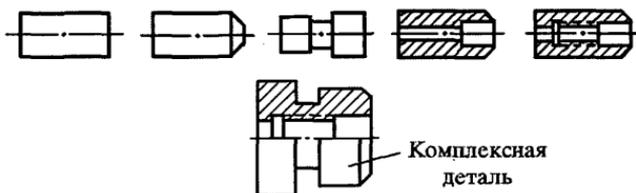


Рис. 1.16. Пример выделения детали-лидера в группе валов класса «тела вращения»

На деталь-лидер разрабатывается подробный технологический процесс (ТП), который является *типовым* для деталей данной группы (рис. 1.17).

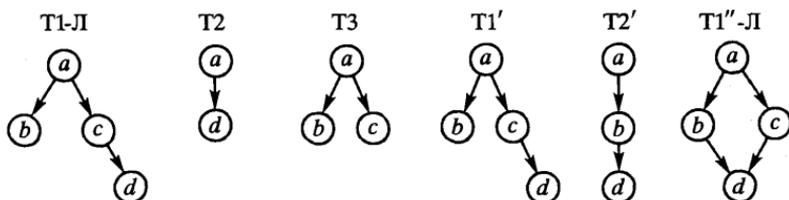


Рис. 1.17. Примеры формирования типовых технологических процессов: a, b, c, d — операции технологического процесса T ; T -Л — типовой процесс-лидер

Технологическая база данных содержит набор типовых технологических процессов для деталей-лидеров всех классификационных групп. При разработке технологического процесса на любую конкретную деталь технолог в диалоге с ЭВМ проводит необходимую коррекцию типового ТП для данной группы. Это позволяет сократить сроки технологической подготовки производства в разы. По результатам классификации деталей и типизации ТП все детали кодируются и заносятся в базу данных. Пример кодирования деталей: 12345 5789 ABCD. Первые цифры 12345 — это шифр типа детали и ее конструктивные характеристики ($1/d$ для тел вращения; A/B или A/C для корпусных деталей; внешний и внутренний формообразующие элементы; вид плоскостной обработки; прочие элементы, например отверстия, зубья и т. п.). Вторые цифры 5789 — это дополнительный шифр таких признаков детали, как: материал и форма исходной заготовки, точность обработки, качество поверхности и др. Четыре дополнительных разряда ABCD — вторичный код последовательности операций и других признаков по желанию предприятия-заказчика.

Полученное число классификационных групп деталей позволяет определить число и типы ГПМ, входящих в состав проектируемой ГПС. Число ГПМ можно брать по числу групп или в ряде случаев ис-

пользовать каждый ГПМ для двух групп деталей. Расчетное число ГПМ данного типа определяется по формуле

$$n_{\text{ГПМ}} = \frac{T_c}{\Phi} + n_p,$$

где T_c — суммарная трудоемкость обработки заготовок на данном ГПМ, н/ч;

$n_p = 1$ — число резервных ГПМ.

Для расчета числа гибких поточных линий используется аналогичная формула.

Приведем пример расчета числа ГПМ.

Пусть ГПС проектируется для обработки 300 типов заготовок, т. е. номенклатура составляет $n_n = 300$. В результате проведенной классификации технологи получили 15 групп заготовок ($k = 15$). Следовательно, каждая группа содержит $n_{\text{тр}} = 300/15 = 20$ типоразмеров заготовок. Таким образом, получаем, что необходимо проектировать ГПМ 15 типов с возможностью переналадки каждого модуля на 20 типов заготовок.

Общее число ГПМ определим из годовой программы выпуска деталей. Известно, что трудоемкость изготовления всех типов деталей составляет 120 тыс. н/ч. Годовой фонд времени ГПМ в трехсменном режиме равен $\Phi = 6000$ н/ч. Используя расчетную формулу, получим:

$$n_{\text{ГПМ}} = \frac{120\,000}{6000} + 1 = 20 + 1 = 21.$$

Расчет показывает, что для большинства классификационных групп заготовок достаточно использовать один ГПМ одного типа. Для изготовления групп заготовок с большим объемом выпуска необходимо более одного ГПМ.

После классификации заготовок и типизации технологических процессов необходимо организовать производственные участки, специализирующиеся на изготовлении деталей определенного класса. Существует две организационные формы участков: технологическая (по типам технологического оборудования) и предметная (по объектам производства). Технологическая форма предполагает компоновку участка по группам однородных станков (рис. 1.18, а). Недостатком этой компоновки считается увеличение трудозатрат на производство продукции за счет неизбежных возвратных транспортных петель между группами станков. Предметная форма позволяет компоновать участок по принципу технологического потока, состоящего из несколь-

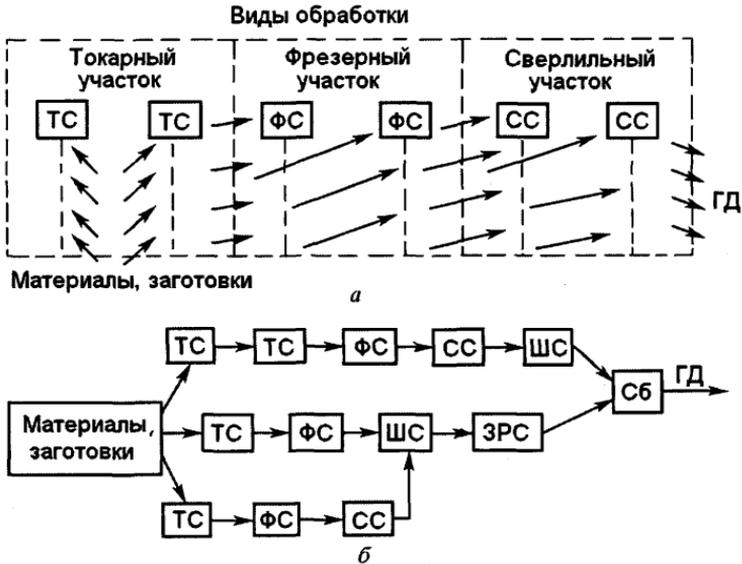


Рис. 1.18. Схемы компоновки производственных участков по технологической (а) и предметной (б) организационным формам:

ТС — токарный станок; ФС — фрезерный станок; СС — сверлильный станок; ШС — шлифовальный станок; ЗРС — зуборезный станок; СМ — сборочная машина

ких параллельных ветвей (рис. 1.18, б). Эта компоновка позволяет исключить указанный недостаток для технологической формы. Однако для мелкосерийного производства не всегда удастся реализовать принцип технологического потока. Чаще применяется комбинированная организационная форма, объединяющая обе указанные компоновки производственных участков.

1.6. Проектирование автоматизированного технологического процесса

В основе проектирования технологического процесса лежит два принципа: технический и экономический. *Технический* принцип должен обеспечивать условие изготовления изделия в соответствии с требованиями чертежа, а *экономический* — условие изготовления изделия с минимальными затратами. Выбор ТП с учетом этих двух противоречивых принципов всегда приводит к компромиссам. При оптимизации ТП по экономическому принципу целевая функция имеет вид: $C \rightarrow \min$ (где C — себестоимость изделия).

Структура себестоимости:

$$C = 3_{из} m + 3_{п},$$

где $3_{из}$ — изменяемые затраты (зарплата, затраты на эксплуатацию оборудования);

$3_{п}$ — постоянные затраты (здание, основные фонды — оборудование, оснастка и т. п.);

m — объем выпуска изделий в шт.

Покажем пример выбора ТП по себестоимости.

Пусть технологии ТП1 соответствует себестоимость изделия C_1 , а технологии ТП2 — себестоимость C_2 (рис. 1.19).

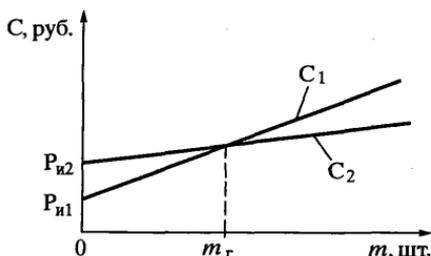


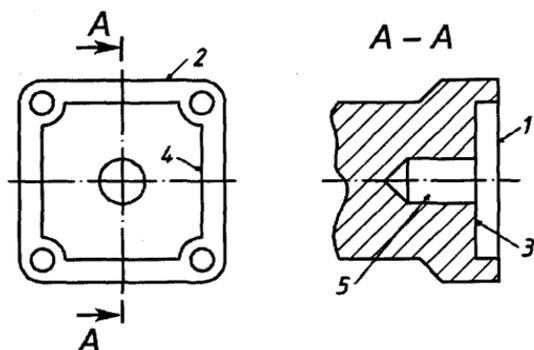
Рис. 1.19. График сравнения технологических процессов по экономическому принципу

Из графика $C(m)$ видно, что до определенного (граничного) значения $m < m_г$ изготовление изделий выгоднее производить по ТП1 с себестоимостью C_1 , а при $m > m_г$ — по ТП2 с себестоимостью C_2 . Значение $m_г$ находим из условия $C_1 = C_2$, или $3_{из1} m + 3_{п1} = 3_{из2} m + 3_{п2}$:

$$m_г = \frac{3_{п2} - 3_{п1}}{3_{из1} - 3_{из2}}.$$

При оптимизации ТП по техническому принципу главным является выбор наилучших технологических приемов и оборудования, обеспечивающих заданное качество и объем выпуска изделий. В случае проектирования автоматизированного ТП основной структурной единицей является *переход*. Переходы разделяют на: элементные (обработка одной поверхности), инструментальные (обработка поверхности при непрерывном движении инструмента), вспомогательные (холостой ход), позиционные (сумма инструментальных и вспомогательных переходов). К особенностям автоматизированного ТП относятся: ограниченное число операций в маршрутной карте из-за кон-

центрации полей обработки на обрабатывающем центре; детальная разработка операционной карты. Пример такой операционной карты (фрагмент) показан на рис. 1.20.



№	Переход	Ин-т	x	y	z	P.x	s	v	n	t _{хх}	t _p	t _п
1	Фр.п.пр.	Т.фр.чер	65	90	150	375	1,6	350	700	0,1	0,35	0,45
2	См.инст.	На чист.	310	90	150	-	-	-	-	0,305	-	0,305
3	Фр.п.ок.	Т.фр.чис	375	-	150	375	1,28	400	800	0,158	0,3	0,46
4	См.инст.	На конц.фр.	310	90	150	-	-	-	-	0,305	-	0,305

Рис. 1.20. Эскиз детали и фрагмент операционной карты автоматизированного ТП: Фр.п.пр — фрезерование поверхности 1 предварительно; Фр.п.ок — то же окончательно; См.инст — смена инструмента; Т.фр.чер — торцевая фреза черновая; Т.фр.чис — то же чистовая; конц.фр — концевая фреза; x, y, z — установочные перемещения в мм; s, v, n — режимы резания; t_{хх} — время холостого хода; t_p — время резания; t_п — время перехода

При проектировании автоматизированного ТП используется комплексный подход, охватывающий обработку, сборку, контроль, дробление и отвод стружки, подвод СОЖ, обеспечение инструментом, транспортно-накопительными устройствами и модульно-агрегатный принцип построения гибких систем и комплексов. В процессе проектирования проводится также анализ технологичности изделий, который включает выбор рационального типа заготовки, конструкторских и технологических баз, возможность использования типового ТП. Количественную оценку технологичности деталей дают по: уровню трудоемкости y_T и себестоимости y_C ; коэффициенту использования материала; коэффициенту точности обработки. Уровень трудоемкости равен:

$$y_T = \frac{T_d}{T_6},$$

где T_d , T_6 — достигнутая и базовая трудоемкости соответственно ($y_T < 1$).

Структура формулы уровня себестоимости аналогична ($y_c < 1$):

$$y_c = \frac{C_d}{C_6}.$$

1.7. Оценка накопленной погрешности при проектировании автоматизированного технологического процесса

Погрешность — это разность между фактическим размером и номинальным размером, заданным чертежом или техническими условиями. Основные факторы, вызывающие погрешность при механообработке и сборке:

- неточность станка в ненагруженном состоянии (погрешности его сборки, износ основных узлов и т. п.);
- неточность инструмента и его износ;
- неточность установки инструмента и настройки станка;
- неточность базирования заготовки;
- тепловые и силовые (при резании) деформации системы: станок — приспособление — инструмент — деталь.

Необходимое условие обеспечения точности при изготовлении детали:

$$\Delta_{\Sigma} \leq \delta,$$

где Δ_{Σ} — суммарная погрешность;

δ — поле допуска, заданное чертежом.

Структура суммарной погрешности:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_c + \Delta_{сл},$$

где $\Delta_c = \sum_{i=1}^n \Delta_i$ — систематические погрешности;

$$\Delta_{сл} = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_i^2} \text{ — случайные погрешности;}$$

Δ_i — составляющая погрешности;

$k = 1 \dots 1,73$ — коэффициент, учитывающий закон распределения случайной величины;

n — число систематических погрешностей;

m — число заготовок в партии.

Систематические погрешности подразделяются на постоянные, связанные с неточностью станка, и переменные, связанные с размерным износом инструмента и тепловыми деформациями станка в период от пуска до достижения температурного равновесия. Случайные погрешности возникают в результате действия большого числа не связанных между собой факторов. Из-за отсутствия определенной закономерности определить точно величину $\Delta_{\text{сл}}$ не удастся. Для закона нормального распределения случайной величины коэффициент $k = 1$. В случае, когда закон распределения случайной величины неизвестен, коэффициент k можно принимать $k = 1,4$.

Процессы обработки и сборки представляют собой пространственные задачи, решаемые с помощью размерных цепей. Размерной цепью называют совокупность взаимосвязанных размеров, расположенных по замкнутому контуру. Задача определения накопленной погрешности решается с помощью размерных цепей (технологических и сборочных). При анализе размерных цепей используют уравнения номиналов и допусков.

Уравнение номиналов имеет вид:

$$\sum_{i=1}^m \varepsilon_i A_i = 0, \text{ или } A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \varepsilon_i A_i,$$

где A_i — i -е звено размерной цепи (РЦ);

A_{Δ} — замыкающее звено РЦ;

ε_i — коэффициент, учитывающий влияние каждого звена на суммарную погрешность замыкающего звена;

m — число звеньев РЦ.

Примером замыкающего звена технологической РЦ является размер, который не указывается на чертеже детали (рис. 1.21).

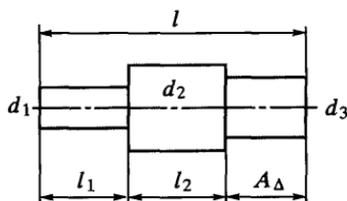


Рис. 1.21. Пример замыкающего звена технологической размерной цепи:

$$A_{\Delta} = l - (l_1 + l_2)$$

В сборочных размерных цепях замыкающее звено обычно представляет собой зазор в соединении деталей и узлов [7, 11].

Уравнение допусков также записывают в виде суммы:

$$\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \delta_i,$$

где δ_{Δ} — допуск на замыкающее звено;

δ_i — допуск i -го звена РЦ.

Для закона нормального распределения случайной величины количественная оценка суммарной погрешности производится с помощью параметров кривой Гаусса (рис. 1.22).

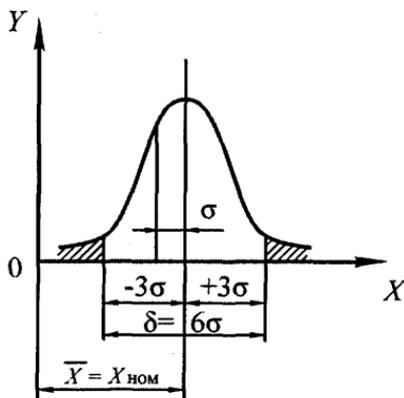


Рис. 1.22. Кривая закона нормального распределения случайной величины

Средняя арифметическая величина:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^N n_i x_i}{N}$$

или

$$x = \sum_{i=1}^N p_i x_i,$$

где $p_i = n_i / N$ — вероятность появления размера x_i ;

N — число измерений.

Среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x)^2}{N}}.$$

Значение σ характеризует величину разброса размеров от центра группирования x . В математической статистике для оценки разброса случайной величины используется также величина дисперсии $D = \sigma^2$.

Основные пути поддержания точности обработки:

- своевременная подналадка станка (рис. 1.23);
- повышение стойкости инструмента;
- повышение точности заготовок;
- автоматизация управления точностью обработки (рис. 1.24).

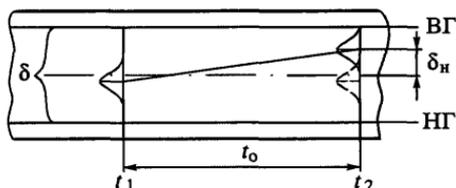


Рис. 1.23. Схема своевременной подналадки станка:

ВГ, НГ — верхняя и нижняя границы допуска δ ; t_0 — период работы станка; t_1 — время начала работы; t_2 — время подналадки; δ_n — допуск на подналадку

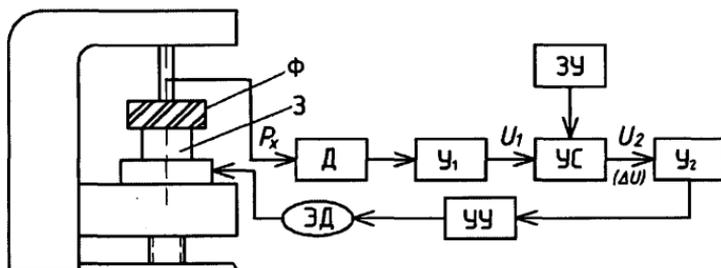


Рис. 1.24. Схема управления точностью обработки:

Ф — фреза; З — заготовка; Д — датчик; У1, У2 — усилители; ЗУ — задающее устройство; УС — устройство сравнения; УУ — устройство управления; ЭД — электродвигатель привода подачи

Подналадка станка производится в момент времени t_2 , когда центр группирования размеров (средняя арифметическая величина x) сместится к верхней границе допуска на величину δ_n . В период работы станка (время t_0) с помощью самописца можно автоматически отслеживать величину смещения δ_n .

Система автоматизация управления точностью обработки в цепи обратной связи имеет датчик, измеряющий составляющую p_x силы резания p , например, по величине упругого отжатия инструмента.

Устройство сравнения сравнивает фактическую и заданную величины p_x , и система вырабатывает сигнал управления скоростью подачи, от которой во многом зависит точность обработки. Управляющий сигнал с устройства сравнения после усиления попадает на серводвигатель привода подачи.

1.8. Метод сетевого планирования и управления сложными работами-проектами

Метод сетевого планирования и управления (СПУ) представляет собой логико-математический метод решения задач рационального планирования сложного комплекса взаимосвязанных работ по выполнению каких-либо программ и проектов (например, строительство крупного объекта, разработка научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с участием многих коллективов). СПУ обеспечивает оптимальное распределение материальных и трудовых ресурсов по работам плана. Комплекс работ представляют в виде ориентированного графа (сетевого графика), дуги которого — выполняемые работы, а вершины — события (завершенные работы). События не являются процессом и поэтому не требуют затрат времени и ресурсов.

Основные свойства сетевого графика:

- ни одно событие не может произойти, пока не будут закончены все входящие в него работы;
- ни одна работа, выходящая из какого-либо события, не может начаться, пока не произойдет данное событие;
- ни одна последующая работа не может начаться раньше, чем будут закончены все предшествующие работы.

Исходными данными для построения сетевого графика служат перечень событий и перечень работ, обеспечивающих выполнение событий. Сетевой график показывает, какое мероприятие следует выполнять в первую очередь, а какое можно выполнять параллельно.

Приведем пример построения сетевого графика небольшой длительности.

Первым составляют перечень событий. Фрагмент этого перечня представлен в табл. 1.1.

Фрагмент перечня работ приведен в табл. 1.2.

Таблица 1.1. Перечень событий

Обозначение события	Наименование события
a_0	Работа начата по плану
a_1	Подготовительные мероприятия закончены
a_2	Выполнена предварительная обработка
a_3	Выполнена последующая обработка
a_4	Закончены финишные операции

Таблица 1.2. Перечень работ

Работа	Наименование работ	Продолжительность, ч	Прешествующие работы	Последующие работы
A_{01}	Выполнение подготовительных мероприятий	4	—	A_{12}, A_{13}
A_{12}	Выполнение предварительной обработки	8	A_{01}	A_{24}, A_{25}
A_{13}	Выполнение последующей обработки	4	A_{01}	A_{34}
A_{24}	Выполнение финишных операций	12	A_{12}	A_{45}, A_{46}

Примерный сетевой график содержит 8 событий ($N_c = 8$), 10 работ ($N_p = 10$) и полное время проекта $T_{пр} = 48$ ч (рис. 1.25).

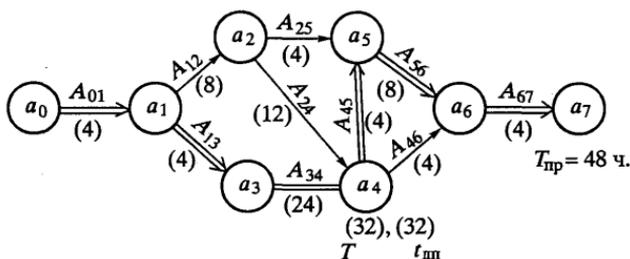


Рис. 1.25. Пример сетевого графика с $N_c = 8$, $N_p = 10$ и $T_{пр} = 48$ ч (критический путь обозначен двойной линией)

Основные параметры сетевого графика:

- *критический путь* — максимальный по времени путь от начального события до конечного;

- *резерв времени* не критического пути показывает, насколько может быть увеличена продолжительность работ на этом пути без увеличения общего срока выполнения проекта;
- *ранг события* — максимальное число работ, входящих в какой-либо из путей.

Первый ранг события a_1 показывает, что путь из a_0 в a_1 состоит из одной работы A_{01} . Событие a_4 имеет 3-й ранг, так как оба пути из a_0 включают 3 работы: A_{01} , A_{12} , A_{24} . В нашем примере параллельно можно выполнять работы A_{24} и A_{25} . Минимальное время проекта достигается только в случае, если каждая операция критического пути начинается сразу же после окончания предшествующих. Резервы времени, выявленные на ненапряженных путях, обычно используются для ускорения работ, лежащих на критическом пути. Резервы времени для работ на критическом пути равны нулю.

Критический путь определяется при движении вперед по сетевому графику от события a_0 (при $t = 0$), причем для каждого события a_i находятся все возможные пути и берется $T(a_i) = \max(t_i)$, где $\max(t_i)$ — максимальное время из всех возможных при движении из a_{i-1} в a_i .

Для определения резервов времени на ненапряженном пути следует двигаться по сетевому графику в обратном направлении, и для каждого события a_i вычисление $\tau(a_i)$ проводим аналогично $\tau(a_i) = \max(t_i)$. Временные ресурсы для каждой работы определяем через *допустимо позднее* время $t_{д.п}$ осуществления события a_i , не увеличивающее время выполнения проекта:

$$t_{д.п}(a_i) = T_{пр} - \tau(a_i).$$

Разница $\Delta t = t_{д.п}(a_i) - T(a_i)$ определяет резерв времени для каждой работы.

Значения $t_{д.п}(a_i)$ наносим на вершины сетевого графика. При этом окажется, что в вершинах графика, лежащих на критическом пути, мы получим равенство

$$t_{д.п}(a_i) = T(a_i),$$

где $T(a_i) = \max(t_i)$.

Следовательно в этих вершинах резерв времени отсутствует ($\Delta t = 0$).

В качестве примера рассчитаем резерв времени для события a_2 , которое лежит на не критическом пути (рис. 1.26). При обратном ходе имеем:

$$\tau(a_2) = \max(t_i) = 4 + 8 + 4 + 12 = 28.$$

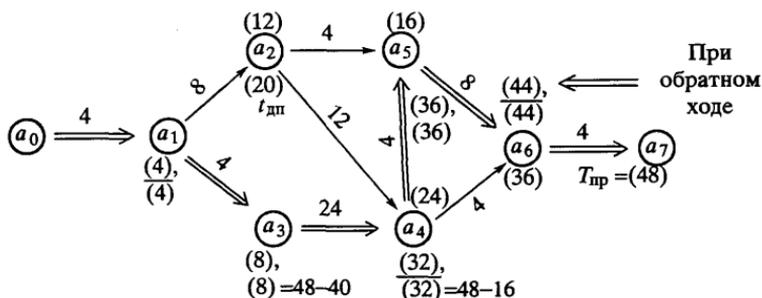


Рис. 1.26. Пример определения резерва времени для события a_2 , лежащего на некритическом пути

Допустимо позднее время для a_2 равно:

$$t_{д.п}(a_2) = 48 - 28 = 20.$$

Резерв времени для a_2 составит:

$$\Delta t = t_{д.п}(a_2) - T(a_2) = 20 - 12 = 8 \text{ ед. времени,}$$

где $T(a_2) = 4 + 8 = 12$ получено при прямом ходе по сетевому графику.

При составлении перечня работ и сетевого графика время выполнения каждой работы определяется экспертами по формуле среднего ожидаемого времени

$$t_{cp} = \frac{\min t + 4t_{н.в} + \max t}{6},$$

где $\min t$ — продолжительность работы при благоприятных условиях (оптимистическая оценка);

$\max t$ — то же при неблагоприятных условиях;

$t_{н.в}$ — наиболее вероятная оценка времени.

Среднеквадратическая ошибка в определении продолжительности работы равна:

$$\sigma = \frac{\max t - \min t}{6}.$$

Например, имеем: $\min t = 4$ ч, $\max t = 9$ ч, $t_{н.в} = 7$ ч. Тогда получим:

$$t_{cp} = \frac{4 + 4 \cdot 7 + 9}{6} = 6,84 \approx 7 \text{ ч; } \sigma = (9 - 4)/6 = 0,83 \approx 1 \text{ ч.}$$

Чтобы отобразить на сетевом графике зависимость работ, непосредственно не опирающихся друг на друга, вводится фиктивная ра-

бота, которая имеет нулевые затраты времени. Она наносится на график штриховой линией.

Сетевой график на реализацию крупных проектов уровня ИПС включает следующие основные этапы:

- 1) предпроектное обследование предприятия и формирование служебного назначения ИПС;
- 2) разработка технического задания на ИПС;
- 3) разработка эскизного проекта;
- 4) разработка технического проекта;
- 5) разработка рабочего проекта;
- 6) пусконаладочные работы;
- 7) опытная эксплуатация и внедрение ИПС.

Исходные данные для проектирования ИПС: номенклатура и годовой объем выпуска продукции; состав и специализация производственных участков и цехов; маршрутная технология и необходимое оборудование.

Глава 2

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

2.1. Производительность технологических машин, комплексов и линий

Под производительностью технологической машины, комплекса, линии понимается количество продукции, производимой в единицу времени (секунду, минуту, час, смену и т. д.). Все технологические машины (ТМ) можно разделить на три класса по связи технологического времени $t_{\text{ТХ}}$ изготовления единицы продукции с временем транспортирования $t_{\text{ТР}}$ объекта в процессе обработки заготовки или сборки изделия. Производительность Q любой технологической машины или системы обратно пропорциональна времени цикла $t_{\text{Ц}}$ изготовления единицы продукции. Структура $t_{\text{Ц}} = t_{\text{О}} + t_{\text{ВС}}$ меняется в зависимости от класса ТМ (здесь $t_{\text{О}}$ — основное производственное время; $t_{\text{ВС}}$ — вспомогательное время).

Производительность технологических машин первого класса

К технологическим машинам первого класса относится обширный парк металлорежущих станков и прессов. Для ТМ 1-го класса характерно изготовление детали (изделия) в стационарном режиме, т. е. без перемещения объекта (транспортная скорость объекта $v_{\text{ТР}} = 0$ и $t_{\text{ТР}} = 0$). С целью повышения производительности технологическая скорость ТМ 1-го класса устанавливается максимальной $v_{\text{ТХ}} = \max$ (следовательно, $t_{\text{ТХ}} = \min$) и остается постоянной в процессе изготов-

ления изделия. Таким образом, характеристика ТМ 1-го класса имеет вид [1, 6, 11]:

$$t_{\text{ТХ}} = t_0 = \text{const}; \quad t_{\text{ТР}} = 0.$$

Теоретическая цикловая производительность ТМ 1-го класса равна:

$$Q_{\text{T}} = \frac{k}{t_{\text{ц}}},$$

где k — число одновременно обрабатываемых заготовок за время $t_{\text{ц}}$ в многошпиндельных агрегатах.

Однако чаще встречается оборудование с $k = 1$. Для таких ТМ теоретическая производительность рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{T}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}}.$$

Фактическая производительность $Q_{\text{ф}}$ меньше теоретической из-за простоев оборудования по различным причинам. Полные простои оцениваются коэффициентом использования оборудования:

$$\eta = \frac{t_{\text{р}}}{t},$$

где $t_{\text{р}} = t - t_{\text{п}}$ — время работы оборудования за период t ;
 $t_{\text{п}}$ — время простоев.

Например, если $t = 8$ ч, $t_{\text{п}} = 2$ ч, то $\eta = 6/8 = 3/4$, или 0,75.

Найдем значение коэффициента использования оборудования:

$$Q_{\text{ф}} = \frac{1}{t_{\text{ц}} + \sum_{i=1}^n t_{ni}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\sum t_{ni}}{t_{\text{ц}}}} = Q_{\text{T}} \eta,$$

где $\sum_{i=1}^n t_{ni}$ — полные внецикловые потери времени (простои оборудования из-за переналадок, смены материала или заготовок и т. п.);

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\sum t_{ni}}{t_{\text{ц}}}}.$$

В зависимости от типа оборудования коэффициент η принимает значения $\eta = 0,8...0,98$.

Для расчета производительности поточных линий вместо $t_{ц}$ используется время такта $t_{т}$ — промежуток времени, через который с линии выходит очередное готовое изделие. Производительность линии рассчитывается по формуле

$$Q_{т} = \frac{1}{t_{т}} \text{ и } Q_{ф} = \frac{1}{t_{т}} \eta.$$

Время такта для поточной линии с тактовым конвейером равно:

$$t_{т} = t_{в} + t_{д},$$

где $t_{в}$ — время выстоя конвейера (соответствует технологическому времени $t_{тх}$);

$t_{д}$ — время движения конвейера между позициями линии (обычно $t_{д}$ минимально).

Время $t_{в}$ устанавливают по технологической операции с наибольшей длительностью $t_{в} = t_{л}$ (лимитирующая операция).

Время цикла для поточной линии равно:

$$t_{ц} = t_{т} n_{оп},$$

где $n_{оп}$ — число операций в линии.

Пути повышения производительности ТМ 1-го класса: организация параллельной обработки ($k > 1$), форсирование технологических режимов (снижение $t_{о}$ и $t_{вс}$). Для линий с тактовым конвейером необходимо снижать $t_{в}$ и $t_{д}$.

Производительность технологических машин второго класса

К технологическим машинам второго класса относятся транспортно-технологические системы (ТТС), в которых обработка осуществляется в процессе транспортирования объекта обработки. В группу ТТС попадает оборудование для профильного проката, накатки резьбы, протяжки шлицев, гидроэкструзии, ряда операций химической обработки.

Производительность ТТС выше, чем у ТМ 1-го класса, за счет исключения из $t_{ц}$ вспомогательного времени ($t_{вс} = 0$), т. е. времени холостого хода. Однако повышение производительности в ТТС принципиально ограничено условием

$$t_{тр} = t_{тх}, \text{ или } v_{тр} = v_{тх}.$$

Это условие является характеристикой ТТС. Попытка снизить $t_{тр}$ (или увеличить $v_{тр}$) приводит к нарушению технологического режима

и появлению брака. Производительность ТТС рассчитывается по формуле

$$Q_{\Phi} = \frac{1}{t_{mp} + \sum_{i=1}^n t_{ni}}$$

Основной путь повышения производительности ТТС — совершенствование технологического процесса в направлении снижения $t_{тх}$ и, следовательно, $t_{тп}$.

Производительность технологических машин третьего класса

К третьему классу относятся роторные технологические машины и поточные линии с непрерывно движущимся конвейером, в которых, как и в ТТС, обработка осуществляется в процессе транспортирования деталей. Однако принципиальное отличие ТМ 3-го класса от ТТС заключается в том, что у них транспортное время жестко не привязано к технологическому. Поэтому характеристика ТМ 3-го класса имеет вид [11, 23]:

$$t_{тп} \neq t_{тх} \text{ или } v_{тп} \neq v_{тх},$$

где $t_{тх} = \text{const}$;

$$t_{тп} = \text{var}.$$

Это означает, что технологический режим всегда выдерживается, а транспортная скорость независимо может увеличиваться в разумных пределах. Так поступают во всем мире при проектировании линий конвейерной сборки автомобилей. Фактическая производительность конвейерной линии равна:

$$Q_{\Phi} = \frac{v_{к}}{s} \eta,$$

где s — шаг между позициями линии;

$v_{к}$ — скорость движения конвейера.

Время такта конвейерной линии $t_{т} = \frac{s}{v_{к}}$.

Фактическая производительность роторных машин и линий рассчитывается по аналогичной формуле, в которой линейную скорость ротора $v_{р}$ необходимо выразить через угловую скорость ω :

$$v_{р} = R\omega,$$

где R — радиус ротора (задает конструктор).

Так как $\omega = 2\pi n$ (где n — число оборотов ротора в мин), то линейную скорость запишем, м/с:

$$v_p = \frac{\pi R n}{30}$$

Время такта роторной линии:

$$t_T = \frac{s}{v_p} = \frac{30s}{\pi R n},$$

а производительность роторных машин и линий:

$$Q_\Phi = \frac{\pi R n}{30s} \eta.$$

Так же как шаг s , частоту вращения ротора n задает конструктор. Схематично фрагмент роторной линии представлен на рис. 2.1.

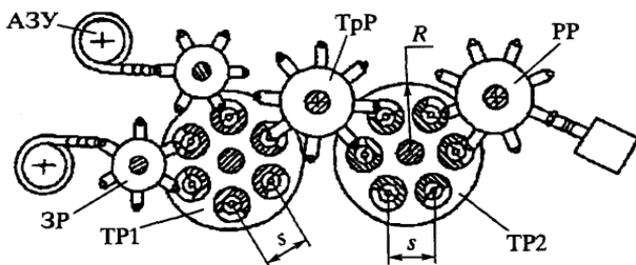


Рис. 2.1. Схема фрагмента роторной линии с двумя технологическими роторами TP1, 2: ЗР — загрузочный ротор; TPР — транспортный ротор; РР — разгрузочный ротор; АЗУ — автоматическое загрузочное устройство

Нарращивание транспортной скорости v_{TP} с целью повышения производительности технологических систем 3-го класса приводит к увеличению длины конвейерных и роторных линий и, как следствие, к снижению их надежности. Угловая скорость роторов в роторных линиях обычно лежит в диапазоне: 15...55 оборотов в минуту. Фактическая производительность линий может достигать 1000 шт./мин (60 000 шт./ч). С такой производительностью работают роторные линии в патронном производстве.

В настоящее время в нашей стране, кроме продукции оборонной промышленности, на роторных линиях выпускают разовые шприцы, втулочно-роликовые цепи, клапаны аэрозольных баллонов и другие виды подобной продукции.

2.2. Надежность технических систем

Надежность — способность технических систем (устройств) безотказно (исправно) работать в течение определенного периода времени в заданных условиях эксплуатации.

Основное понятие в теории надежности — отказ, означающий полную или частичную потерю работоспособности системы (устройства). Виды отказов:

- *внезапный* отказ — повреждение (например, поломка) какого-либо элемента устройства;
- *постепенный* отказ возникает в результате непрерывного изменения характеристик системы, например износа в кинематических звеньях и возрастания зазоров, приводящих к поломке.

Основные параметры надежности

Надежность является комплексным показателем, который включает несколько параметров.

1. **Интенсивность** (или плотность) **потока отказов** — среднее число отказов в единицу времени:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{от}(t, \Delta t)}{\Delta t},$$

где $P_{от}(t, \Delta t)$ — вероятность отказа за период Δt .

Приближенно можно принять $P_{от}(t, \Delta t) = \frac{m}{n}$, где m — число отказавших элементов за период Δt ; n — общее число элементов устройства; $\frac{m}{n}$ — относительная частота отказов.

Тогда интенсивность потока отказов, ч^{-1} :

$$\lambda(t) \approx \frac{m}{n\Delta t}.$$

Значения $\lambda(t)$ для различных типов систем определяются опытным путем (по специальным методикам испытаний) и заносятся в справочные таблицы. Примерное распределение отказов по видам: 48 % — электронное и электрическое оборудование; 37 % — механические узлы; 15 % — гидро- и пневмоприводы.

Нормальные значения λ : для отдельных элементов $\lambda(t) = 10^4 \dots 10^6 \text{ ч}^{-1}$; для систем $\lambda(t) = 10^2 \dots 10^4 \text{ ч}^{-1}$ (по данным японских фирм,

λ для ГПС среднего уровня — не более одного отказа в год при односменной работе, т. е. $\lambda(t) = 1/2000 = 0,0005 \text{ ч}^{-1}$). Для большинства отечественных систем удовлетворительным считается значение $\lambda(t) = 0,0025 \text{ ч}^{-1}$, что означает безотказную работу системы в течение одного месяца в трехсменном режиме, т. е. в течение 400 ч ($20 \text{ ч} \times 20 \text{ дней} = 400 \text{ ч}$).

2. **Средняя наработка на отказ** (или математическое ожидание отказа), ч:

$$\bar{t}_{\text{от}} = \frac{1}{\lambda}.$$

Этот параметр, как и λ , характеризует запас надежности системы (в старом ГОСТе $\bar{t}_{\text{от}}$ назывался коэффициентом надежности). Поэтому можно использовать любую из этих двух величин для характеристики надежности элемента, устройства или системы. В соответствии с указанными λ нормальные значения $\bar{t}_{\text{от}}$ для систем равны: $\bar{t}_{\text{от}} = 300 \dots 10^4 \text{ ч}$.

3. **Коэффициент готовности системы** характеризует ее ремонтпригодность, т. е. быстроту и удобство восстановления системы:

$$k_r = \frac{t_{\text{от}}}{t_{\text{от}} + t_{\text{в}}},$$

где $t_{\text{в}} = \sum_{i=1}^m \frac{\tau_i}{m}$ — среднее время восстановления системы;

τ_i — время восстановления i -го элемента;

m — число отказавших элементов за время $\bar{t}_{\text{от}}$.

4. **Долговечность технической системы** — свойство сохранять работоспособность в течение всего срока службы системы:

$$D = \frac{T_p}{T_p + \sum_{i=1}^m \tau_{ni}},$$

где T_p — время работы системы за весь период эксплуатации в часах;

τ_{ni} — время простоя системы по причине отказа i -го элемента;

$\sum_{i=1}^m \tau_{ni}$ — суммарное время простоев за весь период эксплуатации

системы.

Для инженеров-разработчиков сложных автоматизированных систем большой интерес представляют две задачи, связанные с расчетом характеристик надежности.

Расчет вероятностей числа отказов k при n испытаниях системы

Для расчета вероятностей числа отказов k используется формула Бернулли, в основе которой лежит *теорема умножения вероятностей независимых событий*, т. е. вероятности их совместного появления [9, 10]:

$$P_n(k) = C_n^k p^k q^{n-k},$$

где p — вероятность отказа в каждом испытании (или вероятность отказа i -го элемента при n элементов системы);

q — вероятность неотказа;

n — число испытаний (или число элементов системы);

k — число отказов;

$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ — биномиальный коэффициент (так как $(p+q)^n$ —

бином Ньютона).

Распределение вероятностей, определяемое формулой Бернулли, называется *биномиальным* распределением дискретной случайной величины (в нашем случае отказов), которое при $n \rightarrow \infty$ приближается к нормальному распределению вероятностей (рис. 2.2).

При больших значениях n вычисление вероятностей по формуле Бернулли затруднено, поэтому используется приближенная формула Пуассона, как предельный случай формулы Бернулли

$$P_n(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}.$$

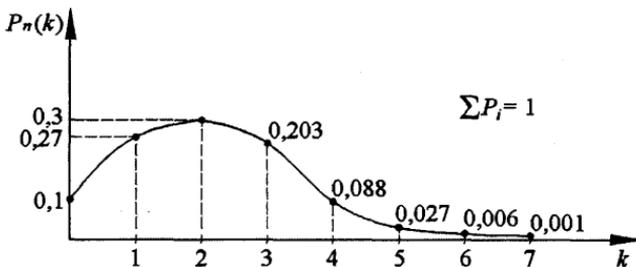


Рис. 2.2. График биномиального распределения дискретной случайной величины при $n = 10$, $p = 0,2$

Рассмотрим пример. Пусть техническая система состоит из $n = 500$ элементов при $p = 0,002$.

Требуется найти следующее распределение вероятностей:

- а) откажет ровно $k = 3$ элемента;
- б) менее 3;
- в) более 3;
- г) хотя бы 1 элемент.

Решение. Условия задачи удовлетворяют распределению Пуассона. Определим интенсивность потока отказов: $\lambda = 500 \cdot 0,002 = 1$.

$$1. P_{500}(3) = 1^3/3! \cdot e^{-1} = 0,36788/6 = 0,0613.$$

2. Сумма вероятностей, кроме $k = 3$:

$$P_{500}(<3) = P_{500}(0) + P_{500}(1) + P_{500}(2) = e^{-1} + e^{-1} + e^{-1}/2 = 0,9197.$$

3. Противоположное событие — отказало не более 3 элементов (это сумма вероятностей, включая $k = 3$):

$$P_{500}(>3) = 1 - q = 1 - (0,9197 + 0,0613) = 0,019 \text{ (см. п. 1 и 2).}$$

4. Противоположное событие — не отказал ни один элемент ($k = 0$):

$$P = 1 - P_{500}(0) = 1 - 0,36788 = 0,632.$$

Если в n испытаниях вероятности p_i появления события (отказа) не равны, то используют *производящую* функцию типа

$$\varphi_n(z) = (p_1z + q_1)(p_2z + q_2) \dots (p_nz + q_n),$$

где z — некоторая переменная.

Вероятность $P_n(k)$ равна коэффициенту при z^k в разложении производящей функции по степеням z . Например, для $n = 2$ имеем:

$$\varphi_2(z) = (p_1z + q_1)(p_2z + q_2) = p_1 p_2 z^2 + (p_1 q_2 + p_2 q_1)z + q_1 q_2,$$

где $P_2(2) = p_1 p_2$; $P_2(1) = (p_1 q_2 + p_2 q_1)$; $P_2(0) = q_1 q_2$.

Рассмотрим пример. Устройство состоит из трех независимо работающих элементов, вероятности безотказной работы которых за период t равны: $p_1 = 0,7$; $p_2 = 0,8$; $p_3 = 0,9$.

Найти следующее распределение вероятностей отказов за период t :

- а) все 3 элемента будут работать безотказно ($k = 0$);
- б) только 2 элемента ($k = 1$);

- в) только 1 элемент ($k = 2$);
 г) ни один из элементов ($k = 3$).

Решение. Сначала найдем вероятности отказов:

$$q_1 = 1 - 0,7 = 0,3; \quad q_2 = 0,2; \quad q_3 = 0,1.$$

Составим производящую функцию для $n = 3$:

$$\begin{aligned} \Phi_3(z) &= (p_1z + q_1)(p_2z + q_2)(p_3z + q_3) = \\ &= (0,7z + 0,3)(0,8z + 0,2)(0,9z + 0,1) = \\ &= 0,504z^3 + 0,398z^2 + 0,092z + 0,006. \end{aligned}$$

Таким образом, имеем:

- а) $P_3(0) = 0,504$ — не отказал ни один элемент;
 б) $P_3(1) = 0,398$ — отказал один элемент;
 в) $P_3(2) = 0,092$ — отказали 2 элемента;
 г) $P_3(3) = 0,006$ — отказали 3 элемента.

Для проверки решения используем контрольную функцию

$$\sum_1^4 p_i = 0,504 + 0,398 + 0,092 + 0,006 = 1.$$

Расчет вероятностей числа отказов на заданном интервале времени t

Для вычисления функции $P_i(k)$ используют разновидность формулы Пуассона

$$P_i(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}.$$

Вероятность того, что за время t не произойдет ни одного отказа ($k = 0$):

$$P_i(0) = P(t) = e^{-\lambda t}.$$

В теории надежности эта формула известна как **функция надежности**. Она показывает **экспоненциальное** распределение времени между отказами (рис. 2.3, а). Противоположная функция позволяет вычислять вероятность отказа (рис. 2.3, б):

$$P_{от}(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Вероятность безотказной работы системы для малых промежутков времени Δt можно рассчитывать по приближенной формуле [9, 10]:

$$P(t) = 1 - \lambda t,$$

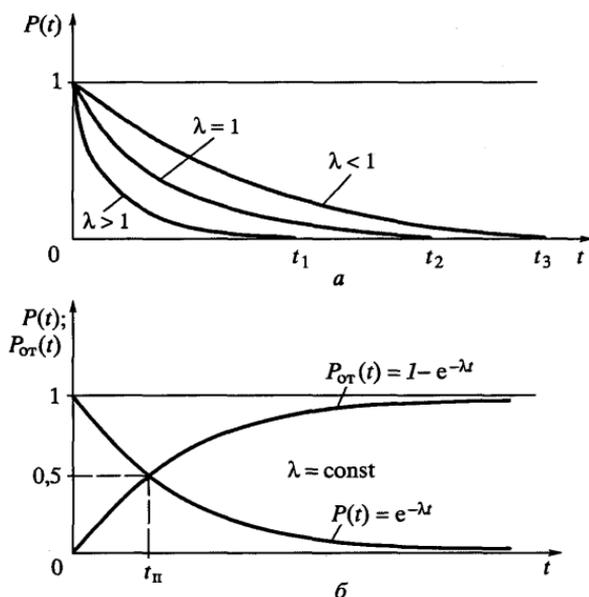


Рис. 2.3. Графики экспоненциального распределение времени между отказами $P(t)$ для различных λ (а) и вероятности отказа $P_{отр}(t)$ (б)

которая получается разложением показательной функции в степенной ряд

$$e^{-\lambda t} = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \frac{(\lambda t)^3}{3!} \dots$$

В этом разложении членами выше первого порядка пренебрегаем.

Приближенная формула справедлива для малых значений $\lambda t \leq 0,1$.

Расчет вероятностных характеристик с помощью функции надежности возможен при условии $\lambda = \text{const}$. Известно, что по мере расходования резерва надежности значение $\lambda(t)$ в течение эксплуатации системы изменяется (рис. 2.4).

В начальный период повышенное значение $\lambda(t) = \lambda_1$ объясняется наличием скрытых дефектов в элементах системы, которые проявляются в процессе приработки узлов. В самый длительный период нормальной эксплуатации системы интенсивность потока отказов $\lambda(t) = \lambda_2$ снижается и остается приблизительно постоянным ($\lambda_2 = \text{const}$). Именно для этого периода справедлива функция надежности. Третий период характеризуется резким повышением $\lambda(t) = \lambda_3$, которое объяс-

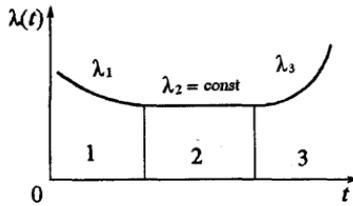


Рис. 2.4. График изменения интенсивности потока отказов за период эксплуатации системы:

1 — начальный период приработки узлов; 2 — период нормальной эксплуатации; 3 — период катастрофического износа узлов

няется появлением недопустимо больших зазоров в кинематических парах системы в результате прогрессирующего износа деталей.

Рассмотрим пример использования функции надежности.

Испытывают два независимо работающих элемента с характеристиками:

$$\lambda_1 = 0,02; \quad \lambda_2 = 0,05.$$

Найти вероятность того, что за период $t = 6$ ч:

а) оба элемента откажут; б) оба не откажут; в) только один элемент откажет; г) хотя бы один элемент откажет.

Решение

1. Вероятность отказа одного элемента:

$$p_{от1} = 1 - e^{-0,02 \cdot 6} = 1 - 0,887 = 0,113,$$

где $p_1 = 0,887$ — вероятность безотказной работы;

$$p_{от2} = 1 - e^{-0,05 \cdot 6} = 1 - 0,741 = 0,259, \text{ где } p_2 = 0,741.$$

Вероятность отказа обоих событий рассчитаем по формуле умножения вероятностей независимых событий

$$p_{от} (2 \text{ эл}) = p_{от1} \cdot p_{от2} = 0,113 \cdot 0,259 = 0,03.$$

2. Вероятность безотказной работы обоих элементов находим аналогично:

$$P(t) = p_1 \cdot p_2 = 0,887 \cdot 0,741 = 0,66.$$

3. Вероятность отказа только одного элемента находим как сумму произведений $p_i \cdot q_j$:

$$p_2 \cdot q_1 + p_1 \cdot q_2 = 0,113 \cdot 0,741 + 0,259 \cdot 0,887 = 0,31,$$

где $q_1 = p_{от1}$; $q_2 = p_{от2}$.

4. Вероятность отказа хотя бы одного элемента находим как событие, противоположное событию по п. 2:

$$P_{\text{от}}(1 \text{ эл}) = 1 - p_1 \cdot p_2 = 1 - 0,66 = 0,34.$$

Пути повышения надежности технических систем

Статистика показывает, что затраты на восстановительные работы и производство запасных частей составляют более половины стоимости новой техники.

