ДЛЯ ВУЗОВ

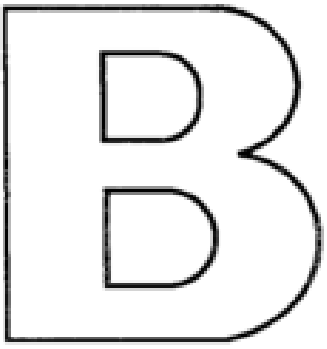
Л.И. Волчкевич

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Светлой памяти моего Учителя
Григора Арутюновича Шаумяна
ПОСВЯЩАЮ
Главную книгу моей жизни

621.52
В-67



ДЛЯ ВУЗОВ

Л.И. Волчкевич

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Допущено УМО по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 651600 «Технологические машины и оборудование» специальности 120900 «Проектирование технических и технологических комплексов»



МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
2005

УДК 681.5
ББК 32.965 я 73
В67

Волчкевич Л.И.

В67 Автоматизация производственных процессов: **Учеб. пособие.** М.: Машиностроение, 2005. 380 с.: ил.

ISBN 5-217-03246-4

Пособие призвано дать будущим инженерам-машиностроителям комплекс знаний и умений по трем квалификационным уровням: 1) общей эрудиции, знанию материальной части; 2) вариантности технических решений, их сравнительному анализу и оценке; 3) синтезу технических решений, расчету и проектированию. Особое внимание обращено на выбор оптимальных структурно-компоновочных решений при проектировании машин-автоматов и их систем на этапе технического предложения.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению 651600 "Технологические машины и оборудование" специальности 120900 "Проектирование технических и технологических комплексов", может быть полезна инженерно-техническим работникам промышленных предприятий.

УДК 681.5
ББК 32.965 я 73

ISBN 5-217-03246-4

© Волчкевич Л.И., 2005
© Издательство "Машиностроение", 2005

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 8
Глава 1. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ АВТОМАТИЗАЦИЯ 11
1.1. Бизнес-процессы в сфере материального производства 11
1.2. Технологии материального производства 13
1.3. Принципы автоматизации производственных процессов. Вопросы технической политики 24
1.4. Ступени автоматизации производственных процессов 27
1.5. Общность машин-автоматов различного технологического назначения 45
1.6. Системы автоматического управления 52
1.7. Вариантность технических решений при автоматизации. Критерии сравнительной оценки 64
Глава 2. ЭКОНОМИКА АВТОМАТИЗАЦИИ 75
2.1. Инженерные подходы к экономическим оценкам вариантов технических решений 75
2.2. Взаимосвязь технических и экономических показателей 83
2.3. Факторный анализ показателей экономической эффективности автоматизации 86
2.4. Технико-экономические допуски 94
2.5. Пути повышения экономической эффективности новой техники – пути автоматизации 98
Глава 3. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МАШИН 105
3.1. Показатели производительности 105
3.2. Оценка производительности в условиях массового и серийного производства 117
3.3. Зависимость производительности от параметров процессов и конструкций 122
Глава 4. НАДЕЖНОСТЬ МАШИН 130
4.1. Причины отказов в работе 130
4.2. Показатели надежности 141
4.3. Зависимость технико-экономических показателей от надежности 151
4.4. Допуски на надежность 155

Глава 5. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАШИН-АВТОМАТОВ 161
5.1. Дифференциация технологического процесса и концентрация операций 161
5.2. Автоматы последовательного действия 171
5.3. Автоматы параллельного действия 177
5.4. Автоматы последовательно-параллельного действия 180
Глава 6. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ 187
6.1. Виды автоматических линий 187
6.2. Структурная вариантность 189
6.3. Транспортно-накопительные системы 202
6.4. Проблемы переналадки 221
Глава 7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПОСТАВКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ 229
7.1. Принципы и методы оптимального проектирования 229
7.2. Этапы проектирования 234
7.3. Изготовление и поставка 241
7.4. Вариантность технических решений на различных этапах проектирования 244
7.5. Организационное управление процессами создания и поставки 255
Глава 8. ВЫБОР ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРОЕКТИРУЕМЫХ МАШИН-АВТОМАТОВ 260
8.1. Основные положения 260
8.2. Формирование совокупности возможных вариантов 262
8.3. Отбор по качественным и количественным критериям 267
8.4. Расчет и выбор оптимального варианта 271
Глава 9. ВЫБОР ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРОЕКТИРУЕМЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ 278
9.1. Основные положения 278
9.2. Формирование совокупности возможных вариантов 280
9.3. Сравнительный анализ и отбор вариантов 284
9.4. Выбор оптимального варианта 293

Глава 10. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ 300
10.1. Цели и содержание испытаний и исследований 300
10.2. Качество выпускаемой продукции 303
10.3. Производительность оборудования 312
10.4. Безотказность в работе 320
10.5. Целесообразность автоматизации действующего оборудования 327
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 334
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАЗДЕЛЫ 338
Д1. Производительность труда и прогрессивность новой техники 338
Д2. Становление и задачи теории надежности машин и их систем 349
Д3. Особенности разработки технологических процессов для автоматических линий. Составление циклограмм 354
Д4. Расчет производительности и надежности проектируемых автоматических линий 364
Д5. Организация проектирования автоматических линий 375
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 378

ПРЕДИСЛОВИЕ

Задача настоящего учебного пособия состоит не только в приобретении студентами конкретных знаний и умений в области, обозначенной названием книги, и соответствующих учебных дисциплин.

Сверхзадача книги – способствовать воспитанию у будущих специалистов аналитического мышления: умения постигать глубинную сущность предметов и явлений; осознавать причинно-следственные связи и закономерности, выходящие за рамки очевидности; видеть противоречия в любых конкретных задачах и ситуациях.

Такому подходу в вузовских курсах учат недостаточно. Преобладают систематизированные описания и рецептурные методы, способные, как максимум, дать конкретную эрудицию и воспитать логическое мышление.

Только один пример. Мы учим студентов кинематике и устройству универсального токарного станка. Звенья кинематической настройки – коробки скоростей и подач. Студентов учат определять число ступеней настройки, передаточные отношения шестерен, величину межцентровых расстояний валов и т.д.

Потом переходят к изучению многошпиндельного токарного автомата, в котором, как оказывается, кинематическая настройка выполняется гитарой сменных шестерен. И опять студентам говорят о том, как выбирать число шестерен, их модули, числа зубьев и др.

Наконец, токарный полуавтомат с ЧПУ, где для кинематической настройки почему-то используется регулируемый электродвигатель постоянного тока. И здесь студентам рассказывают, как подбирать двигатель по типу и мощности и т.д., не акцентировав их внимание на том, почему в трех станках одинакового назначения три вида звеньев кинематической настройки.

А ведь существуют еще сменные шкивы, вариаторы, двигатели переменного тока с регулируемой частотой и др. И если все это применяется – значит у каждого вида свое сочетание достоинств и недостатков. Каких? Как они проявляются? Почему так, а не иначе? Это остается вне процесса обучения.

Умение оценивать всю вариантность решения конкретных задач, определять перечень критериев сравнительного анализа и оценки, понимать приоритеты для различных условий применения и в итоге осознавать закономерности – именно такой путь воспитания аналитического мышления – через категорию вариантности – представляется автору единственным.

Учить нужно не частностям, а закономерностям, из которых частности вытекают естественным образом. Любые приводимые студентам в лекционных курсах и учебниках конкретные процессы и конструкции должны трактоваться как взаимозаменяемые примеры, которые должны, с одной стороны, формировать знания предметной части, с другой – иллюстрировать подходы и закономерности, выходящие за пределы данной конкретики.

Автору представляется, что наиболее приемлемым для такой методологии инженерной подготовки является изучение автоматизации производственных процессов. Именно создание автоматизированных производств несет в себе наибольшую вариантность задач, не разрешаемых на основе только традиционных методов и критериев кинематики и прочности конструкций, качества продукции, экологичности процессов.

Поэтому вопросы вариантности технических решений, их оценки выбора красной нитью проходят через всю книгу. Рассмотрение конкретных процессов и конструкций трансформируется в познание общих принципов и закономерностей.

Не случайно параллельно рассматриваются примеры из таких, казалось бы, далеких отраслей производства, как машиностроение и электронная промышленность.

Особенностью книги является и разделение ее материала на две категории: 1) **основной текст** (гл. 1 – 10), где изложение построено в логической последовательности на уровне, доступном пониманию "среднего" студента (это относится прежде всего к математическому аппарату); 2) **дополнительные разделы**, предназначенные для "продвинутых" студентов и аспирантов и рекомендуемые для написания рефератов; здесь автор сознательно ввел некоторые спорные положения и трактовки.

Любое учебное пособие рассчитано прежде всего на студентов, но оно необходимо и для преподавателей, которым положено знать свой предмет обширнее и глубже. Рассыпанные по тексту **реплики** есть обращения автора к преподавателям именно с такой целью.

Следовательно, настоящая книга – более концептуальная, нежели предметно-познавательная.

Автор взял на себя трудную задачу: систематизировать все лучшее из трудов основоположников науки об автоматизации: Г.А. Шаумяна, А.П. Владзиевского, С.И. Артоболевского, Л.Н. Кошкина, А.Н. Рабиновича, Ю.Б. Эрпшера, развитых и дополненных работами А.И. Дащенко, И.А Клусова, Б.И. Черпакова, Г.И. Меламеда и др. Это трансформировано через собственный, почти полувековой опыт преподавания в Московском высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана (ныне Техническом университете).