Основные пути повышения надежности:

1) снижение интенсивности потока отказов λ (повышение $t_{\text{от}}$) за счет применения новых материалов с высокими эксплуатационными свойствами (повышение износостойкости деталей кинематических пар);

2) входной контроль исходных материалов, деталей и комплектующих. Сохранение технологических и эксплуатационных норм в производстве и рабочем периоде;

3) сокращение числа деталей в узле (и числа узлов в системе) на стадии конструирования машин и механизмов. Следует помнить, что вероятность безотказной работы машины равна произведению вероятностей $p_i(t)$ безотказной работы ее элементов:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t).$$

Эта формула соответствует последовательному соединению элементов в узле (рис. 2.5, а);

4) применение принципа резервирования потенциально ненадежных элементов в особо ответственных узлах:

$$p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n p_{\text{оти}}(t).$$

Эта формула соответствует параллельному соединению элементов, когда перемножаются вероятности отказов элементов $p_{\text{оти}}$

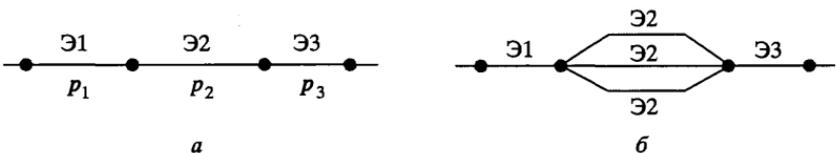


Рис. 2.5. Последовательное (а) и параллельное (б) соединение элементов в узле

(рис. 2.5, б). При тройном резервировании элемента с $p(t) = 0,9$ (вероятность отказа каждого из трех элементов $p_{от}(t) = 1 - 0,9 = 0,1$) вероятность безотказной работы элемента с резервированием равна:

$$p_p(t) = 1 - (0,1)^3 = 0,999;$$

5) обеспечение фирменного обслуживания и ремонта технических систем. Повышение надежности ведет к росту коэффициента использования оборудования.

2.3. Уровень автоматизации, технологическая гибкость и другие характеристики технических систем

Уровень автоматизации

По числу операций:

$$y_a = \frac{n_{ao}}{n_{об}},$$

где n_{ao} , $n_{об}$ — число автоматизированных и общее число операций на участке соответственно;

$$y_a \leq 1.$$

По трудоемкости:

$$y_a = \frac{t_o}{t_{шт}},$$

где t_o , $t_{шт}$ — основное и штучное время на операциях участка соответственно.

В инженерной практике вместо уровня автоматизации иногда пользуются понятием «степень автоматизации»:

$$C_a = \frac{p_a}{p_{об}},$$

где p_a , $p_{об}$ — число рабочих на автоматизированных операциях и общее число рабочих на участке соответственно; $C_a \leq 1$.

Численные значения уровня автоматизации:

$y_a = 0,25 \dots 0,45$ — малый уровень;

$y_a = 0,45 \dots 0,6$ — средний;

$y_a = 0,6 \dots 0,75$ — повышенный;

$y_a = 0,8 \dots 0,95$ — высокий;

$y_a = 1$ — полная автоматизация.

Технологическая гибкость

$$\Gamma = \frac{t_o}{t_o + t_{\pi}} \left(1 - \frac{1}{m} \right),$$

где $t_o = \frac{\sum_{i=1}^n t_{oi}}{n}$ — среднее время обработки заготовок n типов;

$t_{\pi} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} t_{ni}}{n-1}$ — среднее время переналадки оборудования системы с

i -й на j -ю заготовку;

n — номенклатура заготовок, обрабатываемых на данном оборудовании системы.

Численные значения коэффициента технологической гибкости:

$\Gamma = 0,6 \dots 0,8$ — средний уровень;

$\Gamma = 0,8 \dots 0,9$ — высокий уровень.

Кроме основных технико-экономических показателей, для сравнительной оценки автоматизированных систем используются следующие частные критерии:

1. Энергоемкость:

$$k_э = \frac{N}{K} \rightarrow \min,$$

где N — потребляемая системой (установкой) мощность;

K — количество продукции, изготовленной в единицу времени.

2. Металлоемкость:

$$k_м = \frac{M}{N} \rightarrow \min,$$

где M — масса системы (установки).

3. Численность обслуживающего персонала:

$$k_{оп} = \frac{t_з}{\Phi_{см}} \rightarrow \min,$$

где $t_з$ — среднее время занятости персонала;

$\Phi_{см}$ — сменный фонд времени.

4. Объем незавершенного производства:

$$V_{нп} \rightarrow \min .$$

5. Занимаемая производственная площадь:

$$S_{пл} \rightarrow \min .$$

2.4. Экономическая оценка автоматизированных систем

Автоматизация производственных процессов может осуществляться как за счет создания новой техники, так и за счет модернизации существующего оборудования путем оснащения его загрузочно-разгрузочными устройствами, межоперационными транспортно-накопительными системами, единой системой управления, контроля, диагностирования и блокировки. Так как в том и другом случае требуются дополнительные капитальные вложения в совершенствование производства, то основной проблемой становится расчет условий, обеспечивающих гарантированную эффективность средств автоматизации. В производственной практике известны примеры, когда применение сложных и дорогих автоматических систем оказывалось неоправданным и убыточным для предприятия. Причиной этого часто является увлечение техническими решениями, соответствующими наивысшему уровню автоматизации в ущерб экономически целесообразным решениям.

Основным критерием эффективности новой техники должно служить сокращение затрат живого труда непосредственно в процессе производства, или повышение производительности общественного труда Π_T :

$$\Pi_T = \frac{K}{3} = \frac{K_T t}{3_{пт} + (3_M + 3_{жт})t},$$

где K , K_T — количество выпущенной продукции за определенный промежуток времени t (число лет) и за 1 год (в штуках, тоннах, м³) соответственно;

3 , $3_{пт}$, 3_M , $3_{жт}$ — суммарные затраты общественного труда в рублях, затраты прошлого труда (на здания, оборудование и др.), затраты на материалы, инструмент, электроэнергию, ремонт и т. д., затраты живого труда (зарплата, накладные расходы и др.) соответственно.

Анализ зависимости $\Pi_T(t)$ показывает, что, начиная с некоторого отрезка времени t_k , рост производительности общественного труда практически прекращается (рис. 2.6) и, следовательно, существенный прирост показателя Π_T может быть достигнут за счет перехода на качественно новые технологии и оборудование.

Количественно рост Π_T при переходе на новую технику можно оценить по коэффициенту производительности труда:

$$K_{п} = T_6 / T_{нт},$$

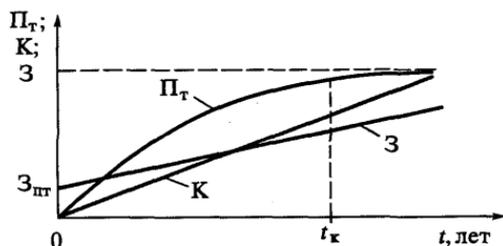


Рис. 2.6. Качественный график эффективности новой техники

где T_6 , $T_{нт}$ — трудоемкости, н/ч, изготовления продукции на базовом (существующем) и вновь предлагаемом оборудовании соответственно ($\kappa_{п} > 1$, так как $T_6 > T_{нт}$).

Помимо $\kappa_{п}$ необходимо оценивать окупаемость $O_{нт}$ затрат, которая рассчитывается из годового экономического эффекта, полученного от внедрения новой техники, например производственного комплекса (линии):

$$\Theta_r = (C1 + E_n K1) - (C2 + E_n K2) = \Delta C - E_n \Delta K,$$

где $\Delta C = C1 - C2$ — экономия по себестоимости;

$\Delta K = K1 - K2$ — дополнительные капитальные вложения на новую технику;

E_n — нормативный коэффициент эффективности дополнительных капитальных вложений.

Коэффициент E_n определяется из формулы экономического эффекта при условии $\Delta C = E_n \Delta K$ (ситуация пессимизма):

$$E_n = \frac{\Delta C}{\Delta K}.$$

По современным требованиям $E_n = 0,4$ руб. на 1 руб. затрат, откуда окупаемость составляет:

$$O_{нт} = \frac{1}{E_n} = \frac{\Delta K}{\Delta C} = 1/0,4 = 2,5 \text{ года.}$$

По старой методике СССР нормативный коэффициент был установлен $E_n = 0,15$, и поэтому окупаемость принималась $O_{нт} \approx 7$ лет.

Для конкурирующих вариантов автоматизации полный расчет себестоимости продукции выполнять нецелесообразно, а достаточно ограничиться расчетами технологической себестоимости. Для этого рассчитывают приведенные капитальные затраты для сопоставляе-

мых вариантов по установленному для отрасли нормативному коэффициенту эффективности, затем находят приведенные затраты по минимуму. При определении величины экономической эффективности в конкретных условиях типовой методикой предусматривается принимать за базу сравнения показатели заменяемой техники.

В случае расчета эффективности необходимо соблюдать сопоставимость затрат сравниваемых вариантов по роду производств, времени получения эффекта, ценам и методам исчисления. Так, если по сравниваемым вариантам капиталовложения осуществляются в разные сроки, а текущие затраты изменяются во времени, то сравнивать варианты следует приведением затрат более поздних лет к текущему моменту путем применения коэффициента приведения (функция выгод):

$$B = (1 + E_n)^{-t},$$

где t — период времени приведения (число лет).

С помощью функции выгод выясняется, что экономия \mathcal{E}_1 , полученная через t_1 лет, снижается более чем в два раза ($\mathcal{E}_2 < \mathcal{E}_1/2$) к периоду $t_2 = 2t_1$ по отношению к средствам, сэкономленным в момент отсчета времени t .

Экономический анализ эффективности конкурирующих вариантов автоматизации изготовления изделий в некоторых случаях показывает, что при одинаковом объеме производства на данный момент времени предприятию выгоднее внедрение поточно-механизированных линий с запланированными техническими характеристиками вместо автоматических. По данным немецких специалистов, затраты на автоматизацию оправданы, если по сравнению с базовым вариантом производительность системы возрастает примерно в два раза [7, 2].

Глава 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

3.1. Основные понятия

На стадии проектирования сложных технических систем обычно проводится их моделирование, позволяющее предсказывать поведение системы в определенных условиях, поскольку модель дает описание системы, отображающее совокупность ее свойств. Техническую систему можно описывать с различных точек зрения: функциональной, морфологической, информационной. *Функциональное* описание показывает изменение состояния системы во времени и определяет ее место по отношению к другим системам и к внешней среде. *Морфологическое* (топологическое) описание позволяет представить структуру системы, т. е. совокупность ее элементов и связей между ними. *Информационное* описание дает представление об организации системы, поскольку оно определяет зависимость морфологических и функциональных ее свойств от внутренней и внешней информации [15, 25].

В основе моделирования лежит теория подобия, которая утверждает, что абсолютное подобие имеет место лишь при замене одного

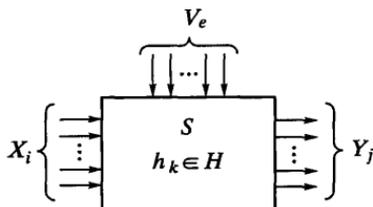


Рис. 3.1. Модель системы S в виде черного ящика

объекта другим точно таким же. Поэтому при моделировании разработчики стремятся к тому, чтобы модель как можно полнее отображала процесс функционирования объекта. Модель системы S можно представить в виде черного ящика с указанием множества величин, взаимодействующих с системой (рис. 3.1).

Входные $x_i \in X$ и внешние $v_e \in V$ воздействия, а также внутренние характеристики $h_k \in H$ системы являются независимыми переменными, а выходные параметры $y_j \in Y$ системы — зависимыми. Процесс функционирования системы можно описать оператором F_s в векторной форме:

$$\bar{Y}(t) = F_s(\bar{x}_i, \bar{v}_e, \bar{h}_k, t).$$

Оператор F_s может быть задан в виде функции, либо функционала J , в виде логических условий, или в алгоритмической и табличной формах. При разработке моделей используются классический и системный подходы. Классический подход применяют для разработки сравнительно простых моделей, в которых возможно независимое рассмотрение отдельных аспектов функционирования реального объекта. Модель M , создаваемая на базе классического подхода, представляет собой сумму компонентов K , причем каждый компонент решает определенную собственную задачу и изолирован от других K (рис. 3.2, *a*). Каждая группа исходных данных D используется для постановки локальных целей, на основе которых формируются K -модели.

При синтезе модели на основе системного подхода учитываются параметры внешней среды E и предусматривается обратная связь между моделью M и поставленной целью C (рис. 3.2, *b*). От исходной цели C формулируются технические требования T , затем в результате декомпозиции определяются подсистемы P и элементы Θ модели. Конечным шагом является функциональный выбор B составляющих системы по критериям выбора KB . Наличие обратной связи позволяет уточнять цель по результатам функционирования модели.

Поскольку реальное моделирование, являясь наиболее адекватным, требует больших материальных и временных затрат, математическое моделирование остается основным инструментом исследования сложных технических систем.

Математическое моделирование подразделяется на аналитическое, имитационное и комбинированное, включающее первые два.

При аналитическом моделировании процесс функционирования системы записывается в виде функциональных уравнений (алгебраи-

ческих, дифференциальных, конечно-разностных и т. д.) или в виде логических условий.

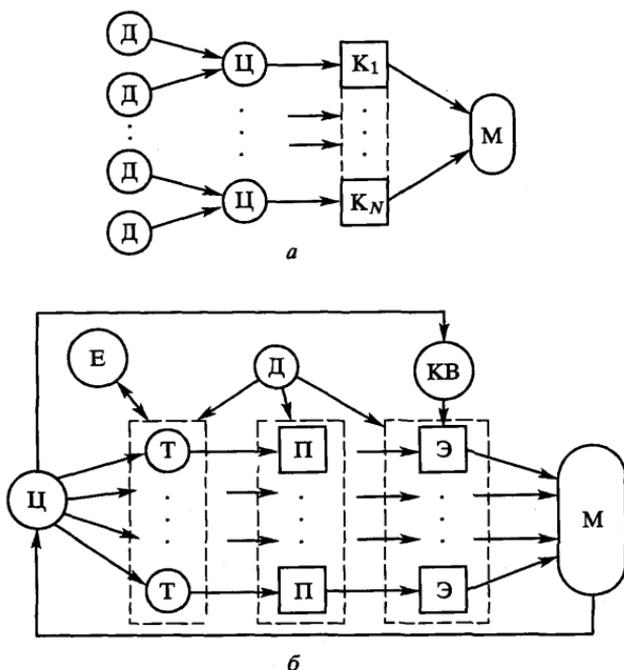


Рис. 3.2. Схемы формирования модели на основе классического (а) и системного (б) подходов

В основе имитационного моделирования лежат алгоритмы и программы, воспроизводящие работу системы с учетом реальной последовательности протекания во времени элементарных явлений и случайных воздействий на систему. По результатам моделирования устанавливается характер связей между целевым параметром (целевой функцией) и воздействующими факторами (интерполяционная задача) или решается задача оптимизации целевой функции (экстремальная задача).

Имитационное моделирование используется для структурного и параметрического синтеза технической системы с оптимизацией ее по важнейшим параметрам: производительность, надежность, экономическая эффективность. Имитационное моделирование технологических процессов и систем может проводиться с применением сетей Петри или теории систем массового обслуживания.

3.2. Имитационное моделирование объектов автоматизированного производства с использованием сетей Петри

При использовании сетей Петри моделируемые объекты (или процессы) описываются причинно-следственными отношениями на множестве: «события (переходы) — условия (позиции)». Исходя из цели модели, сначала составляется множество событий $\{t_i\}$, последовательность которых определяет функционирование системы, а затем — множество условий $\{p_i\}$, выполнение которых обеспечивает наступление того или иного события.

Последовательность событий, характеризующая процесс функционирования системы в реальном времени, отображается срабатыванием переходов. Графически сеть Петри изображается двухдольным графом с вершинами двух типов: позиции — переходы. Выполнение какого-либо условия (позиции) связано с появлением маркера (метки) в соответствующей позиции. В сетях Петри имеется ресурс меток или обеспечивается их регенерация.

Сеть Петри формально описывается набором вида

$$N = (P, T, F, H, \mu_0),$$

где $P\{p\}$ — конечное непустое множество позиций (условий);

$T = \{t\}$ — конечное непустое множество переходов (событий);

$F: P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ — функция входных инциденций (отношений);

$H: T \times P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ — функция выходных инциденций;

$\mu_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ — начальная маркировка сети Петри;

$\{0, 1, 2, \dots\} = N$ — множество натуральных чисел.

Переход t может сработать при маркировке μ , если он является возбужденным, т. е.

$$\mu(p) - F(p, t) \geq 0, \quad \forall p \in P,$$

где квантор \forall : для любого p , принадлежащего множеству P .

Это условие означает, что в каждой входной позиции P перехода t число маркеров не меньше веса дуги, соединяющей P с t . В результате срабатывания возбужденного перехода t маркировка μ заменяется маркировкой μ^1 по правилу

$$\mu^1(p) = \mu(p) - F(p, t) + H(t, p), \quad \forall p \in P.$$

В результате срабатывания перехода из всех входных позиций t изымается $F(p, t)$ маркеров, а в каждую выходную позицию перехода t добавляется $H(t, p)$ маркеров. Это означает, что маркировка μ^1 непосредственно достижима из маркировки μ : $\mu \rightarrow \mu^1$. Функционирование сети Петри — это последовательная смена маркировок в результате срабатывания возбужденных переходов t . Маркеры могут интерпретировать движение деталей или информационных данных.

Пусть произвольный граф Петри характеризуется множеством позиций $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$, множеством переходов $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ и начальной маркировкой $\mu_0 = (1, 1, 0, 0, 0)$. Это ординарная сеть Петри, у которой кратность дуг $n = 1$ (рис. 3.3). Такие дуги на графе не отмечаются. Если $n > 1$, то ее значение указывается над дугой. Такие сети называются обобщенными сетями Петри.

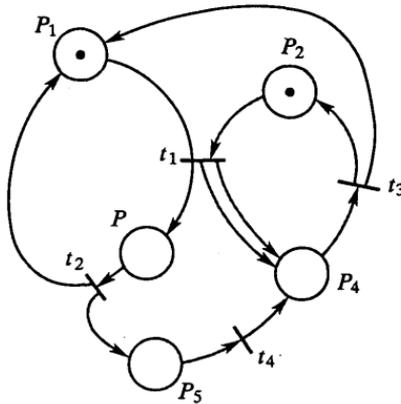


Рис. 3.3. Пример ординарной сети Петри с кратностью дуг $n = 1$

Матрицы входных (F) и выходных (H) инцидентий представлены с помощью табл. 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1. Матрица входных инцидентий F

	t_1	t_2	t_3	t_4
p_1	1	0	0	0
p_2	1	0	0	0
p_3	0	1	0	0
p_4	0	0	1	0
p_5	0	0	0	1

Таблица 3.2. Матрица выходных инцидентов H

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
t_1	0	0	1	2	0
t_2	1	0	0	0	1
t_3	1	1	0	0	0
t_4	0	0	0	1	0

Возможные варианты функционирования сети Петри описываются с помощью графа *достижимости*, вершинами которого являются возможные маркировки (рис. 3.4). Если для некоторой маркировки ни один из переходов t сработать не может, то такая маркировка называется тупиковой.

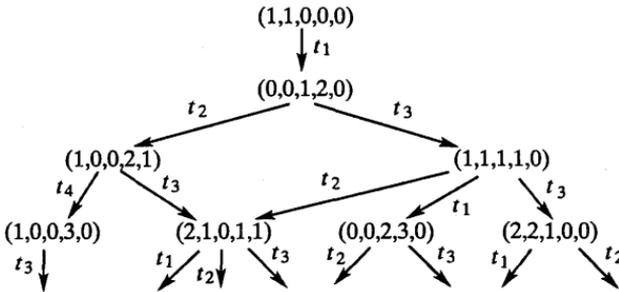


Рис. 3.4. Фрагмент графа достижимости

Множество всех маркировок, достижимых из начальной μ_0 , называется множеством достижимости сети Петри и обозначается $R(N)$.

Рассмотрим основные переходы фрагмента графа достижимости (см. рис. 3.4).

1. Произошло событие t_1 (переход t_1 открылся). Маркеры из позиций p_1 и p_2 перешли в позиции p_3 (1 метка) и p_4 (2 метки, так как в p_4 входят 2 дуги).

2. Затем, если сработал переход t_2 , то 1 метка из p_3 вернется в p_1 и 1 метка попадет в p_5 (генерация меток).

3. Если вместо t_2 сработает переход t_3 , то 1 метка вернется в p_1 и 1 метка — в p_2 . По одной метке остается в p_3 и в p_4 .

4. После срабатывания перехода t_4 (при открытых t_1 и t_2) 1 метка остается в p_1 (циркуляция по кругу), отсутствуют метки в p_2 , p_3 и p_5 . К двум меткам в p_4 добавится 1 метка из p_5 (в p_5 будет 3 метки).

Далее события могут развиваться в зависимости от срабатывания t_3 , t_2 и т. д.

Управление технологической системой в терминах сети Петри описывается функцией $F: P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ и сводится к управлению переходами t_j сети в зависимости от маркировки ее позиций. Многообразие динамических объектов в сети Петри отображается разноцветными маркерами, например, маркировка $\mu(p, \omega)$ показывает число маркеров цвета ω в позиции p .

Временные сети Петри используются для анализа периодических режимов функционирования системы (циклических процессов), так как в них переходы t_j срабатывают сразу, как только выполняются условия их возбуждения. В частности, с помощью временных сетей Петри моделируются системы конвейерного типа, которые связаны с тактовой частотой появления меток. Сети Петри позволяют моделировать процессы с конфликтными ситуациями, однако они не пригодны для моделирования событий с приоритетами (это недостаток сетей Петри).

Имитационное моделирование объектов ИПС с использованием сети Петри рассмотрим на примере модели обрабатывающего центра (ОЦ) в составе гибкого производственного комплекса (ГПК) механообработки. ГПК включает два ОЦ с операционными накопителями (ОН) заготовок и деталей (на 2 места), автоматический склад (АС) с приемно-передающим устройством (ППУ) и транспортный робот (ТР) для обслуживания ОЦ (рис. 3.5).

Имитационную модель ГПК можно построить по частям в виде модулей ОЦ, ТР, АС. Для построения модели объекта необходимо сначала составить перечень событий, а затем перечень условий. В ка-

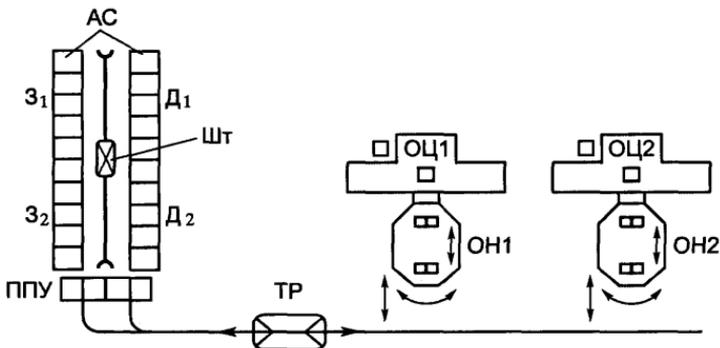


Рис. 3.5. Схема ГПК механообработки

честве примера составим перечень событий для модуля ОЦ, предварительно построив циклограмму его работы (рис. 3.7). Начало цикла работы ОЦ: событие t_1 — заготовка загружена из ОН в рабочую зону ОЦ и зафиксирована. Процесс фиксации спутника с заготовкой можно выделить в отдельное событие. Минимально необходимые условия выполнения события t_1 : p_1 — в ОН имеется требуемая заготовка; p_2 — место в ОЦ свободно. Событие t_2 — заготовка обработана согласно операционной технологической карте. Условия выполнения события t_2 : p_3 — наличие полного комплекта необходимого инструмента в инструментальном магазине; p_4 — во время обработки поломки инструмента не было. Событие t_3 — спутник с деталью расфиксирован и выгружен в ОН. Основное условие этого события p_5 — место в ОН свободно. Следующее событие t_4 — ОН сменил позицию для загрузки в ОЦ новой заготовки. Условием события t_4 может быть p_6 — наличие детали и новой заготовки в ОН.

Общий вид ГПК механообработки показан на рис. 3.6.

Событие t_5 — «ОН разгружен-загружен с помощью ТР» не влияет на время цикла работы ОЦ, так как эту операцию ТР выполняет во время обработки заготовки (см. циклограмму на рис. 3.7). Поэтому событие t_5 не включено в граф сети Петри модуля ОЦ (рис. 3.8). В графе стрелка с события t_4 замыкается на модуль ТР. Покажем нестандартную ситуацию на графе, которую представим в виде события t_2^1 — обработка заготовки прервана, ОЦ остановлен по блокиро-

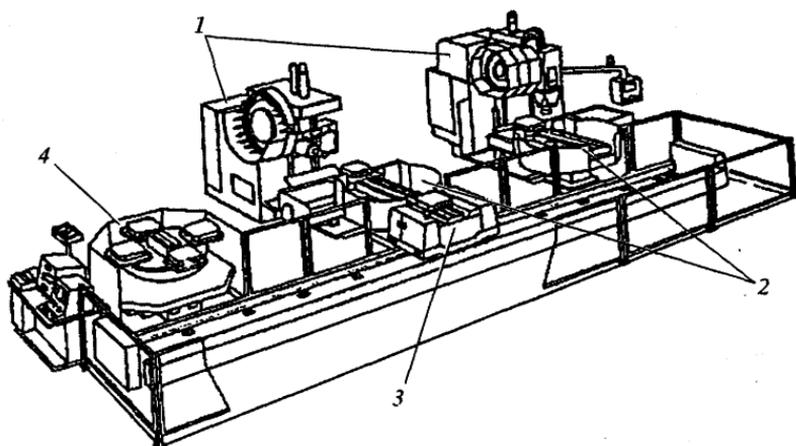


Рис. 3.6. Общий вид ГПК механообработки:
1 — ОЦ; 2 — ОН; 3 — ТР; 4 — накопитель ГПК

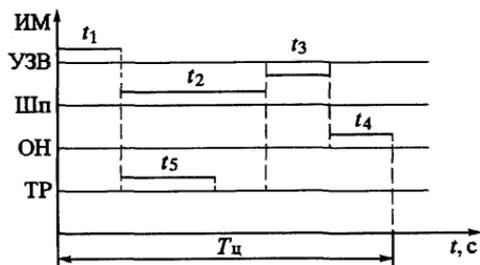


Рис. 3.7. Циклограмма работы ГПК

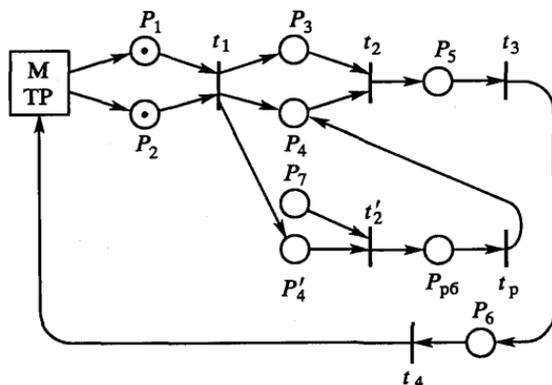


Рис. 3.8. Граф сети Петри модуля ОЦ

вочному сигналу «Стоп», дан сигнал вызова ремонтной бригады. Условие останова ОЦ p_4^1 — поломка инструмента. Событие t_p означает — бригада прибыла, ремонт произведен и ОЦ продолжает работу в штатном режиме. Условием для события t_p служит p_{p6} — наличие ремонтной бригады. На графе выход t_p замыкаем на условие p_4 .

Имитационная модель сборочной системы на основе сети Петри представлена в [11].

3.3. Имитационное моделирование объектов автоматизированного производства на основе теории массового обслуживания

Теория массового обслуживания изучает процессы, связанные с удовлетворением массового спроса на обслуживание технических объектов или людей с учетом случайного спроса и предложения. По-

этому работа системы массового обслуживания (СМО) протекает нерегулярно: то образуется *очередь* заявок на обслуживание, то начинают *простаивать* каналы обслуживания (технические устройства, приборы).

Основная задача теории массового обслуживания — установить *оптимальную* зависимость между числом каналов обслуживания и их производительностью. Оптимальная зависимость предполагает минимизацию затрат на каналы обслуживания и потерь, связанных с простоями технологического оборудования в очереди на обслуживание и с простоями каналов обслуживания. Обобщенная схема СМО показана на рис. 3.9.

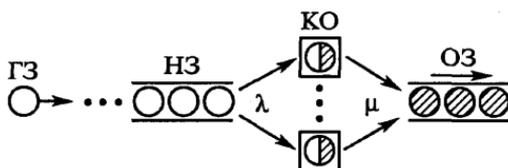


Рис. 3.9. Обобщенная схема СМО:

ГЗ — генератор заявок; НЗ — накопитель заявок; КО — каналы обслуживания; ОЗ — обслуженные заявки; λ , μ — характеристики входного и выходного потоков заявок соответственно

Математическая модель СМО может быть представлена в виде ориентированного графа, вершины которого есть состояния системы, а на дугах графа указаны входные λ и выходные μ характеристики (рис. 3.10).

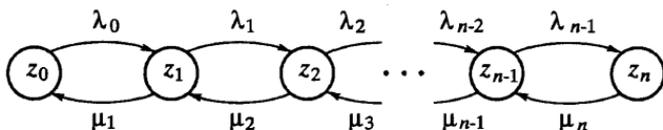


Рис. 3.10. Пример графа СМО с n состояниями

Для построения математической модели СМО необходимо иметь следующие исходные данные:

- интенсивность заявок, т. е. среднее число заявок в единицу времени, λ^{-1} ;

$$\lambda = \frac{1}{t_{\text{cp}}},$$

где $t_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$ — среднее время между заявками;

n — число наблюдений;

- интенсивность обслуживания, т. е. среднее число обслуженных заявок в единицу времени, ч^{-1} :

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{об}}},$$

где $t_{\text{об}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$ — среднее время обслуживания заявки;

- процедура обслуживания (дисциплина очереди). Живая очередь (первым пришел — первым обслужен); срочное обслуживание (по шкале приоритетов).

Относительный приоритет — поступившая заявка начинает обслуживаться, только когда закончится обслуживание предыдущей заявки. Абсолютный приоритет — поступившая заявка начинает обслуживаться сразу (обслуживание предыдущей заявки прерывается).

Принимая допущение, что все потоки λ и μ в модели СМО являются простейшими (пуассоновскими), заключаем, что процесс функционирования системы представляет собой марковский случайный процесс [9, 10, 15]. А.А. Марков — русский математик, внесший существенный вклад в теорию случайных процессов.

Как известно, в простейшем потоке событий число заявок k за время t распределяется по закону Пуассона

$$P_i(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}.$$

Заявки поступают в систему в случайные моменты времени, причем вероятность поступления одной заявки $P_i(t)$ в интервале от t до $t + \Delta t$ равна $P_i(t) = \lambda \Delta t$ и не зависит от t . Вероятность появления в этом интервале двух и более заявок пренебрежимо мала.

Длительности обслуживания отдельных заявок предполагаются также случайными величинами с экспоненциальным законом распределения. Это свидетельствует о том, что вероятность окончания обслуживания очередной заявки в промежутке от t до $t + \Delta t$ не зависит от времени t и равна $P_{\text{об}}(t) = \mu \Delta t$.

3.4. Вывод основных уравнений системы массового обслуживания

Базовые уравнения СМО используются для вычисления вероятностей состояний системы во время переходного и установившегося (стационарного) режима. Переходный процесс характеризуется пошаговым изменением вероятностей состояний системы от начального к установившемуся.

Сначала рассмотрим минимальный граф СМО с двумя возможными состояниями (рис. 3.11).

Расчет вероятностей состояний системы за период Δt проведем, считая потоки пуассоновскими. Рассмотрим возможные ситуации.

1. Вероятность пребывания системы в состоянии z_0 в момент t равна $P_0(t)$.

Это означает, что в момент t и за период Δt в систему не поступило ни одной заявки.

2. Вероятность перехода системы из z_0 в z_1 при поступлении заявки в период Δt . Найдем вероятность поступления заявки в систему за период Δt (аналогично вероятности появления отказа):

$$1 - e^{-\lambda_0 \Delta t} = 1 - (1 - \lambda_0 \Delta t) = \lambda_0 \Delta t,$$

где $e^{-\lambda_0 \Delta t} \approx 1 - \lambda_0 \Delta t$ — вероятность непоступления заявки.

Тогда вероятность перехода системы из z_0 в z_1 по теореме умножения вероятностей 1 и 2:

$$-P_0(t) \lambda_0 \Delta t.$$

Знак минус показывает уменьшение вероятности состояния z_0 .

3. Вероятность перехода системы из z_1 в z_0 при обслуживании заявки за период Δt . Вероятность пребывания системы в состоянии z_1 равна $P_1(t)$.

Вероятность обслуживания заявки за период Δt равна:

$$1 - e^{-\mu_1 \Delta t} = 1 - (1 - \mu_1 \Delta t) = \mu_1 \Delta t.$$

Аналогично п. 2 вероятность перехода системы из z_1 в z_0 по теореме умножения вероятностей равна:

$$P_1(t) \mu_1 \Delta t.$$

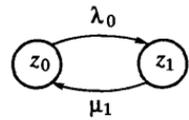


Рис. 3.11. Граф СМО с двумя состояниями

Знак плюс показывает увеличение вероятности состояния z_0 .

Вероятность состояния системы, включающего все три ситуации, находим по теореме сложения вероятностей:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t) - P_0(t)\lambda_0 \Delta t + P_1(t)\mu_1 \Delta t.$$

Перенесем $P_0(t)$ влево и разделим на Δt :

$$\frac{\Delta P_0(t)}{\Delta t} = -P_0(t)\lambda_0 + P_1(t)\mu_1.$$

Переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получим первое дифференциальное уравнение Колмогорова:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -P_0\lambda_0 + P_1\mu_1.$$

Теперь рассмотрим граф СМО с тремя состояниями, считая, что в момент $t + \Delta t$ в системе находится n заявок (рис. 3.12).

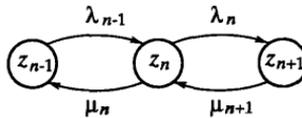


Рис. 3.12. Граф СМО с тремя состояниями

Перечислим возможные ситуации СМО.

1. Вероятность пребывания системы в состоянии z_0 в момент t : $P_n(t)$.

Число заявок в системе не меняется и равно n .

2. Вероятность перехода системы из z_n в z_{n+1} при поступлении заявки за период Δt :

$$-P_n(t)\lambda_n \Delta t.$$

3. Вероятность перехода системы из z_n в z_{n-1} при обслуживании заявки за время Δt :

$$-P_n(t)\mu_n \Delta t.$$

4. Вероятность перехода системы из z_{n-1} в z_n при поступлении заявки за время Δt :

$$P_{n-1}(t)\lambda_{n-1} \Delta t.$$

5. Вероятность перехода системы из z_{n+1} в z_n при обслуживании заявки за время Δt :

$$P_{n+1}(t) \mu_{n+1} \Delta t.$$

Вероятность состояния системы, включающего все пять ситуаций, находим по теореме сложения вероятностей:

$$P_n(t + \Delta t) = P_n(t) - P_n(t) \lambda_n;$$

$$\Delta t - P_n(t) \mu_n \Delta t + P_{n-1}(t) \lambda_{n-1} \Delta t + P_{n+1}(t) \mu_{n+1} \Delta t.$$

Перенесем $P_n(t)$ влево, разделим на Δt и, переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получим второе дифференциальное уравнение Колмогорова:

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -P_n(\lambda_n + \mu_n) + P_{n-1}\lambda_{n-1} + P_{n+1}\mu_{n+1}.$$

Решение этих уравнений производится численными методами на ЭВМ. Однако решение первого уравнения для СМО с двумя состояниями может быть выполнено с помощью формулы полной вероятности:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n p(B_i) p_{B_i}(A),$$

где $P(A)$ — полная вероятность появления события A ;

$p(B_i)$ — безусловная вероятность;

$p_{B_i}(A)$ — условная вероятность.

Событие A может наступить лишь при появлении одного из несовместных событий B_i .

Приведем пример расчета вероятностей для минимального графа СМО с заданными числовыми характеристиками (рис. 3.13).

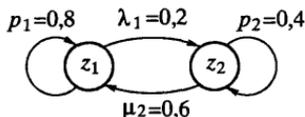


Рис. 3.13. Минимальный граф СМО с заданными числовыми характеристиками

Произвольно зададим распределение вероятностей на нулевом шаге $n = 0$ (начальный момент):

$p_{n=0} = (1, 0)$, т. е. $p_{10} = 1$ и $p_{20} = 0$ (это безусловные вероятности).

Для 1-го шага ($n = 1$) находим:

$$p_{n=1}(z_1) = p_{16} \cdot p_{1y} + p_{26} \cdot \mu_2 = 1 \cdot 0,8 + 0 \cdot 0,6 = 0,8,$$

где $p_{1y} = 0,8$ и $\mu_2 = 0,6$ — условные вероятности (μ_2 увеличивает вероятность пребывания системы в состоянии z_1).

$$p_{n=1}(z_2) = p_{26} \cdot p_{2y} + p_{16} \cdot \lambda_1 = 0 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,2 = 0,2.$$

Для 2-го шага ($n = 2$) расчет ведем с учетом новых значений безусловных вероятностей $p_{n=1}(0,8; 0,2)$:

$$p_{n=2}(z_1) = 0,8 \cdot 0,8 + 0,2 \cdot 0,6 = 0,76.$$

$$p_{n=2}(z_2) = 0,2 \cdot 0,4 + 0,8 \cdot 0,2 = 0,24.$$

Уже при $n = 5$ имеем:

$$p_{n=5}(z_1) = 0,75008 \text{ и } p_{n=5}(z_2) = 0,24992.$$

При $n \rightarrow \infty$ получим предельные значения вероятностей, характерные для установившегося состояния системы:

$$p_n(z_1) = 0,75; \quad p_n(z_2) = 0,25.$$

Проведем проверку:

$$p_1 + p_2 = 0,75 + 0,25 = 1.$$

Вероятности переходов независимы от начального состояния системы. Пусть начальное состояние будет: $p_{n=0} = (0,1)$, т. е. $p_{16} = 0$ и $p_{26} = 1$.

Тогда для $n = 1$ имеем:

$$p_{n=1}(z_1) = 0 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,6 = 0,6;$$

$$p_{n=1}(z_2) = 1 \cdot 0,4 + 0 \cdot 0,2 = 0,4,$$

а для $n = 2$:

$$p_{n=2}(z_1) = 0,72, \quad p_{n=2}(z_2) = 0,28$$

и т. д. до $p_1 = 0,74976$ и $p_2 = 0,25024$.

В установившемся режиме вероятности состояний системы не меняются $p_n(t) = \text{const}$, производная $dp_n(t)/dt = 0$ и дифференциальные уравнения Колмогорова превращаются в алгебраические:

$$p_0 \lambda_0 = p_1 \mu_1; \quad p_n (\lambda_n + \mu_n) = p_{n-1} \lambda_{n-1} + p_{n+1} \mu_{n+1}.$$

Последовательно задавая $n = 1, 2, \dots$ во втором уравнении, получим систему

$$p_0 \lambda_0 = p_1 \mu_1; \quad p_1 \lambda_1 = p_2 \mu_2; \quad \dots \quad p_n \lambda_n = p_{n+1} \mu_{n+1}.$$

Например, при $n = 1$ имеем:

$$p_1(\lambda_1 + \mu_1) = p_0 \lambda_0 + p_2 \mu_2.$$

Подставляя в это уравнение $p_0 \lambda_0 = p_1 \mu_1$, получим $p_1 \lambda_1 = p_2 \mu_2$.

Из полученной системы найдем значения вероятностей:

$$p_1 = p_0 \frac{\lambda_0}{\mu_1}; \quad p_2 = p_0 \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\mu_1 \mu_2}; \quad \dots \quad p_n = p_0 \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_n}.$$

При вычислении p_i необходимо дополнительно использовать условие

$$p_0 + p_i = 1,$$

откуда $p_i = 1 - p_0$.

Используя полученные уравнения установившегося режима, вычислим предельные значения вероятностей p_1 и p_2 СМО с двумя состояниями (см. рис. 3.13):

$$p_2 = p_1 \frac{\lambda_1}{\mu_2} \quad \text{и} \quad p_1 = 1 - p_2.$$

Подставив p_1 в первое уравнение, получим

$$p_2 = (1 - p_2) \frac{\lambda_1}{\mu_2},$$

откуда

$$p_2 = \frac{\lambda_1}{\mu_2 + \lambda_1} = 1/4 = 0,25$$

и

$$p_1 = 1 - 0,25 = 0,75.$$

Как видим, эти значения вероятностей p_1 и p_2 совпадают со значениями, полученными с помощью формулы полной вероятности.

Таким образом, задавая входную (λ) и выходную (μ) характеристики стационарной СМО с двумя состояниями, можно легко вычислять вероятности состояний системы.

3.5. Виды систем массового обслуживания

Из двух видов СМО (с отказами и с ожиданием), используемых для моделирования процессов и систем, наибольшее применение в различных отраслях машиностроения находят системы с *ожиданием*. В СМО с ожиданием вновь поступившая заявка становится в очередь на обслуживание, если все N каналов обслуживания заняты (рис. 3.14).

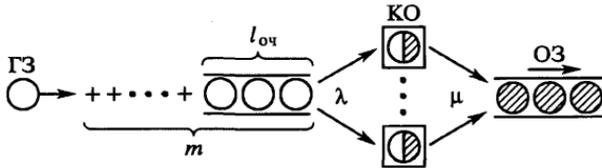


Рис. 3.14. Схема многоканальной СМО с ожиданием:

ГЗ — генератор заявок; КО — каналы обслуживания; ОЗ — обслуженные заявки

Общее число мест m в очереди может колебаться от 0 до ∞ ($0 \leq m < \infty$). При $m \rightarrow \infty$ имеет место чистая СМО с ожиданием, а при $m = 0$ — СМО с отказами. Условие нормальной работы СМО: $\alpha < N$ показывает, что в системе имеет место конечная очередь $l_{оч}$ заявок (где $\alpha = \lambda/\mu$ — относительная интенсивность потока заявок). При $\alpha \geq N$ СМО неработоспособна, так как длина очереди $l_{оч}$ неограниченно растет.

Представим основные характеристики многоканальной СМО с ожиданием.

1. Средняя длина очереди заявок, ожидающих обслуживания:

$$l_{оч} = p_{св} \frac{\alpha^{N+1}}{(N-1)!(N-\alpha)^2},$$

где $p_{св} = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \alpha^{N+1}}{N!(N-\alpha)} \right]^{-1}$ — вероятность того, что все каналы сво-

бодны (например, в начале смены).

2. Среднее время ожидания обслуживания заявки в очереди:

$$t_{ож} = p_{св} \frac{\alpha^N}{\mu(N-1)!(N-\alpha)^2}.$$

3. Среднее время пребывания заявки в СМО:

$$t_c = t_{ож} + t_{об} = t_{ож} + 1/\mu,$$

где $t_{об} = 1/\mu$ — среднее время обслуживания заявки.

4. Среднее число заявок, поступивших в СМО за время t :

$$n_3(t) = \lambda t;$$

5. Потери времени в ожидании обслуживания n_3 заявок:

$$T_{ож} = n_3(t) t_{ож}.$$

Назовем основные характеристики для одноканальной СМО:

$$l_{оч} = \frac{\alpha^2}{1-\alpha}; \quad t_{ож} = t_{об} \frac{\alpha}{1-\alpha}, \quad \text{где } \alpha < 1.$$

Основное отличие СМО с отказами от СМО с ожиданием заключается в отсутствии очереди на обслуживание, поскольку вновь поступившая заявка покидает систему необслуженной, если оказывается, что все каналы обслуживания заняты (рис. 3.15).

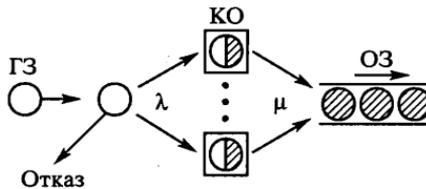


Рис. 3.15. Схема многоканальной СМО с отказами:

ГЗ — генератор заявок; КО — каналы обслуживания; ОЗ — обслуженные заявки

Подобные системы имеют место в сетях телефонной связи (АТС), на вокзалах и т. п. Для моделирования производственных участков в машино- и приборостроении СМО с отказами не используются. Условия обслуживания и отказа: $n_3 \leq N$ — состояние обслуживания; $n_3 > N$ — отказ в обслуживании (где n_3 — число заявок).

Перечислим основные характеристики СМО с отказами.

1. Условная длина очереди: $l_{оч} = N_3$, где N_3 — число занятых каналов.

2. Вероятность одновременной работы занятых каналов:

$$P_N = P_{св} \frac{\alpha^{N_3}}{N_3!},$$

где $p_{\text{св}} = \left(1 + \alpha + \frac{\alpha^2}{2!} + \dots + \frac{\alpha^N}{N!} \right)^{-1}$ — вероятность того, что все каналы свободны (начальное состояние системы).

3. Среднее число занятых каналов (среднее число заявок на обслуживание):

$$N_3 = p_{\text{св}} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i + \frac{\alpha^{N_3}}{(N_3 - 1)!} \right].$$

4. Вероятность отказа в обслуживании (при $N_3 = N$):

$$P_{\text{от}} = p_{\text{св}} \frac{\alpha^N}{N!}.$$

Пусть имеем СМО с отказами при $\alpha = 2$, $N = 3$, ($\alpha < N$). Сначала определим

$$p_{\text{св}} = (1 + 2 + 2^2/2 + 2^3/6)^{-1} = 0,16.$$

Затем найдем

$$P_{\text{от}} = 0,16 \cdot 2^3/6 = 0,213.$$

Число занятых каналов:

$$N_3 = 0,16(2^1 + 2^2 + 2^3/2) = 1,6 \text{ (округляем до } N_3 = 2).$$

Если увеличить интенсивность потока заявок при неизменном N ($\alpha = N$), то получим: $P_{\text{от}} = 0,4$. Как видим, вероятность отказа в СМО возросла в 2 раза.

3.6. Пример моделирования технической системы по параметру надежности

Покажем на примере, как решается одна из важнейших задач по обеспечению надежности проектируемой технической системы с применением принципа резервирования.

Пусть имеется некоторая техническая система (ТС), которая представляет собой сумму основного блока A , дубли-блока B и блока обнаружения отказов Бл.Об.От. (рис. 3.16). Система может эксплуа-

тироваться в режиме холодного (дубль-блок включается при отказе основного устройства) или горячего (дубль-блок включен постоянно) дублирования. На ориентированном графе представлены основные состояния ТС (рис. 3.17).

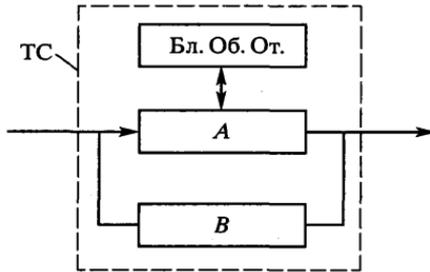


Рис. 3.16. Схема технической системы ТС с резервированием:

A — основной блок; B — дублирующий блок; Бл. Об. От. — блок обнаружения отказов

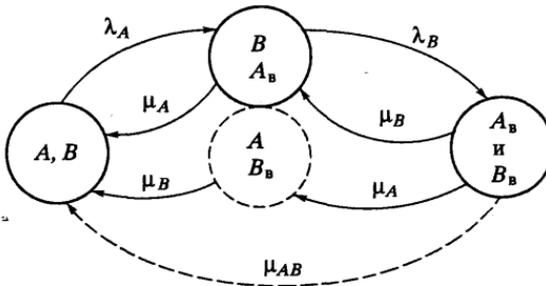


Рис. 3.17. Граф состояний технической системы с резервированием

Блоки A , B исправны — в ТС работает основной блок A ; BA_B — блок B работает, блок A_B восстанавливается после отказа (входная и выходная характеристики λ_A , μ_A); $A_B B_B$ — блоки A и B восстанавливаются после отказа (λ_A , λ_B). В зависимости от того, какой блок будет отремонтирован первым, ТС вернется в состояние BA_B (μ_B) или в AB_B (μ_A), что непринципиально. В случае одновременного восстановления блоков A и B (μ_{AB}) ТС вернется в состояние AB . На графе показана и возможность перехода ТС из исправного состояния AB в состояние $A_B B_B$ (λ_{AB}) в случае одновременного отказа блоков A и B , что маловероятно. Введем допущение: безотказность и восстанавливаемость блоков A и B описывается экспоненциальным законом распределения случайной величины.

Вероятности состояний ТС связаны уравнениями (см. рис. 3.17):

$$P_B(t) = P_{AB}(t) \lambda_A / \mu_A, \text{ или } P_A(t) = P_{AB}(t) \lambda_B / \mu_B; \quad P_B(t) = P_A(t); \quad \lambda_A = \lambda_B;$$

$$P_{A_B B_B}(t) = P_B(t) \lambda_B / \mu_B; \quad P_{A_B B_B}(t) = P_B(t) \lambda_B / \mu_A; \quad P_{A_B B_B}(t) = P_B(t) \lambda_B / \mu_{AB}.$$

$$P_{AB}(t) = 1 - P_{A_B B_B}(t) = 1 - q_A q_B,$$

где $P_A(t) = P_B(t)$ — вероятности безотказной работы основного блока A и дубли-блока B ;

$P_{AB}(t)$ — то же для системы AB ;

$P_{A_B B_B}(t)$ — вероятность отказа системы AB ;

$q_A = q_B$ — вероятности отказов блока A и дубли-блока B ;

$\lambda_B = \lambda_A$ — интенсивности отказов блоков A и B ;

$\mu_A = \mu_B$ — интенсивности восстановления блоков A и B .

Для расчета $P_{A_B B_B}(t)$ и $P_{AB}(t)$ необходимо знать интенсивности $\lambda_{A(B)}$ и $\mu_{A(B)}$. Значение $\mu_{A(B)} = 1/(t_{A(B)})$ найдем, задавая реальное время восстановления системы AB в диапазоне ($t_{A(B)} = 1 \dots 10$ ч). Значение $\lambda_{A(B)}$ рассчитаем, задавая $P_{AB}(t)$ в необходимом интервале времени, например в течение $t = 2000$ ч. Функция надежности в этом случае имеет вид:

$$P_{AB}(2000) = e^{-2000 \lambda_{AB}},$$

откуда

$$\lambda_{A(B)} = \ln P_{AB}(2 \cdot 10^3) / 2 \cdot 10^3.$$

Приведем некоторые значения $\lambda_{A(B)}$, если $P_{AB}(2 \cdot 10^3)$ задавать в диапазоне: 0,999...0,95. Пусть $P_{AB}(2 \cdot 10^3) = 0,999; 0,995; 0,990; 0,980; 0,950$. Вычислим $\ln 0,999$:

$$\ln(9,99 \cdot 10^{-1}) = \ln 9,99 - 1 \cdot \ln 10 = 2,3016 - 2,302985 = -0,0014.$$

$$\text{При } \ln 0,999 = -0,0014 \quad \lambda_{A(B)} = 0,0014 / 2 \cdot 10^3 = 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1};$$

$$\text{при } \ln 0,995 = -0,0054 \quad \lambda_{A(B)} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1};$$

$$\text{при } \ln 0,99 = -0,0105 \quad \lambda_{A(B)} = 5,25 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1};$$

$$\text{при } \ln 0,98 = -0,0206 \quad \lambda_{A(B)} = 1,03 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1};$$

$$\text{при } \ln 0,95 = -0,0517 \quad \lambda_{A(B)} = 2,585 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Принимая $P_{AB}(2000) = 0,999$, найдем $q_A q_B = 1 - 0,999 = 0,001$.

Считая, что вероятности отказов блоков A и B одинаковы, определим

$$q_A = q_B = \sqrt{0,001} \cong 0,032.$$

Тогда вероятности безотказной работы блоков A и B будут равны:

$$P_A = P_B = 1 - 0,032 = 0,968 \cong 0,97;$$

$$\lambda_A = \lambda_B = \ln 0,97/2 \cdot 10^3 = 0,032/2 \cdot 10^3 = 1,6 \cdot 10^{-5}, \text{ ч}^{-1}.$$

Таким образом, интенсивность отказов λ_A, λ_B блоков A и B может быть увеличена примерно в 20 раз (с $\lambda_{A(B)} = 0,7 \cdot 10^{-6}$ до $\lambda_{AB} = 1,6 \times 10^{-5}, \text{ ч}^{-1}$) без снижения надежности системы AB . Значительное снижение требований к надежности блоков A и B позволяет существенно удешевить их конструкции.

3.7. Моделирование системы массового обслуживания с использованием метода статистических испытаний

Метод статистических испытаний (МСИ) — численный метод решения задач СМО с помощью моделирования случайных величин. К таким задачам относятся: определение времени ожидания $t_{\text{ож}}$ обслуживания технологического оборудования (ТО) и времени простоев $t_{\text{пр}}$ каналов обслуживания.

Для решения этой задачи используется модель, в основе которой лежит последовательность *случайных чисел*. Первый ряд случайных чисел используется для моделирования времени $t_{\text{п}}$ поступления ТО на обслуживание, а второй ряд — для моделирования времени обслуживания $t_{\text{об}}$ [15, 25].

Пример моделирования с помощью МСИ

Пусть на пункт технического обслуживания поступают транспортные роботы (ТР) в случайной последовательности и обслуживаются в порядке поступления. Известно, что интервалы времени между моментами поступления ТР на обслуживание в 40 % случаев составляют 20 мин, а в 60 % — 40 мин. Длительность обслуживания $t_{\text{об}}$ является случайной величиной, причем 20 мин требуется для обслуживания 80 % ТР и 60 мин — для обслуживания остальных 20 % ТР.

Для решения задачи с помощью генератора случайных чисел (например, ЭВМ) сформируем две последовательности чисел по 10 цифр

в каждой. Пусть в первой последовательности первые 4 цифры (0, 1, 2, 3) характеризуют интервал поступления ТР на обслуживание 20 мин, а остальные 6 цифр — интервал 40 мин (6 цифр из 10 — это 60 %).

Во второй последовательности допустим, что 8 цифр (от 0 до 7) характеризуют длительность обслуживания 20 мин (это 80 % ТР), а цифры 8, 9 — длительность 60 мин. Последовательности случайных чисел сведем в две таблицы: поступления ТР на обслуживание и длительности обслуживания.

Таблица 3.3. Поступление ТР на обслуживание

Ряд случайных чисел	6	5	1	5	9	0	7	9	5	6
$t_{п}$	40	40	20	40	40	20	40	40	40	40

Номера ТР: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

Таблица 3.4. Длительности обслуживания ТР

Ряд случайных чисел	6	9	1	8	6	0	3	3	9	3
$t_{об}$	20	60	20	60	20	20	20	20	60	20
Номера ТР	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

По этим таблицам составим график обслуживания десяти ТР, приняв за начало момент поступления на обслуживание первого ТР (рис. 3.18). В нижней части графика в масштабе отложим моменты поступления ТР и интервалы $t_{п}$, а в верхней — длительность $t_{об}$.

Из графика находим:

время ожидания обслуживания ТР:

$$t_{ож} = 20 + 20 + 40 + 20 + 20 + 20 = 140 \text{ мин (2 ч 20 мин);}$$

время простоя пункта технического обслуживания:

$$t_{пр} = 20 + 20 = 40 \text{ мин.}$$

По результатам моделирования принимается решение о коррекции числа каналов обслуживания. В данном примере время ожидания обслуживания ТР велико, поэтому необходимо увеличить число пунктов технического обслуживания. Для более точного определения $t_{ож}$ и $t_{пр}$ необходимо использовать больший ряд случайных чисел.

Во втором примере моделирования СМО с помощью метода статистических испытаний выборка случайных чисел представляет значения функции вероятностей $p_{об}(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}$, описывающей экспоненциальный характер распределения времени обслуживания τ .



Рис. 3.18. График обслуживания десяти ТР, построенный с помощью метода статистических испытаний

Имитация процесса массового обслуживания может быть представлена таблицей, включающей: момент поступления заявки на обслуживание $t_{п}$; выборку случайных чисел в виде $p_{об}(\tau)$; время обслуживания τ ; момент окончания обслуживания $t_{ок}$; время ожидания обслуживания $t_{ож}$. В табл. 3.5 задан регулярный поток заявок с периодом $t_{п} = 2$ мин, в котором каждому значению $t_{п}$ соответствует случайное число $p_{об}(\tau)$.

Таблица 3.5. Результаты моделирования СМО с помощью МСИ

$t_{п}$	$p_{об}(\tau)$	τ	$t_{ок}$	$t_{ож}$
2	0,41	0,7	2,7	0
4	0,49	0,9	4,9	0
6	0,77	1,9	7,9	0
8	0,13	0,2	8,2	0
10	0,77	1,9	11,9	0
12	0,99	4,3	16,3	0
14	0,91	3,0	19,3	2,3
16	0,65	1,4	20,7	3,3
18	0,17	0,23	20,93	2,7
20	0,59	1,2	22,1	0,93

Время окончания обслуживания представляет собой сумму $t_{\text{ок}} = t_{\text{п}} + \tau$. Например, для первой строчки имеем $t_{\text{ок}} = 2 + 0,7 = 2,7$. Для строчки с $t_{\text{п}} = 12$ время $t_{\text{ок}} = 12 + 4,3 = 16,3$. Со следующей строчки ($t_{\text{п}} = 14$) время ожидания обслуживания оказывается больше нуля. Время окончания обслуживания для $t_{\text{п}} = 14$ без учета предыдущей заявки равно $t_{\text{ок}} = 14 + 3 = 17$. Однако это время с учетом $t_{\text{ок}} = 16,3$ предыдущей заявки оказывается больше $t_{\text{ок}}^1 = 16,3 + 3 = 19,3$. Поэтому заявка с $t_{\text{п}} = 14$ будет простаивать в ожидании обслуживания:

$$t_{\text{ож}} = 19,3 - 17 = 2,3 \text{ ед. времени.}$$

Глава 4

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

4.1. Задачи оптимизации

Автоматизированная система, обеспечивающая наилучшие показатели качества при заданных условиях работы и ресурсных ограничениях, называется **оптимальной**. Основной задачей синтеза таких систем является обеспечение оптимального значения какого-либо основного показателя качества управления: быстродействие, точность, потребляемая энергия и др. с учетом ограничений на значения других показателей. Таким образом, искусство инженера-проектировщика состоит в максимальном удовлетворении заданных требований при известных ресурсных ограничениях [4, 9, 10, 22].

Существует два класса задач оптимизации:

- *интерполяционные*, в которых определяется оптимальный характер протекания процесса в заданной зоне (по одному или двум параметрам);
- *экстремальные*, в которых определяется экстремум функции:

$$\text{extr } F(x) = \max (\text{или } \min).$$

Применительно к автоматизированным системам мы будем рассматривать экстремальные задачи оптимизации, в которых используется понятие функционала. Известно, что если числам x ставятся в соответствие числа y , то задана функция $y = f(x)$, а если функциям $f(x)$ из множества $F(x)$ ставится в соответствие число y , то задан *функционал* J .

Функционал — это соответствие (или закон), согласно которому каждой функции соответствует числовое значение некоторого параметра.

Такое соответствие в теории множеств называется отображением множества функций $F(x)$ в множество чисел y :

$$J: F(x) \rightarrow y,$$

где множество J имеет элементами пары $[f(x), y] \in J$.

В этом случае говорят, что вещественное число y представляет собой функционал J от функции $f(x)$ и записывается в виде $y = J[f(x)]$. В задачах оптимизации функционал J используется как критерий качества выбранной функции $f(x)$. В случае оптимизации системы по производительности таким критерием будет минимальное время цикла $t_{ц}$, а определение оптимального вида функции $f(x)$ сводится к выполнению условия

$$\min J[f(x)],$$

при котором $t_{ц} \rightarrow \min$.

В случае оптимизации системы по надежности среднее время наработки на отказ должно быть максимальным $\bar{t}_{от} \rightarrow \max$, а при оптимизации — по экономическому фактору необходимо минимизировать себестоимость продукции, выпускаемой на данной системе $C \rightarrow \min$.

Таким образом, для определения экстремума функционала $J[f(x)]$ необходимо найти значение функции $f(x)$, соответствующее \max или $\min J$. В вариационном исчислении показывается, что необходимым условием $\text{extr } J$ является $\delta J = 0$, где $\delta J \approx \Delta J$ — вариация функционала (ΔJ — его приращение). Это условие аналогично понятию экстремума в дифференциальном исчислении, где показывается, что в точках экстремума производная функции всегда равна нулю [10].

4.2. Оптимизация задачи многостаночного обслуживания

Целью поставленной задачи является определение оптимального числа n единиц технологического оборудования (ТО), обслуживаемых одним устройством (например, промышленным роботом ПР) при ус-

ловии минимизации времени простоев основного (ТО) и вспомогательного (ПР) оборудования. Эта задача считается типичной для одноканальной СМО с ожиданием.

В структуру автоматического участка механической обработки заготовок входит: n станков с ЧПУ (С), один транспортно-загрузочный робот (ТЗР) и участковый накопитель в виде автоматического склада (АС) для заготовок и деталей (рис. 4.1).

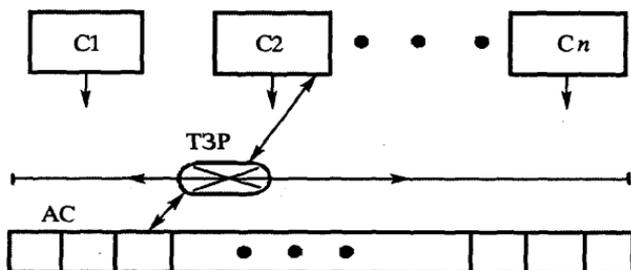


Рис. 4.1. Схема многостаночного обслуживания на автоматическом участке механообработки

Согласно циклограмме ТЗР последовательно обслуживает станки от $C1$ до Cn и возвращается к $C1$ (рис. 4.2).

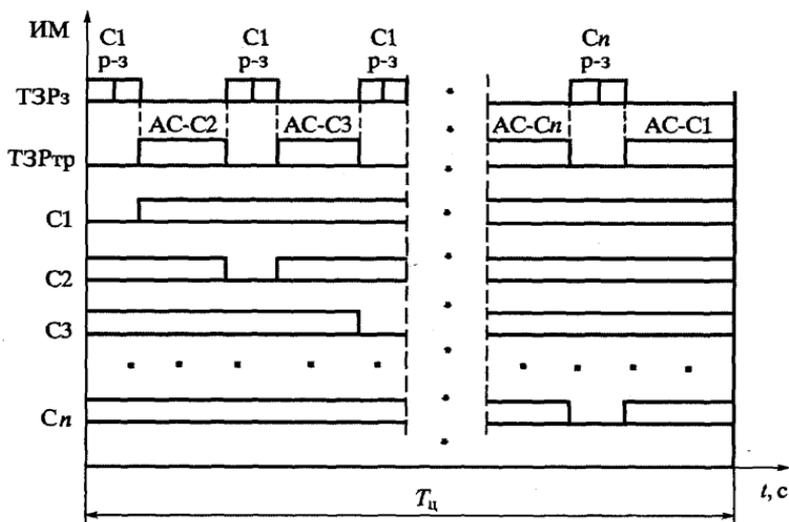


Рис. 4.2. Циклограмма последовательного обслуживания станков одним ТЗР

При многостаночном обслуживании возможны три ситуации.

1. Простой ТО и ТЗР равны нулю (идеальная ситуация).

В этом случае время обработки заготовки $t_{шт}$ на одном станке равно времени обслуживания ТЗР $(n - 1)$ станков (с учетом, что один станок уже обслуживается):

$$t_{шт} = (n - 1) t_{об},$$

где $t_{об}$ — время обслуживания одного станка.

Из этой ситуации находим оптимальное число единиц ТО:

$$n_{опт} = \frac{t_{шт}}{t_{об}} + 1.$$

2. Время обработки $t_{шт}$ больше времени обслуживания:

$$t_{шт} > (n - 1) t_{об}.$$

Простой станков равны нулю ($\Delta t_c = 0$), а простои ТЗР составляют:

$$\Delta t_p = t_{шт} - (n - 1) t_{об}.$$

3. Время обработки $t_{шт}$ меньше времени обслуживания:

$$t_{шт} < (n - 1) t_{об}.$$

Простои ТЗР равны нулю ($\Delta t_p = 0$), а простои станков составляют:

$$\Delta t_c = (n - 1) t_{об} - t_{шт}.$$

По результатам моделирования одноканальной СМО строят график простоев оборудования для различных значений $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ (или $\alpha = \frac{t_{об}}{t_{шт}}$) при заданном $t_{об} = \text{const}$ и переменным $t_{шт} = \text{var}$.

Коэффициент простоя станков равен:

$$k_{пр.с} = \frac{\Delta t_c}{t_{шт} + \Delta t_c},$$

а коэффициент простоя ТЗР:

$$k_{пр.р} = \frac{\Delta t_p}{t_{об} + \Delta t_p}.$$

Приведем пример построения графика простоев для заданных значений $\alpha = 0,33; 0,5; 1,0; 1,5$ и $t_{об} = 15$ мин (рис. 4.3). Всем точкам на оси абсцисс α соответствуют нулевые простои оборудования, так как в этих точках выдерживается расчетное время $t_{шт}$.

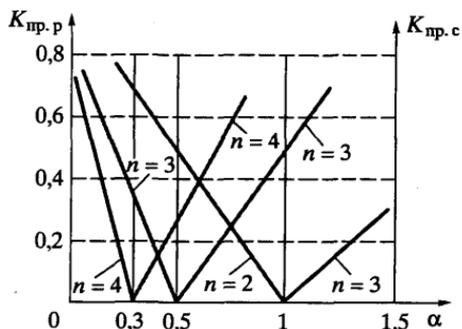


Рис. 4.3. График простоев ТО и ТЗР, построенный по результатам моделирования одноканальной СМО

1. Определим $t_{шт}$ для $\alpha = 0,33$:

$$t_{шт} = \frac{t_{об}}{\alpha} = 15/0,33 = 45 \text{ мин.}$$

Оптимальное число обслуживаемых станков:

$$n_{опт} = 45/15 + 1 = 4.$$

Простои станков и ТЗР:

$$\Delta t_c = (4 \text{ ст} - 1) \cdot 15 \text{ мин} - 45 \text{ мин} = 0;$$

$$\Delta t_p = 45 \text{ мин} - (4 \text{ ст} - 1) \cdot 15 \text{ мин} = 0.$$

Соответственно коэффициенты простоев: $k_{пр.р} = 0$ и $k_{пр.с} = 0$.

Чтобы сохранить нулевые простои оборудования при меньшем времени $t_{шт} = 30$ мин (соответственно $\alpha = 0,5$), необходимо обслуживать $n = 3$ станка.

Если при этом сохранить $n_{опт} = 4$, то возникнут простои станков, равные $\Delta t_c = (4 \text{ ст} - 1) \cdot 15 \text{ мин} - 30 \text{ мин} = 15 \text{ мин}$. Коэффициент простоя станков будет равен $k_{пр.с} = 15/(30 + 15) = 0,33$.

При $t_{шт} = 75$ мин (соответственно $\alpha = 0,2$) необходимо обслуживать $n = 5$ станков. Если при этом сохранить $n_{опт} = 4$, то возникнут

простой ТЗР, равные $\Delta t_p = 75 \text{ мин} - (4\text{ст} - 1) \cdot 15 \text{ мин} = 30 \text{ мин}$. Коэффициент простоя ТЗР будет равен $k_{\text{пр.р}} = 30/(3\text{ст} \cdot 15 + 30) = 0,4$.

2. Определим $t_{\text{шт}}$ для $\alpha = 0,5$:

$$t_{\text{шт}} = 15 \text{ мин}/0,5 = 30 \text{ мин}.$$

Оптимальное число обслуживаемых станков:

$$n_{\text{опт}} = 30/15 + 1 = 3.$$

При меньшем $t_{\text{шт}} = 15 \text{ мин}$ и $\alpha = 1$ получим:

$$n = 2; \Delta t_c = (3 \text{ ст} - 1) \cdot 15 \text{ мин} - 15 \text{ мин} = 15 \text{ мин};$$

$$k_{\text{пр.с}} = 15/(15 + 15) = 0,5.$$

При большем $t_{\text{шт}} = 45 \text{ мин}$ и $\alpha = 0,33$ получим:

$$n = 4; \Delta t_p = 45 - (3 \text{ ст} - 1) \cdot 15 \text{ мин} = 15 \text{ мин};$$

$$k_{\text{пр.р}} = 15/(2 \text{ ст} \cdot 15 + 15) = 0,33.$$

3. Определим $t_{\text{шт}}$ для $\alpha = 1$:

$$t_{\text{шт}} = 15 \text{ мин}/1 = 15 \text{ мин}.$$

Оптимальное число обслуживаемых станков:

$$n_{\text{опт}} = 15/15 + 1 = 2.$$

При меньшем $t_{\text{шт}} = 10 \text{ мин}$ и $\alpha = 1,5$ получим:

$$n = 1; \Delta t_c = (2 \text{ ст} - 1) \cdot 15 \text{ мин} - 10 \text{ мин} = 5 \text{ мин};$$

$$k_{\text{пр.с}} = 5/(10 + 5) = 0,33.$$

При большем $t_{\text{шт}} = 30 \text{ мин}$ и $\alpha = 0,5$ получим:

$$n = 3; \Delta t_p = 30 - (2 \text{ ст} - 1) \cdot 15 \text{ мин} = 15 \text{ мин};$$

$$k_{\text{пр.р}} = 15/(1 \text{ ст} \cdot 15 + 15) = 0,5.$$

4. Определим $t_{\text{шт}}$ для $\alpha = 1,5$:

$$t_{\text{шт}} = 15 \text{ мин}/1,5 = 10 \text{ мин}.$$

Оптимальное число обслуживаемых станков:

$$n_{\text{опт}} = 10/15 + 1 = 1,66.$$

Так как ТЗР не может обслуживать 1,5 станка, то реально принимаем

$$n_{\text{опт}} \approx 1 \text{ станок.}$$

Это означает, что в этих условиях каждый станок автоматического участка должен быть оснащен индивидуальным загрузочным роботом.

4.3. Оптимизация многоканальной СМО с ожиданием по числу каналов обслуживания

Для решения данной задачи оптимизации в качестве целевой функции принимают суммарные затраты в СМО

$$Z_c = Z_k + Z_{\text{ож}} + Z_{\text{пр.к}} \rightarrow \min,$$

причем при нулевых простоях оборудования (затраты на ожидание обслуживания $Z_{\text{ож}} = 0$) в целевой функции остается только член $Z_{\text{пр.к}}$ (затраты, связанные с простоем каналов обслуживания), а при нулевых простоях каналов ($Z_{\text{пр.к}} = 0$) остается только член $Z_{\text{ож}}$.

Представим развернутые значения членов целевой функции.

Затраты в рублях на создание и эксплуатацию N каналов обслуживания за период работы СМО, ч:

$$Z_k = E_n K_k N \frac{t}{\Phi_r},$$

где $E_n = 0,4$ руб./на 1 руб. затрат — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

K_k — капитальные затраты на создание одного канала обслуживания, руб.;

$\Phi_r = 4000$ ч — годовое фонд работы оборудования СМО в часах при двухсменной работе.

Затраты, руб., связанные с простоями оборудования в ожидании обслуживания:

$$Z_{\text{ож}} = C_{\text{ож}} T_{\text{ож}},$$

где $C_{\text{ож}}$ — стоимость простоя одного станка в единицу времени, руб./ч;

$T_{\text{ож}} = n_3(t)t_{\text{ож}}$ — время ожидания обслуживания;

$n_3(t) = \lambda t$ — среднее число заявок на обслуживание за период t ;

$\lambda = n_{\text{ст}} / t_{\text{шт}}$ — интенсивность потока заявок;

$n_{\text{ст}}$ — число обслуживаемых станков;

$t_{\text{шт}}$ — штучное время обработки одной заготовки, мин;

$t_{\text{ож}}$ — среднее время ожидания обслуживания одной заявки, мин.

Затраты, связанные с простоями каналов обслуживания, в рублях:

$$Z_{\text{пр.к}} = C_{\text{пр}} T_{\text{пр.к}}$$

где $C_{\text{пр}}$ — стоимость простоя одного канала обслуживания в единицу времени, руб./ч;

$$T_{\text{пр.к}} = t P_{\text{св}} \sum_{i=1}^{N-1} \alpha^i \frac{(N-i)}{i!} — \text{потери времени из-за простоев каналов}$$

обслуживания, ч;

$$\alpha = \lambda / \mu;$$

$$\mu = 1 / t_{\text{об}};$$

$t_{\text{об}}$ — время обслуживания одной заявки, мин.

Рассмотрим пример на оптимизацию СМО с ожиданием по числу каналов обслуживания.

Исходные данные:

$\lambda = 0,27$ 1/мин; $\mu = 0,3$ 1/мин; $\alpha = 0,9$; $n_{\text{ст}} = 10$ ед.; $t = 10$ ч;

$C_{\text{ож}} = 1,5$ тыс. руб.; $C_{\text{пр}} = 1,0$ тыс. руб.; $K_{\text{к}} = 35$ тыс. руб.;

$E_{\text{н}} = 0,4$ руб./на 1 руб. затрат.

Используя программный пакет MathCAD, построим график $Z_{\text{с}}(N)$ и определим $N_{\text{опт}}$ (рис. 4.4). Рассчитаем суммарные затраты для различных значений N .

Для $N = 1$ имеем:

длина очереди $l_{\text{оч}} = 8,1$ заявки;

$t_{\text{ож}} = 0,5$ ч;

$n_3(t) = 0,27 \text{ м}^{-1} \cdot 60 \text{ м} \cdot 10 \text{ ч} = 162$ заявки;

$T_{\text{ож}} = 162 \text{ з} \cdot 0,5 \text{ ч} = 81$ ч;

$Z_{\text{ож}} = 1,5 \text{ тыс. руб.} \cdot 81 \text{ ч} = 121,5 \text{ тыс. руб.};$

$Z_{\text{к}} = 77,5 \text{ тыс. руб.};$

суммарные затраты: $Z_{\text{с}} = 121,5 + 77,5 = 199$ тыс. руб.

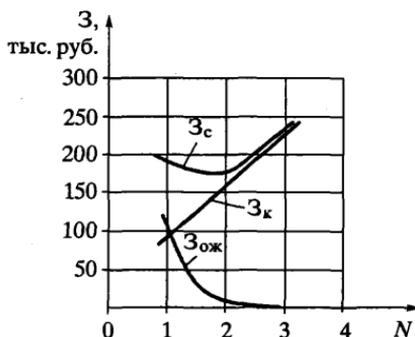


Рис. 4.4. График оптимизации многоканальной СМО с ожиданием по числу каналов обслуживания:

$$N_{\text{опт}} = 2; Z_c = 162,3 \text{ тыс. руб.}$$

Для $N = 2$:

$$l_{\text{оч}} = 0,23 \text{ заявки};$$

$$t_{\text{ож}} = 0,03 \text{ ч};$$

$$T_{\text{ож}} = 4,86 \text{ ч};$$

$$Z_{\text{ож}} = 7,3 \text{ тыс. руб.};$$

$$Z_k = 155 \text{ тыс. руб.};$$

суммарные затраты: $Z_c = 7,3 + 155 = 162,3 \text{ тыс. руб.}$

Для $N = 3$:

$$l_{\text{оч}} = 0,119 \text{ заявки};$$

$$t_{\text{ож}} = 0,02 \text{ ч};$$

$$T_{\text{ож}} = 3,05 \text{ ч};$$

$$Z_{\text{ож}} = 4,6 \text{ тыс. руб.};$$

$$Z_k = 232,5 \text{ тыс. руб.};$$

суммарные затраты: $Z_c = 4,6 + 232,5 = 237 \text{ тыс. руб.}$

Таким образом, для данной СМО оптимальное число каналов $N_{\text{опт}} = 2$ (см. рис. 4.4).

Отметим, что полученное значение $N_{\text{опт}}$ при моделировании многоканальной СМО полезно проверить путем решения задачи оптимизации многостаночного обслуживания (т. е. при моделировании одноканальной системы).

4.4. Оптимизация ИПС по производительности

Производительность автоматизированных систем и комплексов тесно связана с порядком обработки заготовок на обрабатывающем комплексе или сборки узлов и изделий на сборочном комплексе.

Определение наилучшей последовательности обработки или сборки относится к задачам составления оптимальных расписаний. Из всех возможных вариантов обработки (сборки) необходимо выбрать расписание, позволяющее закончить обработку (сборку) партии из N заготовок за кратчайшее время при условии минимизации простоев оборудования и времени ожидания операции обработки (сборки). Это задача комбинаторного типа, так как ее решение связано с выбором из $N!$ вариантов обработки (сборки).

4.4.1. Оптимальное расписание при последовательной обработке заготовок на поточной линии

Обработка заготовок на поточной линии производится в соответствии с маршрутной технологической картой. Критерий оптимальности расписания — минимизация максимальной длительности прохождения заготовок в системе

$$\max T \rightarrow \min.$$

Это значит, что минимизируется цикловое время, которое напрямую связано с производительностью технологических систем ($Q_T = 1/t_{\text{ц}}$).

Теория показывает, что в поточной линии достаточно установить порядок обработки заготовок на первых двух станках С1 и С2. В общем виде расписание для двух станков представлено в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Порядок обработки заготовок на первых двух станках поточной линии

С1	a_1	a_2	a_3	...	a_{N-1}	a_N	
С2		b_1	b_2	b_3	...	b_{N-1}	b_N

В представленном расписании в верхней строчке таблицы заданы a_i — длительности обработки заготовок на станке С1, а в нижней

строчке — b_j — длительности обработки на станке С2. Индексы при a_i и b_j указывают порядок следования заготовок на обработку.

Из табл. 4.1 следует, что длительность $\max T$ равна:

$$\max T \geq \sum_{i=1}^N a_i + b_N \text{ или } \max T \geq a_i + \sum_{j=1}^N b_j.$$

Суммы в этих выражениях не зависят от последовательности работ, так как определяются только технологией обработки заготовок. Поэтому уменьшить время $\max T$ можно лишь за счет выбора величин a_i и b_N .

В основе алгоритма составления оптимального расписания при последовательной обработке заготовок на поточной линии лежит теорема Джонсона, результатом которой является соотношение [21]

$$\min (a_j, b_i) \leq \min (a_i, b_j).$$

Если имеем $\min (a_j) \leq \min (b_j)$, то заготовка a_j должна обрабатываться первой, а если $\min (b_i) < \min (a_i)$, то заготовка b_i будет обрабатываться последней. Соответственно обозначения заготовок будут: a_1, b_1 и a_N, b_N .

После того как будет размещена одна заготовка, это правило применяется для оставшихся заготовок, пока не будет сформировано оптимальное расписание.

Пример. В табл. 4.2 даны длительности обработки пяти заготовок на двух станках.

Таблица 4.2. Длительности обработки пяти заготовок на двух станках

№ заготовки	1	2	3	4	5
a_i	6	0	5	8	2
b_j	3	2	4	6	1

Упорядочим массивы a_i и b_j в порядке возрастания:

a_i	0_2	2_5	5_3	6_1	8_4
b_j	1_5	2_2	3_1	4_3	6_4

На станке С1 минимальная длительность обработки у заготовки № 2 ($a_2 = 0$), а на станке С2 — у заготовки № 5 ($b_5 = 1$). Так как $a_2 < b_5$

($0 < 1$), то заготовка № 2 будет обрабатываться первой. Исключив ее из списка, получим:

a_i	2 ₅	5 ₃	6 ₁	8 ₄
b_j	1 ₅	3 ₁	4 ₃	6 ₄

Здесь $b_5 < a_5$ ($1 < 2$), поэтому заготовка № 5 должна обрабатываться последней. Прodelывая эту процедуру с оставшимися заготовками, получим *оптимальное* расписание (по номерам заготовок): 2, 4, 3, 1, 5.

Чтобы убедиться в этом, следует сравнить диаграммы с оптимальным и исходным расписаниями (рис. 4.5). Диаграммы строят в масштабе по длительностям обработки. По диаграммам находим:

$\max T_{\text{исх}} = 26$ ед. времени, а $\max T_{\text{опт}} = 23$ ед. времени.

$a_2 = 0$

a_i	$a_1 = 6$	$a_3 = 5$		$a_4 = 8$	$a_5 = 2$	5 ед.	
b_j		$b_1 = 3$	$b_2 = 2$	$b_3 = 4$	Простой 4 ед.	$b_4 = 6$	$b_5 = 1$

а

$a_2 = 0$

a_i	$a_4 = 8$		$a_3 = 5$	$a_1 = 6$		$a_5 = 2$	2 ед.	
b_j	$b_2 = 2$	Простой 6 ед.	$b_4 = 6$	$b_3 = 4$	Пр. 1 ед.	$b_1 = 3$	$b_5 = 1$	

б

Рис. 4.5. Диаграммы с исходным (а) и оптимальным (б) расписаниями обработки заготовок на двух станках поточной линии

4.4.2. Оптимальное расписание при параллельной обработке заготовок без переналадки станка

Параллельная обработка заготовок на группе однородных станков проводится с целью повышения производительности на «узких» участках производства. Партия заготовок доставляется на участок обработки и разбивается на группы по числу станков (*статическая система*). Оптимальное расписание составляется для каждого станка независимо от других и минимизирует время ожидания обработки $t_{\text{ож}}$,

так как время $\Sigma t_i = \text{const}$ и зависит лишь от технологии обработки (t_i — время обработки i -й заготовки).

При отсутствии ограничений для составления оптимального расписания обработки на каждом станке используется алгоритм SPT (Short Processing Time), по которому упорядочение заготовок имеет вид:

$$t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_N.$$

Однако алгоритм SPT не обеспечивает равномерной загрузки станков, при которой снижаются их простои. Покажем это на примере. Пусть имеется партия из шести заготовок с фактическими временами обработки t_i (1, 2, 3, 4, 5, 6), которую надо распределить между двумя станками. Используя алгоритм SPT, составим расписание обработки на обоих станках:

C1	1	3	5	$\Sigma t_i = 9$
C2	2	4	6	$\Sigma t_i = 12$

Первый станок, закончив обработку, будет простаивать 3 ед. времени в ожидании поступления новой партии заготовок. Для выравнивания суммарного времени Σt_i используют следующее правило: вначале на станок идет заготовка с t_{\max} , затем из оставшихся — опять заготовка с t_{\max} и т. д. В результате получим промежуточное расписание:

C1	6	3	2	$\Sigma t_i = 11$
C2	5	4	1	$\Sigma t_i = 12$

Здесь заготовка с $t = 4$ идет на станок C2, так как станок C1 в это время занят. В этом случае неравномерность загрузки станков уменьшилась и простой станка C2 минимален (1 ед. времени). Окончательное расписание получаем, применяя алгоритм SPT:

C1	2	3	6	$\Sigma t_i = 11$
C2	1	4	5	$\Sigma t_i = 10$

Если в системе имеет место ограничение в виде плановых (директивных) сроков обработки d_i , то расписание имеет вид (алгоритм Джексона):

$$d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_N.$$

Для случая $\Delta t_i = d_i - t_i < 0$ имеем запаздывание в выполнении работ, а в случае $\Delta t_i > 0$ — опережение, т. е. резерв времени. Расписание с Δt_i имеет вид:

$$\Delta t_1 \leq \Delta t_2 \leq \dots \leq \Delta t_N.$$

Алгоритм Джексона дополнен Смитом для случая, когда максимальное запаздывание работ равно нулю, т. е. $d_i \geq \sum_{i=1}^N t_i$ (алгоритм Джексона—Смита). В этом случае из группы заготовок, удовлетворяющих данному условию, выбирается заготовка с максимальным временем обработки t_i и для оставшихся $N - 1$ заготовок процедура повторяется.

Динамическая система

Статическая система превращается в динамическую, если вводится дополнительное ограничение, регламентирующее время поступления r_i заготовок на участок обработки. В этом случае программа «автоматический диспетчер» должна распределять поступающие заготовки по станкам в соответствии с расписанием, обеспечивающим обработку в заданные сроки.

Пример работы программы автоматического диспетчера.

Партия из 7 заготовок обрабатывается на трех станках. Характеристики заготовок приведены в табл. 4.3. Кроме номеров заготовок, в таблице указаны фактические t_i и плановые d_i сроки обработки, а также время поступления r_i заготовок на участок.

Таблица 4.3. Характеристики партии заготовок в динамической системе

№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7
t_i	2	5	6	3	8	10	1
r_i	0	6	1	3	8	2	6
d_i	5	16	10	7	20	18	10

На множестве $\{r_i\}$, $\{d_i\}$ построим временные интервалы: (0, 1); (1, 2); (2, 3); (3, 5); (5, 6); (6, 7); (7, 8); (8, 10); (10, 16); (16, 18); (18, 20).

На временные интервалы наложим номера поступивших в моменты r_i заготовок и проведем их распределение по трем станкам (табл. 4.4).

Таблица 4.4. Распределение заготовок по трем станкам в динамической системе

Станок	Интервал																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
C1	1	1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6								
C2		3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2								
C3				4	4	4	7		5	5	5	5	5	5	5	5				

4.4.3. Оптимальное расписание при обработке заготовок с переналадкой станка

В этом случае при составлении оптимального расписания обработки N заготовок на станке следует учитывать, что каждый раз при переходе от обработки заготовки i к обработке заготовки j требуется время t_{ij} на переналадку станка.

Число вариантов очередности обработки N заготовок составляет $N!$ и может быть представлено в виде матрицы переналадок станка (табл. 4.5).

Таблица 4.5. Матрица переналадок станка

№ заготовки	1	2	3	...	$N-1$	N
1	x	t_{12}	t_{13}	...	$t_{1(N-1)}$	t_{1N}
2	t_{21}	x	t_{23}	...	$t_{2(N-1)}$	t_{2N}
3	t_{31}	t_{32}	x	...	$t_{3(N-1)}$	t_{3N}
...	x
$N-1$	$t_{(N-1)1}$	$t_{(N-1)2}$	$t_{(N-1)3}$...	x	$t_{(N-1)N}$
N	t_{N1}	t_{N2}	t_{N3}	...	$t_{N(N-1)}$	x

Для решения этой задачи оптимизации рассмотренные выше алгоритмы оптимальных расписаний не подходят. Однако достаточно эффективно подобные задачи можно решать с помощью метода *ветвей и границ* [9, 10, 21].

Метод ветвей и границ (МВГ) часто применяется для решения транспортной задачи оптимизации маршрута следования. МВГ позволяет установить, в каком порядке необходимо посетить $N-1$ пунктов (пункт выезда задан), чтобы суммарные затраты на маршрут были минимальными. Если не задан начальный пункт маршрута, то получаем

полную аналогию с задачей составления оптимального расписания обработки N заготовок.

Существо метода ветвей и границ состоит в следующем. Имеется начальное множество вариантов решения задачи $U \{1, 2, \dots, N\}$. Пусть q_i — значение некоторого параметра, характеризующего качество решения задачи в i -м варианте. Оптимальному решению соответствует условие

$$q^* = \min_{i \in U} q_i$$

где q^* — точная нижняя граница для множества $\{q_1, q_2, \dots, q_N\}$.

Для множества U вводится понятие «оценка снизу» \hat{q} , которая удовлетворяет условию

$$\hat{q} < q^*.$$

Затем проводится последовательное улучшение оценки снизу с целью приближения ее к точной нижней границе $\hat{q} \rightarrow q^*$. Начальное множество U разбивают на подмножества с точными нижними границами критерия качества, например на два подмножества. Это позволяет уменьшить число элементов. Для более детального исследования подмножества его, в свою очередь, разбивают еще на подмножества. Процедуру разбиения представляют в виде дерева разбиений (рис. 4.6).

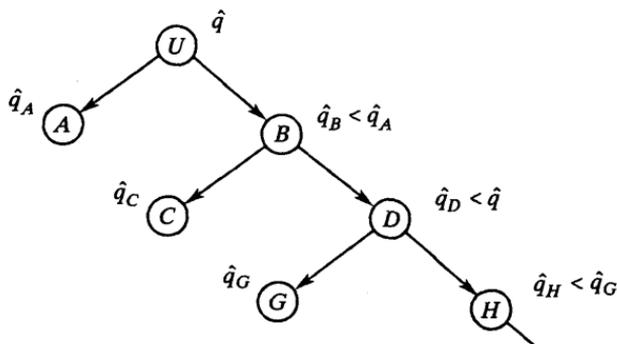


Рис. 4.6. Дерево разбиений к задаче оптимизации методом ветвей и границ

Пусть множество U разбивается на подмножества A и B с точными нижними границами q_A^* и q_B^* , связанными с q^* соотношением

$$q^* = \min(q_A^*, q_B^*).$$

Так как подмножества A и B имеют меньшее число элементов, чем множество U , то можно получить оценки снизу \hat{q}_A и \hat{q}_B более близкие к q^* , чем оценка снизу \hat{q} . Оптимальный вариант обычно оказывается в подмножестве с меньшей оценкой снизу (на рис. 4.6 это подмножество B). Подмножество B снова разбиваем на подмножества C и D и т. д., пока не приходим к подмножеству, состоящему из одного элемента со значением $q = q_0$. Этот элемент может рассматриваться как оптимальный.

Пример составления оптимального расписания с помощью МВГ

Пусть дана матрица $i \times j$, в клетках которой заданы времена t_{ij} переналадок станка в единицах времени (табл. 4.6).

Таблица 4.6. Исходная матрица переналадок станка

i	j					h_i
	1	2	3	4	5	
1	x	7	7	2	4	2
2	6	x	2	4	1	1
3	6	1	x	9	2	1
4	2	3	8	x	5	2
5	6	1	2	5	x	1

Найдем оценку снизу начального множества, используя способ приведения матрицы по строкам и столбцам [9, 21].

Таблица 4.7. Матрица, приведенная по строкам и столбцам

i	j				
	1	2	3	4	5
1	x	5	4	0	2
2	5	x	0	3	0
3	5	0	x	8	1
4	0	1	5	x	3
5	5	0	0	4	x

Для этого из элементов каждой строки i вычитается наименьший элемент h_i . В результате получим сумму $\Sigma h_i = 2 + 1 + 1 + 2 + 1 = 7$, ко-

торая дает некоторую оценку снизу. Эту оценку можно улучшить путем приведения матрицы по столбцам (аналогично приведению по строкам). Сумма наименьших элементов по столбцам j :

$$\Sigma g_j = 0 + 0 + 1 + 0 + 0 = 1.$$

Уточненная оценка снизу:

$$\hat{q} = \Sigma h_i + \Sigma g_j = 7 + 1 = 8.$$

В приведенной по строкам и столбцам матрице (табл. 4.7) берем только строки и столбцы, на пересечении которых есть ноль (т. е. $t_{ij} = 0$). Здесь это будут:

(1, 4); (2, 3); (2, 5); (3, 2); (4, 1); (5, 2); (5, 3).

Подсчитаем увеличение оценки снизу $\Delta(i, j)$ сложением минимальных чисел в строках и столбцах:

$$\Delta(1, 4) = 2 + 3 = 5;$$

$$\Delta(2, 3) = 0 + 0 = 0;$$

$$\Delta(2, 5) = 0 + 1 = 1 \text{ (ноль в пересечении не учитывается);}$$

$$\Delta(3, 2) = 1 + 0 = 1;$$

$$\Delta(4, 1) = 1 + 5 = 6;$$

$$\Delta(5, 2) = 0 + 0 = 0;$$

$$\Delta(5, 3) = 0 + 0 = 0.$$

Наибольшее увеличение оценки снизу получается для дуги (4, 1) (рис. 4.7).

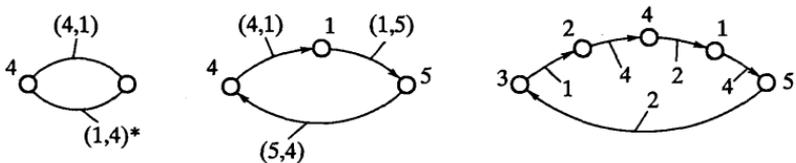


Рис. 4.7. Этапы построения контура с номерами заготовок:
a — первоначальный; *b* — промежуточный; *c* — конечный

Исключим 4-ю строку и 1-й столбец из приведенной матрицы и получим матрицу для подмножества [(4, 1)] (табл. 4.8).

Оценка снизу для подмножества [(4, 1)]: $\hat{q} = 2 + 3 = 5$.

Приведенная по строкам и столбцам матрица для подмножества [(4, 1)] представлена в табл. 4.9. Клетки (4, 1) в последних матрицах

Таблица 4.8. Матрица для подмножества [(4, 1)]

i	j				h_i
	2	3	4	5	
1	5	4	*	2	2
2	x	0	3	0	0
3	0	x	8	1	0
5	0	0	4	x	0
g_j	0	0	3	0	

(см. табл. 4.8 и 4.9) отмечены звездочкой. Это означает, что наложен запрет на дугу (1, 4), поскольку дуга (4, 1) уже введена в расписание, а дуга (1, 4) образует с ней контур (см. рис. 4.7).

Таблица 4.9. Приведенная матрица для подмножества [(4, 1)]

i	j			
	2	3	4	5
1	3	2	*	0
2	x	0	0	0
3	0	x	5	1
5	0	0	1	x

Для приведенной матрицы подмножества [(4, 1)] приращения оценки снизу \bar{q} будут равны:

$$\Delta(1,5) = 2; \Delta(2,3) = 0; \Delta(2,4) = 1; \Delta(2,5) = 0; \Delta(3,2) = 1;$$

$$\Delta(5,2) = 0; \Delta(5,3) = 0.$$

Наибольшее увеличение оценки снизу имеем у дуги (1, 5), которую вводим в расписание, и получаем последовательность обработки заготовок (по их номерам): 4, 1, 5 (см. рис. 4.7). Единицу в расписании учитываем один раз.

Исключив 1-ю строку и 5-й столбец из приведенной матрицы подмножества [(4, 1)], получим матрицу для подмножества [(4, 1), (1, 5)] (табл. 4.10).

$$\text{Оценка снизу для подмножества [(4, 1), (1, 5)]: } \bar{q} = 0 + 0 = 0.$$

Полученная матрица является приведенной, так как минимальные элементы в строках и столбцах равны нулю. Найдем приращения $\Delta(i, j)$: $\Delta(2, 3) = 0$; $\Delta(2, 4) = 5$; $\Delta(3, 2) = 5$; $\Delta(5, 2) = 0$; $\Delta(5, 3) = 0$. Най-

Таблица 4.10. Матрица для подмножества [(4, 1), (1, 5)]

i	j		
	2	3	4
2	x	0	0
3	0	x	5
5	0	0	1*

большие значения $\Delta(i, j) = 5$ получены для дуг (2, 4) и (3, 2). Поэтому обе эти дуги включаем в расписание и получим следующую последовательность дуг: (3, 2); (2, 4); (4, 1); (1, 5). Этому соответствует расписание обработки заготовок: 3, 2, 4, 1, 5. В случае обработки второй партии аналогичных заготовок необходимо замкнуть полученную последовательность дуг в контур, добавив дугу (5, 3). В результате получим контур: 3, 2, 4, 1, 5, 3 (см. рис. 4.7). Затраты времени на переналадки станка найдем, суммируя числа t_{ij} в клетках исходной матрицы на пересечениях: (3,2) — 1; (2, 4) — 4; (4, 1) — 2; (1, 5) — 4; (5, 3) — 2

$$\min \sum_1^5 t_{ij} = 1 + 4 + 2 + 4 + 2 = 13.$$

Построим дерево разбиений к данной задаче (рис. 4.8).

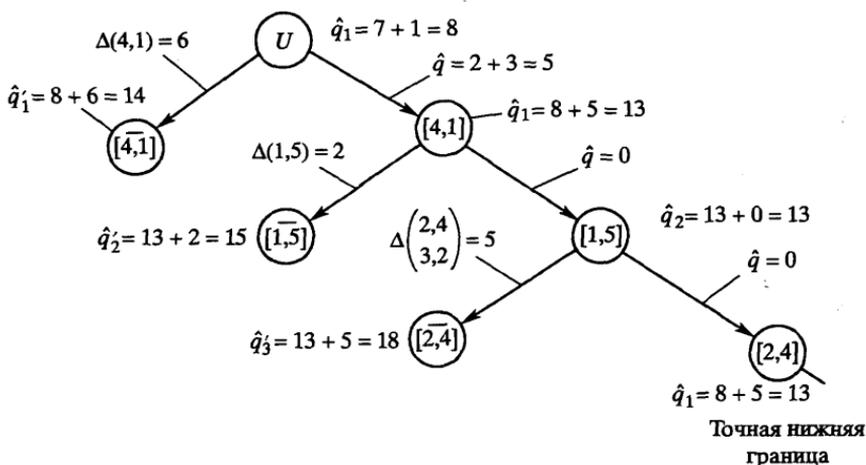


Рис. 4.8. Дерево разбиений к примеру составления оптимального расписания с помощью МВГ

Так как у нерассмотренных подмножеств [(4, 1)]; [(1, 5)]; [(2, 4)] оценки снизу больше 13 (соответственно 14, 15, 18), то эти подмножества не могут содержать расписаний с критерием лучше, чем 13. Следовательно, полученное расписание является оптимальным. Если последовательность номеров заготовок в оптимальном расписании изменить, например на контур: 2, 3, 5, 1, 4, 2, то получим сумму $\sum_1^5 t_{ij} = 2 + 2 + 6 + 2 + 3 = 15$, которая больше $\min \sum_1^5 t_{ij}$.

4.5. Оптимизация использования ресурсов предприятия методом линейного программирования

При решении задачи оптимального управления производственно-экономическими системами, в частности задачи об оптимальном использовании ресурсов предприятия (сырье, материалы, оборудование, энергетика, рабочая сила и т. д.), чаще всего используется метод *линейного программирования* (ЛП), с помощью которого находится экстремум целевой функции с учетом заданных ограничений.

Для решения задачи ЛП классические методы математического анализа не применимы, так как частные производные целевой функции (ЦФ) не обращаются в ноль одновременно и, следовательно, экстремум внутри области определения ЦФ не достигается [26].

Математическая модель задачи линейного программирования дается в линейной форме и включает уравнение целевой функции $L \rightarrow \text{ext}$ и систему ограничений обычно в форме неравенств. Если, например, при оптимизации решается задача снижения себестоимости (С) выпускаемой продукции (следовательно, экономного расходования ресурсов), то ЦФ имеет вид $\min L_c$, а если — увеличения прибыли (П) от реализации продукции, то ЦФ будет $\max L_n$. Из формулы структуры цены (Ц) на продукцию $\text{Ц} = \text{П} + \text{С} = \text{const}$ видно, что увеличение прибыли напрямую связано со снижением себестоимости.

Постановка задачи линейного программирования

Пусть имеется m видов ресурсов в количествах соответственно b_1, b_2, \dots, b_m . С помощью этих ресурсов можно произвести n видов продукции в количествах x_1, x_2, \dots, x_n . Известна норма затрат a_{ji} каждого

няется, то нулю следует приравнять другие $n - m$ переменных. Решение уравнений с базисными переменными называется базисным.

Базисное решение системы из m уравнений будет допустимым (опорным), если все базисные переменные $x_i \geq 0$. Решение задачи линейного программирования заключается в том, чтобы среди всех опорных базисных решений выбрать такое, при котором целевая функция L достигает экстремума. Этот результат достигается с помощью *симплекс-метода*.