Книга почти не содержит обширных систематизированных описаний технологических процессов и конструкций, обзоров и классификаций. Наличие таких материалов потребовало бы значительного расширения объема. Такую информацию можно найти в технической литературе и в Internet.

Глава 1

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ АВТОМАТИЗАЦИЯ

1.1. БИЗНЕС-ПРОЦЕССЫ В СФЕРЕ МАТЕРИАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Бизнес-процесс (БП) – это цепочка последовательных действий, связанных с удовлетворением потребностей в материальной продукции, услугах и т.п., с получением экономической выгоды.

В простейшем случае БП может сводиться к перепродаже, т.е. за деньги $Д_1$ покупается товар Т, который перепродается по более высокой цене $Д_2$

$$Д_1 \rightarrow Т \rightarrow Д_2.$$

Основное действующее лицо такого многоступенчатого процесса – менеджер.

БП в сфере материального производства – это цепочка последовательных действий, включающих в себя создание технических средств производства и их эксплуатацию для получения соответствующей продукции. БП в условиях товарно-денежных отношений выражается формулой

$$Д_1 \rightarrow П \rightarrow Т \rightarrow Д_2,$$

т.е. сначала вкладываются деньги $Д_1$ в производство П, получается товарная продукция Т, реализация которой приносит деньги $Д_2$, желательно с прибылью (экономическим эффектом производства).

Центральные фигуры в БП материального производства – инженеры-машиностроители, технолог и конструктор, задача которых состоит в создании оптимального для данных условий производственного базиса (комплекта средств производства для выпуска данной продукции).

В условиях рыночной экономики БП многовариантен (рис. 1.1). Машиностроителям не гарантируются ни портфель заказов, ни денежные средства. Поставка средств производства заказчикам протекает в условиях неопределенности, с различным соотношением показателей прибыли и риска.

Основные варианты действий организации – поставщика производственного оборудования (см. рис. 1.1):

1) работать с конкретными заказчиками, покупая и комплектуя для них готовое оборудование, с возможной его доработкой и т.д.; здесь риск минимален, но и прибыль не может быть высокой;



Рис. 1.1. Схема БП при производстве материальной продукции в условиях рыночной экономики

2) работать с конкретными заказчиками, создавая для них технологии и средства производства для выпуска продукции; здесь прибыль может быть значительно выше, но и риск весьма возрастает в условиях конкурентности на рынке, так как на создание оборудования требуются и время, и деньги, а результат может оказаться нелучшим;

3) вести перспективные разработки, ориентируясь на маркетинг рынка, предвидеть потребности и тенденции развития; тогда к моменту появления заказчика (которого нужно еще найти!) поставщик может в кратчайшие сроки поставить средства производства самого современного уровня. Последний вариант наиболее рискованный прежде всего потому, что необходимых оборотных средств у разработчика, как правило, нет и необходимо брать кредиты, которые нужно отдавать с процентами; нельзя достоверно предсказать уровень успеха перспективных разработок, сроки их завершения с доведением до коммерческого результата и т.д. Кроме того, необходимы широкая реклама, постоянная работа с потенциальными заказчиками, анализ рынка и т.д.

Тем не менее именно по этому пути идут все передовые машиностроительные фирмы, ибо только перспективные разработки способны принести высокую прибыль.

В условиях рыночной экономики нашей страны, особенно на современном этапе, значительная часть выпускников технических вузов идет не на крупные, а на малые предприятия, в производственно-коммерческие или коммерческие структуры, где молодые талантливые специалисты достаточно быстро завоевывают право решать, а не только исполнять. Поэтому уже на вузовской скамье студенты должны получить необходимые эрудицию и практическое умение. Квалификационный диапазон выпускника вуза должен включать в себя умение:

1) анализировать текущие и перспективные потребности рынка в конкретных видах продукции;

2) ориентироваться на рынке новой техники, знать возможных конкурентов;

3) работать с вероятными заказчиками, владеть искусством рекламы, демонстраций на выставках, презентации продукции и т.д.;

4) пользоваться кредитной системой, зная все ее тонкости, ориентироваться в юридических вопросах собственности, в том числе интеллектуальной;

5) видеть все разнообразие возможных технических решений, находить оптимальные варианты по заданному функциональному назначению;

6) разрабатывать новые технологические процессы и средства производства;

7) реализовывать обратную связь от эксплуатации средств производства на последующие разработки.

Основой квалификации инженера-машиностроителя остаются знания и умения в разработке технологии, расчете и конструировании оборудования, **эта квалификация необходима, но недостаточна.** Знания и умения (см. пп. 1 – 4) даются в курсах по экономике и организации производства, по менеджменту и маркетингу.

Настоящее пособие кроме общей теории машин-автоматов и их систем посвящено **вариантности технических решений, их генерации, *сравнительному анализу и выбору***. Рассматриваются также задачи реализации обратной связи – от эксплуатации на последующее проектирование.

1.2. ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Производственный процесс – это регламентированное взаимодействие потоков материалов, энергии и информации в целях производства материальной продукции. Определяющую роль играют потоки основных

и вспомогательных материалов, их движение и преобразование; потоки энергии и информации обеспечивают эти процессы, делают их возможными. Все взаимодействия в рамках производственного процесса являются *технологическими*.

Современное понимание технологии носит всеобъемлющий характер. Одно из ее определений: *это комплекс целенаправленных методов и средств, объединенных последовательностью действий.*

Исходя из этого, ключевыми признаками любой технологии надо считать наличие:

– многократных *действий*, следующих друг за другом;

– *объектов воздействия*, претерпевающих целенаправленные изменения;

– *материализованных средств технологического оснащения*, посредством которых реализуются воздействия на объекты.

Под такие понятия и определения подпадают, по существу, все серьезные проявления человеческого разума самой разной направленности, включая производственные, политические, банковские технологии и т.д. и т.п.

В сфере материального производства технологические процессы можно трактовать как последовательную реализацию целенаправленных *методов* получения заданной продукции путем применения *средств технологического оснащения*.

Характер методов воздействия и средств технологического оснащения определяется их целевой направленностью. Так, для технологии конструкционных материалов *технологический метод есть совокупность правил, определяющих последовательность и содержание действий при формообразовании, обработке или сборке, перемещении, в том числе технологический контроль и испытания, установленные безотносительно к наименованию, типоразмеру или исполнению изделий* [22].

Всякий технологический процесс, по определению, многооперационный. Операция есть составная часть процесса, характеризуемая идентичностью и завершенностью воздействия, их локализацией во времени и в пространстве. Так, технология механической обработки трактует операцию как комплекс действий, выполняемый на одном металлорежущем станке, на одном рабочем месте [22].

Технологический маршрут "набирается" из операций, которым последовательно подвергается объект.

Рассмотрим важнейшие виды технологий и средств оснащения современного материального производства.

1. **Технологии воздействия на материальные потоки** в целях изменения свойств конструкционных материалов: размеров, формы, химического состава, физических свойств и т.д. В металлообработке эти технологии реализуются как процессы плавки, литья, сварки, резания, штамповки, термообработки материалов; сборки деталей и узлов. Средствами технологического оснащения здесь являются прокатные станы, литейные машины, прессы, металлорежущие станки, сварочные машины, термические печи, а также инструментальные комплексы, комплекты технологической оснастки, средства измерения и др. Как правило, единица технологического оборудования (металлорежущий станок, пресс) выполняют одну операцию. Технологический процесс как последовательные операции реализуется *технологическими комплексами оборудования*.

Технологии, формирующие качество конкретной продукции, принято называть *основными*, остальные часто трактуют как вспомогательные и обслуживающие.

2. **Технологии воздействия на материальные потоки** в целях непосредственного обеспечения основных операций: подача, ориентация, закрепление, межоперационное перемещение обрабатываемых материалов. Средствами оснащения в этом случае служат механизмы и устройства загрузки материалов (бункера, магазины, манипуляторы и др.), их закрепления (кулачковые, цанговые патроны и др.), поворота и фиксации (мальтийские, кулачково-цевочные и др.), линейные транспортеры и т.д.

3. **Технологии воздействия на материальные потоки** на межоперационном уровне: транспортирование материалов (с разделением или соединением потоков), складирование, накопление; удаление отходов производства и т.д.; средствами оснащения здесь являются разнообразные транспортеры, подъемники (тельферы, подъемные краны); магазины-накопители; склады материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий, готовой продукции; транспортеры отвода стружки и пр.

4. **Энергетические технологии подачи потоков энергии**, необходимых для выполнения операций преобразования или перемещения материальных потоков (питание электродвигателей, нагрев изделий и т.п.).

5. ***Энергетические технологии обеспечения функционирования*** подразделений и производства в целом: подача силовой электроэнергии, освещения, теплоты, сжатого воздуха и др. В совокупности технические средства данного назначения составляют энергетическое хозяйство предприятия (трансформаторные подстанции и сети, системы теплоснабжения, централизованной подачи сжатого воздуха и т.д. и т.п.).

6. **Информационные технологии**, решающие задачи технологического управления конкретными операциями и средствами производства. Традиционно в любых системах управления различают программную и аппаратную составляющие. Длительное время программное обеспечение управления базировалось на аналоговых носителях информации (кулачки, копиры, упоры, реле и т.д.), что не обеспечивало ни гибкости, ни дистанционности. Революционным стало появление систем управления с аппаратной реализацией на электронной основе, сначала в виде индивидуальных пультов числового программного управления, а далее – на базе типовых микропроцессорных (МП) блоков, образующих системы автоматического управления (САУ). В технической литературе такие системы часто называют АСУТП (автоматизированные системы управления технологическими процессами).