4.5.1. Геометрическая интерпретация задачи линейного программирования

Пусть математическая модель задачи имеет вид:
целевая функция:

$$L = x_1 - x_2 \rightarrow \max;$$

система ограничений:

$$-2x_1 + x_2 \leq 2;$$

$$x_1 - 2x_2 \leq 2;$$

$$x_1 + x_2 \leq 5.$$

Добавим новые переменные (x_3, x_4, x_5) и запишем ограничения в виде равенств

$$-2x_1 + x_2 + x_3 = 2;$$

$$x_1 - 2x_2 + x_4 = 2;$$

$$x_1 + x_2 + x_5 = 5.$$

Систему равенств разрешаем относительно переменных: x_3, x_4, x_5 , которые выбираем в качестве базисных. Тогда переменные: x_1, x_2 будут свободными.

$$x_3 = 2 + 2x_1 - x_2;$$

$$x_4 = 2 - x_1 + 2x_2;$$

$$x_5 = 5 - x_1 - x_2.$$

При значениях $x_1 = x_2 = 0$ базисные переменные удовлетворяют условию неотрицательности. Чтобы проиллюстрировать решение за-

дачи в двумерном пространстве на плоскости в координатах свободных переменных: x_1, x_2 , построим прямые x_3, x_4, x_5 , задавая соответственно $x_3 = 0, x_4 = 0, x_5 = 0$ (рис. 4.9). В результате получим многоугольник $odcbg$ базисных решений, вершины которого представляют опорные базисные решения, причем в каждой вершине многоугольника сразу две базисные переменные равны нулю. Линия целевой функции L проходит под углом 45° , так как коэффициенты при свободных переменных x_1 и x_2 равны.

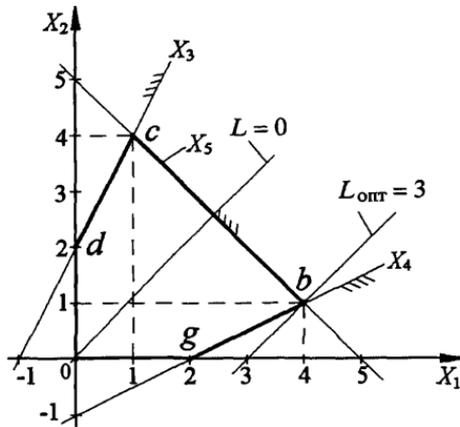


Рис. 4.9. Схема построения многоугольника базисных решений

Координаты вершины b многоугольника $odcbg$ соответствуют $\max L = 4 - 1 = 3$. Координаты других вершин дают меньшие значения L .

4.5.2. Симплекс-метод

Процедура симплекс-метода (СМ) заключается в последовательном вычислении решений, находящихся в вершинах многоугольника (для плоскости) или многогранника (для объема), образующего область допустимых решений. С помощью СМ просматривается небольшая часть решений из множества возможных с быстрым выходом на $\text{extr } L$. Приведем укрупненный алгоритм симплекс-метода:

- находится начальный допустимый (опорный) план;
- устанавливается признак оптимальности выбранного опорного плана;

- приводится способ, позволяющий перейти к лучшему опорному плану.

Рассмотрим *алгебраическую* форму СМ на вышеприведенном примере.

Начальный опорный план получим, полагая, что свободные переменные равны нулю ($x_1 = x_2 = 0$). Тогда базисные переменные будут равны: $x_3 = 2$, $x_4 = 2$, $x_5 = 5$ и начальный опорный план имеет вид: $x_{01} (0, 0, 2, 2, 5)$. Проверим его на оптимальность (в нашем случае $\max L$). При $x_1 = x_2 = 0$ целевая функция $L_1 = x_1 - x_2 = 0$. Максимум целевой функции не достигнут, так как с увеличением x_1 можно увеличивать L . Поэтому x_1 переводим в базисные переменные. Для определения новой свободной переменной анализируем систему уравнений, разрешенных относительно x_3 , x_4 , x_5 , полагая $x_2 = 0$. Увеличение x_1 приводит к возрастанию x_3 и снижению x_4 и x_5 , и поэтому x_3 не может быть переведена в свободные переменные. Так как переменная x_4 достигает значения $x_4 = 0$ быстрее (при $x_1 = 2$), а переменная $x_5 = 0$ при $x_1 = 5$, то переменную x_4 исключаем из базиса и переводим ее в свободные переменные. Разрешим второе уравнение системы ограничений относительно $x_1 = 2 + 2x_2 - x_4$. Подставим это значение x_1 в целевую функцию, в первое и третье уравнения ограничений и получим новую систему:

целевая функция:

$$L_2 = 2 + x_2 - x_4;$$

система ограничений:

$$x_1 = 2 + 2x_2 - x_4;$$

$$x_3 = 2 + 2(2 + 2x_2 - x_4) - x_2 = 6 + 3x_2 - 2x_4;$$

$$x_5 = 5 - (2 + 2x_2 - x_4) - x_2 = 3 - 3x_2 + x_4.$$

Новый опорный план имеет вид: $x_{02} (2, 0, 6, 0, 3)$. Полагая $x_2 = x_4 = 0$, получим $L_2 = 2$.

Однако $\max L$ не достигнут, так как, увеличивая x_2 , можно повышать L . Поэтому свободную переменную x_2 переводим в базисные. Новой свободной переменной становится x_5 , так как условие $x_5 = 0$ (при $x_4 = 0$) достигается быстрее других, а именно при $x_2 = 1$. Из 3-го уравнения последней системы находим: $x_2 = 1 + 1/3x_4 - 1/3x_5$. Подста-

вим это значение x_2 в целевую функцию, в первые два уравнения системы ограничений и получим:

целевая функция:

$$L_3 = 2 + 1 + 1/3 x_4 - 1/3 x_5 = 3 - 2/3 x_4 - 1/3 x_5;$$

система ограничений:

$$x_1 = 2 + 2(1 + 1/3 x_4 - 1/3 x_5) - x_4 = 4 - 1/3 x_4 - 2/3 x_5;$$

$$x_2 = 1 + 1/3 x_4 - 1/3 x_5;$$

$$x_3 = 6 + 3(1 + 1/3 x_4 - 1/3 x_5) - 2x_4 = 9 - x_4 - x_5.$$

Новый опорный план: $x_{03} (4, 1, 9, 0, 0)$. Полагая $x_4 = x_5 = 0$, получим $L_3 = 3$. Так как в уравнении целевой функции коэффициенты переменных x_4 и x_5 отрицательные, то пределом их увеличения является ноль. Следовательно, при базисе x_{03} достигается $\max L = L_3 = 3$, который уже нельзя повысить. Таким образом, $L_3 = L_{\text{опт}}$, что совпадает с результатом, показанным на рис. 4.9.

Кроме алгебраической, используется также *табличная* форма симплекс-метода, к достоинствам которой можно отнести большую наглядность. Покажем табличную форму реализации СМ, изменив экстремум целевой функции с $\max L$ на $\min L$ ($\min L = -\max L$).

Уравнения математической модели задачи оптимизации запишем в несколько измененной форме:

целевая функция:

$$L = 0 - (x_1 - x_2) \rightarrow \min;$$

система ограничений:

$$x_3 = 2 - (-2x_1 + x_2);$$

$$x_4 = 2 - (x_1 - 2x_2); \quad x_5 = 5 - (x_1 + x_2).$$

Исходная симплекс-таблица имеет следующий вид (табл. 4.11).

Каждая ячейка табл. 4.11 разбита по диагонали на 2 клетки. В верхние клетки занесены свободные члены и коэффициенты при свободных переменных x_1 и x_2 . Найдем в строке L любой положительный коэффициент (кроме $k = 0$). Здесь такой коэффициент $k = 1$ при x_1 . Если положительных коэффициентов в строке L нет, то решение оптимально, так как при новой записи $\min L$ свободные переменные x_1, x_2 должны быть положительны. Поставим столбец x_1 стрелкой и назовем его разрешающим. Для определения разрешающей строки

Таблица 4.11. Табличная форма симплекс-метода

Базисная переменная	Свободный член	Свободная переменная	
		x_1	$-x_2$
x_3	2/4	-2/2	1/-4
→ x_4	2/2	1/1	-2/-2
x_5	5/-2	1/-1	1/2
L	0/-2	1/-1	-1/2

↑

выберем положительный коэффициент в столбце x_1 . В нашем случае имеем $k = 1$ в строках x_4 и x_5 . Разрешающая строка будет x_4 , так как отношение свободного члена к коэффициенту x_1 в ней меньше, чем в строке x_5 ($2/1 < 5/1$). Пометим строку x_4 стрелкой. На пересечении стрелок в числителе окажется разрешающий элемент ε_p , который здесь равен $\varepsilon_p = 1$. В знаменателе клетки запишем величину $1/\varepsilon_p = 1$. Умножим на $1/\varepsilon_p = 1$ все числа в числителе клеток разрешающей строки и результат запишем в знаменатель (это будут числа: 2, 1, -2). Все числа в числителе клеток разрешающего столбца умножим на $-1/\varepsilon_p$ (в нашем случае на -1) и результат запишем в знаменатель его клеток (это будут числа: 2, -1, -1). По специальному правилу заполняем знаменатели других клеток.

Начальный опорный план, записанный в исходной табл. 4.11, не оптимален, так как коэффициент при x_1 целевой функции положителен. Поэтому x_1 исключаем из свободных переменных и переводим в базисные, а x_4 переводим в свободные. Аналогично исследуем другой опорный план, заполняя новую таблицу и т. д., пока не достигнем $\min L = -3$.

В библиотеке стандартных программ ЭВМ есть программа, реализующая симплекс-метод.

4.6. Оптимизация задачи распределения грузов с помощью метода потенциалов

Математическая модель задачи оптимизации с помощью линейного программирования может быть представлена в табличной форме, для которой применяют специальный *метод потенциалов*, кото-

рый является разновидностью симплекс-метода. Метод потенциалов в ряде случаев позволяет упростить решение задачи поэтапного достижения экстремума целевой функции. Этот метод широко применяется при решении транспортной задачи, результатом которой является определение оптимальной схемы перевозок грузов от поставщиков к потребителям. Обычно задача формулируется следующим образом.

Пусть имеется m пунктов хранения однородного продукта (например, заготовок одного типа), в каждом из которых находится соответственно a_1, a_2, \dots, a_m количеств продукта. Имеется n пунктов потребления этого продукта, в каждый из которых требуется доставить b_1, b_2, \dots, b_n количеств продукта. Известны удельные затраты c_{ij} на перевозку единицы продукта из каждого i -го пункта хранения ($i = 1, m$) в каждый j -й пункт потребления ($j = 1, n$). Оптимальным является план перевозок, при котором суммарные транспортные затраты минимальны. Данные транспортной задачи представляют в виде таблицы.

Таблица 4.12. Данные транспортной задачи для решения методом потенциалов

Пункты хранения	Пункты потребления				a_i
	B_1	B_2	B_3	B_n	
A_1	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{1n}	a_1
	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{1n}	
A_2	c_{21}	c_{22}	c_{23}	c_{2n}	a_2
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{2n}	
...
A_m	c_{m1}	c_{m2}	c_{m3}	c_{mn}	a_m
	x_{m1}	x_{m2}	x_{m3}	x_{mn}	
b_j	b_1	b_2	b_3	b_n	$\Sigma b_j = \Sigma a_i$

В табл. 4.12 содержатся все уравнения математической модели задачи линейного программирования. Сумма произведений $c_{ij}x_{ij}$ каждой клетки дает выражение целевой функции

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij} \rightarrow \min,$$

где x_{ij} — количество продукта, доставляемого из i -го пункта хранения в j -й пункт потребления.

Система ограничений имеет вид равенств:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = b_j; \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = a_i,$$

где $x_{ij} > 0$.

Уравнение баланса (правая нижняя клетка таблицы):

$$\sum_{j=1}^n b_j = \sum_{i=1}^m a_i.$$

Пример решения задачи методом потенциалов

Пусть из двух накопителей Н1 и Н2 автоматического склада АС необходимо доставить заготовки одного типа на 3 производственных участка ГПС: У1, У2, У3 (табл. 4.13).

Таблица 4.13. Исходные данные к примеру транспортной задачи

АС	ГПС			a_i
	У1	У2	У3	
Н1	20 x_{11}	20 x_{12}	30 x_{13}	1800
Н2	30 x_{21}	40 x_{22}	20 x_{23}	2600
b_j	1000	1200	2200	4400

$$\text{Баланс: } \sum_{j=1}^n b_j = \sum_{i=1}^m a_i = 4400.$$

Требуется определить количество единиц груза x_{ij} .

Этап № 1

Для определения первоначального допустимого базисного плана сначала заполняем верхнюю левую клетку, по возможности удовлетворяя полностью запрос потребителя У1, т. е. назначаем $x_{11} = 1000$. При этом учитывается, чтобы величина затрат c_{11} была минимальной. В нашем примере $c_{11} = c_{12} = 20$, поэтому можно заполнять как клетку (1.1), так и клетку (1.2). После заполнения клетки (1.1) остаток за-

готовок из Н1 запишем в клетку (1.2), т. е. $x_{12} = 1800 - 1000 = 800$ заготовок пойдет на участок У2. Для потребителя У3 останется $x_{13} = 0$.

Во второй строке клетка с минимальными затратами $c_{23} = 20$ соответствует участку У3, поэтому туда записываем всю потребность $x_{23} = 2200$. Остаток из Н2 запишем в соседнюю клетку (2.2), т. е. $x_{22} = 2600 - 2200 = 400$. Для потребителя У1 останется $x_{21} = 0$.

Заполненные клетки соответствуют *базисным* переменным, а незаполненные — *свободным*. После заполнения клеток получим табл. 4.14. Проверим начальный опорный план на оптимальность. Для свободных клеток ($x_{ij} = 0$) оптимального плана должно выполняться условие

$$v_j - u_i \leq c_{ij},$$

где v_j — потенциал j -го столбца ($j = 1, 2, 3$ — номер столбца);

u_i — потенциал i -й строки ($i = 1, 2$ — номер строки).

Таблица 4.14. Распределение грузов на первом этапе

АС	ГПС			a_i
	У1	У2	У3	
Н1	20	20	30	1800
	1000	800	0	
Н2	30	40	20	2600
	0	400	2200	
b_j	1000	1200	2200	4400

Значения потенциалов находим из условия: $v_j - u_i = c_{ij}$ для базисных клеток ($x_{ij} > 0$). Напишем эти равенства:

(кл. 1.1): $v_1 - u_1 = 20$;

(кл. 1.2): $v_2 - u_1 = 20$;

(кл. 2.2): $v_2 - u_2 = 40$;

(кл. 2.3): $v_3 - u_2 = 20$.

Так как переменных здесь больше, чем уравнений, то принимаем, например, $u_1 = 0$. Тогда получим: $u_2 = -20$; $v_1 = 20$; $v_2 = 20$; $v_3 = 0$.

Теперь проверим неравенства для свободных клеток:

(кл. 1.3): $v_3 - u_1 \leq 30$, $0 - 0 \leq 30$ (условие выполняется);

(кл. 2.1): $v_1 - u_2 \leq 30$, $20 + 20 \leq 30$ (условие не выполняется).

Следовательно, начальный план не оптимален. Необходимо его улучшить.

Этап № 2

В клетку (2.1), для которой не выполняется контрольное неравенство, перенесем поставку груза из соседней клетки (2.2) и получим: $x_{21} = 400$, $x_{22} = 0$. Затем, двигаясь по часовой стрелке, с целью сохранения баланса цифру 400 вычтем из клетки (1.1) и добавим 400 в клетку (1.2). В результате цикла пересчета новые значения базисных переменных будут: $x_{11} = 1000 - 400 = 600$; $x_{12} = 800 + 400 = 1200$. Значения переменных в столбце У3 остались прежними. После заполнения на втором этапе получаем табл. 4.15.

Таблица 4.15. Распределение грузов на втором этапе

АС	ГПС			a_i
	У1	У2	У3	
Н1	20	20	30	1800
	600	1200	0	
Н2	30	40	20	2600
	400	0	2200	
b_j	1000	1200	2200	4400

Если при пересчете сразу в нескольких вершинах цикла будут нулевые поставки, то свободной объявляется одна клетка, а остальные остаются базисными с нулевыми поставками.

Проверим новый допустимый план на оптимальность.

Сначала найдем значения потенциалов, полагая $u_1 = 0$; $u_2 = -10$; $v_1 = 20$; $v_2 = 20$; $v_3 = 10$. Затем проверим неравенства:

(кл. 1.3): $v_3 - u_1 \leq 30$, $10 - 0 \leq 30$ (условие выполняется);

(кл. 2.2): $v_2 - u_2 \leq 40$, $20 + 10 \leq 40$ (условие выполняется).

Следовательно, данное решение *оптимально*.

Сравним значения целевой функции для исходного и оптимального планов:

$$L_1 = 20 \cdot 1000 + 20 \cdot 800 + 40 \cdot 400 + 20 \cdot 2200 = 96\ 000 \text{ ед.}$$

$$L_2 = L_{\text{опт}} = 20 \cdot 600 + 20 \cdot 1200 + 30 \cdot 400 + 20 \cdot 2200 = 92\ 000 \text{ ед.}$$

В результате оптимизации достигается экономия 4000 единиц без дополнительных капитальных вложений.

4.7. Оптимизация управления технологическим процессом

Динамическое программирование (ДП) — метод поэтапной оптимизации управления процессом, когда на каждом шаге принимается решение, от которого зависит успех на данном шаге, но с учетом последующих шагов.

Основу метода ДП составляет принцип оптимизации Р. Беллмана: «Каково бы ни было состояние оптимизируемой системы в результате какого-то числа шагов, управление на ближайшем шаге должно быть выбрано так, чтобы оно обеспечивало максимальный выигрыш на всех оставшихся шагах, включая данный» [5]. Это значит, что поиск оптимума не зависит от предыдущего состояния системы и определяется лишь ее состоянием в рассматриваемый момент времени.

Оптимизация управления n -шагового процесса состоит в определении последовательности управлений U_0, U_1, \dots, U_{n-1} , при которых функционал достигает минимума:

$$J_n(U) = \min \int_0^T Q[x(t), U(t)] dt,$$

где $Q[x(t), U(t)]$ — мгновенные потери (затраты) в момент t при состоянии системы $x(t)$ и управлении $U(t)$.

Выбор управления на отдельном шаге производится как из условия минимизации потерь на данном шаге $Q(x_l, U_l)$, так и из условия минимизации потерь на всех последующих шагах Q :

$$(x_l, U_l) + f_{n-(l+1)}(x_{l+1}),$$

где $Q(x_l, U_l)$ — мгновенные потери на шаге l ;

$f_{n-(l+1)}(x_{l+1})$ — суммарные потери на всех последующих шагах (рис. 4.10).

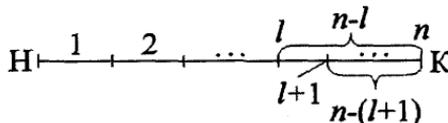


Рис. 4.10. Пояснение к уравнению Беллмана:

n — число шагов

Рекуррентное соотношение $(n - l)$ — шагового процесса, начиная с шага l имеет вид (уравнение Беллмана):

$$f_{n-l}(x_l) = \min [Q(x_l, U_l) + f_{n-(l+1)}(x_{l+1})].$$

Оптимальное управление на каждом шаге определяется последовательным прохождением траектории управления от конечной точки x_k до начальной x_n . На любом шаге выбор делается из l вариантов вместо l^{n-1} , где n — число шагов. Только последний шаг планируется без учета на будущее (рис. 4.11).

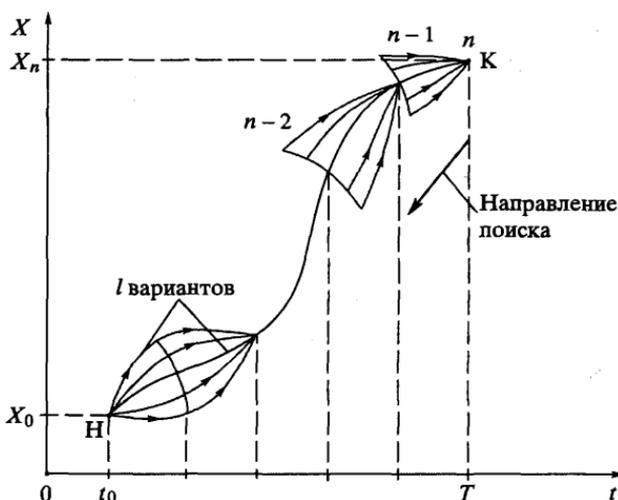


Рис. 4.11. Поиск оптимальной траектории управления методом ДП

Метод ДП снимает проблему абсолютного и относительного экстремума, так как позволяет сразу находить абсолютный экстремум (в данном случае \min).

Процесс определения оптимальной траектории управления изображается на плоскости. Для этого проводится дискретизация переменных, т. е. диапазон изменения параметра разбивается на интервалы. Дискретные состояния представляются узлами сети потерь (или затрат). Затраты $Q(x, U)$ на переход из данного узла к следующему обозначаются числами на ребрах сети. Для записи цифр минимальных потерь в узлах сети составляются специальные таблицы значений: x_{ij} , $Q_k(x, U)$ и $\min Q_k(x, U)$ на каждом шаге (где $\min Q_k(x, U) = f_k(x)$; k — номер шага). Например, таблица для управления на последнем шаге ($k = 1$) имеет следующий вид (табл. 4.16).

Таблица 4.16. Управление на последнем шаге

x_{ij}	U_{ij}	$Q_1(x, U)$	$\min Q_1(x, U)$	$U_{\text{опт}}$
x_{10}	0	a	a	0
	1	—		
x_{01}	0	—	b	1
	1	b		

Значения переменных: x_{10} — координата на первом шаге управления параметром по горизонтали (код управления $U = 0$); x_{01} — координата на первом шаге управления параметром по вертикали (код управления $U = 1$); a, b — соответственно числа над ребрами сети потерь по горизонтали и по вертикали. Числам a и b соответствует код $U_{\text{опт}}$.

В качестве примера рассмотрим задачу на определение оптимальной траектории управления с целью перехода на новый технологический процесс. Пусть параметры существующего технологического процесса: K_0 — качество продукции (например, точность), P_0 — производительность. Требуется перейти на новый технологический процесс с параметрами: $K_1 > K_0$ и $P_1 > P_0$ при условии минимизации затрат. Разобьем диапазоны изменения параметров K и P на 4 интервала от 0 до 4, начиная с конечного значения x_k . Затраты $Q(x, U)$ на переход из данного узла до следующего обозначены на ребрах сети затрат K — P (рис. 4.12).

Вначале проставим нарастающую сумму затрат в узлах нулевой вертикали (управление процессом по координате P) и нулевой горизонтали (управление процессом по координате K). В обоих случаях других вариантов управления нет. Сумма затрат в узлах нулевой вертикали составит: 8, 14, 17, 18 единиц, а в узлах нулевой горизонтали: 9, 18, 24, 32 единицы (рис. 4.13).

Затем находим суммарные затраты в узлах первой вертикали. В первом узле остается цифра 9. Во втором узле минимальная сумма составит $16 = 9 + 7$, так как в другом случае сумма больше и равна $17 = 9 + 8$. То же в третьем узле: минимальная сумма $22 = 16 + 6$ (большая сумма $23 = 14 + 9$) и т. д. Аналогично поступаем с вертикалью 2 и другими вертикалями. Пути, по которым получены минимальные суммы, отмечают стрелками.

Закончив заполнение узлов четырех вертикалей, по стрелкам проходим по сети затрат в прямом направлении от x_n до x_k и вычисляем суммарные затраты на оптимальной траектории управления.

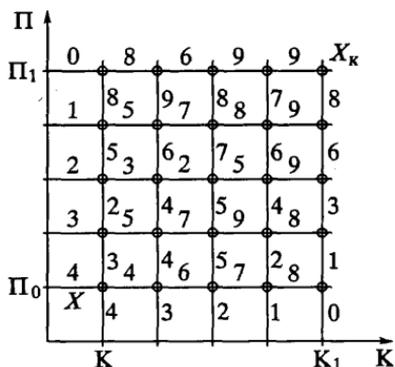


Рис. 4.12. Сеть затрат к примеру применения метода ДП

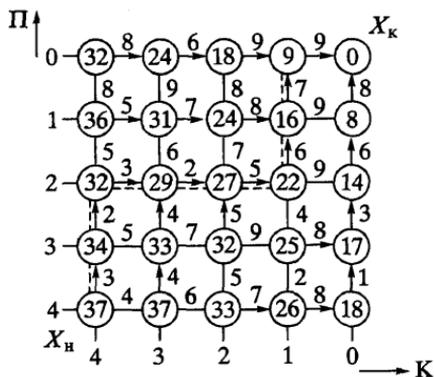


Рис. 4.13. Сеть затрат с оптимальной траекторией управления

Для нашего примера $\min Q(x, U) = 37$ единиц, а код оптимальной траектории управления $U_{\text{опт}}(11000110)$, где $U_k = 0$ — управление по параметру K , а $U_\Pi = 1$ — управление по параметру Π . Приведем электронные таблицы управления с минимальными затратами для нескольких шагов k (табл. 4.17—4.19).

Таблица 4.17. Управление для шага $k = 1$

x_{ij}	U_{ij}	$Q_1(x, U)$	$\min Q_1(x, U)$	$U_{\text{опт}}$
x_{10}	0	9	9	0
	1	—		
x_{01}	0	—	8	1
	1	8		

Таблица 4.18. Управление для шага $k = 2$

x_{ij}	U_{ij}	$Q_2(x, U)$	$\min Q_2(x, U)$	$U_{\text{опт}}$
x_{20}	0	18	18	0
	1	—		
x_{11}	0	17	16	1
	1	16		
x_{02}	0	—	14	1
	1	14		

Таблица 4.19. Управление для шага $k = 3$

x_{ij}	U_{ij}	$Q_3(x, U)$	$\min Q_3(x, U)$	$U_{\text{опт}}$
x_{30}	0	24	24	0
	1	—		
x_{21}	0	24	24	0
	1	26		
x_{12}	0	23	22	1
	1	22		
x_{03}	0	—	17	1
	1	17		

Недостаток метода ДП заключается в том, что при рассмотрении на каждом шаге оптимального управления для всех возможных состояний объекта остается неясным, какое оптимальное управление будет для заданного начального положения. Обычно оказывается, что результаты значительной части вычислений не будут использованы. В этом отношении более эффективным является метод оптимизации, известный как «принцип максимума» академика Л.С. Понтрягина [15, 16, 22].

Глава 5

АВТОМАТИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ИПС

5.1. Выбор основного и вспомогательного оборудования ИПС

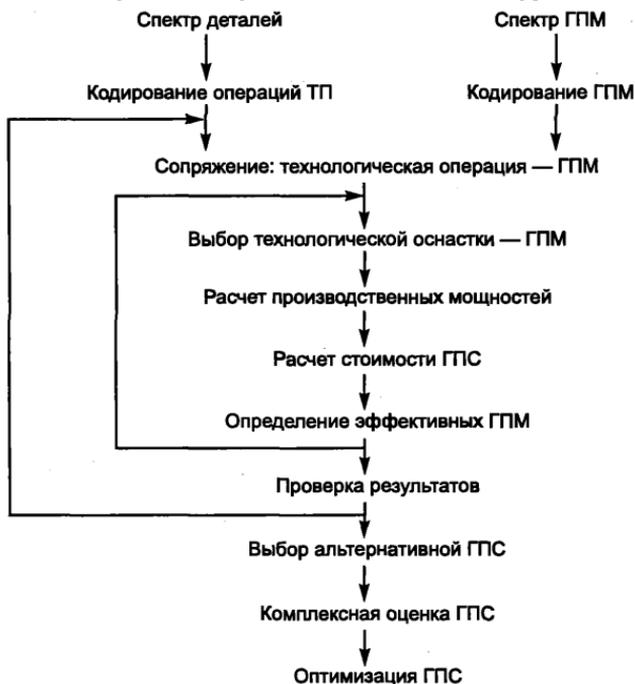
При выборе технологического оборудования для комплектования автоматизированных производств необходимо учитывать следующие требования:

- 1) максимальная автоматизация производственного процесса (загрузка—выгрузка деталей, смена инструмента, отвод стружки, контроль и диагностирование);
- 2) максимальная концентрация операций на станке с целью снижения числа переустановок заготовок и числа единиц оборудования;
- 3) выполнение принципа постоянства базирования заготовок при переходе от станка к станку;
- 4) компоновочная и программная стыковка технологического оборудования с транспортно-накопительной системой, измерительным и диагностическим комплексом и др.;
- 5) обеспечение быстрой переналадки технологического оборудования;
- 6) обеспечение заданной точности и качества обработки;
- 7) соответствие производительности оборудования годовому объему выпуска изделий;
- 8) минимальная себестоимость обработки и отпускная цена оборудования;
- 9) реальная возможность приобретения нового и использования имеющегося оборудования.

Если выбор технологического оборудования для механообработки можно осуществлять по каталогам, то оборудование для сборки узлов и изделий из-за отсутствия серийного производства приходится разрабатывать каждый раз под конкретную задачу, используя статистические данные по трудоемкости этапов сборки и типовым соединениям узлов (разъемные, неразъемные). По каталогам и отраслевым нормам можно производить выбор методов и средств автоматической загрузки-выгрузки деталей и инструментальных сборочных головок.

Существует алгоритм выбора технологического оборудования уровня гибких производственных модулей (ГПМ) для комплектования гибких производственных систем (ГПС). Исходными данными для процедуры выбора оборудования служат: классификация деталей и ГПМ, а также типизация технологических процессов. При сопряжении технологической операции с соответствующим ГПМ учитываются массогабаритные параметры заготовок, деталей, изделий и производится выбор технологической оснастки (спутники, устройства базирования, делительные головки и др.), обрабатывающего и измерительного инструмента.

Алгоритм выбора технологического оборудования ГПС



Технологическое оборудование, обеспечивающее автоматизацию материальных потоков, включает различные механические системы и управляющий вычислительный комплекс. Для наглядности механические системы на схеме могут быть сосредоточены вокруг специального технологического оборудования ТО, являющегося ядром ГПМ (рис. 5.1).

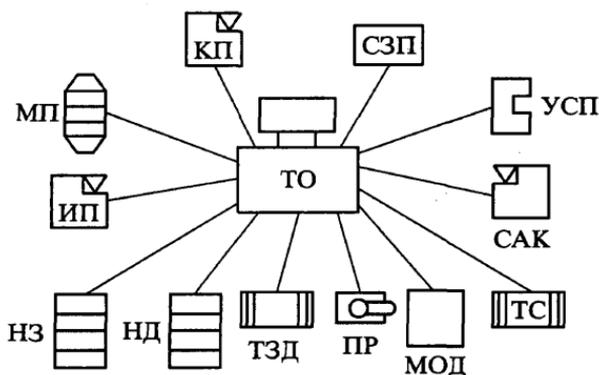


Рис. 5.1. Комплект технических средств ГПМ

В общем виде в комплект технических средств ТО входят: накопители заготовок НЗ и деталей НД; транспортёр заготовок и деталей ТЗР; транспортёр стружки ТС; измерительный пост ИП для замера деталей после обработки; промышленный робот ПР для загрузки-разгрузки ТО; система активного контроля САК за ходом технологического процесса обработки или сборки; механизм отбраковки деталей МОД по результатам измерений; магазин инструмента МИ с устройством автоматической смены инструмента УСИ, средствами контроля инструмента КИ (степени износа и поломок) и счетчиком числа заточек инструмента СЗИ.

Номенклатура и количество технических средств ТО определяются назначением и технологическим уровнем ГПС [1, 6, 12, 27].

Управляющий вычислительный комплекс (УВК) ГПС представляет собой систему, на верхнем уровне которой расположена центральная ЭВМ (ЦЭВМ), выполняющая обработку и распределение данных управляющих программ на несколько единиц оборудования с ЧПУ (рис. 5.2).

На втором уровне УВК расположены микроЭВМ и микропроцессорные системы МП с соответствующими блоками сопряжения и

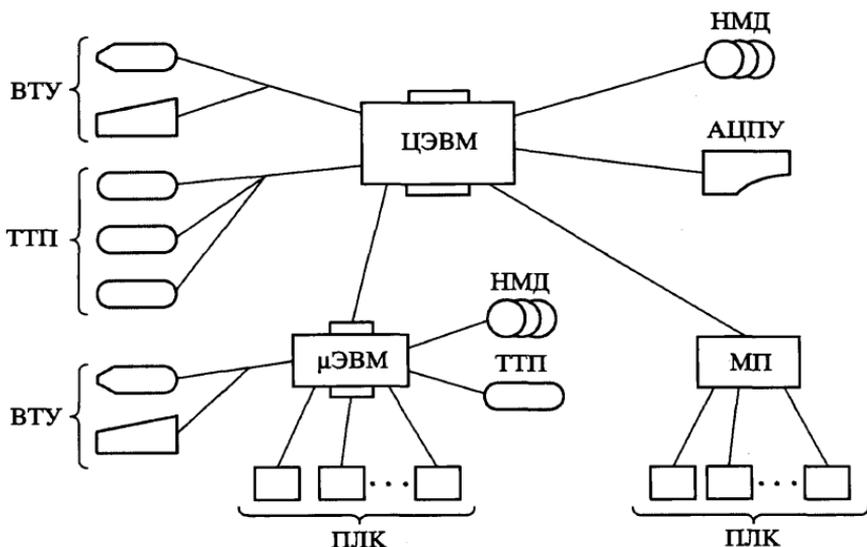


Рис. 5.2. Комплект технических средств управляющего вычислительного комплекса ИПС

системными пультами оператора для задания режима и согласования работы программируемых логических контроллеров ПЛК, которые в режиме разделения времени генерируют команды управления различными исполнительными механизмами (приводы подач, устройства смены инструмента и т. п.). В состав УВК входят видеотерминальные устройства VTU как пульта диспетчера для оперативного управления, технологические терминальные пульта ТТП, которые используются для непосредственного сообщения оператором различных указаний и для связи оператора с диспетчером и другими службами предприятия. Таким образом, диспетчер и станочник-оператор могут вводить данные и команды (например, внеочередные заказы) прямо на рабочем месте в зависимости от текущей ситуации. В перечне технических средств УВК необходимо указать каналы связи и комплекты датчиков обратной связи, которые являются источником текущей информации о состоянии управляемых объектов.

Рассмотрим кратко состав технологического оборудования по видам производства.

Оборудование для заготовительного производства

К заготовительному производству относятся участки штамповки и высадки, различных видов литья, прессования из пластмасс и

пресс-порошков, изготовление заготовок из стекла, ситалла, керамики, полупроводниковых и других материалов.

Производство заготовок литьем под давлением

Для литья под давлением заготовок из цветных сплавов (силумин, бронза) массой от 2,5 до 20 кг широко используется РТК в составе: машина литья под давлением с манипулятором-дозатором расплава, робот для съема отливок и смазки литьевой формы, пресс для обруб-ки летников, система автоматического контроля технологического режима и параметров отливок.

Производство заготовок штамповкой и ковкой

В этом производстве используются в основном РТК различной компоновки, включающие: оборудование для листовой, холодной и горячей объемной штамповки,ковки, прессования заготовок из порошков (металлокерамика) и пластмасс (прессы простого и двойного действия, винтовые, эксцентриковые, обрезные и чеканочные, молоты и правильные машины), роботы и манипуляторы для подачи исходных материалов и съема штучных заготовок массой от 0,1 до 40 кг. Для производства заготовок из пластмасс широкое применение в нашей стране нашли термопластавтоматы фирмы «Куаси» (Япония).

Производительность таких РТК составляет от 150 до 3000 шт./ч.

Оборудование для механообработки

К оборудованию для механообработки относится обширный парк металлорежущих станков, которые в зависимости от характера выполняемых работ и типа применяемых режущих инструментов подразделяются на 10 групп: токарные, фрезерные, строгальные, протяжные, зубо- и резьбообработывающие, сверлильные, разрезные, шлифовальные, полировальные и доводочные. В отдельную группу выделены разные и вспомогательные станки, которые не вошли ни в одну из перечисленных групп.

В состав РТК механообработки обычно входят: станок с ЧПУ (или обрабатывающий центр) с инструментальным манипулятором, обслуживающий робот, операционный накопитель, комплект технологической оснастки и УВК. Выбор типа станка в составе РТК производится с помощью классификатора ЕСКД, который выделяет два класса деталей: тела вращения (ТВ) и корпусные детали (КД). Внутри этих классов детали разбивают на массогабаритные группы с привязкой к конкретным станкам. Покажем это на примерах.

Тела вращения

Первый подкласс — валы (В) с $l/d \geq 2$.

Группа деталей	Габариты, мм, и масса, кг, деталей			Параметры станка		Модель станка
	d	l	m	D_y	D_m	
1В	20	250	2	250	125	ТПК-125В
2В	50	500	10	320	200	26Б16Т1
3В	80	1000	40	400	250	16К20Т1
4В	160	1400	160	630	400	16К30Ф3

Второй подкласс — диски (Д) с $l/d \leq 2$

Группа деталей	Габариты, мм, и масса, кг, деталей			Параметры станка		Модель станка
	d	l	m	D_y	D_m	
1Д	160	100	10	200	100	КТ-141
2Д	250	200	40	320	200	16Б16Т1
3Д	320	250	80	400	250	16К20Т1
4Д	400	320	160	500	320	1П752МФ3

Корпусные детали

Группа деталей	Габариты, мм, и масса, кг, деталей			Параметры станка		Модель станка
	l	b	m	b_c	l_c	
1К	300	300	200	400	630	ИР320ПМФ4
2К	500	500	500	630	800	ИР500МФ4
3К	800	800	3000	1120	1250	ИР800МФ4

Принятые обозначения: D_y — установочный диаметр станка; D_m — максимальный диаметр заготовки; l_c , b_c — установочные размеры станка.

Образцы выбранных по каталогу многооперационного станка (МОС) и обслуживающего робота для токарного обрабатывающего центра показаны на рис. 5.3.

Оборудование для сборки

Состав оборудования для сборки зависит от структуры сборочного комплекса: сборочный центр (стационарная сборка) или сборочная линия (подвижная сборка). В этот состав входит: комплект сбо-

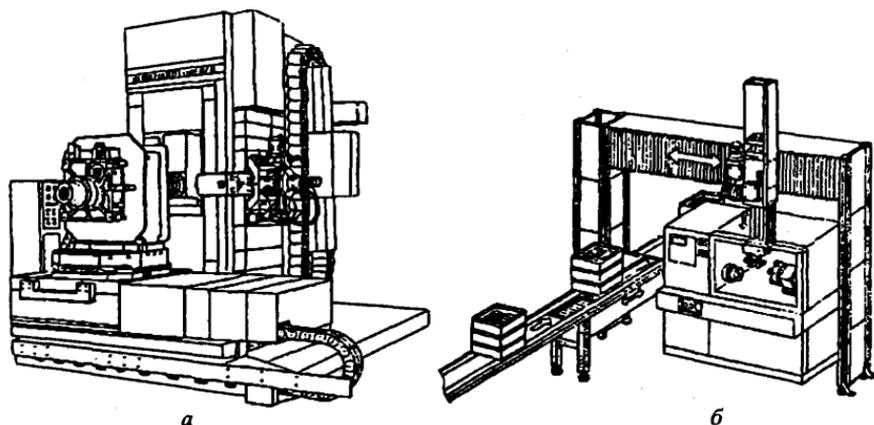


Рис. 5.3. Образцы выбранных по классификатору ЕСКД МОС для обработки корпусных деталей (а) и деталей типа «тела вращения» (б)

рочных головок (для разъемных и неразъемных соединений), загрузочные роботы и специализированные устройства загрузки-выгрузки (УЗВ), транспортно-накопительная система, спутники, набор инструментов, устройства ориентации и кантования деталей и узлов, система контроля и диагностики, датчики, система управления сборочного модуля.

Некоторые варианты компоновок сборочных центров представлены на рис. 5.4. Разнообразие структурных вариантов сборки связано с широким спектром технологических задач. Подвижная сборка

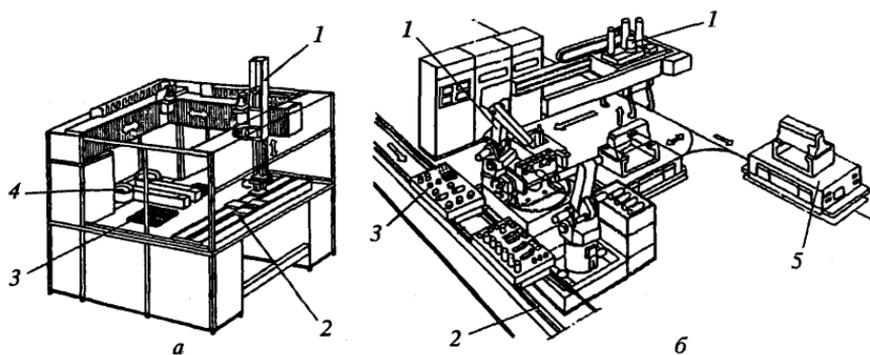


Рис. 5.4. Варианты компоновок сборочных центров с порталным (а), напольными и подвесным (б) роботами:

1 — ПР; 2 — транспортер кассет; 3 — кассета с деталями; 4 — УЗВ; 5 — транспортный робот

реализуется на базе тактового или непрерывно движущегося конвейера, который объединяет механизированные посты и автоматические сборочные модули. Более подробно автоматизированные сборочные системы рассмотрены в [7, 11].

5.2. Система инструментального обеспечения

В настоящее время более 40 % типов станков оснащены системами автоматической смены инструментов, из них примерно 55...60 % приходится на многооперационные станки токарной группы и 40...45 % — на фрезерно-расточные обрабатывающие центры. Существует два способа замены затупившегося (или сломанного) инструмента:

- индивидуальный — замена отдельных инструментов в магазине инструментов (МИ);
- комплектный — замена целиком магазина инструментов.

Первый способ позволяет максимально использовать режущие свойства (стойкость) инструмента, оперативно заменять инструмент в случае поломки и постоянно сохранять в МИ инструменты-дублиеры. Второй способ обеспечивает минимальное время переналадки станка, но приводит к неполному использованию резерва стойкости каждого инструмента.

Конструктивно магазины инструментов выполняют в виде револьверных головок с числом позиций от четырех до 12, дисков и барабанов емкостью от 12 до 30 инструментов и цепных накопителей емкостью от 30 до 120 инструментов (рис. 5.5, 5.6).

В токарных станках инструмент устанавливается в специальных резцедержателях с вертикальной или горизонтальной осью вращения с помощью промежуточных оправок. Манипулятор заменяет инструментальные блоки в целом. На фрезерно-расточных станках инструмент устанавливается в оправках в гнезда инструментального магазина встроенным автооператором.

Компоновка системы инструментального обеспечения (СИО) автоматизированных производств определяется количеством используемого инструмента, интенсивностью его замены в зависимости от программы обработки заготовок заданной номенклатуры. В качестве примера рассмотрим компоновку СИО для обеспечения работы ГПК в составе семи обрабатывающих центров (рис. 5.7).

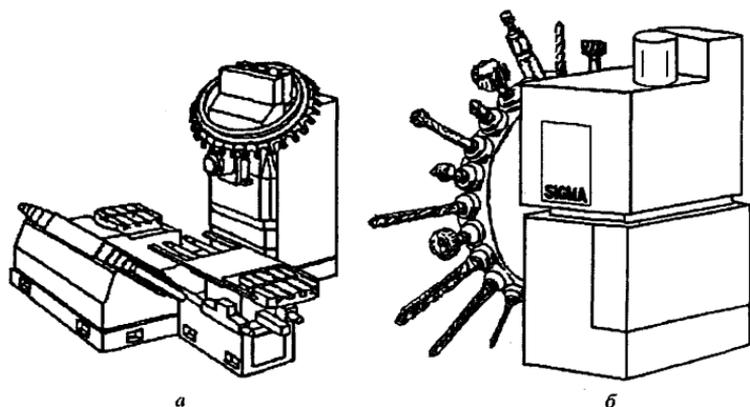


Рис. 5.5. Внешний вид станка с дисковым магазином инструментов (а) и конструкция дискового магазина (б)

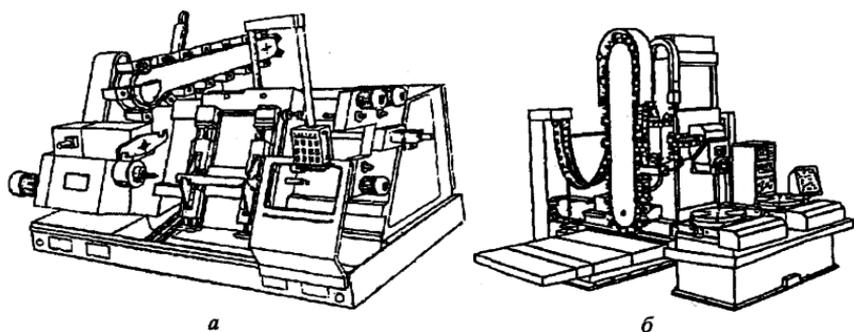


Рис. 5.6. Многооперационные станки с горизонтальным (а) и вертикальным (б) цепными магазинами инструментов

Инструментальный склад ГПК представляет собой два одноярусных накопителя Н1 и Н2, в гнездах которых инструменты располагаются вертикально. Накопитель Н1 имеет две кассеты К1 и К2 (по 6 гнезд каждая), через которые происходит прием инструментов с центрального инструментального склада и отправка их обратно на заточку затупившегося и замену сломанного инструмента. Загрузку и разгрузку кассет и установку инструмента в гнездо СК для считывания кода производит манипулятор М3. Манипулятор М2 комплектует необходимым инструментом накопитель Н1 в соответствии с запросами станков участка (передача инструмента из Н2 в Н1 и обратно). Манипуляторы М2 и М3 связаны между собой через передаточную зону ПЗ, которая, как и кассеты К1, К2, имеет привод вертикального хода для

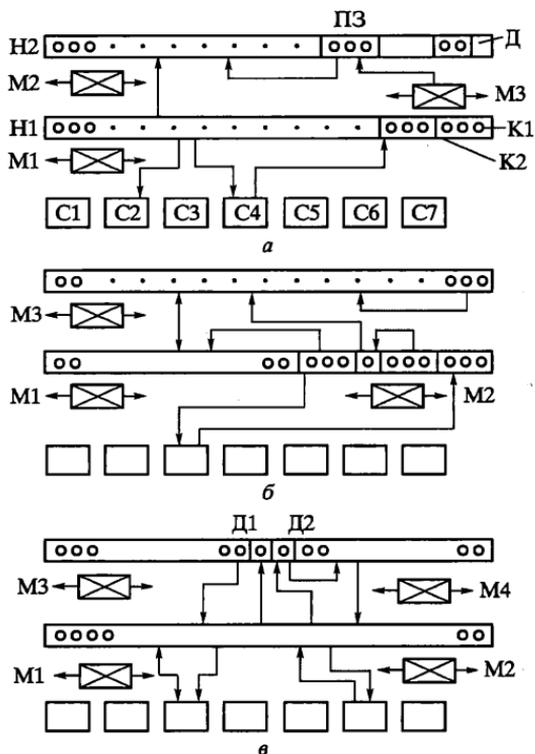


Рис. 5.7. Пример компоновки СИО для ГПК в составе семи обрабатывающих центров: *а* — с одним станочным манипулятором; *б* — с одним манипулятором в накопителе; *в* — с полным комплектом манипуляторов

удобства захвата инструмента. Передачу инструментов в инструментальный магазин ОЦ и обратно производит манипулятор М1. В различных вариантах компоновок СИО число манипуляторов между накопителями Н1 и Н2 и между Н1 и станками варьируется от одного до двух. Оценка вариантов компоновки СИО производится с помощью графа перемещений манипуляторов М1—М3, над дугами которого указывается число их перемещений за месяц, а вершины показывают пункты доставки инструмента (рис. 5.8).

Окончательный выбор числа инструментальных манипуляторов СИО производится не только с учетом интенсивности инструментального потока, но и с позиций оценки надежности работы ГПК. Например, если оставить один манипулятор для обслуживания станков, то при выходе его из строя будет остановлен весь ГПК. То же самое произойдет, если между накопителями Н1 и Н2 останется один

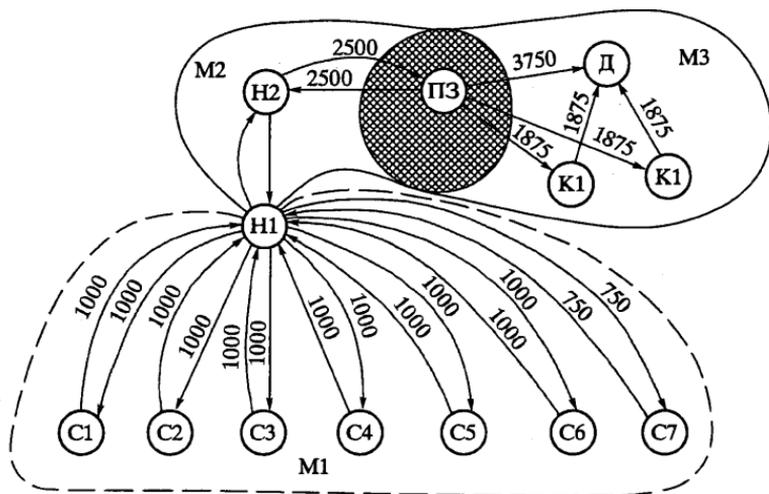


Рис. 5.8. Граф перемещений инструментальных манипуляторов за месяц

манипулятор. Для крупных ГПК оптимальной является компоновка СИО с четырьмя манипуляторами.

Расчет параметров СИО

Целью расчета является определение емкости E инструментального склада ГПК и числа обслуживающих манипуляторов n_m . Емкость определяется числом инструментов $n_{ин}$, необходимых для обработки заданной номенклатуры $n_{тр}$ заготовок, т. е. $E = n_{ин}$. Если в инструментальном складе участка не удастся разместить весь необходимый инструмент, то часть инструментов $n_{цс}$ придется хранить в центральном инструментальном складе.

Исходные данные для расчета параметров СИО.

Число обрабатывающих центров в ГПК $n_{оц} = 7$; емкость магазина инструментов каждого ОЦ $E_{ми} = 30$ ин.; номенклатура обрабатываемых заготовок на ГПК $n_{тр} = 152$ т/р; среднее число инструментов-дублеров на один типоразмер заготовок $n_d = 2$; среднее время обработки заготовок одного типоразмера $t_{об} = 90$ мин; среднее время работы одного инструмента $t_{ин} = 10$ мин; длина накопителей Н1 и Н2 $L = 26\,500$ мм; шаг между гнездами накопителя $S = 125$ мм.

Длина L накопителей определяется габаритами ОЦ и расстояниями между ними, а шаг S задается конструктором с учетом возможности захвата инструмента манипулятором (рис. 5.9).

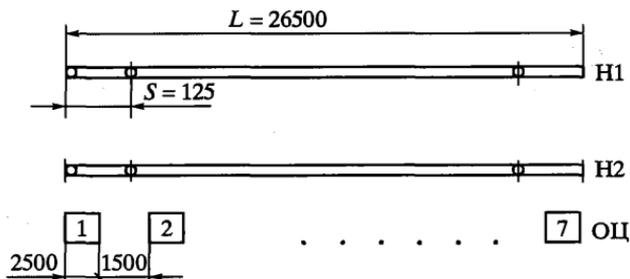


Рис. 5.9. Схема для расчета емкости инструментального накопителя ГПК

Расчет необходимого количества инструмента.

Количество инструментов в магазинах ОЦ:

$$n_{\text{МИ}} = E_{\text{МИ}} \cdot n_{\text{ОЦ}} = 30 \cdot 7 = 210 \text{ ин.}$$

Количество инструментов в одном накопителе ГПК:

$$n_{\text{Н}} = L/S = 26\,500/125 = 212 \text{ ин.}$$

То же в двух накопителях:

$$E_{\text{Н}} = 2 \cdot n_{\text{Н}} = 2 \cdot 212 = 424 \text{ ин.}$$

Количество инструментов на станках ГПК:

$$n_{\text{ГПК}} = n_{\text{МИ}} + E_{\text{Н}} = 210 + 424 = 634 \text{ ин.}$$

Количество основных инструментов для обработки всей номенклатуры заготовок:

$$n_{\text{осн}} = n_{\text{ТР}} \cdot t_{\text{об}}/t_{\text{ин}} = 152 \cdot 90/10 = 1368 \text{ ин.}$$

Количество инструментов-дублеров для обработки всей номенклатуры заготовок:

$$n_{\text{д}} = n_{\text{д}} \cdot n_{\text{ТР}} = 2 \cdot 152 = 304 \text{ ин. дубл.}$$

Общее число инструментов для обработки всей номенклатуры заготовок:

$$n_{\text{ин}} = n_{\text{осн}} + n_{\text{д}} = 1368 + 304 = 1672 \text{ ин.}$$

Количество инструментов, которые должны храниться на центральном складе:

$$n_{\text{цс}} = n_{\text{ин}} - n_{\text{ГПК}} = 1672 - 634 = 1038 \text{ ин.}$$

Расчет числа обслуживающих манипуляторов n_m .

Число n_m рассчитывают по коэффициенту загрузки манипулятора М1:

$$k_{зм} = T_{об} / \Phi_m,$$

где $\Phi_m = 305$ ч — месячный фонд времени манипулятора;

$T_{об} = n_{см} \cdot t_{см} / 60$ — суммарное время обслуживания станков манипулятором М1;

$n_{см}$ — число смен инструмента в течение месяца;

$t_{см} / 60$ — среднее время смены одного инструмента, мин.

Если коэффициент загрузки $k_{зм} \geq 1$, то принимают $n_m = 2$.

Для манипулятора М2 (зона обслуживания между Н1 и Н2):

$$T_{об} = t_{вв} + t_{кн},$$

где $t_{вв}$ — время ввода-вывода инструмента из ГПК через К1 и К2;

$t_{кн}$ — время комплектования инструментом накопителя (обмен между Н1 и Н2). Время простоя манипулятора в течение месяца:

$$t_{пр.м} = \Phi_m - T_{об}.$$

Расчет числа кассет в инструментальном накопителе

Производительность кассеты:

$$Q_k = n_{ин} \cdot k_{п} / \Phi_m, \text{ шт./ч,}$$

где $k_{п} = 1,5$ — коэффициент партионности заготовок по типоразмерам;

$$Q_k = 1672 \cdot 1,5 / 305 \text{ ч} = 8,22 \approx 9 \text{ ин./ч (или 9/60 ин./мин).}$$

Тактовое время замены инструмента:

$$t_{т.ин} = 1 / Q_k = 1 \cdot 60 \text{ мин} / 9 \text{ ин.} = 6,66 \approx 7 \text{ мин.}$$

Если $t_{т.ин} \approx t_{т.уч}$, то достаточно одной кассеты (здесь $t_{т.уч}$ — тактовое время обработки заготовок на участке ГПК). Если $t_{т.ин} \geq t_{т.уч}$, то необходимо 2 кассеты.

В схеме на рис. 5.7 инструментальные накопители условно размещены по одну сторону от линии станков, а в реальной компоновке Н1 и Н2 размещаются симметрично по обе стороны от станков над ними. Их обслуживают подвесные манипуляторы. Станочные магазины инструментов обслуживают встроенные в станки манипуляторы.

5.3. Автоматические системы поиска и доставки инструмента в шпиндель станка

Рассмотрим схемы основных систем индивидуальной замены инструментов в многооперационных станках с магазинами инструментов различного типа.

Система без кодирования

В системе без кодирования инструменты в гнездах инструментального магазина располагаются в строгой последовательности согласно маршрутной технологической карте. Поэтому каждый инструмент после окончания своей операции должен быть установлен в то же гнездо, из которого он был извлечен. Укажем две возможные схемы систем без кодирования: схема без инструментального манипулятора (рис. 5.10, а) и схема с манипулятором (рис. 5.10, б).

В схеме без манипулятора установка и сьем инструментов в шпиндель станка производится дисковым магазином, который смонтирован на подвижной каретке. Рассмотрим цикл замены инструмента при условии, что в схеме предусмотрен реверс магазина.

1) $MI_{хв}$ — ход вперед магазина к шпинделю и захват отработавшего инструмента;

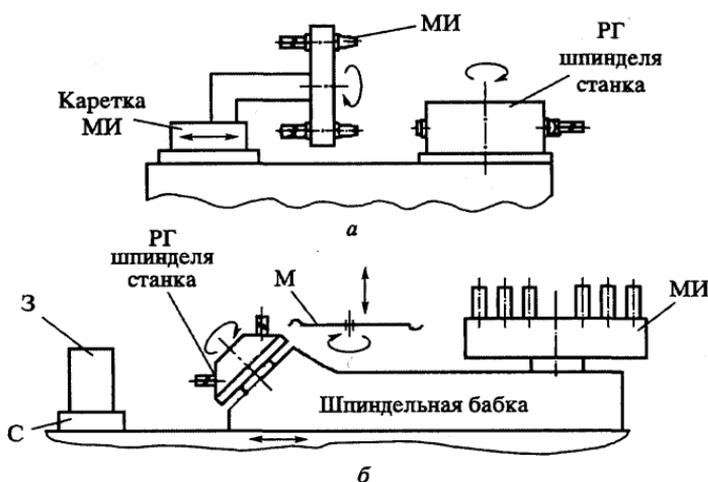


Рис. 5.10. Схемы замены инструмента с помощью инструментального магазина (а) и манипулятора (б) в системе без кодирования:

МИ — магазин инструментов; РГ — револьверная головка; М — манипулятор; З — заготовка; С — спутник

- 2) $MI_{ок}$ — съём инструмента из шпинделя обратным ходом магазина;
- 3) $MI_{2ф}$ — поворот магазина на 2 шага по часовой стрелке;
- 4) $MI_{хв}$ — ход вперед магазина и установка в шпиндель нового инструмента;
- 5) $MI_{ок}$ — обратный ход магазина без инструмента;
- 6) $MI_{1ф}$ — поворот магазина на 1 шаг против часовой стрелки.

При реверсе магазина определенное пустое гнездо будет готово принять свой отработавший инструмент.

Если конструкция привода не предусматривает реверс МИ, то примерно в два раза увеличивается время замены инструмента и соответственно время простоя станка. Коэффициент использования станка может упасть с 0,95 до 0,9.

Во второй схеме используется одно- и двухзахватный манипулятор для замены инструмента (см. рис. 5.10, б). Цикл замены инструмента здесь аналогичен первой схеме.

Обе схемы находят применение на станках токарной группы с револьверными головками на 4...12 позиций и на станках с дисковыми магазинами небольшой емкости (до 30 гнезд) благодаря своей простоте (отсутствие устройства считывания кода). Следует отметить, что в системе без кодирования оператор отвечает за точную установку инструмента в МИ в требуемой последовательности.

Система с кодированием инструмента

В этой системе инструмент не привязан к конкретному гнезду МИ, и поэтому отработавший инструмент может быть установлен в любое свободное гнездо инструментального магазина. Поиск и доставка очередного инструмента в позицию замены производится во время обработки заготовки. Для идентификации инструмента перед МИ расположено кодовое устройство, которое позволяет проверять правильность номера затребованного инструмента. Кодовое устройство по принципу действия может быть механическое, индуктивное, оптическое. Система с кодированием комплектуется в основном цепными магазинами большой емкости (от 60 до 120 инструментов) и двухзахватным манипулятором. Одна из конструкций такого манипулятора 4 показана на рис. 5.11. Гнездо цепного магазина 3 выполнено под конусную оправку 1 инструмента 2.

Конусную часть гнезда и оправки выполняют под углом 11° (конус Морзе) для надежной фиксации инструмента в гнезде.

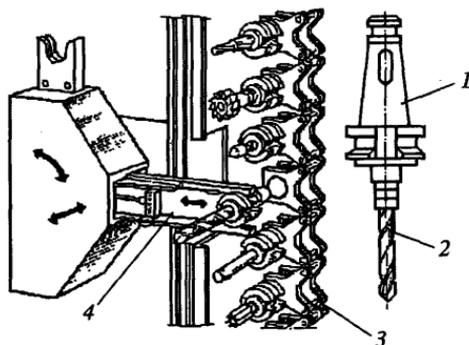


Рис. 5.11. Пример конструкции двухзахватного манипулятора и цепного магазина инструментов

Компоновка СИО может выполняться без промежуточного гнезда (рис. 5.12, а) и с промежуточным гнездом в случае удаленности магазина от шпинделя станка.

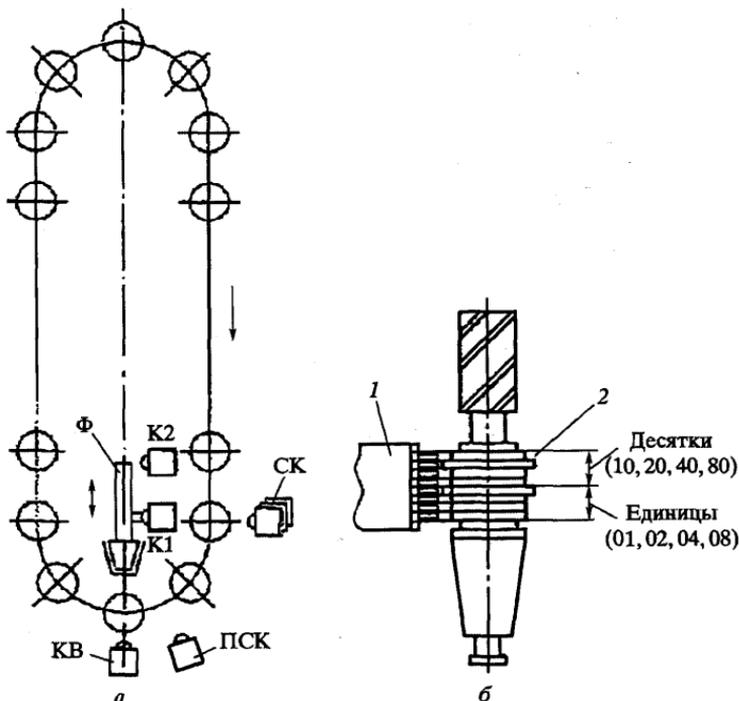


Рис. 5.12. Схемы цепного магазина без промежуточного гнезда (а) и набора кодовых колец на оправке инструмента (б)

Типовой алгоритм автоматической системы поиска и замены инструмента:

- 1) выдача сигнала от блока ЧПУ станка в виде кода номера инструмента;
- 2) выдача команды «начало цикла поиска инструмента»;
- 3) проверка отсутствия блокировочных сигналов, запрещающих выполнение цикла поиска;
- 4) расфиксация магазина инструментов (обратным ходом Φ , сигнал K2);
- 5) контроль расфиксации;
- 6) определение направления вращения МИ;
- 7) быстрое вращение МИ;
- 8) сравнение кодов от ЧПУ, считывателя кода (СК) и поразрядного СК при быстром вращении МИ;
- 9) замедление вращения МИ при совпадении кодов;
- 10) останов МИ при наличии сигнала от конечного выключателя (КВ);
- 11) фиксация МИ (прямым ходом фиксатора Φ , сигнал от K1);
- 12) контроль фиксации;
- 13) выдача сигнала «поиск окончен».

Механическое кодовое устройство может быть выполнено в виде сменных колец 2, которые взаимодействуют с блоком микропереключателей 1 (рис. 5.12, б), разделенных на две группы: единицы и десятки.

Диаграмма кодов задания номера инструмента показана на рис. 5.13, а функциональная схема системы управления поиском затребованного инструмента — на рис. 5.14.

		Команды Т от ЧПУ									
		1	0	1	0	1	0	1	0	1	
(2^0)	ТО1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	
(2^1)	ТО2	0	0	0	1	1	1	1	0	0	
(2^2)	ТО4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
(2^3)	ТО8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		(2^0) N1 0001	(2^1) N2 0010	(2^0+2^1) N3 0011	(2^2) N4 0100	(2^0+2^2) N5 0101	(2^1+2^2) N6 0110	$(2^0+2^1+2^2)$ N7 0111	(2^3) N8 1000	(2^0+2^3) N9 1001	№ ин.

Рис. 5.13. Диаграмма кодов задания номера инструмента

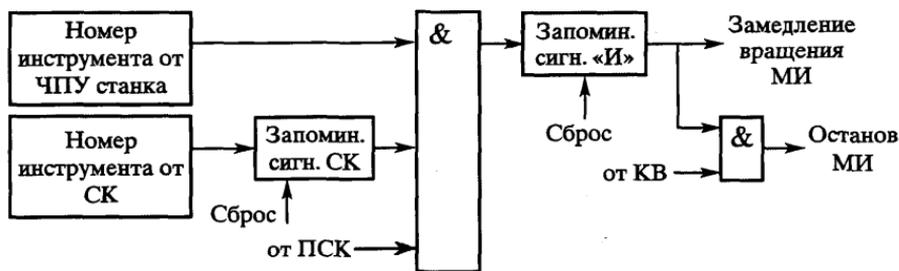


Рис. 5.14. Функциональная схема системы управления поиском затребованного инструмента

Сигналы от ЧПУ задания номера инструмента выдаются в двоично-десятичном коде и имеют длительный характер. Изменение кода происходит только при новом задании номера инструмента. Сигналы от СК и ПСК также формируются в двоично-десятичном коде, но носят импульсный характер. Их длительность определяется временем нажатия кодовых колец на исполнительные элементы считывающего устройства, например на микропереключатели. Длительность этих сигналов нестабильна, так как она зависит от скорости вращения магазина, конструктивных особенностей микропереключателей, разброса диаметров кодовых колец, положения инструмента в гнезде магазина и т. д. В силу этих причин выдача сигналов СК по разрядам происходит не одновременно, поэтому для получения достоверной информации эти сигналы запоминаются с последующим их считыванием стробирующим сигналом.

Определенным недостатком СИО с кодированием инструмента является необходимость изменения конструкции инструментальных оправок с целью размещения механических элементов цифрового кода. В принципе, кроме механических, в СИО могут использоваться штрихкоды.

Система с кодированием гнезд МИ

В данной системе каждый инструмент привязан к своему гнезду МИ, так как цифровой код гнезда точно соответствует определенному типу инструмента. Алгоритм работы такой системы в отличие от алгоритма предыдущей системы включает *двойной* поиск гнезда МИ за период обработки заготовки. Так же как и системы поиска с кодированием инструмента, варианты структуры СИО с кодированием гнезд могут быть с промежуточным гнездом или без него.

Укрупненный алгоритм двойного поиска гнезда МИ в СИО с промежуточным гнездом:

- 1) поиск гнезда с номером затребованного инструмента $N_{тр}$;
- 2) перегрузка найденного инструмента $N_{тр}$ в промежуточное гнездо ПГ с помощью вспомогательного манипулятора M_B (рис. 5.15);
- 3) кантование ПГ с инструментом $N_{тр}$ на 90° с целью размещения осей инструментов $N_{тр}$ и $N_{ис}$ в одной плоскости;
- 4) поиск пустого гнезда для инструмента $N_{ис}$, исполняющего операцию обработки в данный момент;
- 5) замена инструментов в ПГ и в шпинделе станка с помощью основного манипулятора $M_{ос}$;
- 6) установка отработавшего инструмента $N_{ис}$ в свое гнездо вспомогательным манипулятором M_B ;
- 7) поиск гнезда с номером $n + 1$ очередного затребованного инструмента $N_{тр}$ согласно маршрутной технологической карте.

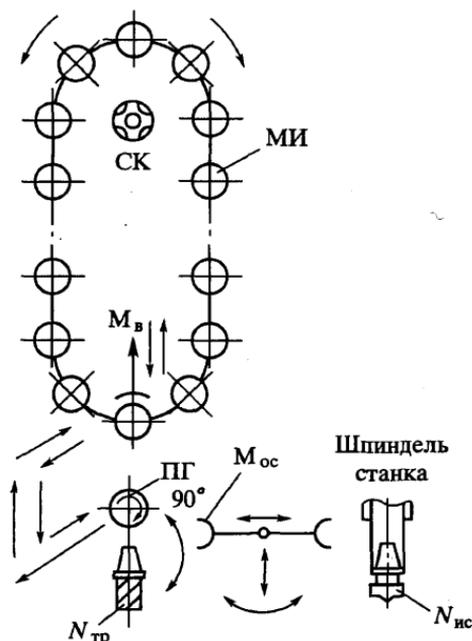


Рис. 5.15. Схема СИО с цепным МИ, промежуточным гнездом ПГ и кантованием инструмента:

СК — считыватель кода; M_B — вспомогательный манипулятор; $M_{ос}$ — основной манипулятор; $N_{тр}$, $N_{ис}$ — номера инструментов, затребованного и исполняющего текущую операцию соответственно

Схема СИО с дисковым МИ, вспомогательным манипулятором и промежуточным гнездом без кантования инструмента показана на рис. 5.16.

Алгоритм определения направления вращения МИ с целью доставки затребованного инструмента $N_{тр}$ по кратчайшему пути покажем на примере дискового магазина емкостью $n = 24$ ин. (рис. 5.17).

Условие вращения МИ по часовой стрелке:

$$N_{тр} > N_{ис} \text{ и } |N_{тр} - N_{ис}| < n/2, \text{ или } N_{тр} < N_{ис} \text{ и } |N_{тр} - N_{ис}| > n/2.$$

Например, если $N_{тр} = 8$, а $N_{ис} = 21$, то $8 < 21$ и $|8 - 21| = 13 > 12$.

Условие вращения МИ против часовой стрелки:

$$N_{тр} > N_{ис} \text{ и } |N_{тр} - N_{ис}| > n/2, \text{ или } N_{тр} < N_{ис} \text{ и } |N_{тр} - N_{ис}| < n/2.$$

Например, если $N_{тр} = 21$, а $N_{ис} = 8$, то $21 > 8$ и $|21 - 8| = 13 > 12$.

При реверсе система управления переключает контакты электродвигателя привода МИ.

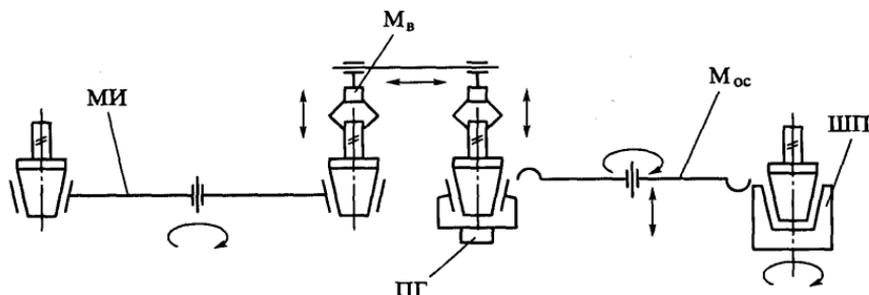


Рис. 5.16. Схема СИО с дисковым МИ, вспомогательным манипулятором M_b и промежуточным гнездом ПГ без кантования инструмента: $M_{ос}$ — основной манипулятор; ШП — шпиндель станка



Рис. 5.17. Схема к алгоритму определения направления вращения дискового МИ емкостью $n = 24$ инструмента

5.4. Системы комплектной замены инструментов

Наиболее часто комплектная замена инструментов применяется при обработке сложных заготовок на многооперационных станках, входящих в состав автоматических линий и комплексов, а также гибких производственных систем. При достаточно большом цикле обработки (до 5 часов и более) на линии (комплексе) осуществляется замена многшпindelных головок (МШК) с установленными инструментальными комплектами-наладками, которые последовательно вступают в работу при обработке заготовок.

На схеме обрабатывающего комплекса МШК располагаются на тактовом транспортере-накопителе замкнутого типа, образуя два полуконтра (рис. 5.18). В состав системы комплектной замены инструментов входит линейный одноярусный накопитель МШК, с которым взаимодействует транспортно-загрузочный робот рельсового типа. Малый полуконтра с небольшим набором МШК используется для обработки сравнительно несложных заготовок, не требующих большого набора инструментов. Для обработки заготовок высокой сложности в работу вступают МШК, размещающиеся на большом полуконтра. Замену инструментальных МШК на тактовом транспортере-накопителе осуществляет транспортно-загрузочный робот.

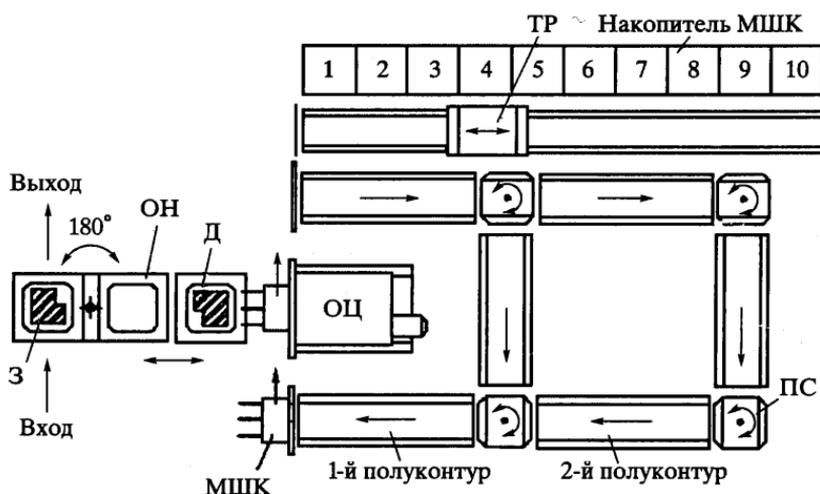


Рис. 5.18. Схема обрабатывающего комплекса с двумя полуконтрами МШК на тактовом транспортере-накопителе:

З — заготовка; Д — деталь; ОН — операционный накопитель; ОЦ — обрабатывающий центр; ТР — транспортный робот; ПС — поворотный стол

В ряде случаев на гибких обрабатывающих комплексах применяются схемы с заменой целиком инструментальных магазинов большой емкости (обычно цепных). Такие схемы в основном характерны для крупных обрабатывающих центров и комплексов. Схема одной из таких систем фирмы «Хитачи Сейки» (Япония) приведена на рис. 5.19. Японская система комплектной замены инструментов содержит накопитель цепных магазинов НМИ и приемно-передающее устройство ППУ, которое обеспечивает прием магазина $МИ_{ис}$ с отработавшим инструментом и замену его на новый магазин $МИ_{тр}$. Замена $МИ$ происходит в случае израсходования запаса стойкости ряда инструментов или в случае переналадки обрабатывающего центра ОЦ на обработку заготовок другого типоразмера. В процессе замены магазин $МИ_{ис}$ отключается от ОЦ и по направляющим сдвигается в позицию по стрелке и затем перемещается в свободную позицию СП накопителя магазинов. Освободившееся место занимает новый магазин $МИ_{тр}$, который из накопителя попадает на ОЦ через приемно-передающее устройство.

Схема комплектной замены инструментов позволяет сократить время переналадки многооперационного станка. Однако при этом возникает сложность усреднения стойкости отдельных инструментов, что приводит к неполному использованию их режущих свойств (ресурса стойкости) и необходимости установки резервных инструментальных магазинов. Это объясняется различной стойкостью инструментов в магазине и директивным способом его замены.

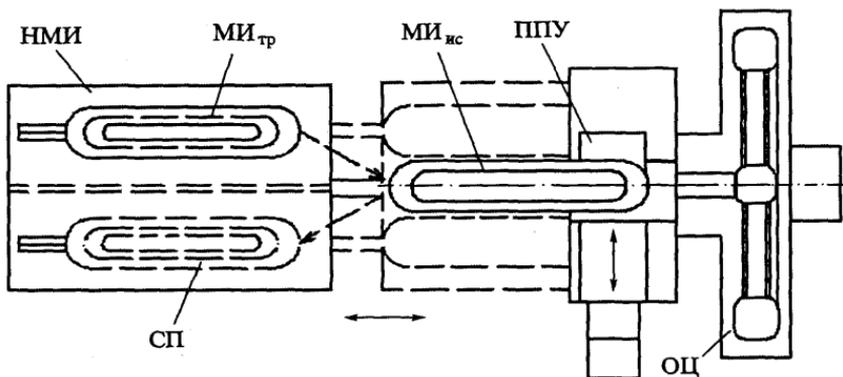


Рис. 5.19. Схема замены цепных инструментальных магазинов на крупном обрабатывающем центре:

НМИ — накопитель $МИ$; $МИ_{тр}$, $МИ_{ис}$ — магазины затребованный и исполняющий операции соответственно; ППУ — приемно-передающее устройство; СП — свободная позиция в накопителе

5.5. Транспортно-накопительная система гибкого автоматизированного производства

Интенсивность грузопотоков в транспортно-накопительной системе (ТНС) автоматизированного производства оценивается в тоннах в год. С учетом интенсивности грузопотоков и характера грузов производится выбор транспортных средств, а путем последовательного уточнения технических требований формируется схема транспортных связей ГАП. Классификация грузов производится по массе, габаритам, форме, способу загрузки и т. п.

Выделяют 6 основных классов грузов: газообразные, наливные, сыпучие, длиномерные, штучные, штучно-массовые (мелкие метизы). По массе различают: миниатюрные (до 0,01 кг), легкие (до 0,5 кг), средние (до 16 кг), переходной массы (до 125 кг), тяжелые (свыше 125 кг). По форме: тела вращения, корпусные детали, плоские (пластины, диски), равномерные, стержни. По материалу: металлические, неметаллические (пластмасса, керамика, стекло, дерево). По свойствам: твердые, пластичные, хрупкие, абразивные, магнитные и т. п. По способу загрузки в технологическое оборудование и транспортно-накопительные устройства: в спутниках, в таре навалом, ориентированно в кассетах (магазинах), в рулонах, в пакетах.

Разновидности ТНС показаны на рис. 5.20, а грузопотоки гибкого производственного модуля в составе ГАП — на рис. 5.21.

В основе транспортно-накопительной системы автоматизированных производств лежат схемы поточной переработки грузов (рис. 5.22).

Принцип поточной переработки грузов состоит в том, что готовая продукция с технологической линии ТЛ после упаковки на машине УМ поступает на распределительный конвейер РК, с которого грузы



Рис. 5.20. Разновидности транспортно-накопительных систем



Рис. 5.21. Грузопотоки гибкого производственного модуля в составе ГАП

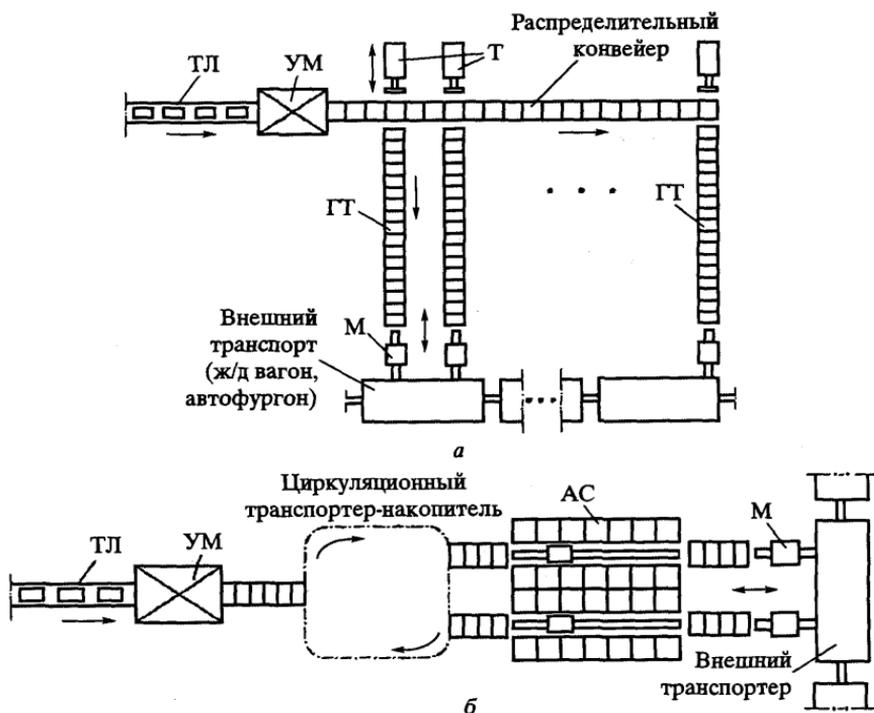


Рис. 5.22. Схемы поточной переработки грузов в ГАП с гравитационным (а) и циркуляционным (б) транспортерами-накопителями

попадают согласно программе на соответствующий гравитационный транспортер-накопитель ГТ с помощью толкателя Т (рис. 5.22, а). Загрузочный манипулятор ЗМ укладывает грузы с ГТ на внешний транспорт ВТ (автотрейлер, ж/д вагон), который доставляет готовую продукцию потребителю в необходимой комплектации.

Один из вариантов устройства распределения грузов показан на рис. 5.23.

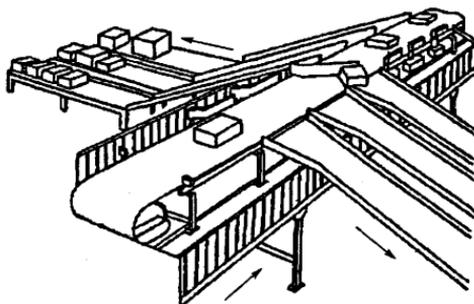


Рис. 5.23. Вариант устройства распределения грузов по гравитационным транспортерам-накопителям

На рис. 5.22, б вместо распределительного конвейера и ГТ используются циркуляционный транспортер ЦТ (подвесной или напольный) и автоматический стеллажный накопитель АС с трансфер-роботом, который передает грузы М для укладки на ВТ. Выбор того или иного конструктивного варианта системы поточной переработки грузов во многом определяется конкретными производственными условиями.

5.6. Непрерывный и дискретный транспорт

Непрерывный и дискретный транспорт используется для обслуживания технологического оборудования автоматизированных производственных участков. К непрерывному транспорту относят различные конвейерные системы: с автоматическим адресованием грузов (толкающие и пневмоконтейнерные), без адресования, подвесные и напольные. По виду грузонесущего органа различают следующие конвейеры: ленточные, пластинчатые, скребковые, винтовые, вибрационные, роликовые, тележечные, пневматические (трубопроводные) [3, 12]. Преимуществом непрерывного транспорта является высокая производительность, а недостатком — консерватизм (сложность переналадки при необходимости изменения трассы).

К дискретному транспорту относят транспортные роботы (ТР): подвесные (монорельсовые системы) и напольные (рельсовые и безрельсовые). Транспортные тележки-роботы могут быть автономные и буксируемые, схемы маршрутослежения: по отражающей полосе, по индукционному кабелю, радиоуправляемые. Загрузка-разгрузка транспортных роботов производится собственным манипулятором

или внешними средствами. Программа обслуживания оборудования хранится в памяти бортового компьютера робота.

Основным преимуществом дискретного транспорта является его высокая гибкость, т. е. способность к быстрой переналадке (за исключением рельсовых систем). В каждом конкретном случае необходимо выбирать, что важнее — производительность или технологическая гибкость.

Рассмотрим основные схемы обслуживания технологического оборудования транспортными роботами ТР (рис. 5.24). Во всех схе-

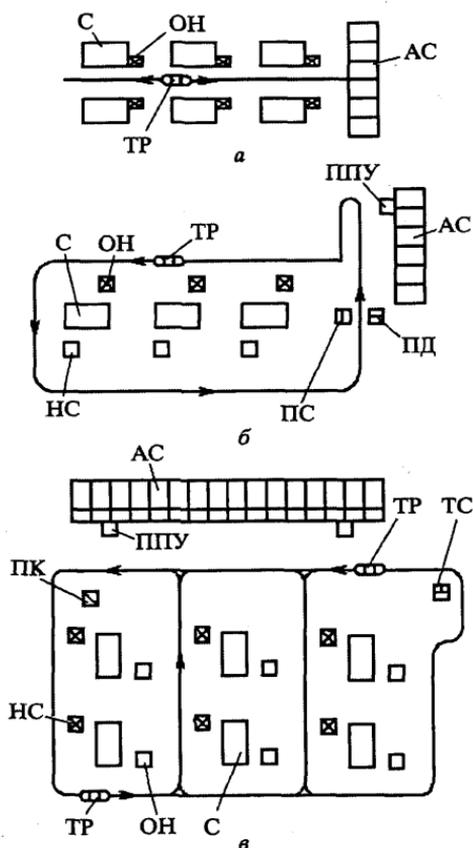


Рис. 5.24. Схемы обслуживания технологического оборудования транспортными роботами ТР:

с прямой (а), замкнутой (б) и разветвленной (в) трассой: ОН — операционный накопитель; НС — накопитель стружки; ПС, ПД — перегрузка стружки и деталей; ПК — пост контроля; ТС — тара со стружкой

мах ТР взаимодействует с приемно-передающими устройствами ППУ участков складов-накопителей (с одной стороны) и операционными накопителями ОН станков (рис. 5.25 и 5.26).

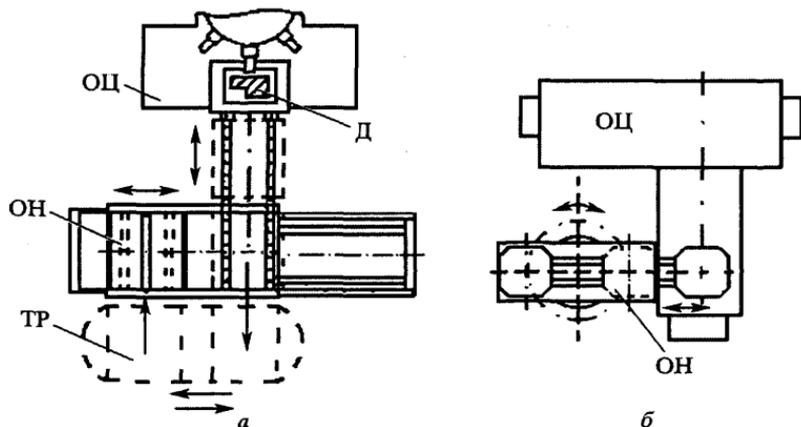


Рис. 5.25. Схемы операционных накопителей челночного (а) и поворотного (б) типа: Д — деталь; ТР — транспортный робот

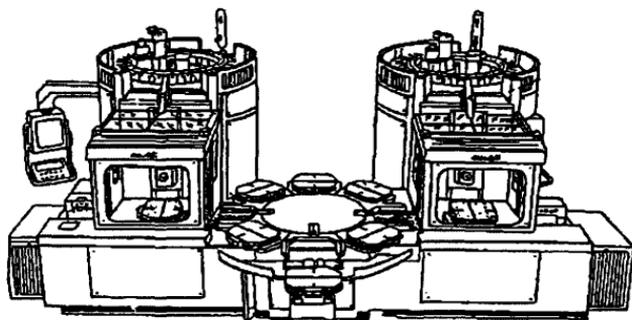


Рис. 5.26. Общий вид поворотного операционного накопителя для двух ОЦ

В ряде случаев на ТР возлагается задача транспортировки стружки с участка. Мировая практика показывает, что одной из самых трудоемких работ в составе гибкого автоматического участка является уборка стружки от станков к центральному посту сбора стружки.

Транспортирование стружки

Комплексные системы уборки стружки включают: устройства дробления стружки, транспортное средство, оборудование для пресования стружки или для загрузки ее в тару. Магистральный транс-

портер стружки обычно располагают вдоль линии станков. Для витой стружки применяют способ транспортирования в спрессованных брикетах, а для элементной стружки — насыпью в таре (рис. 5.27).

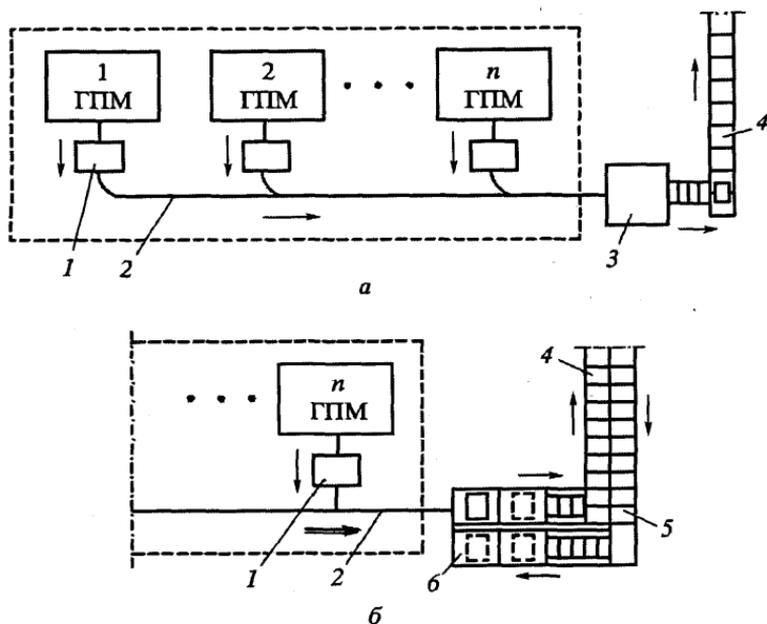


Рис. 5.27. Схемы транспортирования стружки: а — в спрессованных брикетах; б — в таре насыпью:

1 — приемник стружки; 2 — магистральный транспортер; 3 — устройство брикетирования; 4 — отводящий конвейер; 5 — подводящий конвейер; 6 — пост загрузки стружки в тару

Стружка черных и цветных металлов транспортируется раздельно. Способ транспортирования стружки в таре более трудоемкий, так как для его реализации требуется подводящий (доставка пустой тары) и отводящий (для заполненной тары) конвейеры и пост загрузки стружки в тару (см. рис. 5.26, б).

Для отвода от станков мелкой и пылевидной стружки широко используется трубопроводный транспорт (рис. 5.28).

Поток сжатого воздуха в трубе создается воздуходувкой ВД, а ресивер Р сглаживает пульсации давления воздуха в трубе. В зоне 1 приема стружки из бункера Б установлена диафрагма З для ускорения потока воздуха за счет сужения сечения трубы 2. Отделение стружки из воздушного потока происходит в циклонах Ц1 (мелкая стружка) и

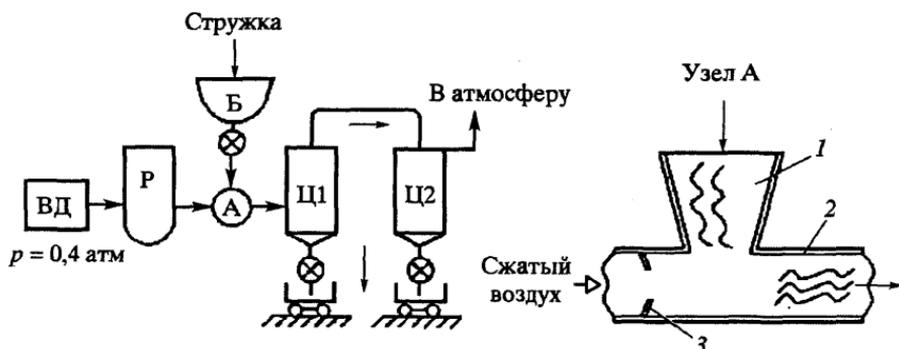


Рис. 5.28. Схема трубопроводного транспорта для мелкой и пылевидной стружки: ВД — воздуходувка; Р — ресивер; Б — бункер для стружки; Ц1, Ц2 — циклоны для сбора элементной и пылевидной стружки соответственно; 1 — приемник стружки; 2 — труба; 3 — диафрагма

Ц2 (пылевидная стружка). В циклоне поток закручивается, затем резко меняет направление и воздух выходит в атмосферу, а стружка за счет сил инерции сыпается в нижнюю полость циклона, откуда попадает в транспортную тару (тележку).

5.7. Автоматические склады

Автоматические склады (АС) предназначены для приема и хранения нормативного запаса, выдачи и учета заготовок, полуфабрикатов, готовых изделий, приспособлений и инструмента с целью обеспечения ритмичности производственного процесса в ИПС. В машиностроительном производстве наибольшее распространение получили стеллажные склады, которые состоят из стеллажных конструкций модульного типа, трансфер-робота (штабелера), приемно-передающего устройства, системы управления. Основные разновидности АС указанного типа: со стеллажным штабелером; с мостовым штабелером; с гравитационными стеллажами; элеваторные, циркуляционные (рис. 5.29). Стеллажный штабелер позволяет обслуживать ячейки максимум двух стеллажей, а мостовой штабелер — любого числа стеллажей. Колонна стеллажного штабелера движется по нижним рельсам, а колонна мостового штабелера — по верхним. Соответственно направляющие для колонны у них меняются местами. Мостовой штабелер по верхним рельсам, опирающимся на несущие стены цеха, может выхо-

дуть за пределы стеллажей, чтобы сменить коридор обслуживания ячеек стеллажа. Это обстоятельство позволяет в ряде случаев использовать мостовой штабелер для обслуживания станков обрабатывающего участка цеха.

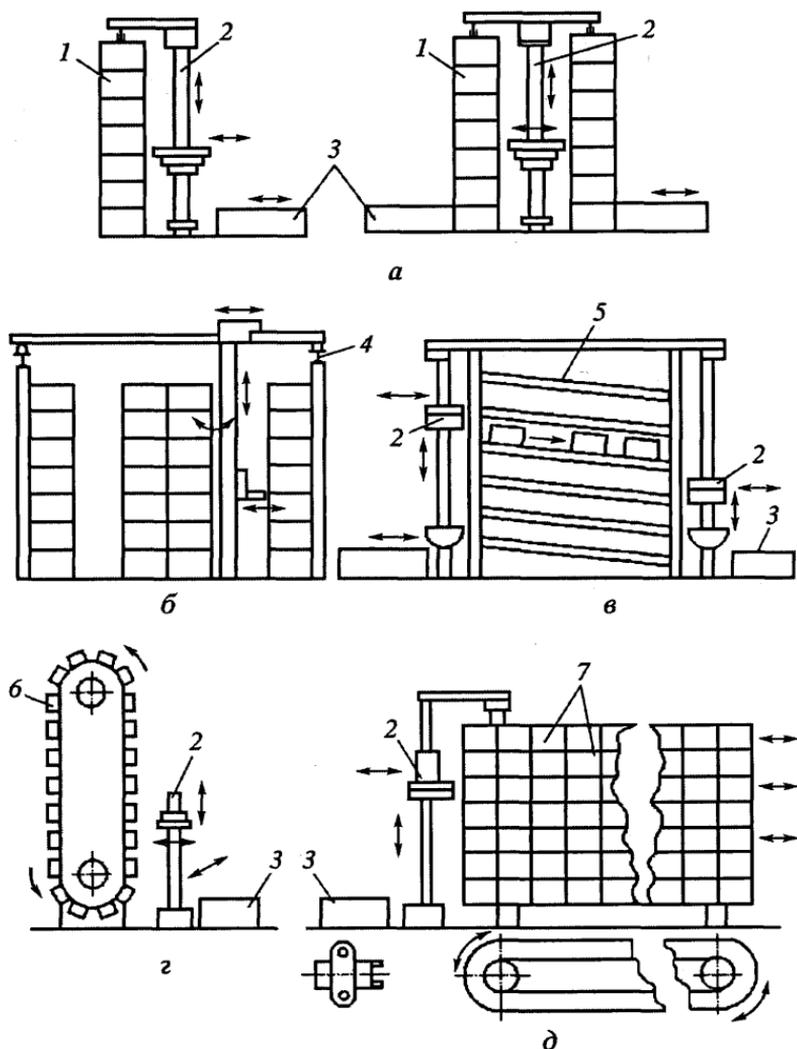


Рис. 5.29. Типовые схемы АС:

а — со стеллажным штабелером; *б* — с мостовым штабелером; *в* — с гравитационными стеллажами 5; *г* — элеваторного типа; *д* — циркуляционного типа; 1 — стеллаж; 2 — штабелер; 3 — ППУ; 4 — рельсы; 6, 7 — приводные ярусы АС

Внешний вид трех типов АС представлен на рис. 5.30.

В схемах *a—г* (см. рис. 5.29) имеется рельсовый путь для перемещения колонны с захватным устройством вдоль стеллажей. В схеме *д* колонна штабелера остается на месте, поскольку достаточно вертикального хода каретки с захватом для обслуживания ячеек нужного яруса. Каждый ярус циркуляционного АС может вращаться независимо друг от друга. В АС элеваторного типа (схема *г*) отсутствует вертикальный ход каретки с захватом, так как ячейки нужного яруса оста-

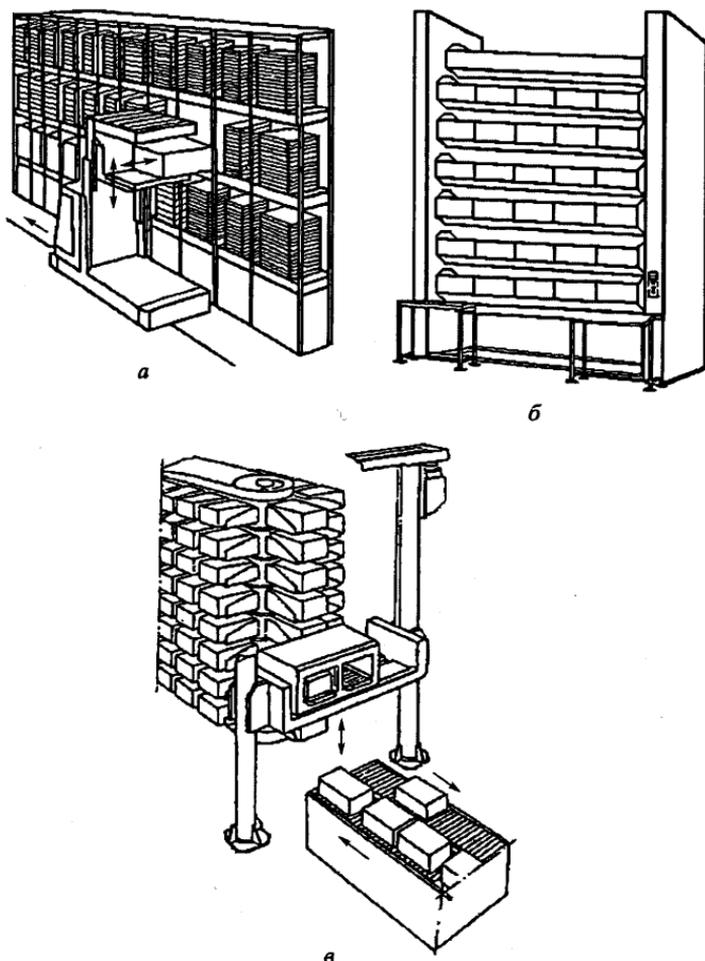


Рис. 5.30. Внешний вид АС:

a — стеллажного с тележкой-штабелером; *б* — элеваторного; *в* — циркуляционного

навливаются на уровне захвата. В АС по схеме *в* гравитационные стеллажи выполнены в виде неприводного рольганга. В этом складе используется процедура очереди обслуживания: «первый загружен — первый выгружен».

Стеллажи АС представляют собой сборно-разборные каркасные конструкции модульного типа. Высота модуля — 3 м, длина — 6 м, ширина — от 0,67 до 0,85 м. Высота стеллажной ячейки принимается кратной 75 мм. Робот-штабелер выполнен в декартовой системе координат для обслуживания объема. По грузоподъемности штабелеры составляют следующий типоразмерный ряд: 50, 150, 250, 500, 1000 кг. Приводы штабелера обеспечивают необходимые скорости перемещения захвата: по горизонтали (вдоль стеллажа) — от 15 м/мин (для небольших АС) до 125 м/мин (для крупных АС); по вертикали (вдоль колонны) — от 9 до 25 м/мин; при входе захвата в ячейку — от 0,7 до 8 м/мин. Для заготовок, закрепленных на спутнике, или ящичной тары на поддоне используется захват вильчатого типа. Точность позиционирования захвата штабелера: $\pm 1,0$ мм. Перемещения захвата по горизонтали и по вертикали контролируются вращающимися трансформаторами типа ВТМ-1В, которые монтируются на конечных звеньях червячных редукторов. Производительность стеллажных АС в среднем составляет: 120...200 адресов в семичасовую смену (или 2 адреса в минуту).