7. **Информационные технологии** организационного управления производственными подразделениями и их функционированием, включая планирование, материальное обеспечение процесса производства, координацию работы подразделений, контроль материальных и денежных потоков и ресурсов, управление ими, снабжение и сбыт и т.д.

В прежние времена эти технологии базировались на документообороте с фиксацией необходимой информации на бумажных носителях. Появление персональных электронных вычислительных машин (персональных компьютеров), сетей и систем, составляющих автоматизированные системы управления производством (АСУП), позволило перевести информационные потоки на безбумажные носители, резко повысив информативность, оперативность, качество управления.

Реплика. *Обилие технологий материального производства свидетельствует об их важности, главенстве, что неизбежно трансформируется в соответствующие приоритеты внимания и финансирования.*

Наука о технологии машиностроения, сформировавшаяся в 20 – 30-е годы XX века с основным базированием на механическую обработку и узловую сборку, категорию "технологии" относила только к основным операциям (формообразование, размерная обработка изделий и т.п.).

Это было закономерно, так как в те времена загрузка и транспортирование заготовок и деталей, управление станками или производственными подразделениями носили чисто "ручной" или умственный характер, с минимальной технической оснащенностью.

Спонтанные начала множества человеческих действий никак не укладывались в рамки совокупности правил, определяющих последовательность и содержание действий, поэтому и делились все процессы на основные технологические, вспомогательные, обслуживающие. В известной степени такие каноны сохраняются до настоящего времени, хотя по техническому совершенству и стоимо-

сти, сложности процессов функционирования средства и системы для обработки, транспортировки, управления практически идентичны.

Сегодня в ходу иная тенденция: считать важнейшими технологии не материальные, а информационные. Производственный процесс трактуется как процесс преобразования информации с передачей ее с цифровых носителей на аналоговые и обратно (изготовленная деталь есть аналоговый носитель информации). Заглавное звено – компьютер, все остальное – периферия; металлорежущий станок является лишь технологическим объектом управления (ТОУ) и в общей иерархии располагается где-то между дешифратором и интерполятором.

Эти и подобные "недоперегибы" не есть истина. Любые технологические процессы материального производства (обработки, транспортирования, управления) есть процессы равной производственной необходимости. Спор о том, что важнее: технологии формообразования или информационные технологии – столь же беспредметен, сколь и спор, что важнее для человека – еда или сон?

Любые технологические процессы и средства производства сегодняшнего дня и обозримого будущего невозможны без участия человека; безлюдные производства пока – миф. По степени и характеру участия человека можно выделить следующие группы процессов.

1. **Ручные**, где человек является непосредственным исполнителем и источником энергии, используя при необходимости подручные орудия труда: инструменты и приспособления. Даже на самых высокоорганизованных и технически оснащенных предприятиях перечень таких процессов и профессий весьма обширен (монтаж и наладка, ремонт и техническое обслуживание средств производства, зданий и сооружений; слесарные подгоночные, сборочные работы, устранение отказов и т.д. и т.п.).

2. **Механизированные**, где средства технологического оснащения имеют внешний подвод энергии и привод, механизмы и устройства для выполнения основных целевых функций, а за человеком остаются вспомогательные действия, управление и контроль.

Хрестоматийный пример – токарная обработка на универсальном станке, где без участия человека выполняется процесс резания посредством вращения шпинделя и подачи суппорта. Все остальные действия: закрепление и открепление деталей, установка резцов и их настройка на размер, включение и выключение – исполняются человеком.

3. **Автоматизированные**, где человек перестает быть непосредственным участником и исполнителем элементов технологического про-

АТИ"-РГТУ

цесса, сохраняя функции наладки средств производства (орудий труда) и контроля их функционирования.

При эксплуатации токарного автомата человек выполняет лишь периодическую заправку материала, установку и снятие инструмента, наладку на размер, устранение отказов.

Производственный процесс можно трактовать как совокупность всех действий людей и орудий труда (средств производства), необходимых на данном предприятии [22].

Общая тенденция развития производственных процессов – сокращение ручного и механизированного труда, автоматизация производства.

Автоматизация производственных процессов есть совокупность мероприятий по разработке прогрессивных технологий, созданию и внедрению высокопроизводительных средств производства, выполняющих основные технологические и вспомогательные процессы без непосредственного участия человека.

Любое производственное предприятие – это огромный технический комплекс, задачи его автоматизации весьма сложны и многообразны.

На рис. 1.2 показана структурная схема подразделений предприятия с технологической направленностью металлообработки; стрелками показаны основные материальные и информационные потоки. На предприятии может изготовляться разнообразная продукция: машины, механизмы, устройства, приборы. Такое предприятие представляет собой сложный комплекс, который обеспечивает бесперебойное функционирование всех элементов производственного процесса. Основные технологии включают в себя заготовительную, обработочную и сборочную фазы.

Заготовки основных деталей производят в заготовительных цехах: литейном, кузнечном и др.

Комплекс литейного производства включает в себя и модельный цех.

Металл в кузнечно-штамповочные цехи поступает либо непосредственно с железнодорожных складов, либо из металлозаготовительного цеха, где выполняют раскрой листов, разрезку или рубку пруткового материала на штучные заготовки и т.д.

Наибольший объем обработки приходится на механические цехи, где заготовки, проходя механическую обработку, приобретают необходимую конфигурацию, точность, твердость, шероховатость. Процессы механической обработки, начиная от черновых операций и кончая чистовыми, окончательными, очень многообразны и могут выполняться последовательно на многих станках, составляющих поточные или автоматические линии.

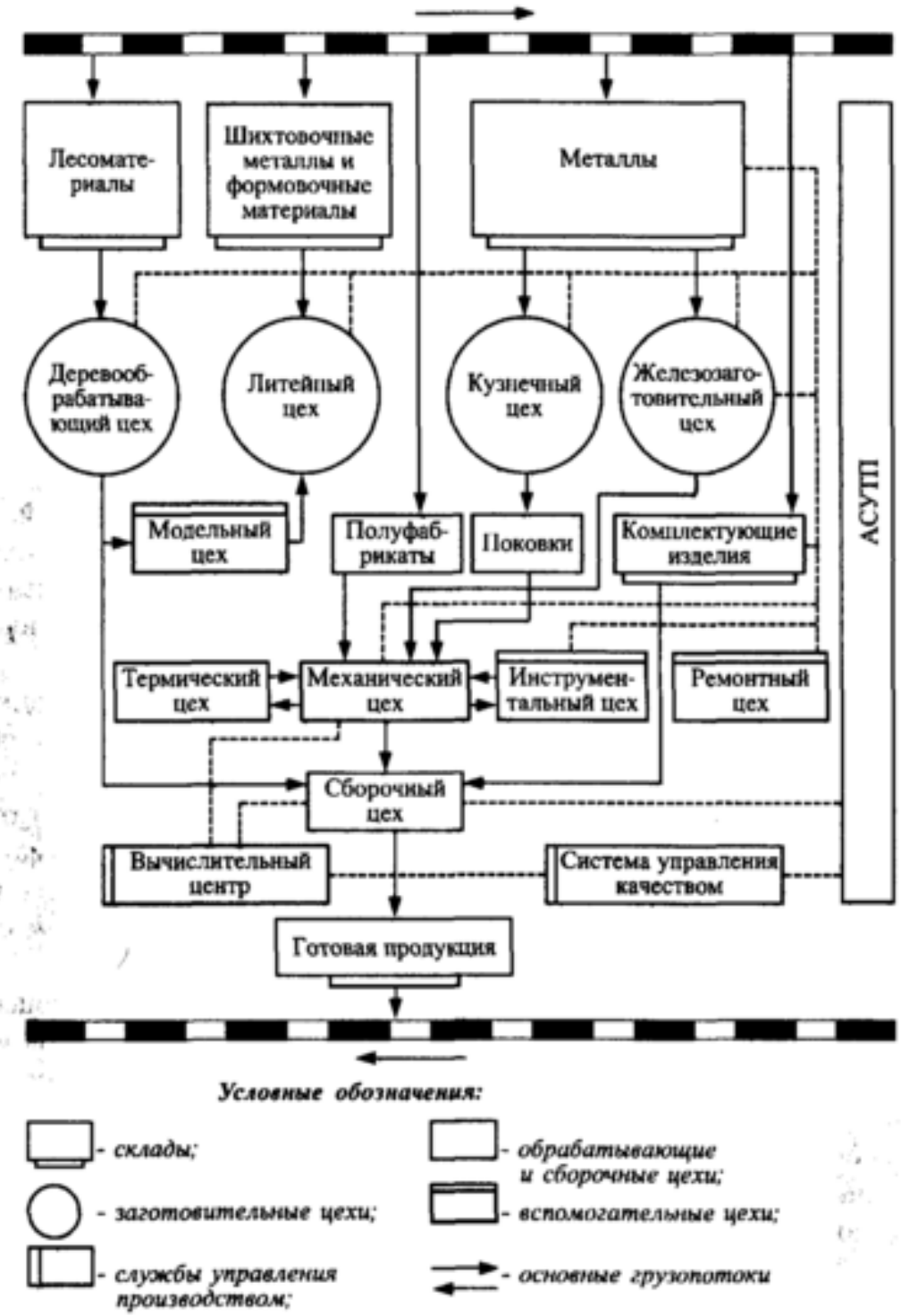


Рис. 1.2. Структурная схема предприятия металлобработки

Между отдельными операциями механической обработки проводится термообработка заготовок либо в специальных термических цехах,

либо на участках термообработки соответствующих механических цехов. В сборочных цехах готовые детали собирают в механизмы и узлы; они проходят контроль, общую сборку, окончательный контроль, испытания, упаковку, консервацию и т.д.