Компоновки складских систем различаются по размещению и ориентации АС относительно производственных участков цеха. Рассмотрим наиболее распространенные компоновки АС, используемые в машиностроительных ИПС (рис. 5.31). В боковой продольной асимметричной компоновке АС расположен с одной стороны производственного участка, а направление перемещения мостового штабелера вдоль стеллажей совпадает с трассой обслуживания станков участка (рис. 5.31, *а*). Это является преимуществом данной компоновки. Вторая компоновка называется боковая продольная симметричная (рис. 5.31, *б*). Здесь АС расположены с двух сторон участка (или цеха). Такая компоновка характерна для мощных ИПС. Боковая поперечная компоновка характеризуется размещением стеллажей АС поперек основных трасс обслуживания станков (рис. 5.31, *в*). Внутри участка локальные коридоры обслуживания параллельны стеллажам АС. В этой компоновке АС также могут располагаться с двух сторон участка. В линейной центральной компоновке стеллажи АС располагаются в центре участка, деля его пополам (рис. 5.31, *г*). Такая компоновка позволяет приблизить станки к ППУ АС и производить обслу-

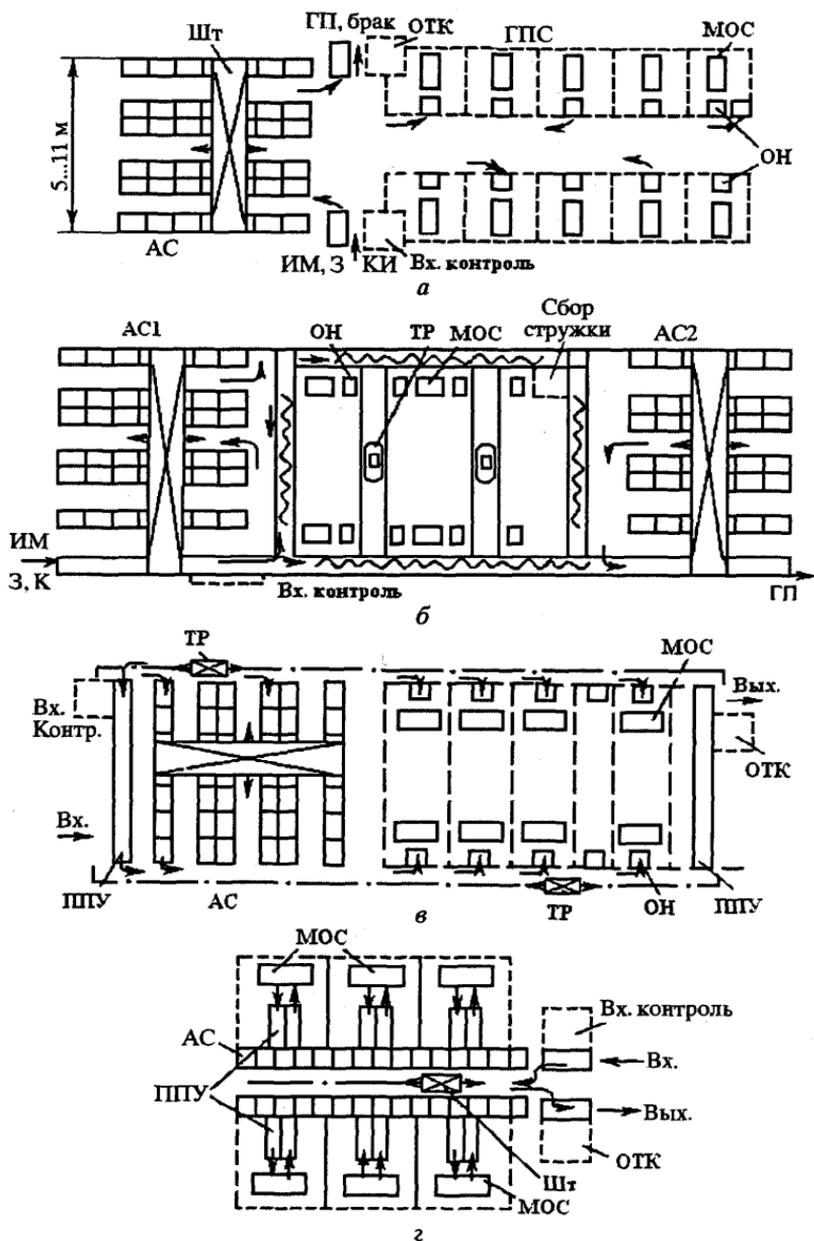


Рис. 5.31. Варианты компоновки складских систем ГАП:

a — боковая продольная асимметричная; *б* — то же симметричная; *в* — боковая поперечная; *г* — линейная центральная

живание станков без транспортных роботов, используя станочные загрузочные роботы (или манипуляторы).

Некоторые объемные планировки складских систем показаны на рис. 5.32.

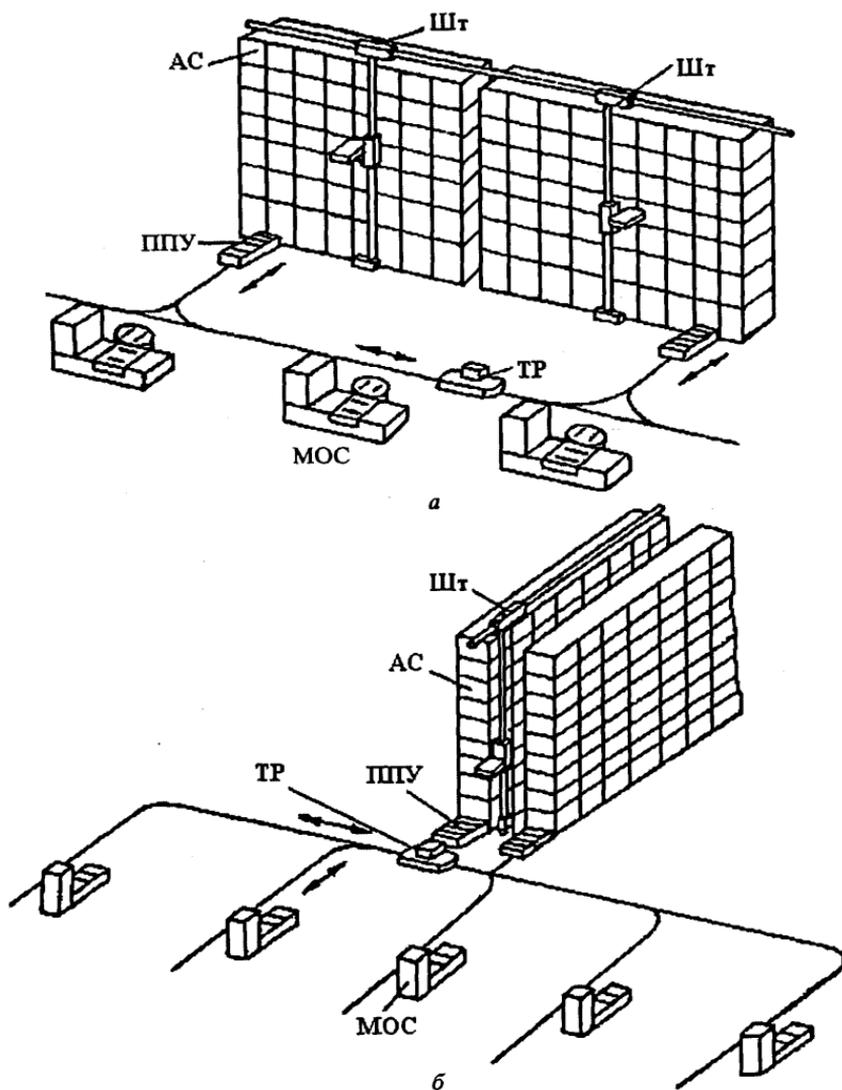


Рис. 5.32. Объемные планировки складских систем:
a — боковая поперечная; *б* — боковая продольная: Шт — штабелер; ТР — транспортный робот; МОС — многооперационный станок

5.8. Расчет параметров автоматических складов

При проектировании АС необходимо рассчитать основные параметры склада.

1. Годовая производительность, $m/\text{год}$:

$$Q_{\text{АС}} = \frac{\Phi_{\text{Г}} m}{T_{\text{Ц}}} \eta,$$

где $\Phi_{\text{Г}} = 2000$ ч — годовой фонд времени при односменном режиме;

m — масса единичного груза, т;

η — коэффициент использования АС;

$T_{\text{Ц}}$ — время цикла переработки единичного груза:

$$T_{\text{Ц}} = t_3 + 2(t_{\text{п.з}} + t_{\text{п.к}} + t_{\text{п.м}}) + t_y,$$

где t_3 — время захвата груза;

$t_{\text{п.з}}$ — время перемещения захвата;

$t_{\text{п.к}}$ — время перемещения каретки с захватом;

$t_{\text{п.м}}$ — время перемещения моста (или колонны) штабелера; t_y — время установки груза.

2. Емкость АС определяется числом ячеек $n_{\text{я}}$ стеллажа:

$$E = n_{\text{я}} = \frac{\Phi_{\text{м.ст}} n_{\text{ст}}}{t_{\text{об}} N_{\text{эм}}},$$

где $\Phi_{\text{м.ст}}$ — месячный фонд времени одного станка;

$n_{\text{ст}}$ — число станков на участке;

$t_{\text{об}}$ — средняя трудоемкость обработки одной заготовки;

$N_{\text{эм}}$ — число заготовок в объеме месячной программы.

3. Оптимальный размер партии заготовок для хранения в АС.

Размер партии $m_{\text{оп}}$ находим из условия минимизации годовых затрат на хранение и доставку заготовок на производственный участок и их обработку (рис. 5.33):

$$Z_{\text{Г}} = \frac{N_{\text{Г}} Z_{\text{об}}}{m} + \frac{Z_{\text{н.п}} m}{2} \rightarrow \min,$$

где $N_{\text{Г}}$ — годовая потребность в заготовках;

$Z_{\text{об}}$ — затраты на доставку и обработку m заготовок;

$Z_{\text{н.п}}$ — затраты на хранение одной заготовки (затраты незавершенного производства).

Среднее число заготовок для хранения на складе равно $m_{\text{ср}} = m/2$.

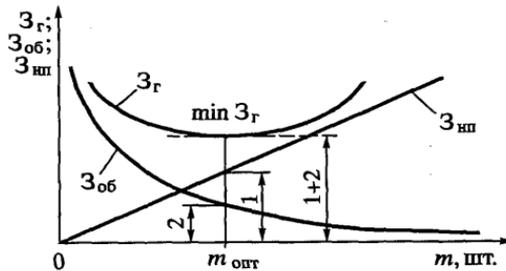


Рис. 5.33. Характер изменения годовых затрат Z_g от размера партии заготовок, хранящихся в АС

Возьмем производную от Z_g по m и приравняем ее к нулю:

$$\frac{dZ_g}{dm} = \frac{N_g Z_{об}}{m^2} + \frac{Z_{н.п}}{2} = 0,$$

откуда

$$m_{опт} = \sqrt{\frac{2N_g Z_{об}}{Z_{н.п}}}, \text{ шт.}$$

с учетом, что $\frac{dm^{-1}}{dm} = -1 \cdot m^{-2} = -1/m^2$.

4. Число роботов-штабелеров АС.

Число обслуживающих штабелеров в АС определяют аналогично числу инструментальных манипуляторов в СИО, т. е. по коэффициенту загрузки:

$$k_3 = \frac{T_{об}}{\Phi_{м.шт}},$$

где $T_{об} = \frac{t_{н.с} n_{н.с}}{60}$ — суммарное время обслуживания штабелером станков участка, ч;

$\Phi_{м.шт}$ — месячный фонд времени штабелера, ч;

$t_{н.с}$ — среднее время передачи заготовки с накопителя (АС) на станок;

$n_{н.с}$ — число перемещений транспортного робота между накопителем и станками.

Если $k_3 \geq 1$, то необходимо брать два штабелера.

5. Суммарное время простоя штабелера:

$$t_{пр.шт} = \Phi_{м.шт} - T_{об}.$$

Управление запасами в АС

Для управления запасами в АС используются в основном два режима:

- без резерва заготовок ($\Delta m = 0$);
- с резервом заготовок ($\Delta m > 0$).

Во втором случае, кроме фиксированной партии заготовок m_ϕ , в АС хранится буферный запас заготовок Δm .

Как было показано выше, при равномерном потреблении заготовок с постоянной скоростью $v = m_\phi / T$ среднюю величину партии хранения можно принять равной $m_{cp} = m_\phi / 2$.

Режимы управления запасами в АС хорошо интерпретируются графиками работы АС, представленными на рис. 5.34.

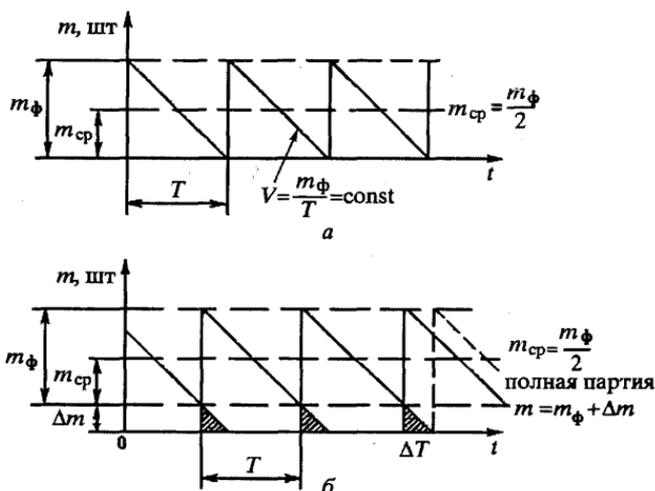


Рис. 5.34. Графики режима работы АС:
а — без резерва ($\Delta m = 0$); б — с резервом ($\Delta m > 0$)

При работе АС в режиме без резерва в конце периода T на склад необходимо оперативно доставить очередную партию заготовок в объеме m_ϕ . Любая задержка с доставкой новой партии заготовок будет вызывать простой станков обрабатывающего комплекса (или участка).

Режим работы АС с резервом учитывает стохастический (вероятностный) характер потребления заготовок производственным участком. Это более реальная схема для случая неидеальной организации труда на производстве.

Глава 6

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ИПС

6.1. Система автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов

Проектирование — процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующего объекта (системы) на основе первичного описания этого объекта (системы) и алгоритма его функционирования. Он включает в себя комплекс работ по изысканию, исследованию, расчетам и конструированию, имеющих целью получение описания предмета проектирования, необходимого и достаточного для создания нового изделия (системы) или реализации нового процесса, удовлетворяющего заданным требованиям. Поэтому проектирование представляет собой сложный специфический вид созидательной деятельности человека, основанный на глубоких научных знаниях и творческом поиске, использовании накопленного опыта и навыков в определенной сфере, не лишенный, однако, необходимости выполнения трудоемких рутинных работ.

Под автоматизацией проектирования понимается такой способ выполнения разработки проекта, когда проектные процедуры и операции осуществляются разработчиком систем при тесном взаимодействии с ЭВМ. Рациональное распределение функций между человеком и ЭВМ подразумевает, что человек должен в основном решать задачи творческого характера, а ЭВМ — задачи, допускающие формализованное описание в виде алгоритма, что позволяет достичь большей эффективности по сравнению с традиционным ручным способом. Системы, построенные на полностью формализуемых методах решения проектных задач, работают обычно в автоматическом режи-

ме и имеют многовариантную основу. В этих системах предусмотрен процесс перепроектирования, если полученный результат по тем или иным причинам не устраивает проектировщика. Поэтому такие системы справедливо относят к системам автоматического проектирования. Системы автоматизированного проектирования (САПР) в отличие от автоматических способны решать задачи проектирования, не поддающиеся полной формализации. САПР строится как организационно-техническая (человеко-машинная) система, состоящая из комплекса технических средств, математического, программного, информационного и организационного обеспечения. Человек сам принимает решение там, где процесс проектирования не поддается формализации. Системы, в которых организуется поиск решений неформализуемых задач, составляют группу *эвристических САПР* [4, 12, 18].

Виды САПР

По объему информационной обеспеченности можно выделить следующие виды систем автоматизированного проектирования:

- **уникальные** — имеют межотраслевой характер и создаются для решения крупных народно-хозяйственных задач. Обычно имеют короткий жизненный цикл;
- **универсальные** — отраслевого назначения с системой коллективного пользования и банком информации, обеспечивающие проектирование всей номенклатуры технических изделий отрасли. Типовое ядро САПР адаптируется к условиям различных предприятий. Универсальные САПР строятся по двухуровневому принципу: на первом уровне — мощные ЭВМ с большим объемом памяти и высоким быстродействием, на втором — периферийные ЭВМ, обслуживающие отдельные графические устройства и рабочие станции. Годовой объем проектной документации, создаваемой такой САПР, достигает 100 тыс. документов;
- **комплексные** — используются для объектов высокой функциональной и технической сложности (например, СВЧ-техника, СБИС с интеграцией до 10^5 элементов) с разработкой моделей физических процессов. Обычно охватывают небольшой круг предприятий;
- **специализированные** — САПР проектной организации, ориентированные на выполнение массовых проектных работ по конкретному изделию на конкретном предприятии. Позволяют разработчику пользоваться методами моделирования и оптимизации на основных стадиях проектирования;

- **индивидуальные** — предназначены для выполнения чертежно-графических работ, прочностных и других расчетов (например, при проектировании печатных плат). Реализуются на мини- и персональных ЭВМ, образующих рабочие станции, т. е. автоматизированные рабочие места.

Принципы построения САПР:

- **включения** — предусматривает согласование параметров конкретной САПР с системой более высокого уровня;
- **системного и информационного единства**, обеспечивающего связь между всеми подсистемами САПР (совместимость баз данных и составляющих программно-методического комплекса, принятого в отрасли);
- **развития** — предусматривает наращивание и совершенствование компонентов САПР;
- **комплексности** — обеспечивает связность проектирования отдельных элементов и всего объема в целом;
- **совместимости** — обеспечивает совместное функционирование всех подсистем при сохранении открытости структуры системы в целом;
- **инвариантности** — требует, чтобы подсистемы и компоненты САПР были инвариантными по отношению к проектируемым объектам;
- **моральной живучести** — обеспечивает адаптацию к имеющимся и вновь создаваемым техническим базам проектирования.

Схемно-технические направления САПР:

- 1) математическое моделирование при проектировании различных объектов (вместо макетирования и натуральных испытаний);
- 2) автоматический поиск оптимальных решений и выбор наилучших параметров;
- 3) проектирование и выпуск конструкторской (КД) и технологической (ТД) документации.

Структура САПР

Существуют две структурные конфигурации САПР:

- 1) структура САПР, в которых вся основная информация, связанная с проектированием, обрабатывается мощной ЭВМ, а корректировка и ввод графической информации на местах осуществляются с помощью мини- или микроЭВМ, соединенных интерфейсом с большой машиной;

2) структура САПР, в которых весь процесс проектирования осуществляется на автоматизированных рабочих местах (АРМ) конструкторов за счет собственных вычислительных и графических средств, а более мощный компьютер служит только передаточным звеном с общей базой знаний.

Структура САПР на базе АРМ является предпочтительной, так как в этом случае процесс проектирования не зависит от выхода из строя одного из рабочих мест, в то время как для первой структуры выход из строя основной ЭВМ практически срывает весь процесс проектирования.

На базе серийно выпускаемой аппаратуры, как правило, создаются двухуровневые конфигурации технических средств (ТС) САПР, которые удобны при сравнительно небольшом количестве АРМ. Для организации режима разделения времени между большим числом пользователей количество уровней в иерархической организации комплекса ТС может быть увеличено до трех и более (рис. 6.1).

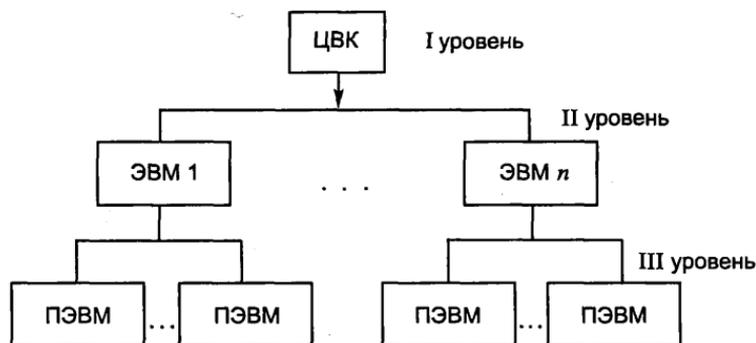


Рис. 6.1. Структура трехуровневой САПР

На верхнем уровне располагается одна или несколько ЭВМ (серверов) большой производительности, которые составляют центральный вычислительный комплекс (ЦВК) для решения сложных задач, требующих больших затрат машинного времени. Здесь организуется база данных (БД) для решения общих вопросов формирования объекта и его проектирования. На втором уровне решаются задачи группового использования ЭВМ нижнего уровня и осуществляется выпуск КД и ТД. На нижнем уровне находятся АРМ, реализованные на микроЭВМ (терминальные ЭВМ), и рабочие станции, которые осуществляют подготовку и корректировку входных данных, выпуск промежуточных документов, обмен информацией между АРМ и ЦВК, а также

решают сравнительно несложные (по затратам машинного времени) проектные задачи.

На аппаратуре соответствующих АРМ одновременно могут работать несколько пользователей: разработчики (Р), конструкторы (К), технологи (Т) и исследователя (И) (рис. 6.2). Автоматизированное рабочее место (АРМ), или, в зарубежной терминологии, «рабочая станция» (work-station), представляет собой место пользователя-проектировщика, оборудованное средствами, необходимыми для автоматизации выполнения им определенных функций. Техническое обеспечение АРМ представляет собой комплекс технических средств, основой которого служит профессиональный персональный компьютер (ПК), предусматривающий работу специалиста без посредников (программистов, операторов и др.). У групповых АРМ таким компьютером могут пользоваться 4...6 человек. В комплект профессионального персонального компьютера входят процессор, дисплей, клавиатура, дополняемые по мере необходимости другими вспомогательными электронными устройствами, а именно: дисковыми накопителями, печатающими устройствами, оптическими читающими устройствами или считывателями штрихового кода, устройствами графики, средствами

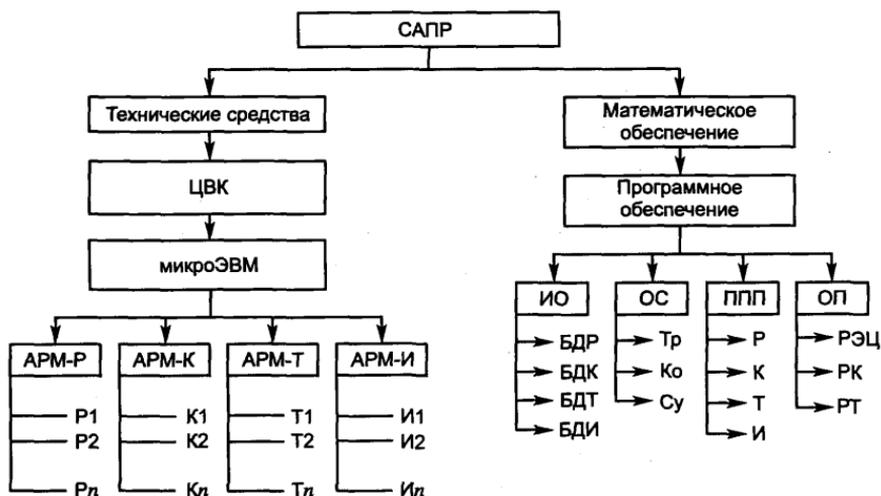


Рис. 6.2. Иерархическая структура САПР:

ИО — информационное обеспечение; БД — база данных разработчика Р, конструктора К, технолога Т, исследователя И; ОС — операционная система; Тр — транслятор; Ко — компилятор; Су — супервизор; ППП — пакет прикладных программ; ОП — обслуживающие программы; РЭЦ — расчеты электрических цепей; РК — расчеты конструкторские; РТ — расчеты технологические

сопряжения с другими АРМ. Основным назначением АРМ можно считать децентрализованную обработку информации на рабочих местах, использование соответствующих «своих» баз данных при одновременной возможности вхождения в локальные сети АРМ и персональных компьютеров, а иногда и в глобальные вычислительные сети.

В САПР используется пакетный и диалоговый режимы работы, определяемые характером обмена информацией между пользователем и ЭВМ. В пакетном режиме решаются полностью формализованные задачи, требующие больших затрат машинного времени. Диалоговый или интерактивный режим применяют для решения задач, у которых отсутствуют формализованные правила принятия решений.

Мультипрограммный диалоговый режим работы вычислительной системы (режим разделения времени) применяется в САПР для организации взаимодействия с ЦВК одновременно нескольких АРМ. При образовании вычислительной сети САПР отдельные ее части могут быть удалены друг от друга на значительные расстояния. Для объединения удаленной группы пользователей САПР применяются локальные вычислительные сети (ЛВС), образующие распределенную вычислительную систему.

Современные САПР и автоматизированные системы технологической подготовки производства (АСТПП) широко используют интерактивную машинную графику (ИМГ). Автономная САПР с ИМГ включает в себя следующие аппаратные средства (рис. 6.3):

- одно или несколько рабочих мест конструктора (рабочих станций), каждое из которых содержит графический терминал и операторские устройства ввода;
- один или несколько графопостроителей и других устройств вывода;
- центральный процессор (ЦП);
- вспомогательные запоминающие устройства (ЗУ).

Для получения доступа к большей вычислительной мощности и большей памяти ЦП связывают с универсальной ЭВМ, которая называется ведущей или сервером (рис. 6.4). Ведущая ЭВМ служит для выполнения сложных технических расчетов и численного анализа, что позволяет избежать перегрузки ЦП. Результаты работы сервера перекачиваются в систему машинной графики для вывода на экран и получения печатной копии.

Современные САПР оснащаются интеллектуальными терминалами с собственным микропроцессором, который играет роль локального ЦП, а ЭВМ содержит интеллектуальный интерфейс, который



Рис. 6.3. Структурная схема автоматизированного рабочего места

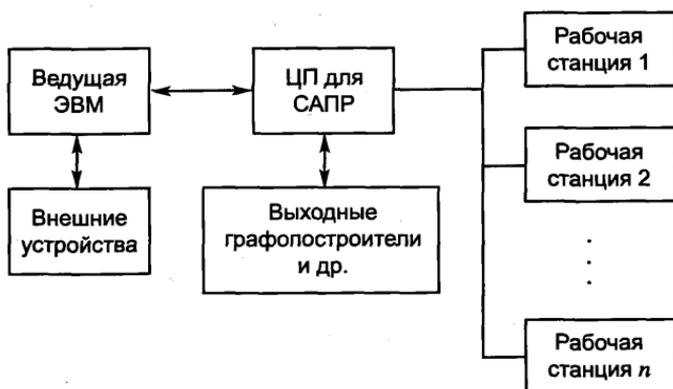


Рис. 6.4. Схема связи АРМ с сервером (ведущей ЭВМ)

позволяет оставить за человеком только постановку задачи, а остальные этапы возложить на ЭВМ. Интеллектуальный интерфейс характеризует переход от обработки *данных* к обработке *знаний*.

6.2. Информационно-программное обеспечение САПР

Информационное обеспечение (ИО) — это совокупность сведений (данных), представляемых в определенном виде и используемых при функционировании ИПС. Информационное обеспечение можно рассматривать как совокупность методов и средств построения информационной базы (ИБ) данных ИПС с разделением на вне- и внутримашинное (рис. 6.5). Входные и промежуточные массивы образуют

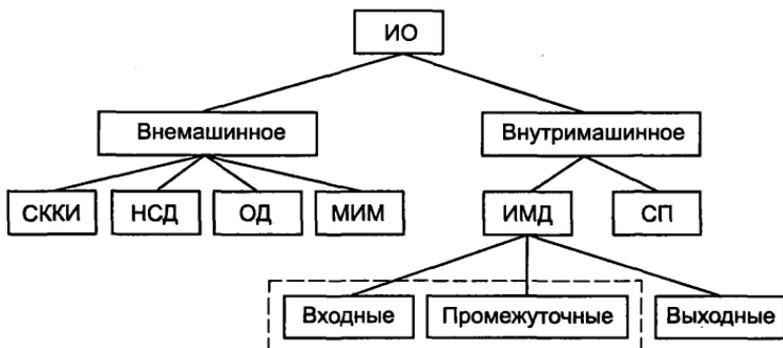


Рис. 6.5. Структура информационного обеспечения САПР:

СККИ — система классификации и кодирования информации; НСД — нормативно-справочная документация; ОД — оперативные документы; МИМ — методические и инструктивные материалы; ИМД — информационные массивы данных; СП — система пользователя (прикладные программы); ИБ — информационная база

ИБ системы, которая содержит сведения о продукции и предметах труда, технологических процессах и оборудовании, производственном персонале, межэлементных связях. Рациональная структура ИБ позволяет создавать информационные массивы в виде автоматизированных банков данных (АБД), которые включают БД и систему управления базой данных (СУБД). Структура БД применительно к САПР содержит архив (постоянная часть) и массивы переменных данных (переменная часть) (рис. 6.6). Архив составляют массивы данных (таблицы, матрицы), входящие в справочник и проект. В справочник входят данные о стандартах, нормалях, унифицированных элементах, типовых проектах и т. п. В справочнике хранится условно постоянная информация, которая изменяется сравнительно редко и характеризуется однократной записью данных и многократным счи-



Рис. 6.6. Структура базы данных применительно к САПР

тиванием. Проект включает сведения о технических решениях, схемы, таблицы, спецификации.

Массивы переменных содержат информацию, необходимую для решения конкретной проектной задачи.

По характеру представления данных различают подмассивы списочной и табличной структуры. Списочная структура — это паспортные данные технологического оборудования, а табличная — таблицы типа зависимости подач при резании от шероховатости поверхности обрабатываемой заготовки и т. п. Использование БД в системах уровня ГПС показано на рис. 6.7. База данных через СУБД связана с мини-ЭВМ, которая управляет модулями ГПС (нижний уровень). Загрузка необходимых данных в мини-ЭВМ производится из ЭВМ верхнего уровня, входящей в состав АСУ предприятия.

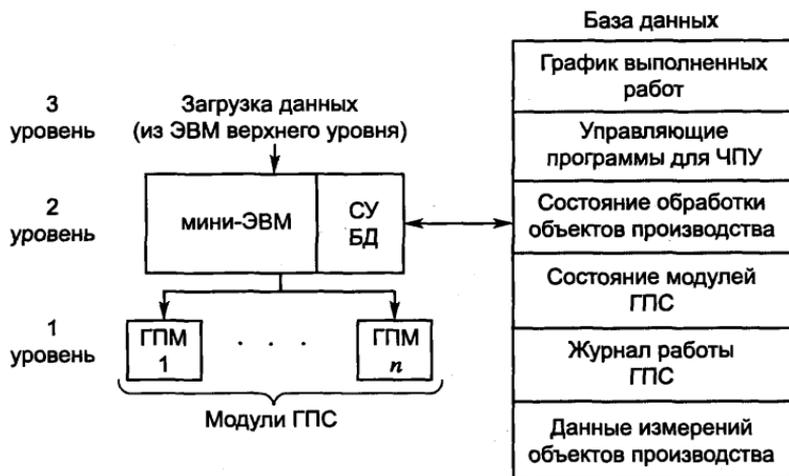


Рис. 6.7. Схема использования базы данных в ГПС

База данных содержит: график выполненных работ, управляющие программы для ЧПУ станков, данные о состоянии обработки объектов производства и ГПМ, журнал работы ГПС, результаты контроля объектов производства.

Программное обеспечение (ПО) ИПС состоит из общего (системного) и специального (прикладного) ПО. *Общее ПО* — это стандартное математическое обеспечение, поставляемое вместе с вычислительной техникой. Оно состоит из операционной системы (ОС), БД, СУБД, программного обеспечения локальных сетей связи. *Специальное ПО* — это прикладные программы пользователя (ППП), реализуемые в виде

отдельных модулей. Характер конкретной ППП зависит от специфики задач, решаемых данной ИПС (механообработка, сборка и т. д.).

Общее ПО предусматривает планирование и организацию процесса обработки информации, ввода-вывода, управления данными, распределения ресурсов ЭВМ, подготовку и отладку программ. Технические параметры общего ПО САПР определяются существующей номенклатурой ОС, которая должна обеспечивать наилучшее использование ресурсов ЭВМ (время работы ЦП, памяти, устройств ввода-вывода). Количественно эффективность ОС оценивается коэффициентом полезного действия:

$$\eta_{ос} = 1 - T_{ос}/T_{м},$$

где $T_{ос}$ — время работы ОС;

$T_{м}$ — общее машинное время работы ЭВМ.

Операционная система представляет собой несколько программных библиотек и системных таблиц. Основными компонентами ОС являются группы управляющих и обрабатывающих программ, обеспечивающих необходимый сервис пользователю и выполняющих тестирование и диагностирование системы в целом (рис. 6.8).

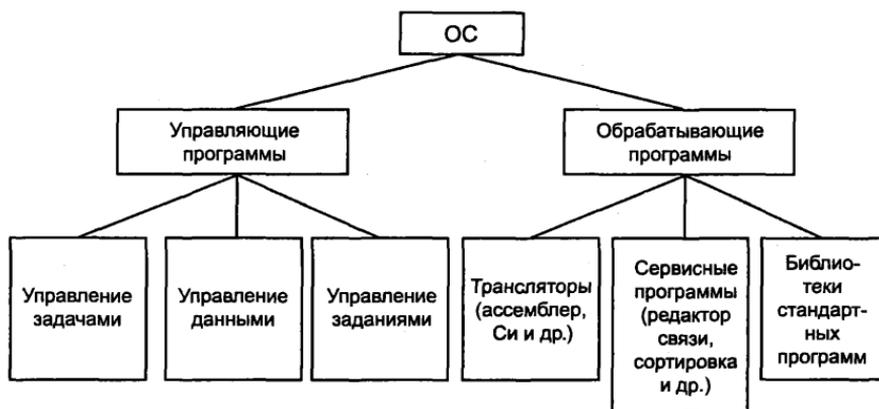


Рис. 6.8. Структура операционной системы ЭВМ

В блоке управляющих программ основной является программа «Диспетчер» (или резидентная программа монитор), которая выполняет все функции организации вычислительного процесса и контролирует ход решения задачи в однопрограммном или мультипрограммном режиме (режиме разделения времени). Кроме того, блок управляющих программ осуществляет первоначальную загрузку ОЗУ и

управление работой системы, включая обработку прерываний, распределение работы каналов обмена информацией с внешних устройств, загрузку программ и переход к следующему заданию.

Сервисные программы в блоке обрабатываемых программ помогают получить готовую к выполнению программу и загрузить ее с носителя в ОЗУ. Они составляют абсолютные модули, резервируют память для общих областей модулей, реализуют копирование, обновление, сжатие и пополнение библиотек и создание личных библиотек.

В ПО предусматриваются средства отладки программ, а также редактирование, тестирование, диагностирование технических средств и программ. Ядро СУБД составляет программа, управляющая всеми манипуляционными данными, например стирание устаревших и ненужных сведений, защиту данных от неправильных изменений и несанкционированного доступа, поиск и формализацию данных, их редактирование и хранение. Наряду с СУБД проектного предприятия существуют СУБД более низкого уровня в иерархии информационного обеспечения САПР (например, IBASE, FOXPRO, CLIPPER), используемые для ПЭВМ и индивидуальных САПР. Типичная структура ПО для работы с СУБД на ПЭВМ состоит из трех основных компонентов:

- диалоговой настройки, позволяющей задавать структуру БД, проводить ввод, поиск и выдачу интересующей информации;
- командного языка для работы с СУБД, позволяющего писать программы для выполнения специфических операций;
- интерфейса — языка управления БД для включения функций работы с БД в прикладные программы.

Управление СУБД ведется через систему развитого меню, представляемого на экране монитора.

Принципы построения и архитектура локальных вычислительных сетей

Информационные связи в ИПС имеют древовидную структуру. Для верхнего уровня ИПС с объемом данных $10^6 \dots 10^{10}$ бит/сут используют локальные вычислительные сети (ЛВС) длиной 1...5 км и скоростью передачи информации 1...10 Мбит/с, а для нижнего уровня — малые ЛВС типа I²C и D²B (фирма Philips) длиной 10...200 м, скоростью обмена информацией $10^2 \dots 10^3$ бит/с и временем выработки управляющего воздействия 10...10³ мс. ЛВС типа D²B характеризуется более высокой помехоустойчивостью и позволяет объединять до 50 микросистем типа I²C.

Топология ЛВС может быть представлена в виде шины, кольца, дерева и др. В стандарты ISO входят две базовые топологии: шина и кольцо. Для топологии шины используется сеть ETHERNET фирмы Хегох (США), а для топологии кольца — сеть CAMBRIDGE RING (Англия). Для распределенных ЛВС с топологией «шина» используется метод случайного доступа для всех абонентов сети в зоне радиусом до 2,5 км с равными правами доступа (рис. 6.9).

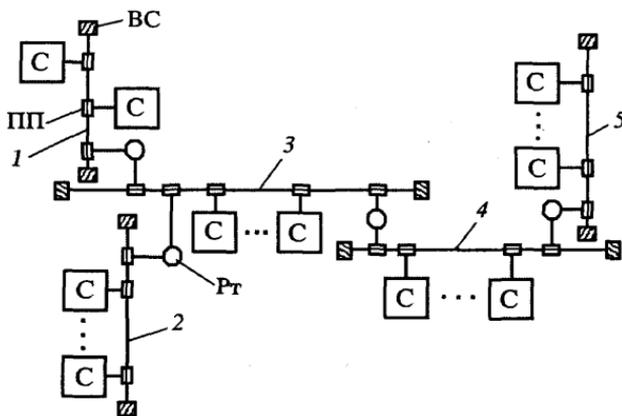


Рис. 6.9. Топология большой ЛВС типа «шина»:

1—5 — сегменты; С — станция; ВС — волновое сопротивление; ПП — приемопередатчик; Рт — ретранслятор

Отдельные ветви (сегменты) могут объединяться между собой и подключаться к сетям большой протяженности с помощью ретрансляторов (Рт) или межсетевых интерфейсов. Длина сегмента — до 500 м, число станций подключения к сегменту — 100 с шагом 2,5 м, удаление станции от сегмента — 50 м. Скорость передачи данных в подключенные к сети ЭВМ составляет от 100 кбайт/с до 100 Мбайт/с.

В ЛВС типа «кольцо» данные передаются в виде мини-пакетов длиной 40 бит: 16 бит используются в качестве поля данных; в двух полях — по 8 бит указываются адреса узла-отправителя и узла-получателя, а оставшиеся 8 бит выделяются для управляющих знаков (рис. 6.10). Интервалы следования битов и промежутки между пакетами задаются главной станцией, при этом по кольцу все время циркулирует определенное число пакетов и промежутков между ними. Каждый пакет содержит бит-индикатор, который указывает, является ли пакет заполненным (т. е. содержит полезные данные) или пустым, т. е. информация пакета принята узлом-получателем, а пакет сделал

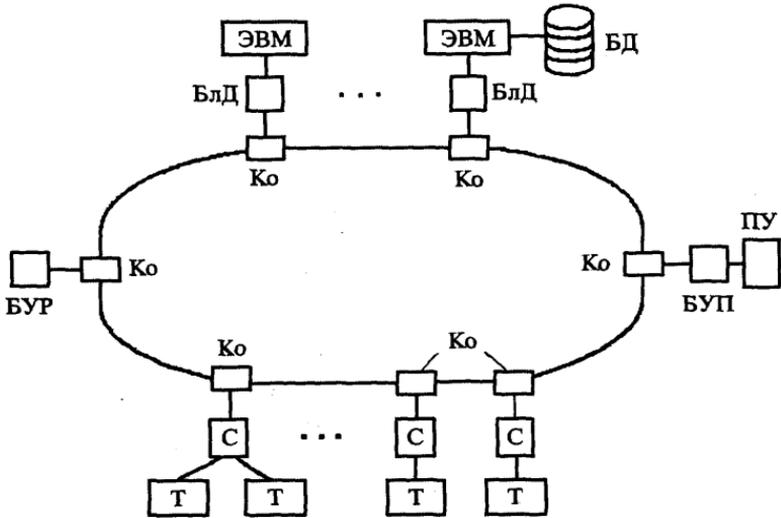


Рис. 6.10. Топология большой ЛВС типа «кольцо»:

БлД — блок доступа; ПУ — печатающее устройство; БУП — блок управления печатью; С — станция; Т — терминал; Ко — концентратор; БУР — блок управления ресурсами главной станции (станция на рис. не показана)

полный круг по кольцу и возвратился в узел, откуда был отправлен. Таким образом, Кембриджское кольцо является примером сети с пустыми сегментами.

Основные блоки ЛВС: блок управления вычислительными ресурсами главной станции (БУР). При получении запроса блок проверяет право доступа и выделяет ресурсы ЭВМ пользователю локальной ПЭВМ; блок управления печатью (БУП) устанавливает очередь на использование принтера.

На участках сети могут устанавливаться различные типы кабелей: коаксиальный, витая пара, оптоволоконный и телефонный. Скорость передачи информации до 10 Мбит/с при расстоянии между ретрансляторами не более 200 м. Сравнительный анализ определяет некоторые преимущества сети Кембриджское кольцо из-за простоты, надежности и меньшей стоимости.

Программные средства машинной графики

Средства машинной графики можно разделить на три модуля (рис. 6.11): 1) пакет программ машинной графики (ППМГ); 2) прикладная программа (ПП — центральный модуль); 3) прикладная база данных (ПБД).

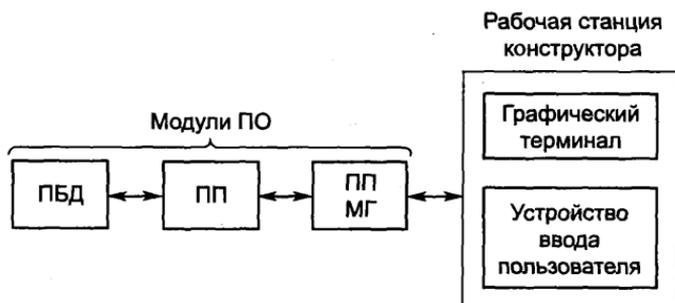


Рис. 6.11. Структура программного обеспечения машинной графики

Пакет программ МГ обеспечивает взаимодействие пользователя с графическим терминалом и играет роль интерфейса между пользователем и ПП. Этот пакет включает в себя подпрограммы ввода и вывода.

Прикладная (сменная) программа — основное ядро для МГ — используется для построения модели физического объекта (его изображение на экране дисплея). Прикладная программа содержит электрические схемы, детали и узлы машин, числовые и логические определения прикладных математических моделей.

6.3. САПР конструктора

На этапах конструкторского и технологического проектирования обеспечивается подготовка основного объема проектной документации, необходимой для изготовления нового изделия (системы). Процесс проектирования реализуется в соответствии с определенным планом, представленным в виде логической схемы построения объекта. Такая схема отображает очередность выполнения основных проектных процедур и операций. С наличием этапов проектирования тесно связаны базовые проектные процедуры, которые можно представить в виде схемы типового процесса проектирования (рис. 6.12). Из схемы видно, что процесс проектирования носит явно выраженный итерационный характер с контурами обратных связей.

Типовой процесс проектирования открывается документом «исходные данные», в который входят: номенклатура и годовой объем выпуска продукции; состав и специализация производственных участков и цехов; маршрутная технология и необходимое оборудование; клас-

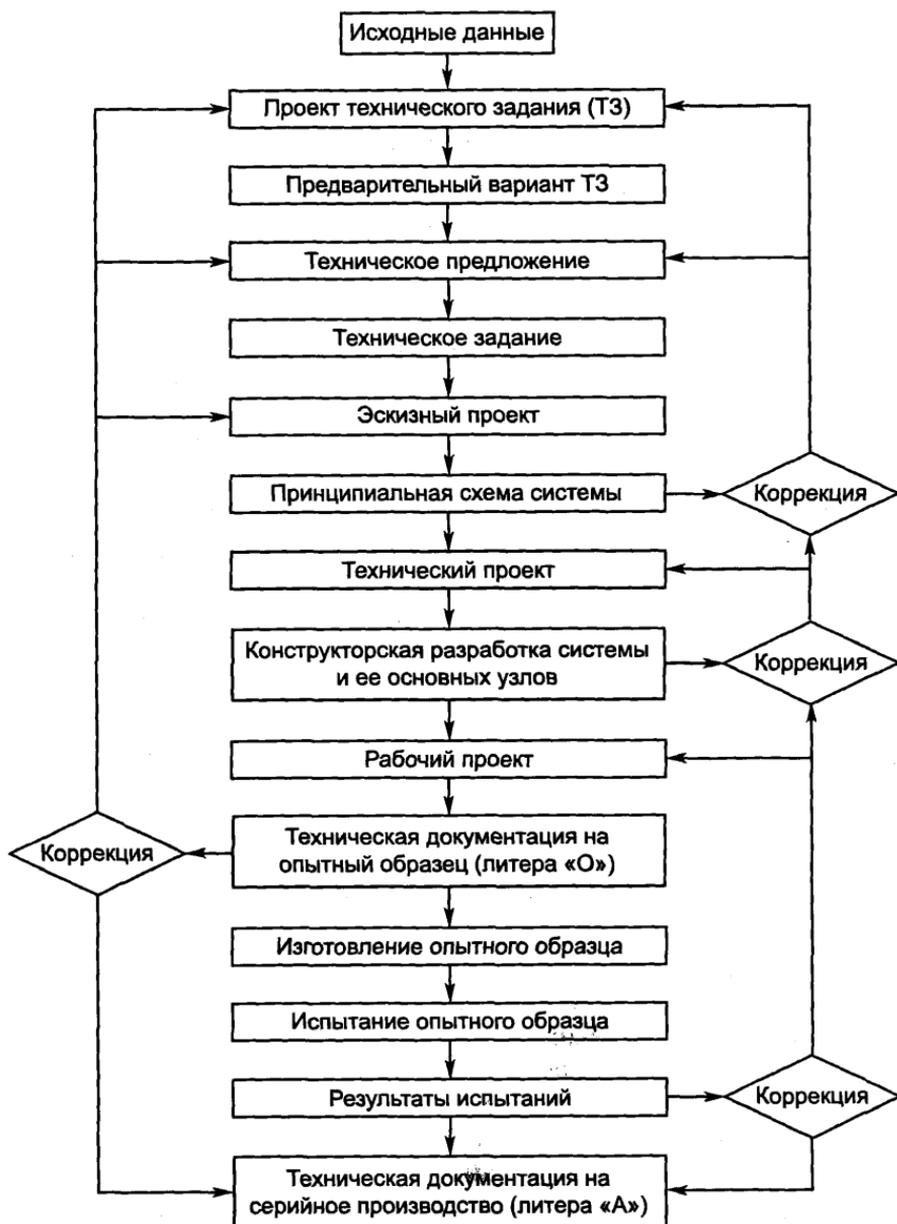


Рис. 6.12. Типовой процесс проектирования нового технического объекта (системы)

сификация и кодирование объектов производства и технологических процессов. Следующим этапом является разработка технического задания (ТЗ), которое включает: перечень задач сборочной системы, технико-экономические показатели (ТЭП), технические требования (ТТ) к подсистемам (техническому, организационному и программному обеспечению), состав, содержание и порядок проведения работ.

Разделы ТТ: технология и оборудование; организация производства и труда; АСУ; АСТПП; требования к производственным помещениям. На определенном этапе формирования ТЗ может возникать необходимость в документе под названием «техническое предложение», которое разрабатывается с целью выявления дополнительных или уточненных требований к системе (технических характеристик, показателей качества и др.), не указанных в ТЗ.

К основным этапам проектирования относится: разработка эскизного, технического и рабочего проектов.

Эскизный проект — это совокупность конструкторских документов, содержащих принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы системы. На этапе эскизного проекта проводится имитационное моделирование системы с целью уточнения компоновки ее составных частей и выбора оптимального варианта системы по показателям производительности, надежности и окупаемости проекта. По результатам имитационного моделирования выполняется корректировка проектных решений во всей совокупности конструкторских документов.

Технический проект разрабатывают с целью выявления окончательных технических решений, дающих полное представление о конструкции системы и содержащих исходные данные для разработки рабочей документации.

На этапе **рабочего проекта** создается полный комплект технической документации (конструкторской и технологической) с литерой «О», по которому изготавливается опытный образец системы, проводятся пусконаладочные работы, опытная эксплуатация и внедрение системы. Состав работ в процессе опытной эксплуатации и внедрения системы включает: подбор и обучение обслуживающего персонала; отработку управляющих программ и технических средств; коррекцию эксплуатационной документации и ТЭП; сдачу системы в промышленную эксплуатацию. По результатам опытной и промышленной эксплуатации системы и необходимой коррекции чертежей появляется комплект технической документации с литерой «А», предназначенной для производства установочной серии систем.

Основная задача конструкторского проектирования — реализация функциональных схем, полученных на этапе функционального проектирования, конструирование отдельных деталей, узлов и системы в целом, компоновка узлов из деталей и конструктивных элементов, агрегатов из узлов. Классификация задач конструкторского проектирования показана на рис. 6.13.



Рис. 6.13. Классификация задач конструкторского проектирования

В группу задач конструкторского проектирования входят:

- 1) задачи геометрического проектирования — определение геометрических параметров конструкции (например, параметров формы);
- 2) задачи топологического проектирования — синтез структуры (топологии) конструкции с учетом ее функциональных характеристик;
- 3) анализ (проверка) качества полученных конструкторских решений.