Для поддержания нормального хода производственного процесса кроме указанных существует ряд вспомогательных цехов: ремонтные, инструментальные и др. В ремонтных цехах осуществляют капитальный ремонт всего технологического оборудования, действующего на заводе, а также его модернизацию. Задачей инструментального цеха является бесперебойное снабжение всех обрабатывающих цехов инструментом, штампами, приспособлениями и т.д.

Как показывает схема (см. рис. 1.2), для нормального функционирования производственного процесса нужна развитая система транспортирования и хранения заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий. Различают системы транспорта межцехового – между отдельными цехами, внутрицехового – между участками и межстаночного – между отдельными станками в пределах одного технологического потока изготовления детали или узла.

До некоторого времени основным направлением автоматизации оставалась автоматизация технологических процессов механической обработки: создание токарных, шлифовальных, фрезерных автоматов и полуавтоматов, агрегатных станков и автоматических линий из агрегатных станков и т.д. Такое направление предопределяет создание автоматизированных участков и цехов, что позволяет намного сократить число производственных рабочих, непосредственно занятых обслуживанием станков.

Впоследствии широко велась работа по автоматизации процессов контроля и сборки, созданию контрольных и сборочных автоматов и автоматических линий для сборки. Автоматизация этих процессов дает возможность в первую очередь повысить качество изготовляемых изделий, особенно в отраслях производства с большими масштабами выпуска (подшипники, метизы и т.д.). Кроме того, автоматизация контроля и сборки позволяет устранить наблюдаемую диспропорцию, когда на контроле и сборке готовых изделий занято больше рабочих, чем на их изготовлении.

Весьма перспективно внедрение автоматизации в заготовительных цехах: литейном, кузнечном и др., что не только сокращает трудоемкость заготовительных процессов, но и значительно облегчает условия труда в горячих цехах. Это относится, прежде всего, к литейным цехам, где ав-

томатизируются процессы формовки, заливки металла и его остывания, выбивки отливок и возврата опок к формовочным машинам. Решающая роль принадлежит автоматизации при внедрении прогрессивных заготовок с минимальными припусками на механическую обработку. Как правило, все технологические процессы получения прогрессивных заготовок методами профильного проката, холодной штамповки и т.д. отличаются высокой степенью механизации и автоматизации.

Автоматизация все больше проникает во вспомогательные цехи (инструментальный, ремонтный, модельный и др.), продукция которых индивидуальна и серийна даже при массовом характере основного производства. Развитие гидрокопировальных станков, электроискровой обработки и станков с программным управлением позволило решить проблему автоматизированного изготовления штампов и других сложных изделий.

Автоматизация технологических процессов обработки и сборки дает возможность значительно сократить число рабочих в основных цехах. В результате большинство производственных рабочих сосредотачивается не на основных процессах производства, а на вспомогательных и обслуживающих. Поэтому сейчас автоматизируют не только технологические процессы обработки, но и все чаще другие звенья производственного процесса, что позволяет решать задачи автоматизации в комплексе, повышать эффективность средств, вкладываемых в автоматизацию.

Высокоэффективны и работы по механизации и автоматизации погрузки-разгрузки. В равной степени это относится к меж- и внутрицеховому транспортированию изделий, накоплению и расходованию межоперационных заделов.

Для транспортировки изделий между цехами и участками все большее применение находят различного рода конвейеры, в том числе с автоматическим адресованием и программным управлением. Все более сложными и совершенными становятся транспортирующие системы автоматических линий, предусматривающие не только межстаночное транспортирование, но и хранение заделов в автоматических магазинах-накопителях.

Важнейшей задачей является автоматизация управления предприятием и, прежде всего, сбор и обработка текущей информации о состоянии всех звеньев производственного процесса, системы учета и оперативного планирования. Эта проблема решается с помощью электронных вычислительных машин, которым под силу не только арифметические, но и логические задачи, в том числе расчет оптимальных условий функционирования производственного процесса.

Успехи автоматизации в различных стадиях и звеньях производственного процесса создают условия для комплексной автоматизации.

Под комплексной автоматизацией следует понимать такую автоматизацию, которая охватывает весь комплекс производства изделия, например автомобиля, когда все стадии его изготовления, начиная с исходных материалов и полуфабрикатов и кончая сборкой, автоматизированы. Такое направление автоматизации позволяет обеспечить высокие темпы технического прогресса, избежать отвлечения сил и средств на осуществление отдельных процессов автоматизации, которые, решая частную задачу производства одной или нескольких деталей машины, не в состоянии сколько-нибудь поднять общий уровень производства.

На рис. 1.3 показана структурная схема подразделений предприятия с предметной специализацией – завода по производству конденсаторов.

Электронная промышленность является отраслью, которая в силу специфичности продукции и технологических процессов ее изготовления лишь в малой степени может использовать стандартное технологическое оборудование, выпускаемое другими отраслями: станкостроением, химическим машиностроением, электротехнической промышленностью и др. Поэтому в отрасли организовано собственное производство специального технологического оборудования и инструмента, всех видов электровакуумного стекла и керамики, литых постоянных магнитов, органических пленок для конденсаторов из лавсана и т.д. В условиях разнообразной номенклатуры выпускаемой продукции и частой сменяемости изделий, поставляемых почти всем отраслям народного хозяйства, создание и развитие в рамках отрасли собственной базы по производству специального технологического оборудования, инструмента, специальных материалов и других изделий внутриотраслевого применения позволяют в короткие сроки разрабатывать, осваивать в производстве и организовывать массовый и крупносерийный выпуск новых, отвечающих самым современным требованиям изделий электронной техники.

Реплика. *Рассмотренные вопросы имеют прямое отношение к содержанию и направленности профилирующей инженерной подготовки.*

Для инженеров-машиностроителей прежних формаций достаточно было владеть вопросами создания технологий обработки, проектирования и эксплуатации формообразующего или обрабатывающего оборудования в масштабах конкретного технологического передела (литье, резание, сварка, термообработка и др.). Из-за низкой технической оснащенности процессов загрузки и транспортировки, накопления материалов, полуфабрикатов и изделий, технологического и организационного управления и т.д. не возникало необходимости в фундаментальном их изучении и умении разрабатывать технические средства в целом.

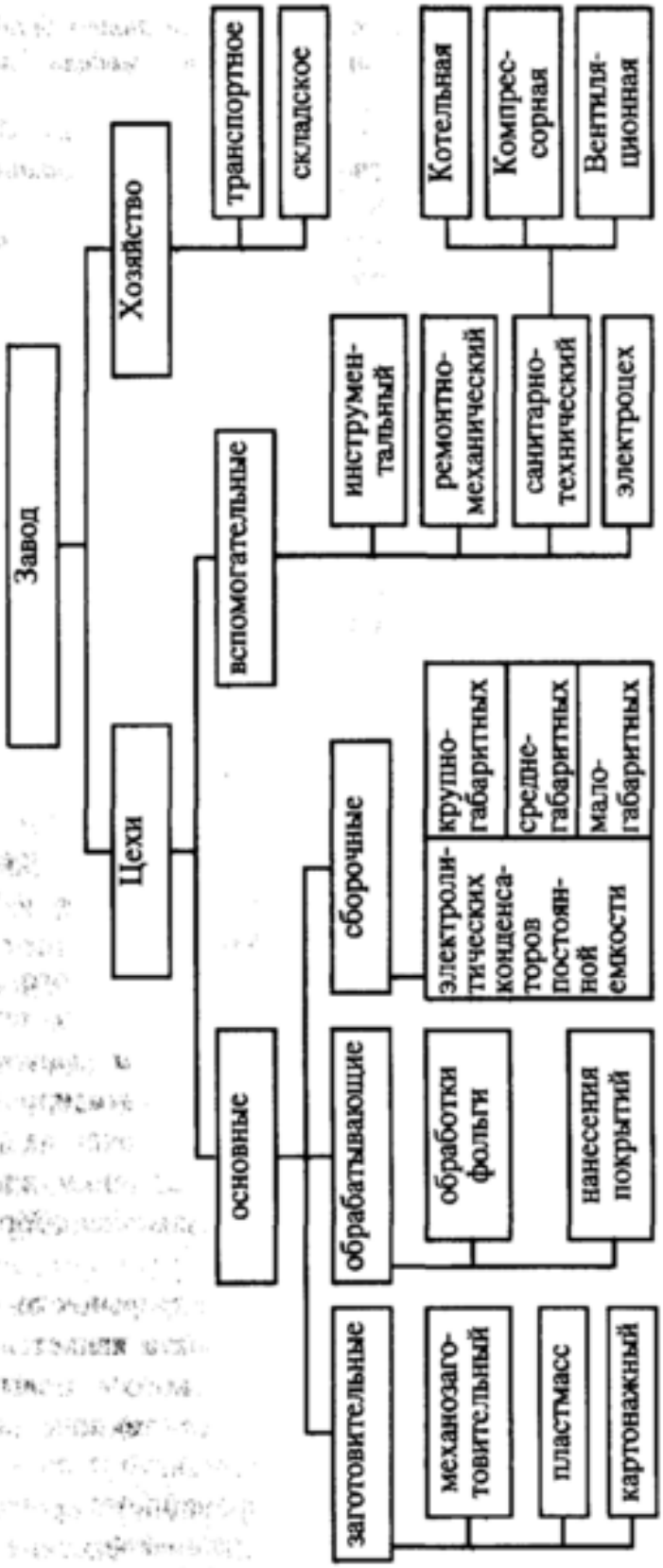


Рис. 1.3. Структурная схема предприятия по производству конденсаторов

Применительно к современному машиностроению и металлообработке в целом, с высокой степенью автоматизации, такая модель – модель "чистого" инженера-механика – устарела.