Геометрическое проектирование включает в себя вопросы геометрического моделирования и синтеза, которые обеспечивают решение позиционных и метрических задач на основе преобразования математических моделей.

Основу топологического проектирования составляют вопросы компоновки, размещения и трассировки, причем к наиболее трудоемкой части относится компоновка конструктивных элементов высшего иерархического уровня из элементов низшего. Типичной задачей размещения, например, для электронных узлов является опреде-

ление оптимального пространственного расположения элементов на коммутационном поле. Критериями и ограничениями здесь оказываются размеры элементов, расстояния между ними, число допустимых пересечений соединений и межслойных переходов и др. Для анализа качества конструкций, кроме структурных моделей, используют модели и методы, характерные для функционального проектирования, что указывает на тесную взаимосвязь функционального и конструкторского проектирования в САПР.

В процессе разработки новой техники конструктор использует систему автоматизированного проектирования (САПР-К). В САПР-К на ЭВМ реализуются следующие основные функции (рис. 6.14):

- 1) геометрическое моделирование;
- 2) инженерный анализ и синтез;
- 3) обзор и оценка проектных решений;
- 4) автоматизированное изготовление конструкторской документации.

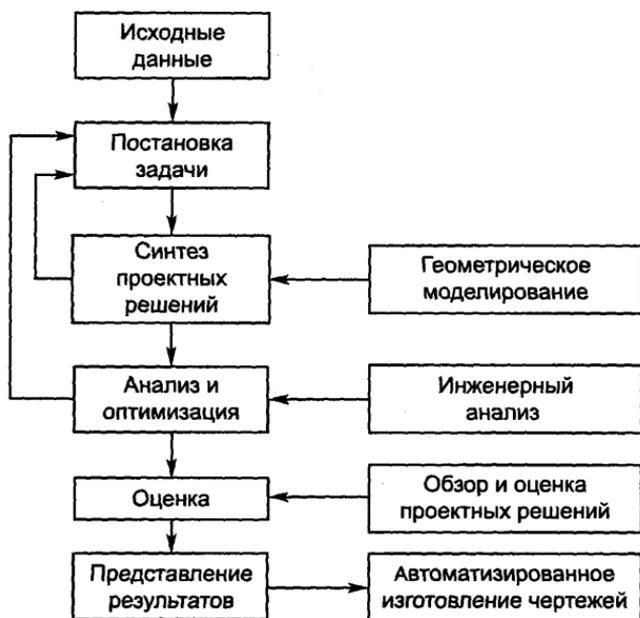


Рис. 6.14. Области использования ЭВМ при автоматизированном проектировании в САПР-К

На этапе синтеза проектных решений проект физического объекта принимает конкретную форму в системе интерактивной машин-

ной графики (ИМГ). При геометрическом моделировании разработчик конструирует графическое изображение объекта проектирования на экране дисплея системы ИМГ, используя:

1) команды, обеспечивающие формирование базовых геометрических элементов, так называемых примитивов (точки, линии, окружности, плоскости, сферы, цилиндры и т. д.);

2) команды преобразования и редактирования геометрической модели, например масштабирование, копирование и удаление, повороты и перемещение изображения и другие преобразования базовых элементов;

3) команды компоновки различных элементов в целостное изображение объекта нужной формы.

Эту информацию (геометрическую модель) запоминает ЭВМ в файлах данных. Впоследствии модель может извлекаться из файлов для анализа и преобразования.

При построении геометрических форм используется геометрическая модель (ГМ) — совокупность сведений, однозначно определяющих геометрическую форму объекта на плоскости или в пространстве ($2D$ -, $2,5D$ -, $3D$ -мерные ГМ). Геометрические модели могут быть представлены совокупностью уравнений линий и поверхностей, алгебраическими соотношениями, графами, списками, таблицами, описаниями на специальных графических языках, например, на языке ЛИСП для АВТОКАДА. Назовем основные геометрические модели.

Аналитические, представляющиеся уравнениями, описывающими контуры или поверхности деталей в декартовой или полярной системе координат.

Алгебраические аналитические, обеспечивающие задание плоских фигур и трехмерных тел, в которых геометрический объект описывается логической функцией условий, выражающих принадлежность точки тем или иным пространственным областям. Например, двухмерная модель C получается из соотношения (рис. 6.15, а)

$$C = A - B,$$

где A , B — аналитические уравнения соответственно прямоугольника и круга на плоскости.

Канонические, применяющиеся в случаях, когда в геометрическом объекте можно выделить параметры, однозначно определяющие его форму (например, координаты центра и радиус окружности).

Рецепторные, описывающие объект двух- или трехмерной матрицей из нулей и единиц. В плоскости или пространстве строится пря-

моугольная решетка (сеть), каждая клетка которой рассматривается как рецептор с состоянием 0 или 1. Если рецептор включается в контур, то он считается возбужденным (состояние 1).

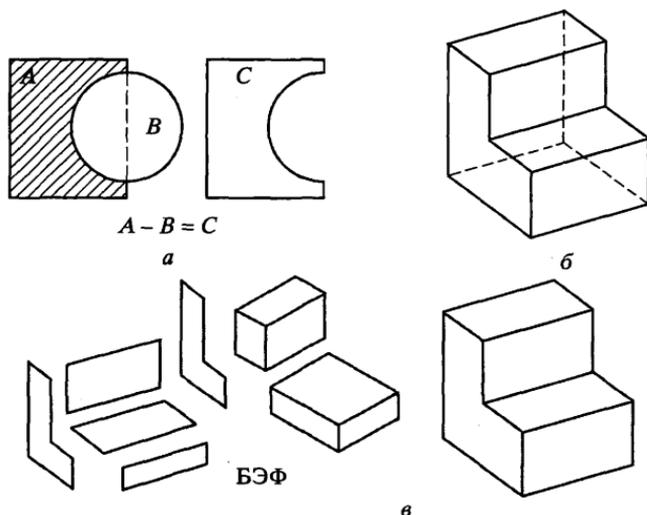


Рис. 6.15. Основные виды геометрического моделирования:
a — с использованием логических функций; *б* — каркасная трехмерная модель; *в* — объемная модель, полученная путем набора из базовых элементов форм (БЭФ)

Каркасные, в которых объект напоминает проволочный каркас с видимыми линиями-ребрами (рис. 6.15, *б*). Основное понятие в каркасной модели — определитель поверхности, который состоит из геометрической и алгоритмической частей. В геометрическую входит объект и параметры его формы, а в алгоритмическую — правила построения точек и линий.

Кинематические относятся к каркасным, но для получения каркаса используется перемещение в пространстве плоской линии, которая задается параметром. Примеры кинематических моделей — поверхности вращения и линейчатые поверхности.

Монолитные (твердотельные) представляются в виде объемного тела. По сравнению с каркасными они более удобны и перспективны, но требуют больших вычислительных мощностей (по быстродействию и объему памяти). Существует два основных принципа монолитного объемного моделирования:

1) принцип конструирования модели из базовых элементов форм (БЭФ): прямоугольные блоки, кубы, сферы, пирамиды и другие гра-

фические примитивы (рис. 6.15, *в*). Используется CSG модель или C — представление;

2) граничное представление (B — представление). Конструктор изображает на экране контуры или границы объекта (вид спереди, сбоку, сверху и др.), указывая линии связи между ними. Затем производится доводка модели до желаемой формы.

Существуют также и гибридные системы, которые сочетают в себе различные методы построения геометрических моделей. В настоящее время конструкторы располагают современными программными средствами компьютерного проектирования, например *Unigraphics* и *Inventor*.

6.4. САПР технолога

Система автоматизированного проектирования технолога (САПР-Т) представляет собой комплекс средств автоматизации проектирования технологических процессов (САПР-ТП), обеспечивающих составление маршрута обработки заготовок без участия технолога. Она предусматривает:

- 1) сокращение сроков и повышение качества проектирования;
- 2) получение оптимального варианта ТП;
- 3) облегчение труда технолога.

Проектирование ТП является неотъемлемой частью автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП), место которой в ИПС показано на рис. 6.16. Трудоемкость технологической подготовки производства составляет не менее 15 % от трудоемкости изготовления изделия. В процессе проектирования ТП необходимо учитывать особенности технологических задач: многомерность, многовариантность, нелинейность связей, вероятностный характер технологического процесса.

В настоящее время технические возможности существующих САПР-ТП не позволяют полностью автоматизировать проектирование технологии всех изготавливаемых деталей. Трудной для ЭВМ задачей может быть выбор способа получения заготовки, баз, последовательности обработки поверхностей детали и т. д. В этом случае на отдельных этапах технолог принимает свое решение или корректирует решение, принятое ЭВМ. Аналогично задачам конструкторского проектирования имеется два способа решения задач САПР-ТП: пакетный (автоматический) и диалоговый (интерактивный). В пакетном

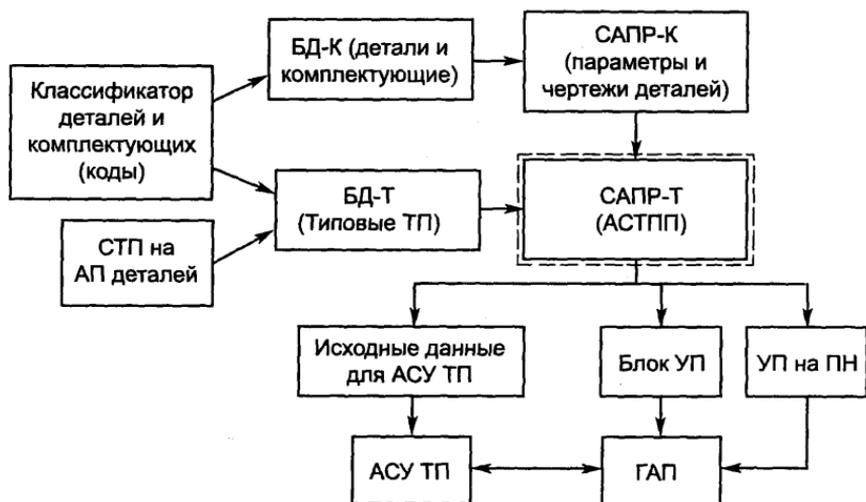


Рис. 6.16. Место САПР-Т (АСТПП) в ИПС проектирования и изготовления деталей: БД — К, БД — Т — базы данных конструктора и технолога соответственно; СТП — стандарт предприятия; АП — автоматизированное проектирование; УП — управляющая программа; ПН — программоноситель; ТП — технологический процесс; АСТПП — автоматизированная система технологической подготовки производства; ГАП — гибкое автоматизированное производство

режиме осуществляется автоматическое составление ТП без вмешательства технолога, который вводит в ЭВМ лишь предварительно закодированные исходные данные о детали. Этот режим применяется в основном для простых деталей.

В диалоговом режиме технолог с пульта терминала вводит необходимую информацию о параметрах детали и принимает те или иные решения в ходе диалога с ЭВМ. Диалоговый режим обычно используется при разработке ТП для сложных деталей.

Автоматизированное проектирование технологических процессов осуществляется путем использования индивидуальных, типовых и групповых процессов обработки. Основные этапы САПР-ТП механической обработки заготовки показаны на рис. 6.17. Такие САПР-ТП относят к системам генерирующего типа.

Выбор оптимального ТП производится с помощью количественной оценки, включающей n частных критериев L_i , которые в сумме составляют обобщенную (аддитивную) функцию

$$L(T) = \sum_{i=1}^n L_i(T_i),$$

где $L_i = k_i(T_i)$;

k_i — весовой коэффициент критерия L_i ;

T_i — код технологической процедуры.

В аддитивную функцию в обязательном порядке должны входить следующие критерии:

1) $L_1 = k_1(T) \rightarrow \min$ — технологическая себестоимость изготовления детали;

2) $L_2 = k_2(T) \rightarrow \min$ — длительность цикла изготовления детали;

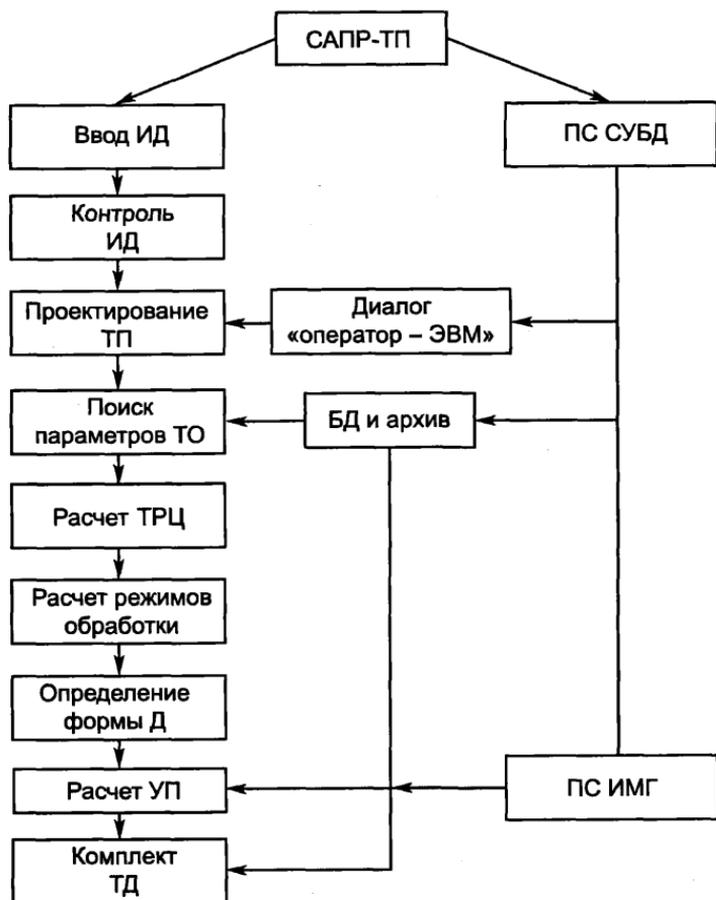


Рис. 6.17. Схема САПР-ТП механической обработки генерирующего типа:

ТД — технологическая документация; ИД — исходные данные; ПС — программные средства; ТРЦ — технологическая размерная цепь; Д — деталь; УП — управляющие программы

3) $L_3 = k_3(T) \rightarrow \max$ — усредненный коэффициент унификации (стандартизации);

4) $L_4 = k_4(T) \rightarrow \max$ — коэффициент использования материала;

5) $L_5 = k_5(T) \rightarrow \max$ — коэффициент автоматизации ТП.

Весовые коэффициенты частных критериев определяются методом экспертных оценок в результате статистического анализа вариантов ТП:

$$L_i(T_i) = \frac{\sum_{i=1}^p m_i}{100p},$$

где m_i — число баллов, назначенное экспертом по 100-балльной шкале оценок;

$p \geq 5$ — число экспертов.

Пример аддитивной функции:

$$L(T) = 0,4T_1 + 0,23T_2 + 0,1T_3 + 0,17T_4 + 0,1T_5,$$

где $T_1 \dots T_5$ — коды соответствующих технологических процедур.

Оптимальным считается ТП, у которого окажется минимальной сумма $\min L_i$ и максимальной сумма $\max L_i$.

Кроме того, существует *структурная* и *параметрическая* оптимизации ТП. При структурной оптимизации определяются: оптимальный маршрут обработки, вид заготовки, тип технологического оборудования, приспособлений и инструмента. При параметрической оптимизации производится расчет оптимальных параметров, таких как межоперационные припуски, допуски на линейные и угловые размеры, стойкость режущего инструмента и др.

При необходимости проводится комплексная оптимизация ТП, в которой задействованы первые две.

Во время оптимизации любого ТП устанавливается ряд ограничений: допустимая величина суммарной погрешности выполняемого размера, отклонение формы и взаимного расположения поверхностей, стойкость режущего инструмента, мощность главного привода, силы, действующие на механизм подачи инструмента, материал и тип заготовок, возможность использования спутников, способы отвода стружки от станка и подвода СОЖ и т. д. Все это показывает, что проектирование ТП представляет собой сложную вариационную задачу.

6.5. Автоматизированная система управления

Управлением в широком смысле слова называется воздействие на какой-либо процесс, обеспечивающее достижение поставленной цели. В более развернутом плане под управлением будем понимать *совокупность действий*, направленных на поддержание и улучшение показателей работы системы (объекта) в соответствии с алгоритмом, реализующим заданные *целевые функции* ИПС. В зависимости от уровня автоматизации управление может осуществляться как автоматически, так и с участием человека. В настоящее время наибольшее распространение получили автоматизированные системы управления (АСУ), в которых все функции управления выполняются специальным устройством с применением вычислительной техники.

Автоматизированная система управления — это человеко-машинная система, обеспечивающая автоматический сбор и обработку информации, необходимой для *оптимизации* управления в различных сферах человеческой деятельности [8, 12, 17].

Различают два типа АСУ:

- 1) АСУП — система организационного управления производством (предприятием);
- 2) АСУ ТП — система управления технологическим процессом (оборудованием ГАП).

Уровень сложности АСУ определяется формой обработки данных:

- регистрация измеряемых величин;
- управление ИПС в режиме консультации;
- прямое управление системой (технологическим процессом).

Выработка управляющих решений в условиях неполной информации

На верхнем уровне управления предприятием (директор, главный инженер, главный технолог) часто возникают ситуации, связанные с неизбежным риском, когда руководству приходится принимать управленческие решения в неопределенной обстановке. К таким ситуациям относятся производственные задачи, решаемые в условиях неполной информации: разработка годового плана, плана реконструкции предприятия (производства), перехода на выпуск нового вида продукции. Обычно при этом нет полной ясности о степени и сроках обеспечения плана всеми необходимыми ресурсами, о сроках ввода в действие объектов производства, эффективности новой техники в ре-

альных условиях, о влиянии рыночных колебаний спроса и предложения на данный вид продукции.

В таких случаях применяются методы *исследования операций*, из которых наиболее распространенным является метод, использующий теорию статистических решений [9]. Эта теория служит для выработки рекомендаций по рациональному управлению при неполной информации, обусловленной объективными причинами. В общем виде задача формулируется так: имеется m возможных решений (стратегий поведения) P_1, P_2, \dots, P_m .

Об условиях обстановки (среды) можно сделать n предположений (стратегии природы) O_1, O_2, \dots, O_n . Показателем эффективности того или иного решения является выигрыш a_{ij} , соответствующий паре P_i-O_j (например, прибыль). На основании значений a_{ij} находят наиболее выгодную стратегию P (линию поведения). Значения a_{ij} определяются методом экспертных оценок и сводятся в таблицу.

Таблица 6.1. Значения эффективности решений для различных P_i-O_j

P_i	a_{ij}			
	O_1	O_2	...	O_n
P_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
P_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...
P_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}

В теории статистических решений помимо показателя эффективности a_{ij} , для оценки качества решения дополнительно используется показатель риска k_{ij} , показывающий, насколько полно реализуется наибольшая эффективность $P_i(O_j)$ с учетом риска. Показатель риска — это разность между эффективностью решения P при полной информации о ситуации O и эффективностью P при неопределенных данных об обстановке.

Рассмотрим пример использования теории статистических решений.

При переходе предприятия на новые виды продукции возможны 4 решения: P_1, P_2, P_3, P_4 , которые зависят от соответствующей обстановки: O_1, O_2, O_3 . Значения эффективности решений приведены в табл. 6.2.

Из табл. 6.2 видно, что для обстановки O_1 эффективность решения P_1 минимальна ($a_{11} = 0,25$). Это соответствует отсутствию досто-

Таблица 6.2. Значения эффективности решений для конкретного примера

P_i	a_{ij}		
	O_1	O_2	O_3
P_1	0,25	0,35	0,4
P_2	0,7	0,2	0,3
P_3	0,35	0,85	0,2
P_4	0,8	0,1	0,35

верных данных о ситуации O_1 . Наоборот, максимальное значение эффективности P_4 ($a_{41} = 0,8$) объясняется достаточно полной информацией об обстановке O_1 . В данном примере для $P_4(O_1)$ показатель риска будет нулевым, так как $k_{41} = 0,8 - 0,8 = 0$, а для $P_1(O_1)$ $k_{11} = a_{41} - a_{11} = 0,8 - 0,25 = 0,55$ (т. е. \max). Расчетные значения k_{ij} приведены в таблице риска (табл. 6.3).

Таблица 6.3. Расчетные значения показателей риска для конкретного примера

P_i	k_{ij}		
	O_1	O_2	O_3
P_1	0,55	0,5	0,0
P_2	0,1	0,65	0,1
P_3	0,45	0,0	0,2
P_4	0,0	0,75	0,05

Первая таблица показывает, что эффективности $P_1(O_2)$ и $P_4(O_3)$ одинаковы ($a_{ij} = 0,35$). Однако из второй таблицы видно, что риск при этом отличается на порядок: $k_{12} = 0,5$, а $k_{41} = 0,05$.

Этот фактор заставляет более тщательно оценивать качество стратегий P_{ij} .

В зависимости от степени неопределенности обстановки различают три варианта решений.

Вариант 1

Выбор решения, когда вероятности возможных вариантов обстановки известны. В этом случае в качестве оптимального выбирается решение, при котором среднее ожидаемое значение выигрыша $\max \bar{a}(P_i)$. Значение $\bar{a}(P_i)$ находится как сумма произведений вероят-

ностей p_i различных вариантов обстановки на соответствующие значения выигрышей a_{ij} . Пусть для нашего примера вероятности знания обстановки равны: $p_1 = 0,5$; $p_2 = 0,3$; $p_3 = 0,2$. Значения $\bar{a}(P_i)$ определим, используя табл. 6.2:

$$\bar{a}(P_1) = 0,25 \cdot 0,5 + 0,35 \cdot 0,3 + 0,4 \cdot 0,2 = 0,31;$$

$$\bar{a}(P_2) = 0,7 \cdot 0,5 + 0,2 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,2 = 0,47;$$

$$\bar{a}(P_3) = 0,35 \cdot 0,5 + 0,85 \cdot 0,3 + 0,2 \cdot 0,2 = 0,47;$$

$$\bar{a}(P_4) = 0,8 \cdot 0,5 + 0,1 \cdot 0,3 + 0,35 \cdot 0,2 = 0,5.$$

Решение P_4 является оптимальным, так как $\max \bar{a}(P_4)$.

Отметим, что оптимальным может считаться также решение, при котором будет $\min \bar{a}(P_i)$, если a_{ij} представляет собой не выигрыш, а затраты предприятия.

Вариант 2

Выбор решения, когда вероятности возможных вариантов обстановки неизвестны, но есть сведения об их относительных значениях. Если считать, что вероятности p_i примерно равны, то выбор решения можно осуществлять по методике первого варианта. В другом случае p_i могут устанавливаться методом экспертных оценок.

Вариант 3

Выбор решения, когда вероятности возможных вариантов обстановки абсолютно неизвестны. В этом случае возможны три линии поведения при выборе решения.

В основе *первой линии поведения* лежит принцип «рассчитывай на худшее».

Оптимальным является решение, для которого выигрыш $a_{ij} = \max$ из минимальных при различных O_j . Из табл. 6.2 имеем: в строке P_1 $\min a_{11} = 0,25$; в строке P_2 $\min a_{22} = 0,2$; в строке P_3 $\min a_{33} = 0,2$; в строке P_4 $\min a_{42} = 0,1$. Следовательно, $P_1 = P_{\text{опт}}$, так как $a_{11} = 0,25 = \max$.

Вторая линия поведения позволяет избежать большого риска в любых условиях. Здесь оптимальным будет решение, при котором максимальный риск для различных O_j окажется минимальным. Из табл. 6.3 видно, что таким решением будет $P_3 = P_{\text{опт}}$, так как для него $k_{31} = 0,45 = \min$ (для P_1 $k_{11} = 0,55$; для P_2 $k_{22} = 0,65$; для P_4 $k_{42} = 0,75$).

В *третьей линии поведения* решение выбирается между расчетом на худшее и на лучшее. Оптимальным считается решение, при кото-

ром критерий «пессимизма-оптимизма» (критерий Гурвица) будет максимальным ($\max G$):

$$G = q \min a_{ij} + (1 - q) \max a_{ij},$$

где весовой коэффициент $q = 0$ в расчете на лучшее и $q = 1$ в расчете на худшее.

Проведем расчет критерия G для нашего примера, приняв $q = 0,5$ (см. табл. 6.2):

$$G(P_1) = 0,5 \cdot 0,25 + 0,5 \cdot 0,4 = 0,32.$$

Для других решений:

$$G(P_2) = 0,45; \quad G(P_3) = 0,52; \quad G(P_4) = 0,45.$$

Оптимальным является решение $P_3 = P_{\text{опт}}$, для которого $G(P_3) = 0,52 = \max$.

Значения критерия G и $P_{\text{опт}}$ для различных q нашего примера показаны в табл. 6.4.

Таблица 6.4. Значения критерия G и $P_{\text{опт}}$ при различных q

P_i	q				
	0	0,25	0,5	0,75	1,0
P_1	0,4	0,36	0,32	0,29	0,25
P_2	0,7	0,57	0,45	0,33	0,2
P_3	0,85	0,69	0,52	0,36	0,2
P_4	0,8	0,62	0,45	0,28	0,1
$P_{\text{опт}}$	P_3	P_3	P_3	P_3	P_1

Приведем пример, когда вероятности возможных вариантов обстановки известны (см. первый вариант выбора решения), но оптимальным считается решение, при котором среднеождаемое значение $M(P_i)$ будет не \max , а \min , так как $M(P_i)$ представляет собой не выигрыш, а затраты предприятия.

Такое условие характерно для задачи о замене технологического оборудования на предприятии. Назовем возможные ситуации (обстановки):

O_1 — оборудование работоспособно, но требует небольшого текущего ремонта;

O_2 — оборудование изношено и требует капитального ремонта;

O_3 — оборудование изношено полностью и требует замены.

Имеющийся опыт эксплуатации аналогичного оборудования показывает, что в 20 % случаев оборудование может находиться в состоянии O_1 (т. е. вероятность $p(O_1) = 0,2$), в 50 % случаев — в состоянии O_2 ($p(O_2) = 0,5$) и в 30 % случаев — в состоянии O_3 ($p(O_3) = 0,3$).

Для руководства предприятия возможны три варианта принятия решения:

P_1 — сохранить имеющееся оборудование еще на один год, произведя незначительный ремонт своими силами;

P_2 — провести капитальный ремонт силами специальной бригады;

P_3 — заменить все оборудование на новое, предусмотрев дополнительные затраты в бюджете предприятия.

Затраты, которые несет предприятие при различных решениях, заданы таблицей затрат (безразмерные величины). Среднеожидаемое значение $M(P_i)$ рассчитывается по формуле

$$M(P_i) = \sum_{i=1}^n L(O_i P_i) p(O_i),$$

где $\sum_{i=1}^n L(O_i P_i)$ — сумма затрат для различных решений.

Таблица 6.5. Затраты на различные проектные решения

O_i	$p(O_i)$	$L(O_i, P_i)$		
		P_1	P_2	P_3
O_1	0,2	1	3	5
O_2	0,5	5	2	4
O_3	0,3	7	6	3

Рассчитаем суммарные затраты для различных P_i :

$$\Sigma L(P_1) = 1 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,5 + 7 \cdot 0,3 = 4,8;$$

$$\Sigma L(P_2) = 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,5 + 6 \cdot 0,3 = 3,4;$$

$$\Sigma L(P_3) = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,5 + 3 \cdot 0,3 = 3,9.$$

Таким образом, оптимальным является решение $P_{\text{опт}} = P_2$, так как $\Sigma L(P_2) = \min$.

Ответственные решения, связанные с большим риском, чаще всего принимаются коллегиально группой экспертов. В практике экспертных оценок существуют два пути принятия решения:

- стратегия простого большинства голосов после всестороннего обсуждения;
- стратегия суммирования рангов.

Второй путь покажем на примере.

Пусть решение принимается группой из трех экспертов (Э) и возможны четыре альтернативных решения: P_1, P_2, P_3, P_4 . Вначале каждый эксперт проводит ранжирование решений в порядке предпочтения, затем составляется таблица рангов решений.

Таблица 6.6. Ранги решений по методу экспертных оценок

Э	Ранг решения			
	1	2	3	4
Э1	P_3	P_4	P_2	P_1
Э2	P_3	P_2	P_1	P_4
Э3	P_1	P_2	P_4	P_3

Чем ниже ранг решения, тем оно предпочтительнее. Поэтому к реализации принимается то решение, у которого сумма рангов наименьшая. В нашем примере предпочтительным является решение P_3 , так как у него

$$\Sigma P_3 = 1 + 1 + 4 = 6 \text{ (min).}$$

У других решений ранг выше:

$$\Sigma P_1 = 4 + 3 + 1 = 8;$$

$$\Sigma P_2 = 3 + 2 + 2 = 7;$$

$$\Sigma P_4 = 2 + 4 + 3 = 9.$$

Полной формализации задачи выработки оптимальных решений в АСУ пока не существует. Поэтому в настоящее время АСУ используется как на верхнем уровне принятия решений как информационно-советующая система, в БД которой содержится нормативно-справочная информация, данные об оборудовании, рабочей силе, ценах и спросе на продукцию, техническом уровне и др. Лицо верхнего уровня управления, используя всю имеющуюся информацию и подсказки АСУ по предпочтительным решениям, производит необходимые коррективы в управлении деятельностью предприятия.

6.6. Автоматизированная система управления производством

Управление предприятием представляет собой процесс непрерывного обмена информацией между всеми структурными подразделениями предприятия, а также между данным предприятием и его смежниками. Поток производственной информации, передаваемые в определенные промежутки времени по каналам связи, отражают материальные процессы, протекающие на уровне предприятия (или на уровне группы предприятий). Перечислим основные подсистемы АСУП:

- технико-экономического планирования;
- оперативного управления основным и вспомогательным производством;
- технологической подготовки производства;
- управления материально-техническим снабжением, сбытом и реализацией продукции;
- управления качеством продукции;
- финансово-бухгалтерской деятельности;
- управления кадрами.

АСУП организуется как иерархическая структура на основе ЭВМ различного класса (рис. 6.18).

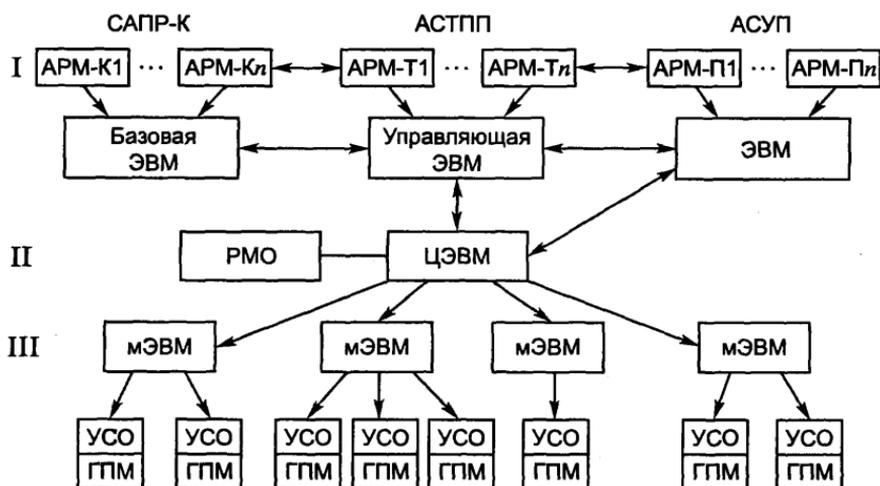


Рис. 6.18. Иерархическая структура АСУП:

РМО — рабочее место оператора; УСО — устройство связи с объектом

Верхний (третий) уровень включает систему управления программами и данными, обеспечивающую заданную технологию и производственный план предприятия.

Второй уровень (центральная ЭВМ) координирует работу ЭВМ первого (нижнего) уровня, которые осуществляют непосредственное управление ГПМ автоматизированного производства с помощью устройств связи с объектом (УСО).

Каждый уровень АСУП функционирует автономно, благодаря чему отказ ЭВМ одного уровня практически не отражается на работоспособности машин других уровней.

Комплексирование ЭВМ различного класса обеспечивается организацией каналов связи между ними методом (рис. 6.19):

- последовательного интерфейса ввода-вывода;
- параллельного интерфейса ввода-вывода;
- через аппаратуру передачи данных (АПД).

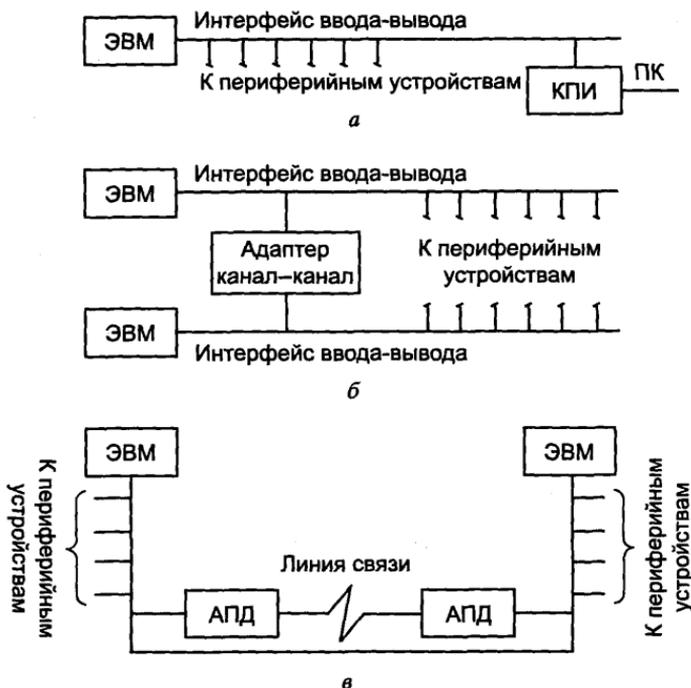


Рис. 6.19. Схемы комплексирования ЭВМ на различных уровнях АСУП:

а — методом последовательного интерфейса ввода-вывода; *б* — методом параллельного интерфейса; *в* — через аппаратуру передачи данных АПД; КПИ — контроллер последовательного интерфейса; ПК — персональный компьютер

Интерфейсы ввода-вывода сопрягаемых ЭВМ связываются через устройство «адаптер канал—канал» (АКК). В зависимости от типа ЭВМ и интерфейса обмен информацией в АСУП осуществляется словами (байтами) со скоростью от 100 тыс. до 10 млн байт/с.

Быстродействие ЭВМ для решения задач АСУП определяется формулой, операций/с:

$$V = \frac{mQk_{oc}}{\Phi},$$

где m — среднее число машинных операций на один байт информации ($m = 200 \dots 500$ для операций учета; $m = 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ — для задач планирования; $m = 10^4 \dots 2 \cdot 10^5$ — для задач оптимизации);

Q — среднегодовой объем перерабатываемой информации, байт;

$k_{oc} = 1,2 \dots 1,5$ — коэффициент, учитывающий работу операционной системы ЭВМ;

Φ — годовой фонд рабочего времени ЭВМ, с.

Для реализации задач верхнего уровня АСУП (управление производственно-хозяйственной деятельностью предприятия и АСТПП) объем внешней памяти вычислительного комплекса должен составлять не менее 300 Мбайт, а быстродействие — не ниже 0,5 млн операций/с при повышенной надежности комплекса.

Вычислительный комплекс уровня управления производством в реальном масштабе времени должен иметь производительность порядка 1 млн операций/с, объем дисковой памяти — не менее 30 Мбайт, объем оперативной памяти — не менее 1,0 Мбайт.

Для управления технологическими комплексами требуется быстродействие порядка 500 тыс. операций/с, оперативная память — объемом не менее 64 кбайт, внешняя память — объемом не менее 0,5 Мбайт.

Основой построения программного обеспечения АСУП является принцип модульности, обеспечивающий легкую перепрограммируемость программного обеспечения, последующее наращивание и расширение функциональных возможностей системы.

Характерным примером программного обеспечения АСУП является SCADA пакет (Supervisory Control and Data Acquisition), широко применяемый для диспетчерского управления и обработки данных. Программный пакет SCADA позволяет осуществлять диспетчерский контроль, сбор, обработку, хранение и визуализацию данных в режиме реального времени, который обеспечивает гарантированное время отклика на входящий сигнал (воздействие).

Система оперативно-диспетчерского управления производственным процессом цехового уровня

Задачи, решаемые системой оперативно-диспетчерского управления цехового уровня, можно разделить на три группы.

В первую группу входят задачи анализа, например, годности текущей партии деталей. Для каждой партии деталей определяется фактический процент брака по видам и сравнивается с нормативным. Сообщение о превышении нормы брака выдается технологу на дисплей, а по его запросу на печать периодически поступают данные о ходе производства, о забракованных партиях и по объему выпуска изделий по форме «план—факт».

Ко второй группе относятся задачи определения местонахождения партии заготовок по кодовому номеру, номеров партий в заделе по номерам операций, задачи учета межоперационных заделов, характеризующих объем незавершенного производства.

В третьей группе сосредоточены системные задачи технолого-диспетчерского управления, которые решаются во взаимосвязи (рис. 6.20). Исключение составляют задачи, иницируемые по запросу.

Центр управления производством с диспетчерскими и операторскими пунктами оснащается средствами взаимодействия с центральным вычислительным комплексом предприятия. Диспетчерские пункты оборудуются АРМ для расчета квартальных, месячных и декадных планов, сменно-суточных заданий и их обеспечения всеми видами ресурсов.

Информационное обеспечение для оперативно-диспетчерского управления представляет собой базу данных, которая организована в виде локальных массивов информации о ходе технологического процесса и нормативно-справочной информации (НСИ), включающей следующие данные: выход годных деталей и нормативный брак, критическое время хранения партий деталей и время выполнения операций, плановое задание операторам, фонд рабочего времени оборудования, календарь рабочих дней, справочники профессий. База данных состоит из основных и вспомогательных массивов. Основные массивы: «изделия», «простои оборудования», «смена», «проба» (рис. 6.21).

Вспомогательные массивы: «ввод» (первоначальный ввод данных), массивы классификаторов (согласно стандарту предприятия) и справочников, «таблица» (указатель расположения массивов на маг-

нитном диске). Базы данных и программы размещаются в ОЗУ ЭВМ верхнего и нижнего уровней управления.

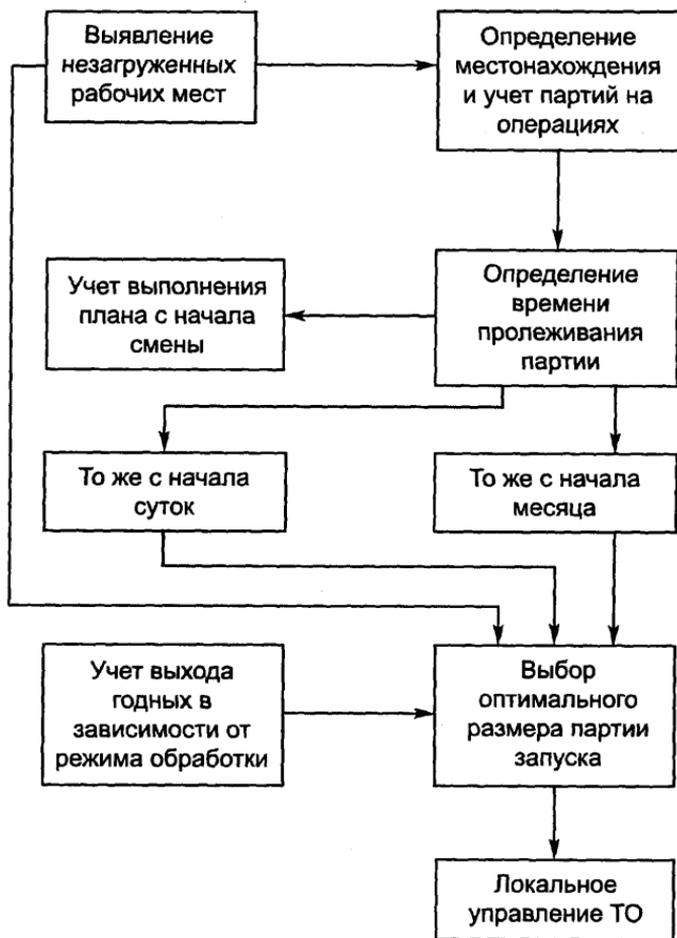


Рис. 6.20. Взаимосвязь системных задач технолого-диспетчерского управления цехового уровня

Программное обеспечение оперативно-диспетчерского управления организовано в виде системы, работающей в реальном масштабе времени с централизованной обработкой прерываний и с операциями ввода-вывода информации. В состав ПО входят программы «Диспетчер» верхнего и нижнего уровней, обработки прерываний и ряд модулей, сгруппированных вокруг программы «Диспетчер».

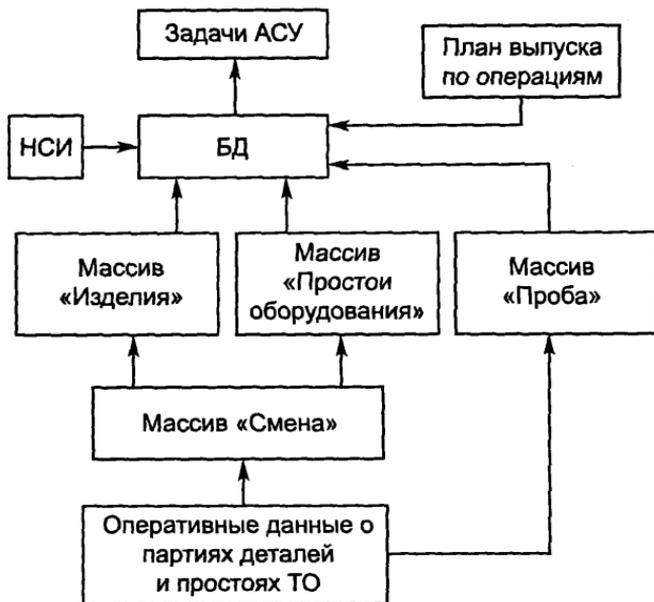


Рис. 6.21. Основные массивы базы данных системы оперативно-диспетчерского управления цехового уровня:

НСИ — нормативно-справочная информация

6.7. Автоматизированная система управления технологическими процессами

Основной задачей автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) является достижение оптимальных параметров ТП, характеризующих высокое качество продукции.

На схеме сопряжения управляющей ЭВМ с технологическим процессом (оборудованием) обозначены (рис. 6.22): x_n — неуправляемые входные параметры (геометрия режущего инструмента, форма детали, материал заготовки и др.); x_y — управляемые входные параметры (скорость резания, подача, глубина резания и др.); x_ϕ — фиксированные входные параметры (ТО, приспособления, инструмент); $y_{\text{вых}}$ — выходные параметры, в том числе контролируемые (измеряемые) параметры y_x (температура, вибрация, напряжение, потребляемая мощность). Параметры $y_{\text{вых}}$ представляют собой интегральный функционал качества ТП:

$$J(x_n, x_y, x_\phi, t).$$

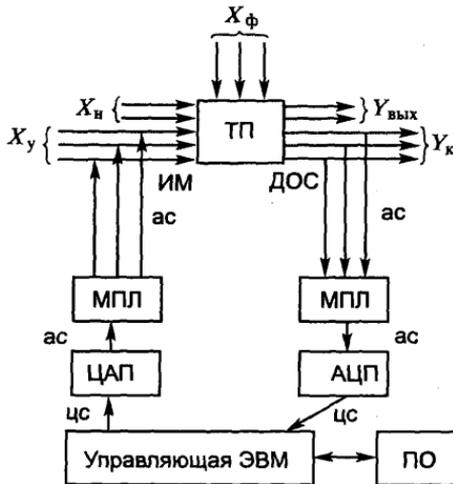


Рис. 6.22. Схема сопряжения управляющей ЭВМ с технологическим процессом (оборудованием):

ас — аналоговый сигнал; цс — цифровой сигнал; ДОС — датчик обратной связи; ПО — пульт оператора; ИМ — исполнительные механизмы

Информация об измеряемых выходных параметрах с помощью датчиков обратной связи (ДОС) передается через входной мультиплексор (МПЛ) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в управляющую ЭВМ. Управляющие сигналы из ЭВМ через цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и выходной мультиплексор поступают на исполнительные механизмы ИМ (двигатели, электромагниты, клапаны, реле и др.), связанные с управляемыми входными параметрами x_y .

В аппаратные средства сопряжения ЭВМ с ТП, кроме переключающего устройства МПЛ, входят:

- генератор импульсов для преобразования цифрового кода в серию импульсов, например, для управления шаговым двигателем;
- счетчик импульсов для преобразования серии импульсов от АЦП в цифровой код для ЭВМ;
- формователи сигналов для фильтрации помех и сглаживания аналогового сигнала от датчиков;
- согласующие усилители для преобразования входного сигнала к уровню ввода в ЭВМ;
- устройство ввода-вывода.

В процессе функционирования АСУ ТП возможны основные прерывания по приоритету низшего уровня:

1) прерывания, инициируемые оператором с целью запроса состояния системы, ввода данных, команды запуска, останова, изменения управляющей программы;

2) прерывания от самой системы для обмена данными между различными ЭВМ;

3) прерывания, назначаемые таймером для регулярной выборки данных из устройств, контролирующих параметры ТП;

4) прерывания для подачи управляющих команд на объект (ТП) в реальном масштабе времени.

Прерывания высшего уровня приоритета генерируются только самим объектом (ТП) при аварийных ситуациях.

ЭВМ нижнего уровня АСУ ТП управляет технологическим оборудованием на основании информации, содержащейся в файлах шести типов:

1) программной обработки заготовок;

2) технологических маршрутов (содержит перечень оборудования, альтернативные маршруты на случай ремонта какого-либо станка);

3) технологических параметров (производительность, точность и качество обработки и т. п.);

4) справочный файл спутников (палет);

5) файл кодов инструментов (для контроля их состояния);

6) файл срока службы инструментов (для управления сменой инструментов).

В настоящее время существует два типа управления ТП:

- логическое, когда реализуется последовательность этапов технологического цикла (включения и выключения исполнительных механизмов);

- настройка параметров ТП (производится в основном на ключевых операциях).

Автоматизированные системы управления ТП используют оба типа управления.

Принципиальные схемы АСУ ТП

Укажем две основные группы АСУ ТП, различающиеся по принципу структурирования.

1. Централизованные системы управления технологическим оборудованием (рис. 6.23, а). К ним относится двухуровневая система управления, на верхнем уровне которой располагается центральная

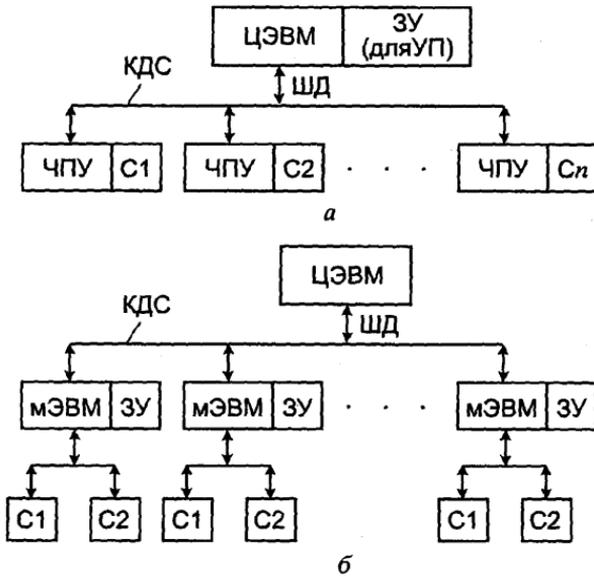


Рис. 6.23. Схемы централизованной (а) и децентрализованной (б) систем прямого цифрового управления технологическим оборудованием:
ШД — шина данных; КДС — канал дистанционной связи

ЭВМ с запоминающим устройством ЗУ большой емкости, где хранятся управляющие программы УП для станков с ЧПУ. Через цифровую шину данных ШД и канал дистанционной связи КДС ЦЭВМ соединена с ЧПУ станков С и управляет ими в реальном масштабе времени. Оператор находится в центре системы, наблюдает за ходом ТП, поддерживая нормальный режим эксплуатации оборудования.

2. Децентрализованные (распределенные) системы управления технологическим оборудованием (рис. 6.23, б). Это трехуровневые системы управления. В такой системе ЦЭВМ верхнего уровня связана с группой периферийных микроЭВМ второго уровня с буферными ЗУ. Каждая микроЭВМ управляет несколькими станками с ЧПУ (нижний уровень). Эта структура АСУ ТП обладает повышенной помехо- и отказоустойчивостью, так как при нарушении связи между ЦЭВМ и периферийной микроЭВМ последняя может работать как автономная система управления (с пониженной производительностью).

Применение микропроцессорных устройств в системах управления позволило разработать основные конфигурации управления оборудованием: машинное числовое программное управление (МЧПУ); прямое цифровое управление (ПЦУ); адаптивное управление (АДУ).

В МЧПУ вместо традиционной системы ЧПУ используется микроЭВМ, которая обеспечивает: управление станком; компенсацию отклонений в процессе обработки; диагностику состояния инструмента и ТО; редактирование управляющей программы у станка; графическое представление эквидистанты; различные типы интерполяции и др.

Системы ПЦУ, представленные на схемах систем управления с ЦЭВМ, обладают рядом преимуществ:

- исключение программносителя и фотосчитывающего устройства;
- удобное хранение управляющих программ в виде машинных файлов;
- повышенные вычислительные возможности и гибкость управления;
- связь с АСУП и возможность перехода к автоматизированным предприятиям будущего.

Адаптивные (самоприспосабливающиеся) системы управления используются в вычислительно-управляющих комплексах с измерением определенных выходных параметров и выработкой управляющих воздействий по результатам измерений (например, управление скоростью резания и подачи). При обработке резанием основными источниками изменения условий ТП являются:

- 1) переменная геометрия заготовки при обработке;
- 2) переменная твердость материала заготовки;
- 3) переменная жесткость крепления заготовки;
- 4) износ режущего инструмента, с увеличением которого АДУ снижает величину подачи;
- 5) воздушные полости в заготовке, при попадании в которые инструмента АДУ увеличивает скорость подачи.