Инженер-машиностроитель, технолог и конструктор должны обладать помимо "традиционных" знаний и умений дополнительным квалификационным диапазоном, как минимум, по следующим направлениям:

– *технологии и средствам автоматической загрузки, ориентации, транспортирования изделий в рамках технологических комплексов;*

– *технологии и средствам "технологического" управления, составляющим САУ.*

Иными словами, он должен быть инженером широкого профиля по автоматизации производственных процессов в машиностроении.

1.3. ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ. ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ

На современном уровне научно-технического и социального прогресса основной формой производства становится комплексно-автоматизированное и высокомеханизированное производство, не только массовое, но и серийное. *Любые неавтоматизированные технологические процессы следует рассматривать как частное, вынужденное решение, когда в конкретных условиях производства еще не возникли технические и экономические предпосылки для автоматизации.*

Источниками технического, экономического и социального эффектов при внедрении автоматизированного оборудования любого технологического назначения являются: 1) *повышение качества выпускаемой продукции* по сравнению с качеством продукции неавтоматизированного производства; 2) *повышение производительности* – количества годной продукции, выдаваемой машиной или системой в единицу времени; 3) *сокращение ручных работ и трудоемкости обслуживания* оборудования в процессе его функционирования и т.д.

Исследования и анализ показывают, что для непрерывного производства основным источником экономического эффекта является улучшение качества (сортности) продукции, для дискретного – повышение производительности машин путем интенсификации технологических процессов, совмещения операций, сокращения простоев.

Все технологические процессы неавтоматизированного производства имеют низкий технико-экономический потенциал вследствие своей

невысокой интенсивности, отсутствия концентрации операций, их совмещения во времени. Одностороннее замещение функций человека в системах, которые десятилетиями складывались применительно к его ограниченным возможностям, неперспективно.

Генеральное направление комплексной автоматизации производственных процессов – не в замене человека при обслуживании машин и аппаратов, а в создании таких высокоинтенсивных технологических процессов и высокопроизводительных средств производства, которые были бы вообще невозможны при непосредственном участии человека. Правильное понимание сущности автоматизации, ее основной направленности – необходимая предпосылка формирования научных принципов и основ технической политики в области автоматизации на производственном уровне.

Немалое количество спроектированного автоматизированного оборудования оказалось неудачным лишь потому, что все усилия разработчиков были направлены на "искоренение" ручных операций, а вопросы качества продукции, быстродействия машин и их надежности при этом оставались на заднем плане или трактовались как второстепенные.

Правильные общие лозунги типа "ручной труд – на плечи машин" иногда понимаются формально, а автоматизацию пытаются свести к созданию технических средств, имитирующих ручные действия человека при манипулировании или управлении машинами.

В результате появляется новая техника, работающая по безлюдной технологии, но громоздкая и дорогая, малопроизводительная и ненадежная, а в итоге неэффективная.

Особенность современного этапа научно-технического прогресса состоит в том, что определяющим фактором при разработке новой техники становится ограниченность ресурсов. Поэтому необходимо так выбирать число объектов разработки, чтобы получать наилучшие результаты при реальных возможностях.

В стратегическом плане это означает поворот к первоочередному техническому перевооружению именно тех звеньев производства, где можно добиться желаемого вследствие применения прогрессивной технологии: новых методов и процессов, концентрации операций, многопозиционной и многоинструментальной обработки; в тактическом – избегать развертывания работ или тиражирования технических средств, по которым не просматриваются конечные результаты или последние выглядят односторонними. При этом в конкретных производственных условиях следует руководствоваться рядом принципов технической политики.

Первый принцип – достижение конкретных результатов. Системы и средства автоматизации должны не просто имитировать и замещать действия человека, а выполнять производственные функции быстрее и лучше, лишь тогда они будут по-настоящему эффективными. Изменение численности какой-либо категории работающих или замена ручного манипулирования автоматическим не цель и не результат.

Анализ работ по автоматизации показывает, что 60…70 % экономического эффекта получается благодаря более высокой производительности автоматизированного оборудования по сравнению с неавтоматизированным; 15…20 % – от повышения или стабилизации качества продукции и лишь 10…15 % – вследствие экономии фонда заработной платы.

Поэтому при планировании и обосновании работ по автоматизации производства необходимо предварительно проанализировать, как могут повлиять намечаемые мероприятия, прежде всего, на качество и количество выпускаемой продукции и только потом – на численность обслуживающего персонала. Обязательное условие – обеспечение заинтересованности всех рабочих во внедрении автоматизированного оборудования и его успешном функционировании.

Второй принцип – комплексность подхода. Все важнейшие компоненты производственного процесса: объекты производства, технология, основное и вспомогательное оборудование, системы управления и обслуживания, удаление отходов, кадры – должны быть рассмотрены и решены на новом, более высоком уровне. Иногда достаточно не учесть хотя бы один компонент производственного процесса, например конструкцию изделия, и вся система мероприятий по автоматизации окажется неэффективной. Тем более неперспективны попытки сводить автоматизацию лишь к преобразованию отдельных компонентов, например созданию сложных и дорогих систем микропроцессорного управления при сохранении отсталой технологии.

Третий принцип – необходимость. Средства автоматизации, включая самые перспективные и прогрессивные, должны применяться не там, где их можно приспособить, а в первую очередь там, где без них нельзя обойтись.

Значимость современных средств электроники и вычислительной техники не только и не столько в замене функций человека при обслуживании известных машин, сколько в открывающихся возможностях создания на их основе средств производства, которые раньше не могли быть созданы. Так, современные установки электронной литографии, контроля интегральных схем и другие могли быть построены лишь на основе мик-

ропроцессорного управления, потому что управление процессами, которые там осуществляются, выходит за рамки физических возможностей человека.

Четвертый принцип – своевременность: внедрение и тиражирование недостаточно созревших технических решений недопустимо. К сожалению, часто стремятся к быстрейшему тиражированию недостаточно отработанных конструкций, а только доведенных до уровня, "способных функционировать". В конечном итоге волевое внедрение дорогих, малонадежных и тихоходных систем и средств автоматизации лишь дискредитирует их.

Более подробно о проблемах развития и внедрения технических новшеств, альтернативности традиционных и новых технологий и средств производства см. в Заключении.

1.4. СТУПЕНИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Современное производство – главным образом машинное, в котором процессы (технологические, вспомогательные, управления) выполняются в основном машинами.

Машина – это сочетание механизмов и устройств, осуществляющих определенные целесообразные действия по преобразованию энергии или информации, выполнению полезной работы.

Категории машин:

- *машины-двигатели* (энергетические машины), преобразующие один вид энергии в другой, например механическую в электрическую или наоборот (электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания, паровые и водяные турбины и т.д.);
- *вычислительные машины*, передающие и преобразующие информацию; здесь почти исключительно применяются электронные вычислительные машины (ЭВМ);
- *рабочие машины*, выполняющие работы по преобразованию формы и размеров, физико-химических свойств и т.д., объектов производства и их положения в пространстве. По последнему признаку различают *технологические и транспортные рабочие машины*.

Все виды машин призваны реализовать определенные технологии (информационные, энергетические, транспортные) (см. разд. 1.2).

Обязательными признаками технологических рабочих машин являются: источник энергии, передаточные, исполнительные, управляющие и базовые (корпусные) устройства. Если отсутствует хотя бы один из дан-

ных компонентов (например, источник движения), то это не машина, а просто механизм, приспособление, устройство.

Источник движения (двигательный механизм) и передаточные устройства часто объединяются общим термином "привод машины".

Главным в машине является исполнительный механизм, определяющий технологические возможности и диапазон воздействий, которые она способна осуществлять. Если эти технологические воздействия однородны, например только токарная обработка, только вакуумирование и т.д., то именно эти технологии дают название машине. Помимо машины эквивалентными обобщенными наименованиями, принятыми в технической литературе, являются: станок, агрегат, установка (токарный станок, сварочный агрегат, установка вакуумного напыления и т.д.).

Технологическое назначение машины, как правило, непосредственно не связано с конкретными объектами производства: так, на универсальном токарном станке можно обточить, расточить, отрезать практически любую деталь в зависимости от габаритных размеров, мощности, точностных возможностей станка.

Если в системе машин реализуются разнородные процессы, ее название часто исходит из функционального назначения, например линия изготовления колец подшипников, древесно-стружечных плит и т.п.

В процессе эксплуатации машин выполняются следующие функции (см. разд. 1.2):

- *основные технологические*, ради которых и создается машина;
- *вспомогательные*, непосредственно относящиеся к работе данной машины (подача изделий, их ориентация и закрепление, подвод и отвод рабочих органов и т.п.);
- *вспомогательные системные*, обеспечивающие нормальную работу машины (обеспечение обрабатываемым материалом, инструментом, вспомогательными средствами; транспортировка полученной продукции, ее межоперационная передача, контроль и складирование);
- *управляющие* по отношению к технологическим и непосредственным вспомогательным процессам (локальное управление);
- *управляющие системные*, связанные со всеми обеспечивающими процессами, когда машина работает как часть системы;
- *обслуживающие* – связанные с поддержанием работоспособности машин и их механизмов (наладка и переналадка, устранение отказов в работе, ремонт и межремонтное обслуживание).