Схема АДУ, реализующего последнее условие, представлена на рис. 6.24. Датчик Д (например, пьезоэлемент) регистрирует величину упругого отжатия инструмента (в данном случае концевой фрезы) в зависимости от глубины t резания, которая определяет скорость подачи V_n каретки станка с заготовкой З.

Адаптивные системы управления построены на основе двух принципов:

- АДУ с оптимизацией, в которой задается показатель эффективности ТП (например, производительность или затраты на единицу объема удаленного металла при резании);

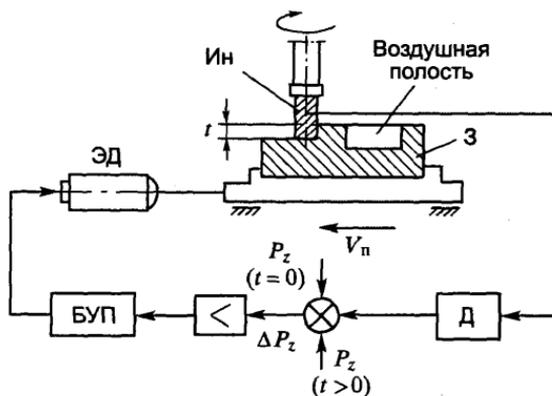


Рис. 6.24. Схема системы адаптивного управления:

P_z — составляющая силы резания; t — глубина резания; V_p — скорость подачи; 3 — заготовка; Ин — инструмент; Д — датчик; БУП — блок управления приводом подачи; ЭД — электродвигатель привода подачи

- АДУ с ограничениями, которые накладываются на измеряемые переменные. В этом случае скорость резания и подача подстраиваются так, чтобы значения переменных оставались ниже уровня заданных ограничений.

Преимущества АДУ: уменьшение времени цикла обработки (от 20 до 60 %) и увеличение срока службы инструмента.

6.8. Понятие о синтезе систем управления

При синтезе систем управления большая роль отводится вычислительной технике. Существует ряд программных пакетов, предназначенных для анализа и синтеза систем управления (СУ). В программной среде MatLab для этих целей может использоваться библиотека Control System Toolbox.

Синтез комбинационных логических схем СУ проводится на основе таблицы состояний системы, а последовательных логических схем СУ — на основе циклограмм и графов. Рассмотрим примеры синтеза СУ на основе таблицы состояний системы. Синтез СУ на основе циклограмм и графов рассмотрен в [17].

Пример 1. Дана таблица состояний, описывающая условия работы автоматического привода при различных комбинациях сигналов с трех датчиков: x_1 , x_2 , x_3 (табл. 6.7).

Таблица 6.7. Состояния автоматического привода

x_1	x_2	x_3	f
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
0	1	1	1
1	1	1	1

Для составления логического уравнения, описывающего работу привода, используем дизъюнктивную нормальную форму (ДНФ). Вычеркнем 5 верхних строчек таблицы с $f = 0$, поставим знак инверсии над аргументами $x = 0$ в строках с $f = 1$, соединим эти строки знаком дизъюнкции (+) и получим:

$$f = (x_1 x_2 \bar{x}_3) + (\bar{x}_1 x_2 x_3) + (x_1 x_2 x_3).$$

Проведем минимизацию полученной формулы аналитическим способом.

Сначала вынесем за скобки x_2 :

$$f = x_2[(x_1 x_3) + (x_1 x_3) + (x_1 x_3)],$$

затем вынесем за скобки x_3 :

$$f = x_2[(x_1 \bar{x}_3) + x_3 (\bar{x}_1 + x_1)].$$

Учитывая, что $(\bar{x}_1 + x_1) = 1$, применим к выражению в квадратных скобках распределительный закон: $(x_1 \bar{x}_3) + x_3 = (x_1 + x_3)(x_3 + \bar{x}_3)$.

Поскольку $(x_3 + \bar{x}_3) = 1$, окончательно получим:

$$f = x_2(x_1 + x_3).$$

Схема системы управления включает один элемент ИЛИ и один элемент И (рис. 6.25). Такая схема пригодна для управления, например, пневмоцилиндром, который переключается воздухораспределителем с одним электромагнитом и возвратной пружиной.

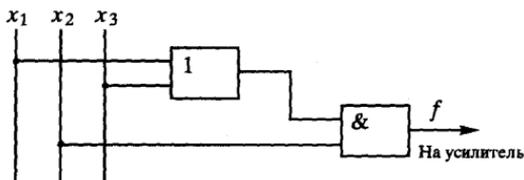


Рис. 6.25. Функциональная схема системы управления приводом на бесконтактных элементах

Пример 2. Дана таблица состояний устройства с двумя датчиками (x_1, x_2) и четырьмя приводами (y_1, y_2, y_3, y_4).

Таблица 6.8. Состояния четырех приводов

x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	y_4
0	0	0	0	0	1
1	0	0	1	1	1
1	1	1	0	1	0
0	1	0	0	1	1

Напишем логические формулы работы приводов:

для приводов y_1 и y_2 используем ДНФ:

$$y_1 = x_1 x_2; \quad y_2 = x_1 \bar{x}_2;$$

для приводов y_3 и y_4 используем конъюнктивную нормальную форму (КНФ):

$$y_3 = x_1 + x_2; \quad y_4 = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 = x_1 x_2.$$

Полученные логические формулы иллюстрирует циклограмма (рис. 6.26).

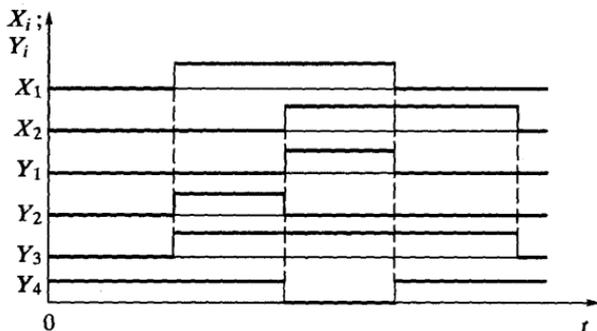


Рис. 6.26. Циклограмма работы устройства с четырьмя приводами

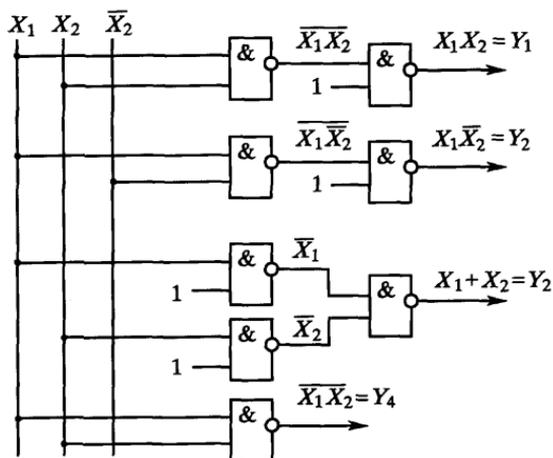


Рис. 6.27. Функциональная схема системы управления на наборе И-НЕ

Функциональная схема системы управления на наборе И-НЕ дана на рис. 6.27.

6.9. Система автоматизированного контроля и диагностирования

Для обеспечения надежного функционирования ИПС необходимо осуществлять автоматизированный контроль и диагностирование состояния основных элементов системы: режима работы оборудования и параметров ТП, качества исходных материалов, комплектующих, полуфабрикатов и готовой продукции, инструментального и программного обеспечения. Все это возлагается на систему автоматизированного контроля и диагностирования (САКД).

Структура САКД

В типовой структуре САКД можно выделить три уровня:

- верхний, обеспечивающий общий контроль и диагностирование технологических модулей производственной системы с целью координации их взаимодействия;
- средний, осуществляющий контроль и диагностирование состояния каждого конкретного модуля с набором входящих в него автоматических устройств;

- нижний, ответственный за контроль объектов обработки и сборки, инструментов и за состояние элементов технических устройств.

Место САКД в ИПС и его организационная структура показаны на рис. 6.28. В САКД поступает следующая информация: данные по результатам периодического контроля изделий (КИД) и точностных характеристик оборудования ГАП (КиД ТО); данные по состоянию и анализу отказов оборудования и вычислительного комплекса; данные о параметрах внешней среды Е (температура, влажность, запыленность); сведения от обеспечивающих подсистем ГАП о наличии запасных узлов и оборудования; новые требования от АСУП к оборудованию при изменении структуры ГАП.

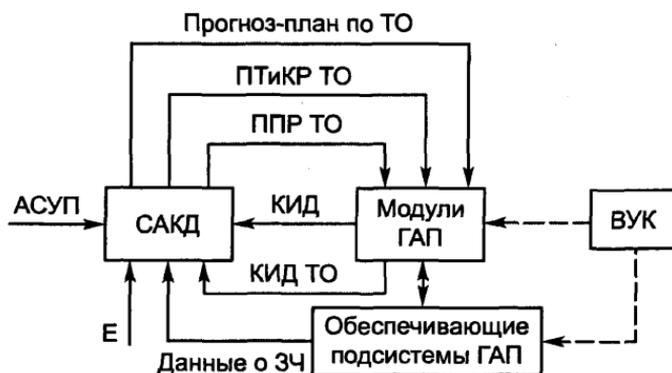


Рис. 6.28. Место САКД в ИПС и его организационная структура:
ЗЧ — запасные части

Виды технического контроля



Информация, которую выдает САКД: план профилактического ремонта оборудования (ППР ТО); план текущего и капитального ре-

монта оборудования (ПТиКР); анализ и прогнозирование состояния оборудования; прогноз на приобретение нового и модернизации существующего оборудования.

Виды контроля технологического процесса: непрерывный, периодический, регистрационный.

6.10. Контроль качества продукции

Контроль качества продукции бывает: входной (исходные материалы, сырье, комплектующие), операционный (по ходу ТП), приемочный (ОТК).

Основные принципы операционного контроля: **недоверия** (перепроверки), когда на входе последующей операции контролируются все параметры изделия; **уточнения**, на входе контролируется часть параметров, определяющих качество изделия; **доверия**, когда контроль параметров на входе следующей операции исключается.

Под контролем качества продукции понимается проверка соответствия показателей качества требованиям Государственного стандарта. Интегральным показателем качества является коэффициент

$$K = \frac{C}{3},$$

где C — потребительская стоимость продукции;

3 — затраты на выпуск продукции.

Точность систем автоматического контроля оценивается абсолютной и относительной погрешностью измерительных устройств (приборов).

Абсолютная погрешность измерения параметра:

$$\Delta A = A_{\text{и}} - A,$$

где $A_{\text{и}}$ — показания измеряющего прибора;

A — заданное (истинное) значение параметра.

Относительная погрешность:

$$\epsilon = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100 \% \text{ или } \epsilon \approx \frac{\Delta A}{A_{\text{и}}} \cdot 100 \%,$$

так как $A = A_{\text{и}} - \Delta A$, где малой величиной ΔA пренебрегаем.

Кроме названных погрешностей, в технике измерений используется также понятие приведенной относительной погрешности:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{\Delta A}{A_{\text{м}}} \cdot 100 \%,$$

где $A_{\text{м}}$ — максимально допустимое значение контролируемого параметра.

По величине $\varepsilon_{\text{п}}$ определяется класс точности измерительного прибора.

Например, если $\varepsilon_{\text{п}} = 2,5 \%$, то класс точности прибора — 2,5.

Обобщенный алгоритм контроля параметра объекта обработки и сборки имеет вид:

Восприятие → Распознавание → Измерение →
→ Сравнение с нормой → Принятие решения.

По результатам контроля осуществляется управление технологическим процессом (подстройка ТП и оборудования за счет коррекции режимов) и разбраковка продукции на две группы: «годен—брак».

Выделим виды контроля по воздействию на предмет обработки: активный и пассивный, прямой и косвенный, контактный и бесконтактный. Активный контроль проводится в процессе обработки заготовки или сразу после ее окончания, что позволяет своевременно провести подналадку станка. Пассивный контроль проводится после обработки всей партии заготовок, а затем выполняется подналадка станка, которая уже не может устранить брак.

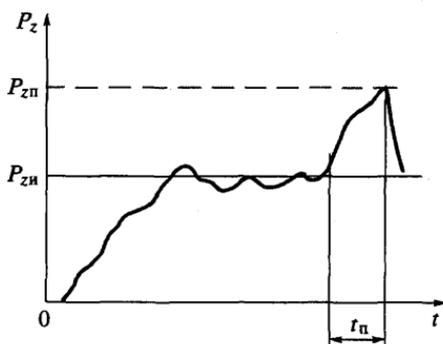


Рис. 6.29. Схема косвенного метода контроля затупления и поломки инструмента: $P_{зи}$ — усилие резания при предельном износе (затуплении) инструмента; P_{zp} — то же при поломке инструмента; t_n — момент поломки

Косвенные методы контроля применяются в случаях, когда прямые методы не доступны или технически затруднены (например, измерение режущей кромки инструмента или ее смещения по мере затупления). Прямой контроль затруднен из-за стружки и СОЖ, а также нароста, образующегося на режущей кромке. Примеры косвенных методов: контроль силы резания P_2 путем измерения величины деформации элементов станок—приспособление—инструмент—деталь, например, с помощью тензодатчика (рис. 6.29); контроль изменения потребляемой главным приводом станка мощности N при затуплении или поломке инструмента.

Контактные методы контроля параметров

Для контроля параметров деталей на автоматизированных участках механообработки используются выносные посты на базе координатно-измерительной машины (КИМ), которая оснащена трехкоординатной измерительной головкой фирмы «Ренишоу» (Англия), фирмы Оптон (Италия) и др. Измерительная головка со сферическим щупом позволяет контролировать методом касания линейные размеры, форму и взаимное расположение плоскостей заготовки с точностью ± 5 мкм. По результатам измерения ЧПУ станка (или управляющая ЭВМ) формирует сигнал коррекции положения инструмента или нулевых точек обработки. Среднее время контроля на КИМ составляет 5...10 % времени от ручного контроля при постоянстве условий контактирования. Недостаток данной системы контроля — многократное транспортирование заготовки к посту КИМ. Альтернативным решением может быть установка измерительной головки в шпинделе станка.

Пример контактной измерительной головки на базе мехатронного датчика показан на схеме измерения диаметра d детали (рис. 6.30).

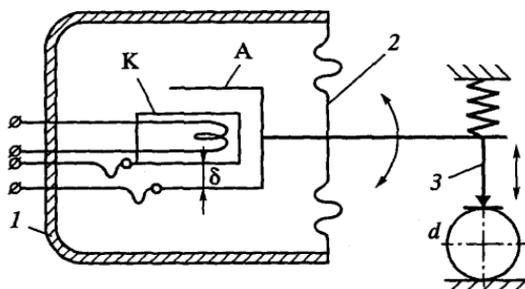


Рис. 6.30. Схема контактной измерительной головки на базе мехатронного датчика: 1 — баллон электровакуумного диода; 2 — диафрагма диода; 3 — щуп на упругой пластине; А — анод; К — катод с подогревом; δ — зазор между катодом и анодом

При изменении диаметра детали (следовательно, положения щупа) изменяется зазор δ между катодом и анодом диода и, как следствие, величина тока I , протекающего через диод. Это изменение регистрируется и трансформируется в показания прибора. Точность мехатронного датчика: $\pm 0,5$ мкм.

Благодаря простоте и низкой стоимости в промышленности широко используются контактные пары для определения момента поломки инструмента типа сверла, метчика и т. п. (рис. 6.31).

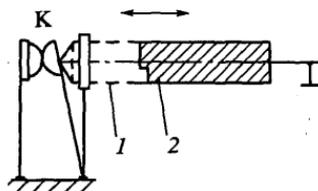


Рис. 6.31. Схема контроля целостности сверла с помощью контактной пары К:
1 — цельное сверло; 2 — сломанное сверло

Бесконтактные методы контроля параметров

Важным достоинством бесконтактных методов является возможность реализации на их основе принципа неразрушающего контроля.

Рассмотрим на примерах некоторые из этих методов.

Основу индуктивного метода контроля целостности инструмента составляет измерительный мост с эталонной катушкой индуктивностью L_3 (полное сопротивление Z_3) и измерительной катушкой L_n (Z_n) в зоне инструмента (рис. 6.32).

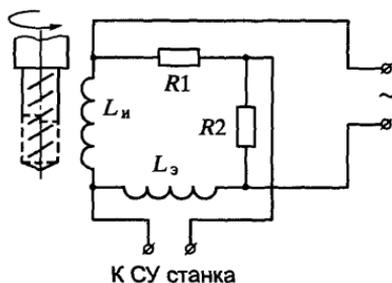


Рис. 6.32. Схема индуктивного метода контроля целостности инструмента

При цельном инструменте индуктивности равны $L_n = L_3$ и ток в измерительном мосту равен $I = 0$, а при поломке инструмента ток $I > 0$. Эта информация попадает в систему управления СУ станка, которая вырабатывает сигнал останова системы для замены инструмента.

Пневматический метод контроля линейных размеров с помощью датчика «сопло—заслонка» в принципе может быть использован и для

контроля качества поверхности деталей. При измерении, например, высоты h детали с изменением h меняется зазор δ между измерительным соплом 1 и поверхностью детали 4 и, следовательно, расход воздуха через сопло (рис. 6.33, *a*).

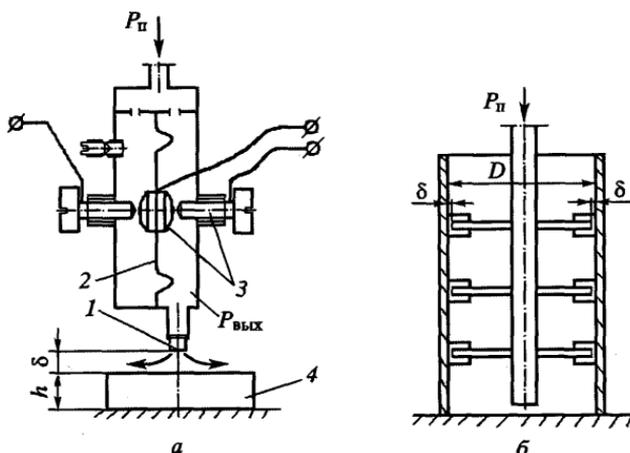


Рис. 6.33. Схемы контроля линейных размеров деталей с помощью пневматического датчика «сопло—заслонка»:

a — контроль высоты h детали; *b* — контроль внутреннего диаметра D гильзы (или цилиндра) ДВС

При уменьшении зазора δ возрастает давление $P_{\text{вых}}$, что вызывает прогиб диафрагмы 2 пневмоэлектрического преобразователя и замыкание контактов 3 . Сигнал через усилитель поступает в систему управления. Измерение внутреннего диаметра гильзы проводится одновременно в трех уровнях датчиком со сдвоенными соплами (рис. 6.33, *b*).

Из оптических достаточно широко применяются методы на базе фотоэлектрического датчика, лазерного луча и твердотельных камер технического зрения. Контроль размеров деталей с помощью фотоэлектрического датчика основан на изменении светового потока $\Delta\Phi$, вызывающего изменение силы тока ΔI в цепи фоторезистора (рис. 6.34). Ток пропорционален величине светового потока $\Delta I \sim \Delta\Phi$, где $\Delta I = I - I_0$; I_0 — темновой ток, когда фоторезистор не освещен. Контролируемая деталь диафрагмирует световой поток, изменяя тем самым величину силы тока в цепи.

Схема контроля размеров методом сканирования детали лазерным лучом показана на рис. 6.35, *a*.

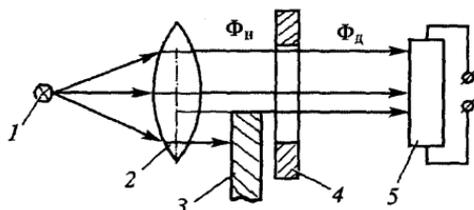


Рис. 6.34. Схема контроля линейных размеров деталей с помощью фотоэлектрического датчика:

1 — источник света; 2 — линза; 3 — деталь; 4 — диафрагма; 5 — фоторезистор; Φ_n , Φ_d — световой поток начальный и после диафрагмы соответственно

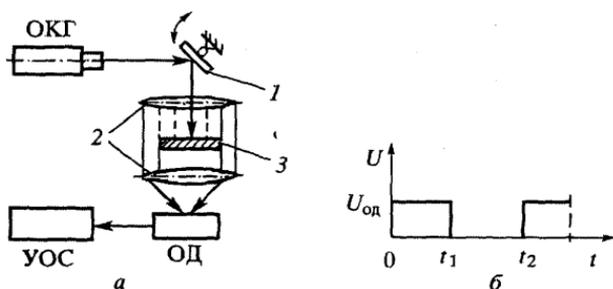


Рис. 6.35. Схема контроля детали сканированием лазерным лучом (а) и диаграмма изменения напряжения на оптическом детекторе ОД (б):

ОКГ — оптический квантовый генератор (лазер); УОС — устройство обработки сигнала; 1 — поворотное зеркало; 2 — линза; 3 — контролируемая деталь

Время $\Delta t = t_2 - t_1$ перекрытия деталью лазерного луча пересчитывается в размер l_d по формуле

$$l_d = v_c \Delta t,$$

где $v_c = \text{const}$ — скорость сканирования (скорость качания зеркала).

Время Δt на диаграмме соответствует отсутствию напряжения на оптическом детекторе (светочувствительном элементе) (рис. 6.35, б). Программа пересчета Δt хранится в ЭВМ.

6.11. Принципы технического диагностирования

Процедура диагностирования объекта включает два этапа: проверка его работоспособности и поиск дефекта. Поэтому основной задачей технического диагностирования (ТД) является поддержание работоспособности объекта путем своевременного распознавания отказов и устранения причин их появления.

По характеру взаимодействия объекта и технических средств можно назвать два метода ТД:

- 1) функционального диагностирования;
- 2) тестового диагностирования.

Первый метод основан на пассивном наблюдении за функционированием объекта и оценке его состояния по диагностическим признакам (например, уровень температуры, шумов или вибрации, величина потребляемой энергии, время выполнения цикла).

Второй метод предусматривает формирование специального воздействия, стимулирующего у объекта ответную реакцию, которая сравнивается с эталонной (активный эксперимент). Роль стимулирующего воздействия выполняют ступенчатые, импульсные, гармонические и другие сигналы.

В качестве диагностических показателей используются параметры динамических звеньев, коэффициенты уравнений, обобщенные параметры.

Типовой алгоритм системы поддержания работоспособности объекта (СПРО) имеет вид:

- сбор информации;
- оценка информации и выявление отклонений показателей от нормы;
- определение причины отклонения;
- принятие решения и выработка корректирующего воздействия (КВ);
- ввод КВ в систему с целью ликвидации отклонения.

Первые два этапа — операции контроля, третий — диагностирование.

Эксплуатируемый объект (система) подвержен как внезапным (случайным), так и постепенным (износ, старение) отказам. Если состояние объекта характеризовать обобщенным выходным параметром P_p , то в случае внезапного отказа P_p принимает лишь два значения: $P_p = P_n$ (норма) или $P_p = P_{от}$ (отказ) (рис. 6.36). В случае постепенных отказов P_p принимает несколько значений:

$$\text{зона нормы} \quad \min P_3 \leq P_p \leq \max P_3;$$

$$\text{зона риска} \quad \min P_{пр} \leq P_p \leq \min P_3 \\ \max P_3 \leq P_p \leq \max P_{пр};$$

$$\text{зона отказа} \quad \max P_{пр} \leq P_p \leq \min P_{пр};$$

где P_3 , $P_{пр}$ — эталонное и предельное значения параметра P_p .



Рис. 6.36. Зоны работоспособности технической системы (объекта):

P_r — обобщенный показатель системы; $P_э$ — эталонное значение P_r ; $P_{пр}$ — предельное значение P_r

В качестве параметра P_r используют различные технические характеристики: температура, размер объекта, величина износа узла (или инструмента), сигнал конечного выключателя и т. п. В случае постепенных отказов можно реализовать мероприятия по предотвращению отказа, если вовремя зафиксирован переход параметра P_r от нормы в зону риска.

В информационной структуре системы поддержания работоспособности объекта (рис. 6.37) можно выделить следующие подсистемы: контроля (ПСК), диагностирования (ПСД) и принятия решений (ПСПР). Информация об объекте управления (ОУ) от датчиков контроля (ДК) поступает на вход ПСК, которая обрабатывает ее, рассчитывает значения обобщенного параметра P_r и сравнивает их с эталонным. По результатам сравнения ПСК формирует сигнал об отклонении P_r от нормы, который подается в зависимости от ситуации в систему программного управления (СПУ) или в ПСПР. В случае уг-

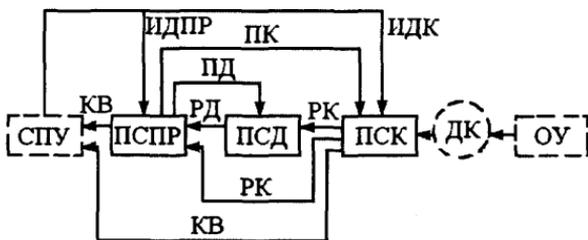


Рис. 6.37. Информационная структура системы поддержания работоспособности объекта:

ПК, ПД — программы контроля и диагностирования соответственно; РК, РД — результаты контроля и диагностирования; ИДК — исходные данные для контроля; ИДПР — исходные данные для принятия решений

розы аварийной ситуации СПУ вырабатывает блокировочный сигнал останова системы для ремонта. При отсутствии угрозы аварии ПСПР вырабатывает корректирующее воздействие (КВ), которое передается в СПУ для осуществления подналадки системы.

Диагностирование оборудования

В технических средствах АСУ реализуется концепция функционального самоконтроля с определением состояния отказа и поиска неисправности (рис. 6.38). На схеме отказоустойчивой подсистемы АСУ блоки 1, 3, 4 представляют подсистему обеспечения безотказной работы диагностируемого блока 2.

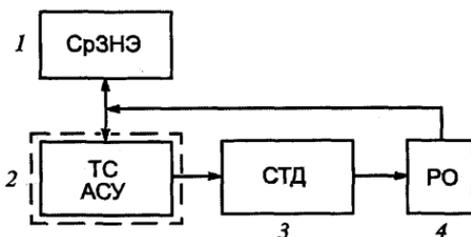


Рис. 6.38. Схема отказоустойчивой подсистемы АСУ:

СрЗНЭ — средства замены неисправного элемента; ТС — технические средства; СТД — средства тестовой диагностики; РО — решающий орган (машина или человек)

Процесс диагностирования технологического оборудования рассмотрим на примере станка с ЧПУ в составе ГПМ (рис. 6.39).

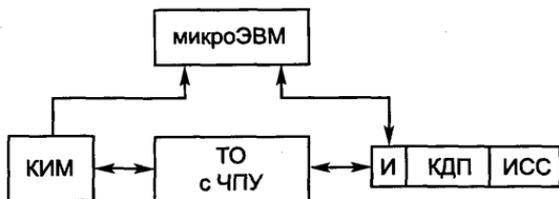


Рис. 6.39. Схема информационных связей системы диагностирования станка (ТО) с ЧПУ в составе ГПМ:

КИМ — контрольно-измерительная машина; И — интерфейс; КДП — контрольно-диагностический пульт; ИСС — индикатор состояния станка

В процессе эксплуатации станка применяются следующие режимы диагностирования:

- непрерывное (например, температура в блоке ЧПУ или масла в гидросистеме);

- периодическое с повышенной частотой (например, давление в системе централизованной смазки, усилие зажима каждой заготовки, точность обработки);
- периодическое с меньшей частотой (например, раз в смену или после обработки партии заготовок определяется кинематическая точность и жесткость станка);
- по требованию (проводит оператор в зависимости от конкретной ситуации).

Структура информационных связей системы диагностирования станка с ЧПУ (см. рис. 6.39) показывает, что от ЭВМ верхнего уровня в ЧПУ поступают тест-программы и алгоритм диагностирования. От контрольно-измерительной машины (КИМ) передается информация по точности обработки заготовок, а от подсистем диагностирования станка — обобщенная оценка технического состояния исполнительных механизмов станка и фактической длительности цикла. По результатам тестирования станок выдает оперативную информацию в ЭВМ через КИМ, а также на контрольно-диагностический пульт (КДП) и индикатор состояния станка (ИСС).

Для выполнения сложных операций диагностирования оборудования используют специальные средства, которые монтируют на передвижной установке, связанной с ЭВМ верхнего уровня. Специальная установка позволяет проводить анализ технических характеристик станка, в частности точности позиционирования и обхода контура заготовки, точности геометрических параметров станка, жесткости кинематических пар и т. п. Специальные средства и ЭВМ в принципе позволяют решать задачу прогнозирования надежности функционирования станка.

Диагностирование режущего инструмента

Существует несколько различных методов и устройств автоматической оценки работоспособности режущего инструмента. Рассмотрим один из универсальных методов, основанный на анализе амплитуды виброакустического сигнала (A) и амплитуды ЭДС сигнала (E), генерируемых в зоне контакта инструмента с заготовкой (рис. 6.40).

Значение E сигнала снимается с резца и заготовки, а привязка сигнала по угловой координате производится с помощью датчика угла ДУ, который запускает систему измерения от синхроимпульса СИ.

Сигналы A и E через усилители $У1$ и $У2$ поступают на 6 полосовых фильтров $f_1—f_6$, а затем через коммутатор аналоговых сигналов КАС и АЦП попадают в ЭВМ для построения показателя затупления инст-

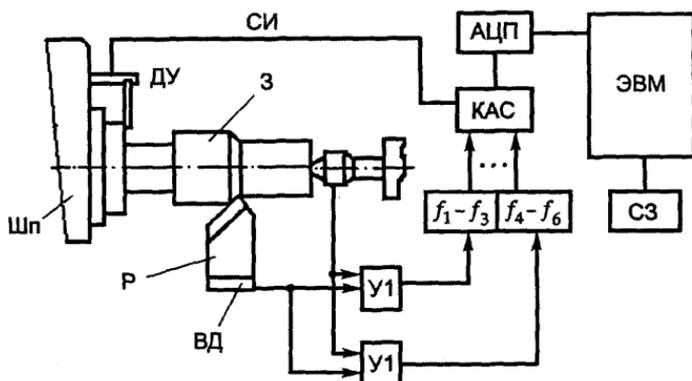


Рис. 6.40. Схема диагностирования состояния режущего инструмента на основе анализа виброакустического (A) и ЭДС (E) сигналов, генерируемых в процессе резания: СИ — синхросигнал; ДУ — датчик угла поворота заготовки; ВД — вибродатчик; КАС — коммутатор аналоговых сигналов; СЗ — сигнализатор затупления; У1, У2 — усилители ЭДС резания; f_1-f_6 — селективные фильтры; Шп — шпиндель; З — заготовка; Р — резец

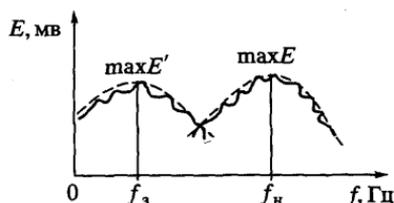


Рис. 6.41. График изменения частотного спектра E сигнала по мере затупления инструмента:
 f_n — частота начального периода резания; f_3 — частота предельного затупления инструмента

румента, в качестве которого служит изменение формы частотного спектра сигнала E (рис. 6.41).

При частоте f_n (начальный периода резания) амплитуда сигнала E_{\max} огибающей кривой спектра соответствует образу острого инструмента, а по мере его затупления E_{\max} сдвигается в область более низких частот $f_3 < f_n$ (E_{\max}). Когда достигается предельное значение f_3 , ЭВМ выключает станок и происходит замена инструмента.

Диагностирование исполнительных механизмов оборудования

Решение задачи диагностирования исполнительных механизмов неразрывно связано с особенностями структуры электроприводов и кинематических схем технологического оборудования. Например,

широко применяемый регулируемый электропривод подач для станков с ЧПУ содержит два замкнутых контура подчиненного регулирования: по току и по скорости. Датчики обратной связи по току и по скорости используются в качестве источника информации о состоянии электродвигателя. Кроме этих датчиков дополнительно можно использовать датчик путевого контроля (ДПК), который позволяет контролировать и механическую передачу электропривода. Когда обратная связь с ДПК полностью охватывает передачу от двигателя до рабочего органа станка, то можно контролировать состояние передачи (рис. 6.42). Датчик, связанный непосредственно с конечным звеном кинематической цепи, позволяет контролировать не только величину люфта, но и прогнозировать предельный износ механической передачи. В случае отсутствия указанной обратной связи такой контроль невозможен.

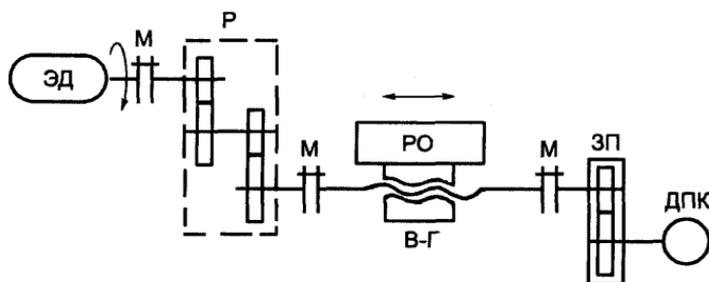


Рис. 6.42. Схема размещения датчика путевого контроля в кинематической цепи станка с полным охватом механической передачи:

М — муфта; Р — редуктор; РО — рабочий орган станка; В-Г — тяговая пара винт—гайка; ЗП — зубчатая передача

Диагностирование печатных узлов системы управления

Системы управления на базе ЧПУ и управляющих ЭВМ состоят из отдельных функциональных блоков, в каждом из которых размещаются стандартные печатные платы (ПП). При диагностировании устройств ЧПУ и управляющих ЭВМ предпочтение отдается методу тестового контроля с локализацией неисправности до печатной платы. Диагностирование блоков систем управления в цеховых условиях проводится с помощью передвижного контрольного поста, а диагностирование ПП с локализацией дефекта до типового элемента замены ТЭЗ (например, ИМС, транзистора и т. п.) осуществляется на стационарном посту (рабочее место ремонтника).

При диагностировании электронных печатных узлов широко применяется принцип раскрутки (расширяющихся областей), когда заведомо исправное диагностическое ядро и аппаратура используются для диагностирования очередной (прилегающей) области узла. Диагностическое ядро и средства тестовой диагностики выполняют следующие функции: загрузки диагностической информации; подачи тестовых воздействий на вход проверяемого блока; опроса ответов с его выхода; сравнения ответов с эталонными значениями; анализа и индикации результатов.

Диагностирование ПП производится до и после монтажа радиоэлементов, и по результатам альтернативного контроля установка определяет неисправный элемент и производит разбраковку плат на две группы: «годен—брак». При индексации группы «брак» формируется диагностический файл с указанием характера неисправности. Для короткого замыкания КЗ и обрыва проводника ОПР выдаются номера точек на ПП до монтажа, а для неисправного радиоэлемента после монтажа — его тип и номинал. В процессе работы установки производится самоконтроль системы диагностирования с помощью эталонной печатной платы и специальной программы.

При подключении к ПП специального контактирующего устройства КУ на плате одновременно контролируется 1024 точки (рис. 6.43).

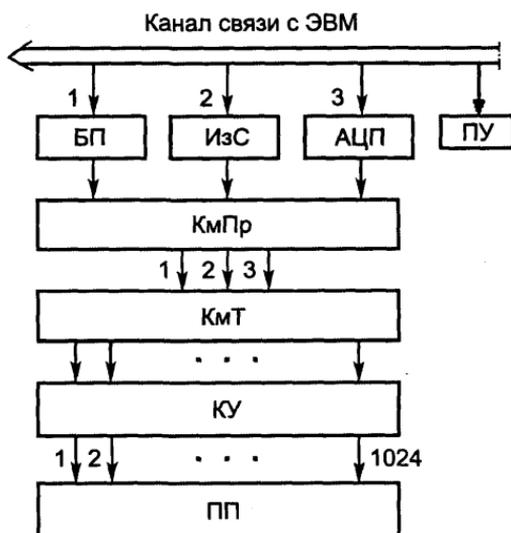


Рис. 6.43. Схема диагностирования печатных плат с помощью одновременного контроля 1024 точек

Установка диагностирования, кроме ЭВМ, содержит измерительную систему ИзС; АЦП; блок питания БП; пульт управления ПУ; коммутатор приборов КмПр, через который информация передается в ИзС; коммутатор точек КмТ, через который ведется программирование порядка подключения элементов на плате; контактирующее устройство. Соответствие между номерами выходных контактов КмТ и номерами радиоэлементов на ПП задается распайкой адаптера КУ. Тест диагностирования предусматривает выдачу команд управления на оба коммутатора, БП и ИзС.

В процессе контроля управляющая программа проверяет правильность передачи информации через КмПр в измерительную систему ИзС и сохранность ее после окончания теста. При сбое в работе ИзС тест повторяется, а при повторном сбое выдается соответствующий диагноз. Тест контроля предусматривает: выдачу команд управления на КмТ, КмПр, БП и ИзС; запуск БП и ИзС по определенной программе; прием с АЦП цифрового значения параметра и его обработку (испытательная программа ИП представляет собой последовательность тестов контроля «ОПр», «КЗ» и радиоэлементов). Схема алгоритма управления контролем и диагностирования неисправностей ПП показана на рис. 6.44.

Структура тестов контроля радиоэлементов отличается от структуры тестов контроля монтажа ПП. Цепи монтажа, образуемые точками с соответствующими номерами, можно представить в виде линий и замкнутых контуров. Тест контроля обрывов записывается как перечисление номеров точек линейной цепи или контура. В каждой цепи выбирается одна активная точка, и запись теста КЗ представляет собой перечисление номеров активных точек, причем в одном тесте записываются активные точки, подключаемые к разным платам КУ коммутатора точек. Такая запись тестов КЗ и ОПр упрощает структуру испытательных программ.

Обнаружение КЗ осуществляется выдачей тестов на точки, найденные методом половинного деления. Например, пусть тест КЗ включает точки 1, 2, ..., N . Сначала проверяется наличие КЗ между точками 1 и 2, 3, ..., N , а при отсутствии неисправности — между 2 и 3, 4, ..., N . При наличии неисправности последовательность точек 2, 3, ..., N делится пополам и проверяется КЗ между точками 1 и 2, 3, ..., $(N - 1)/2$ и т. д. Этот метод половинного деления сокращает число выдаваемых тестов в среднем на 30 % (по сравнению с тестированием каждой пары точек). Метод применим и для обнаружения ОПр. Однако в этом случае отсутствие какого-либо контакта адаптера с ПП

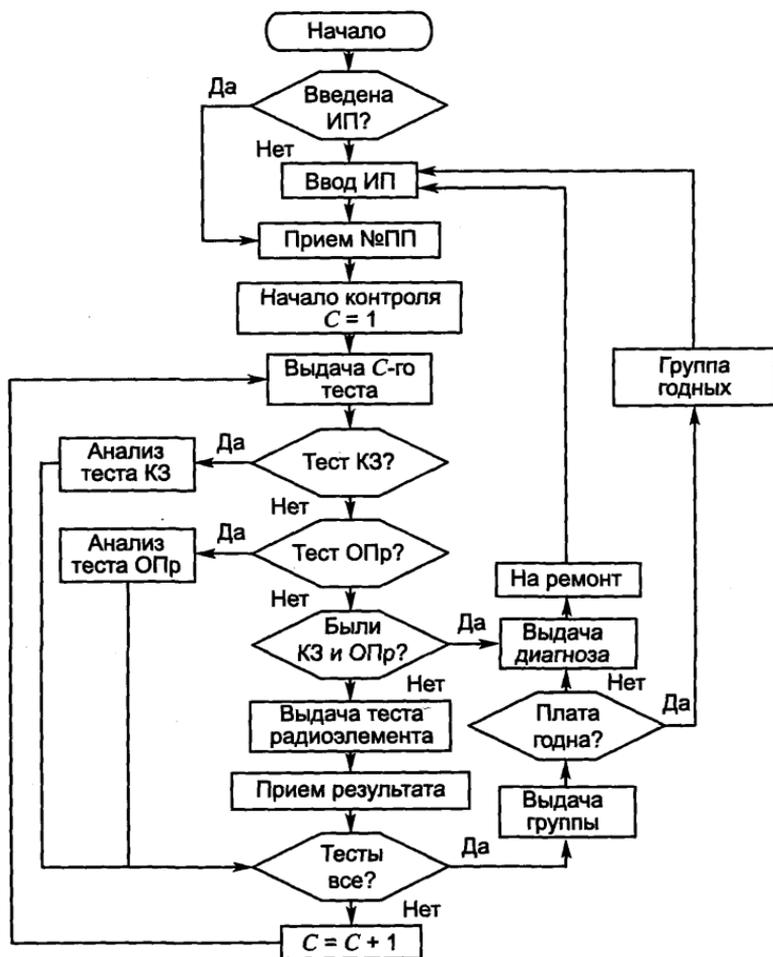


Рис. 6.44. Схема алгоритма управления контролем и диагностированием неисправностей печатных плат

приводит к неверному результату при измерении параметров радиоэлементов. Поэтому необходимо выдавать отдельные тесты для каждой пары точек последовательности 1, 2, 3, ..., N . Точность диагностирования ОПр и неконтактов обеспечивается рядом тестов, позволяющих проанализировать результаты предыдущих тестов.

Библиографический список

1. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник: в 2 т. / А.Г. Схиртладзе, В.Н. Воронов, В.П. Борискин. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2007. Т. 1, 2.
2. Автоматическая загрузка технологических машин: справочник / И.С. Бляхеров, Г.М. Варьяш, А.А. Иванов [и др.]; под общ. ред. И.А. Клусова. М.: Машиностроение, 1990.
3. Автоматические линии в машиностроении: справочник: в 3 т. Т. 3. Комплексные автоматические линии и участки / под ред. А.И. Дашенко, Г.А. Навроцкого. М.: Машиностроение, 1985.
4. *Батищев Д.И.* Методы оптимального проектирования: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1984.
5. *Беллман Р.* Динамическое программирование. М.: Мир, 1978.
6. *Брюханов В.Н., Схиртладзе А.Г., Вороненко В.П.* Автоматизация производства: учебник / под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Высш. шк., 2005.
7. Гибкие сборочные системы / под ред. У.Б. Хегинботама. М.: Машиностроение, 1988.
8. Гибкие производственные комплексы / под ред. П.Н. Белянина, В.А. Лещенко. М.: Машиностроение, 1984.
9. *Гмурман В.Е.* Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. М.: Высшая школа, 1975.
10. *Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д.* Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1965.
11. *Иванов А.А.* Автоматизированные сборочные системы: учебник. Н. Новгород: НГТУ, 2007.
12. *Иванов А.А.* Гибкие производственные системы в приборостроении. М.: Машиностроение, 1988.
13. *Иванов А.А., Москвичев А.А., Кварталов А.Р.* Проектирование нестандартного автоматического оборудования: учеб. пособие. Н.Новгород: НГТУ, 2004.
14. *Иванов А.А., Москвичев А.А., Лахонин А.Н.* Автоматизация материальных потоков в интегрированных производственных системах: учеб. пособие. Н.Новгород: НГТУ, 2003.

15. *Иванов А.А.* Моделирование и оптимизация в интегрированных производственных системах: учеб. пособие / А.А. Иванов [и др.]. Н.Новгород: НГТУ, 2000.

16. *Иванов А.А., Кретинин О.В., Москвичев А.А.* Планирование эксперимента и математические методы обработки экспериментальных данных: учеб. пособие. Н.Новгород: НГТУ, 2004.

17. *Иванов А.А., Кудрявцев С.А., Торохов С.Л.* Основы автоматизации управления: учеб. пособие. Н.Новгород: НГТУ, 2006.

18. *Иванов А.А., Москвичев А.А., Кварталов А.Р.* Интегрированные производственные системы. Автоматизация информационных потоков: учеб. пособие. Н.Новгород: НГТУ, 1997.

19. *Каплун В.Д., Поклонский Н.В., Трунилин В.А.* Основные организационно-технические аспекты создания ГПК для ГАП сборки печатных узлов // Средства связи. 1985. № 3. С. 39.

20. *Козырев Ю.Г.* Промышленные роботы: справочник. М.: Машиностроение, 1988.

21. *Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Милляр Л.В.* Теория расписаний. М.: Наука, 1975.

22. *Коршунов Ю.М.* Математические основы кибернетики: учеб. пособие для вузов. М.: Энергия, 1980.

23. *Кошкин Л.Н.* Роторные и роторно-конвейерные линии. М.: Машиностроение, 1986.

24. Промышленные роботы для миниатюрных изделий / Р.Ю. Бансявичус, А.А. Иванов, Н.И. Камышный [и др.]; под ред. В.Ф. Шаньгина. М.: Машиностроение, 1985.

25. *Саломатин Н.А.* Имитационное моделирование в оперативном управлении производством / Н.А. Саломатин и др.. М.: Машиностроение, 1984.

26. Численные методы линейного программирования / под ред. Л.В. Канторовича. М.: Наука, 1977.

27. *Шишмарев В.Ю.* Автоматизация технологических процессов: учеб. пособие. М.: Академия, 2005.

Оглавление

Список принятых сокрещений	3
Введение	6
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА	8
1.1. Понятие интегрированной производственной системы	8
1.2. Схемы материальных и информационных потоков ИПС	13
1.3. Концепция комплексной автоматизации в массовом производстве	16
1.4. Концепция комплексной автоматизации в мелкосерийном производстве	20
1.5. Организационно-технологические основы комплексной автоматизации массового и мелкосерийного производства ..	26
1.6. Проектирование автоматизированного технологического процесса	30
1.7. Оценка накопленной погрешности при проектировании автоматизированного технологического процесса	33
1.8. Метод сетевого планирования и управления сложными работами-проектами	37
Глава 2. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВ	42
2.1. Производительность технологических машин, комплексов и линий	42
2.2. Надежность технических систем	47
2.3. Уровень автоматизации, технологическая гибкость и другие характеристики технических систем	55
2.4. Экономическая оценка автоматизированных систем	57

Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	60
3.1. Основные понятия	60
3.2. Имитационное моделирование объектов автоматизированного производства с использованием сетей Петри	63
3.3. Имитационное моделирование объектов автоматизированного производства на основе теории массового обслуживания	68
3.4. Вывод основных уравнений системы массового обслуживания	71
3.5. Виды систем массового обслуживания	76
3.6. Пример моделирования технической системы по параметру надежности	78
3.7. Моделирование системы массового обслуживания с использованием метода статистических испытаний	81
Глава 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ	85
4.1. Задачи оптимизации	85
4.2. Оптимизация задачи многостаночного обслуживания	86
4.3. Оптимизация многоканальной СМО с ожиданием по числу каналов обслуживания	91
4.4. Оптимизация ИПС по производительности	94
4.4.1. Оптимальное расписание при последовательной обработке заготовок на поточной линии	94
4.4.2. Оптимальное расписание при параллельной обработке заготовок без переналадки станка	96
4.4.3. Оптимальное расписание при обработке заготовок с переналадкой станка	99
4.5. Оптимизация использования ресурсов предприятия методом линейного программирования	105
4.5.1. Геометрическая интерпретация задачи линейного программирования	107
4.5.2. Симплекс-метод	108
4.6. Оптимизация задачи распределения грузов с помощью метода потенциалов	111
4.7. Оптимизация управления технологическим процессом	116

Глава 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ИПС	121
5.1. Выбор основного и вспомогательного оборудования ИПС	121
5.2. Система инструментального обеспечения	128
5.3. Автоматические системы поиска и доставки инструмента в шпиндель станка	134
5.4. Системы комплектной замены инструментов	141
5.5. Транспортно-накопительная система гибкого автоматизированного производства	143
5.6. Непрерывный и дискретный транспорт	145
5.7. Автоматические склады	149
5.8. Расчет параметров автоматических складов	155
Глава 6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ИПС	158
6.1. Система автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов	158
6.2. Информационно-программное обеспечение САПР	164
6.3. САПР конструктора	171
6.4. САПР технолога	178
6.5. Автоматизированная система управления	182
6.6. Автоматизированная система управления производством ..	189
6.7. Автоматизированная система управления технологическими процессами	194
6.8. Понятие о синтезе систем управления	199
6.9. Система автоматизированного контроля и диагностирования	202
6.10. Контроль качества продукции	204
6.11. Принципы технического диагностирования	209
Библиографический список	219

Иванов Анатолий Андреевич

Автоматизация технологических процессов и производств

Учебное издание

*Издание не подлежит маркировке
в соответствии с п. 1 ч. 4 с. 11 ФЗ № 436-ФЗ*

Редактор *А.А. Чихалкин*
Корректор *О.Н. Картамышева*
Компьютерная верстка *И.В. Кондратьевой*
Оформление серии *П. Родькина*

Подписано в печать 11.11.2015. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 14,0. Уч.-изд. л. 14,5.
Печать цифровая. Бумага офсетная. Доп. тираж 100 экз.
Заказ № 11451.

ООО «Издательство «ФОРУМ»
107023, Москва, ул. Измайловский Вал, д.30, стр.4.
Тел.: (495) 963-18-55, (499) 785-02-43
E-mail: forum-knigi@mail.ru
<http://www.forum-books.ru>

Отдел продаж издательства «ФОРУМ»:

107023, Москва, ул. Измайловский Вал, д.30, стр.4.
Тел.: (495) 963-18-55.
E-mail: forum-ir@mail.ru
www.forum-books.ru

*Книги издательства «ФОРУМ»
вы также можете приобрести:*

ЦАНА 17-28

Отдел продаж «ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Поляная, д.31В, стр.1
Тел.: (495) 280-15-96. Факс: (495) 280-36-29

Отдел «Книга-почтой»
E-mail: podpiska@infra-m.ru;
books@infra-m.ru