Эти функции могут выполняться:

- полностью человеком, в том числе с использованием технических средств, облегчающих и ускоряющих его действия;
- с частичным участием человека, при распределении обязанностей между ним и механизмами и устройствами;
- полностью автоматизированно, без участия человека.

Большинство технологических рабочих машин – циклического (дискретного) действия с чередованием во времени основных технологических и вспомогательных функций в течение времени получения одного изделия или порции изделий, выдаваемых за цикл:

$$T = t_{\text{р}} + t_{\text{х}}, \qquad (1.1)$$

где T – длительность цикла;

$t_{\text{р}}$ – время рабочих ходов;

$t_{\text{х}}$ – время холостых ходов цикла.

Реплика. *В технической литературе часто применяются термины "машинное время" и "вспомогательное время". Они утвердились в эпоху неавтоматизированного производства, когда машина (станок) выполняла лишь непосредственно технологические функции, и это время было действительно "машинным". А во всем остальном человек "вспомогал" машине (загрузка, закрепление и др.). В автоматических машинах и линиях в пределах рабочего цикла нет "немашинного" времени, технологические и вспомогательные процессы с позиций конструктивной реализации и управления равноправны (см. примеры в гл. 8 и 9).*

Поэтому далее используются термины "рабочий ход", когда выполняется основная функция рабочей машины, и "холостой ход", когда машина работает, но с позиции функционального назначения время тратится вхолостую.

Нулевая ступень автоматизации – это неавтоматизированные рабочие машины, где без участия человека выполняются лишь основные технологические функции. Если и непосредственное выполнение технологических операций (покраска, сварка и т.п.) требует участия человека, то это не машина.

Функционально неавтоматизированная рабочая машина включает в себя: двигатель как источник энергии, передаточные механизмы, исполнительный механизм. Последний содержит лишь механизмы рабочих ходов.

Вспомогательные функции (загрузка и съем изделий, их закрепление и открепление и т.д.) выполняются человеком вручную или с использованием средств механизации. Системы управления в общем виде всегда включают в себя, как минимум, два компонента: 1) "командоаппарат" как главный управляющий орган и 2) средства управления (связи с объ-

ектом). В данном случае командоаппаратом является сам человек, а средствами управления – различные кнопки, рукоятки, лимбы и т.д., которыми он и осуществляет управление.

Первая ступень автоматизации – это автоматизация отдельных машин, создание машин-автоматов и полуавтоматов.

Автоматом называется самоуправляющая рабочая машина, которая самостоятельно выполняет все рабочие и холостые ходы и нуждается лишь в наладке и контроле функционирования. В соответствии с этим функциональная схема кроме двигателя, привода и рабочих механизмов (что обязательно для любой машины!) всегда включает в себя комплект механизмов холостых ходов и управления (рис. 1.4), что и является конструктивными признаками автоматов.



а)



б)

Рис. 1.4. Структурные схемы машин-автоматов:
а – на механической основе; *б* – с микропроцессорной САУ

На ранних исторических этапах автоматизации автоматическое управление сводилось к управлению механизмами рабочих и холостых ходов в пределах рабочего цикла, а также к блокировке работы машины при неполадках. Такие простейшие функции могли выполнять устройства на механической или пневмогидравлической основе, которые конструктивно являлись частью исполнительного механизма машины (рис. 1.4, *а*).

Прогресс вычислительной техники позволил перейти к микропроцессорным САУ, где командоаппаратом является управляющая ЭВМ, а все управляющие связи реализуются различными блоками управления. САУ выделяется из состава исполнительного механизма (в том числе дистанционно!), машина из трехзвенной (Дв – Пер – Исп) становится четырехзвенной (рис. 1.4, *б*); при этом по сложности и стоимости САУ теперь сопоставим со всем остальным составом машины. Расширяются функциональные возможности машин-автоматов в отношении не только цикловых функций управления, но и обслуживающих (диагностика состояния, переналадка и подналадка и т.п.) (см. разд. 1.7).

В машинах-автоматах имеется полный комплект механизмов рабочих и холостых ходов и САУ, что позволяет полностью устранить участие человека в работе машины. Однако не всегда это возможно и целесообразно. В ряде случаев автоматическое выполнение некоторых элементов рабочего цикла, например автоматической загрузки хрупких или сложной формы изделий, их ориентации в пространстве и т.п., весьма затруднительны, и эту функцию предпочитают оставлять за человеком.

Полуавтомат – это машина, работающая с автоматическим циклом, для возобновления которого требуется вмешательство человека, конструктивный признак – отсутствие одного из механизмов рабочих ходов (загрузки и т.п.).

Вторая ступень автоматизации – это автоматизация в масштабах системы машин, создание автоматических и автоматизированных линий, гибких производственных систем (ГПС) и др.

Автоматическая линия (АЛ) — это автоматически действующая система машин, расположенных, как правило, в технологической последовательности и объединенных общими средствами транспортировки изделий, управления, накопления заделов, удаления отходов и т.п. Именно наличие автоматически действующих межоперационных механизмов и устройств, а также комплексных САУ является конструктивным признаком АЛ.

АЛ можно рассматривать как машину-автомат более высокого порядка, где подсистему рабочих ходов составляют встроенные в линию

машины-автоматы (со своими механизмами рабочих и холостых ходов, САУ и т.п.); функцию холостых ходов выполняют межстаночные механизмы транспортировки, накопления заделов и т.д.; управляющую подсистему образуют разнообразные механизмы и устройства межагрегатного управления (рис. 1.5).

АЛ обычно не переналаживаются или могут переналаживаться на узкую номенклатуру однотипной продукции.

ГПС – это автоматическая система машин с широкими возможностями переналадки на выпуск разнообразной продукции.

При переходе к системам машин становятся невозможными САУ на механической и пневмогидравлической основе, ведущим здесь является микропроцессорное управление.

Третья ступень автоматизации – комплексная автоматизация на уровне участков и цехов, предприятий в целом.

Автоматическим называется цех, в котором основные производственные процессы выполняются на АЛ или ГПС с автоматическими связями между ними. Структурная схема автоматического цеха приведена на рис. 1.6. Здесь транспортировка межлинейная, а функции управления в основном организационно-экономические – посредством автоматизированных систем управления производством (АСУП) на базе ЭВМ. Чем выше степень автоматизации, тем выше быстродействие и производительность, но оборудование дороже и менее надежно.

Приведем примеры сравнительных характеристик различных по степени автоматизации вариантов оборудования одинакового функционального назначения.

Пример 1. Имеется корпусная деталь (рис. 1.7), на верхней плоскости которой необходимо получить 30 одинаковых резьбовых отверстий, выполнив сверление (t_1 = 1,0 мин), зенкование фасок (t_2 = 0,1 мин) и нарезание резьбы (t_3 = 0,6 мин).

В условиях неавтоматизированного производства такая обработка может быть осуществлена на радиально-сверлильном станке (рис. 1.8). Здесь автоматически выполняются функции вращения шпинделя и его подачи. Все остальные функции в пределах рабочего цикла: подвод и отвод шпинделя с инструментом; подъем и поворот траверсы; радиальное перемещение шпиндельной бабки по траверсе; установка и закрепление детали, ее открепление и съем, замена инструмента; включение, переключение режимов и т.д. – выполняет рабочий.

Устройства управления обслуживают лишь дискретные элементы цикла в пределах одного рабочего хода инструмента при обработке элементарной поверхности. Переход с одного элемента рабочего цикла на другой, включая отвод, установку инструмента на новую глубину обработки, производится человеком.

Рис. 1.5. Структурная схема АЛ

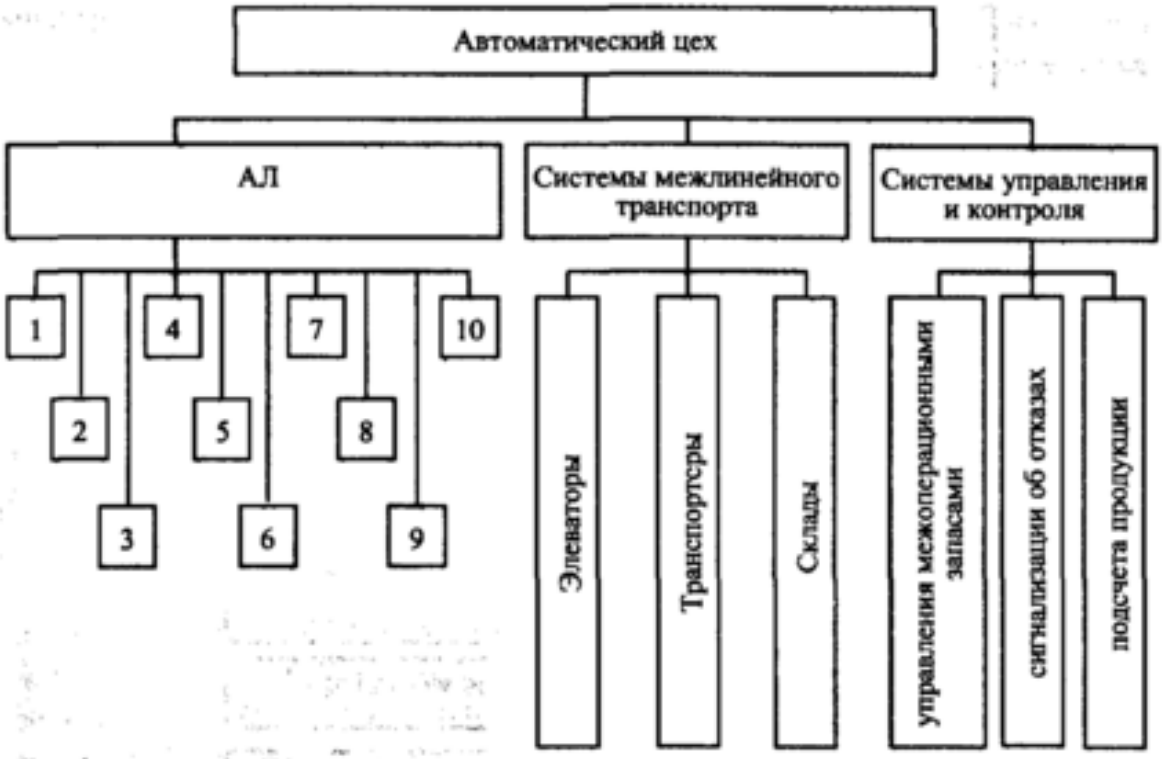


Рис. 1.6. Структурная схема автоматического цеха

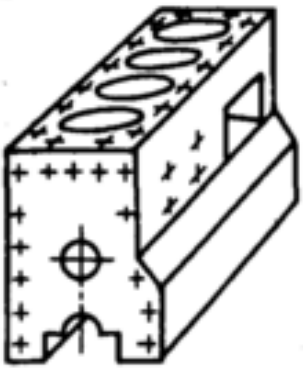


Рис. 1.7. Корпусная деталь

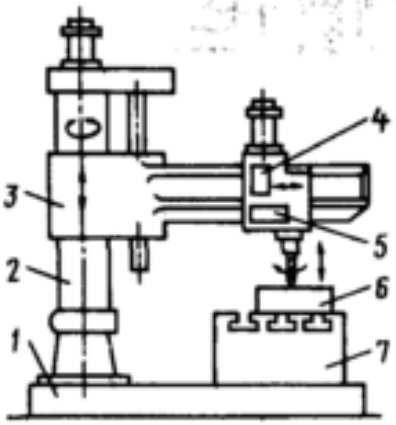


Рис. 1.8. Радиально-сверлильный станок:
1 – основание; *2* – колонна; *3* – траверса; *4* – шпиндельная бабка; *5* – пульт ручного управления; *6* – обрабатываемая корпусная деталь; *7* – стол

Особенностью универсальных станков является отсутствие совмещения операций. Это одноинструментальные станки, поэтому время рабочих ходов цикла равно суммарной длительности всех элементов обработки. Ограниченные воз-

можности человека почти исключают и совмещение вспомогательных функций по установке деталей, замене инструмента, его подводу и отводу и т.д.

Итак, при отсутствии совмещения действий во времени

$$t_p = 30(t_1 + t_2 + t_3) = 30(1{,}0 + 0{,}1 + 0{,}6) = 51 \text{ мин.}$$

Обычно при работе на универсальных станках основное технологическое время составляет лишь 25...30 %, тогда t_x = 120 мин.

Длительность рабочего цикла как интервал времени выдачи одного изделия (корпусной детали) с произведенной обработкой составит

$$T = t_p + t_x = 170 \text{ мин} \approx 3 \text{ ч.}$$

При этом 30 % времени работает станок, а человек простаивает, и наоборот.

В этом примере отмечены все недостатки неавтоматизированного производства: низкая производительность оборудования; монотонный ручной труд.

Как автоматизировать процесс? Часто приходится слышать, что для этого достаточно поставить у станка промышленный робот, который возьмет на себя ручной труд, и компьютер, который будет выполнять все умственные функции. Это глубокое заблуждение. Конструкция и компоновка радиально-сверлильного станка так же идеально "подогнаны" к человеку, как костюм лучшего портного. Ни с роботом, ни с компьютером станок без коренной переделки работать не сможет.

Рассмотрим уже сложившиеся инженерные решения по автоматизации обработки отверстий.

На рис. 1.9 показан многооперационный станок-полуавтомат с ЧПУ, на котором также можно обработать заданную корпусную деталь. Радиально-сверлильный станок и станок с ЧПУ будут иметь одинаковые: структуру рабочего цикла, порядок выполнения элементов обработки, технологический комплект инструмента. Однако они разительно отличаются как по компоновке, так и по конструкции.

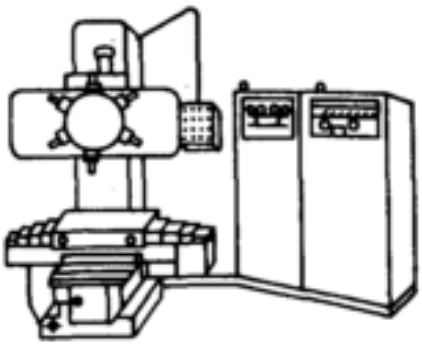


Рис. 1.9. Многооперационный станок-полуавтомат с ЧПУ

В станке с ЧПУ автоматизированы все вспомогательные относительные перемещения: подвод и отвод инструментов, координатная перестановка инструментов и детали, последовательность выполнения всех элементов цикла, переключение технологических режимов, управление перемещениями и т.д. Рабочий лишь снимает готовую деталь, устанавливает и закрепляет новую заготовку и включает станок. Далее весь рабочий цикл выполняется автоматически по командам с пульта программного управления. Комплект инструментов находится в инструментальном магазине, их замена также автоматизирована, изменение координат обработки проводится перемещением стола по двум координатам в горизонтальной плоскости.

При обработке на данном станке рабочий может обслуживать несколько станков, в связи с чем повышается производительность труда.

Продолжительность обработки, если не применены иные конструкции инструмента, существенно не меняется. При любом объеме инструментального магазина станок остается одноинструментным, т.е. одновременно может работать только один инструмент, совмещение рабочих и холостых ходов во времени отсутствует, поэтому производительность по сравнению с обработкой на обычном универсальном станке увеличится не более чем на 40…60 %. Это достигается интенсификацией вспомогательных действий благодаря их автоматическому выполнению.

Однако в пределах первой ступени автоматизации имеются иные технические решения, прежде всего использование принципа совмещения операций, применение многоинструментальной и многопозиционной обработки, что может быть реализовано только в условиях автоматизированного производства, так как человек производить одновременно несколько операций и координировать работу нескольких инструментов не в состоянии.

На рис. 1.10 показан многопозиционный агрегатный станок-полуавтомат. Станок имеет три рабочие позиции, в которых каждая деталь проходит последовательно операции сверления отверстий, зенкования фасок, нарезания резьбы, и одну холостую – для загрузки и съема деталей. На каждой позиции одновременно обрабатываются все отверстия с помощью многошпиндельных насадок с инструментами. Обработка проводится во время стоянки поворотного стола, на холостой позиции в это время идет замена деталей. Таким образом, в данном многопозиционном станке-полуавтомате время рабочих ходов определяется не суммой всех переходов, а длительностью лишь одного из них – сверлением отверстия ($t_р = t_1 = 1$ мин). Следовательно, для рассматриваемого примера оно со-

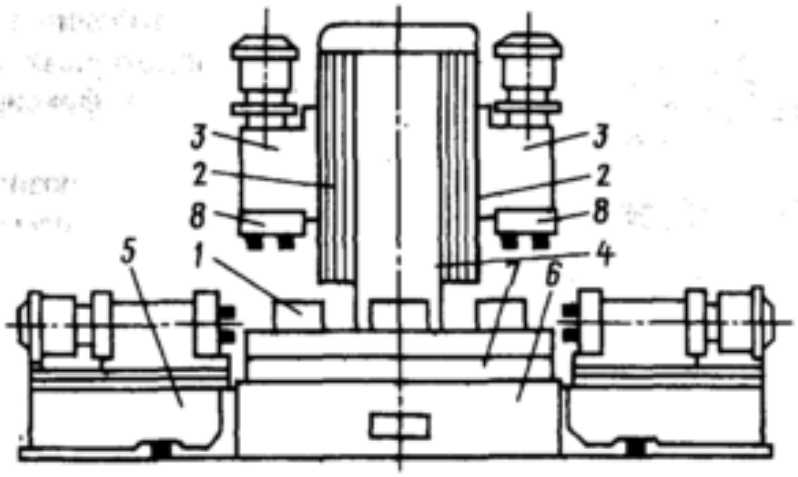


Рис. 1.10. Многопозиционный агрегатный станок-полуавтомат:
1 – обрабатываемая корпусная деталь; *2* – направляющие силовых головок; *3* – силовые головки; *4* – центральная колонна; *5* – станина горизонтальной силовой головки; *6* – центральная станина; *7* – поворотный стол; *8* – многошпиндельная насадка

кращено по сравнению с одноинструментальным станком в ~ 50 раз! Благодаря совмещению сокращены и холостые ходы цикла: все подводы и отводы проводятся одновременно, инструмент не заменяется, загрузка и съем совмещены во времени с обработкой. Несовмещенные холостые ходы цикла складываются из времени быстрого подвода и отвода лимитирующей силовой головки (сверлильной) и поворота стола – t_x = 0,25 мин. В итоге длительность рабочего цикла T = 1,25 мин.

Сочетание автоматизации цикла и совмещения операций позволяет повысить производительность по сравнению с универсальными станками в десятки раз! Однако дается это за счет универсальности. Радиально-сверлильный станок быстро переналаживается на обработку широкого круга изделий; обрабатывающий центр – труднее, но без принципиальных трудностей. Многопозиционный агрегатный станок очень сложно переналаживается и может быть эффективно использован только в условиях массового и крупносерийного производства.

Отметим, что многопозиционный агрегатный станок-полуавтомат (см. рис. 1.10) по своим конструктивно-компоновочным формам не похож ни на универсальный радиально-сверлильный станок (см. рис. 1.8), ни на станок с ЧПУ (см. рис. 1.9), хотя обрабатываемые детали совершенно идентичны.

Обработку корпусных деталей можно выполнять и на *АЛ из агрегатных станков* (рис. 1.11), реализуя тем самым вторую ступень автоматизации.

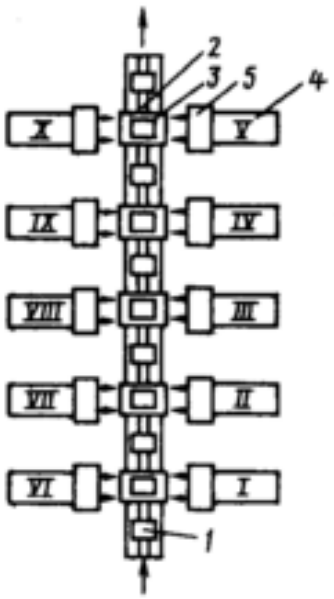


Рис. 1.11. АЛ из агрегатных станков:
1 – обрабатываемая корпусная деталь; *2* – шаговый транспортер; *3* – приспособление; *4* – силовая головка; *5* – многошпиндельная насадка; *I – X* – номера силовых головок

Обработка изделий на АЛ проводится в стационарных приспособлениях, где деталь фиксируют и зажимают.

Перемещение с позиции на позицию выполняет шаговый конвейер. *Цикл работы АЛ*: 1) ход конвейера вперед, перемещение деталей на один шаг; 2) фиксация и зажим деталей в приспособлениях; 3) быстрый подвод всех силовых головок с многошпиндельными насадками; 4) обработка, которая начинается одновременно на всех рабочих позициях; в это время происходят установка очередной заготовки на первую, загрузочную позицию и возврат шагового конвейера; 5) быстрый отвод силовых головок; 6) разжим и расфиксация деталей.

Если дифференцировать сверление отверстий на две части с выполнением на разных позициях, рабочий цикл линии будет $T = 0{,}9$ мин, т.е. производительность по сравнению с радиально-сверлильным станком повысится почти в 200 раз!!!, но переналадка практически невозможна.

Пример 2. Имеется кремниевая пластина (подложка) толщиной 0,2 и диаметром 76 мм, на которой групповым методом изготовляются топологии интегральных микросхем (далее пластина будет разрезана). Все интегральные схемы многослойные, с высочайшей степенью точности совмещения слоев. На предшествующей операции поверх топологии предыдущего слоя наносится тонкое светочувствительное покрытие – фоторезист. Необходимо засветить (экспонировать) этот фоторезист сквозь фотошаблон, на котором нанесена топология последующего слоя. При этом фотошаблон предварительно совмещается по реперным знакам с пластиной, содержащей предыдущий слой.

На рис. 1.12 показана конструктивная схема неавтоматизированной установки экспонирования кремниевых пластин, включающая в себя: осветитель *2*, от которого световые лучи через систему зеркал, линзу и фотошаблон *4* попадают на подложку, засвечивая фоторезист; предметный столик *5*, на котором закрепляется (вакуумным прихватом) подложка; механизм *6* подачи и прижима подложки и фотошаблона; манипулятор *3* для совмещения подложки и фотошаблона; поворотный корпус *1* с микроскопом.

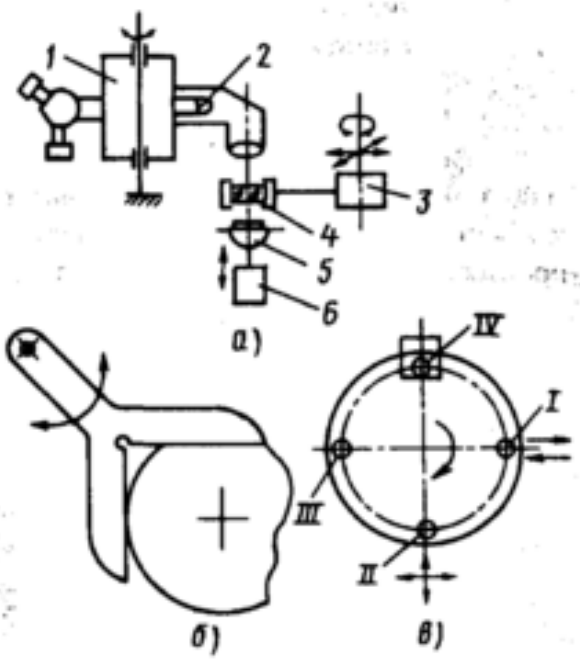


Рис. 1.12. Неавтоматизированная установка контактного экспонирования кремниевых пластин:
а – общая схема; *б* – схема предварительной ориентации пластины по углу; *в* – схема поворотного приспособления; I – IV – номера позиций

Установка показана в положении рабочего процесса – экспонирования длительностью $t_р$ = 60 с. Все вспомогательные операции и управление выполняются рабочим вручную. После выключения осветителя подложка и фотошаблон раскрепляются, корпус поворачивается на 180°, в рабочей позиции оказывается взамен осветителя микроскоп; подложка укладывается в кассету, t_{x2} = 10 с. Новый цикл начинается с укладки новой подложки на столик, далее манипулятором шаблон совмещается по реперным знакам с подложкой при наблюдении в микроскоп, идет закрепление на столике. Корпус снова поворачивается на 180° так, что в рабочей позиции снова оказывается осветитель; t_{x1} = 60 с.

Итого: $T = 60 + 60 + 10 = 130$ с, из них ручного времени $t_{x1} + t_{x2} = 70$ с, т.е. 55 %. Ускорение холостых ходов можно получить специальным шаблоном с предварительной ориентацией подложки по лыске (см. рис. 1.12, *б*) или поворотным приспособлением с поз. I – IV (см. рис. 1.12, *в*), но время холостых ходов нельзя сократить менее чем на 10...20 с, все равно лимитирующими по быстродействию будут не рабочие, а холостые ходы, прежде всего совмещение шаблона с подложкой. Ускорение ухудшает точность совмещения.

Схема полуавтомата для совмещения и экспонирования показана на рис. 1.13. Здесь человек выполняет только совмещение с помощью манипулятора и нажатие кнопки сигнала к продолжению цикла в конце процесса. Суммарное время холостых ходов t_x = 18 с; технологический процесс неизменный, поэтому

$T = t_р + t_к = 60 + 18 = 78$ с. Точность совмещения вручную осталась на уровне 2...3 мкм. Чтобы полностью автоматизировать рабочий цикл, пришлось радикально переконструировать оборудование (рис. 1.14). Это установка не контактной, а проекционной литографии. Вместо манипулятора установлен двухкоординатный предметный стол, фотошаблон расположен стационарно. Повысилась точность совмещения, но уменьшилась производительность, так как единовременно засвечивается не вся подложка, а ее отдельный участок.

Автоматизация процессов микролитографии может быть осуществлена на автоматизированной линии (рис. 1.15).

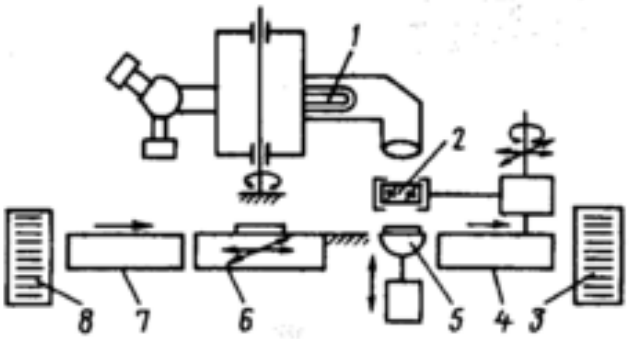


Рис. 1.13. Полуавтомат контактного экспонирования кремниевых пластин:
1 – осветитель; *2* – фотошаблон в захвате манипулятора; *3*, *8* – соответственно приемная и исходная кассеты; *4*, *7* – соответственно отводной и подающий лотки; *5* – неподвижный предметный столик; *6* – позиция предварительной ориентации

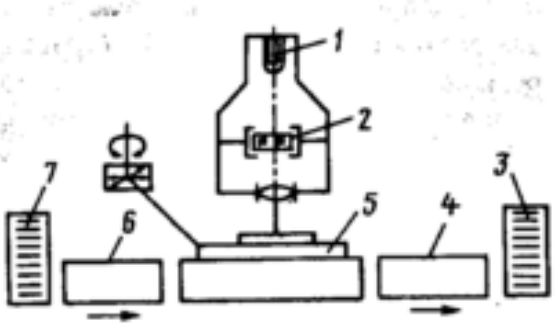


Рис. 1.14. Полуавтомат проекционного экспонирования кремниевых пластин:
1 – осветитель; *2* – фотошаблон; *3*, *7* – соответственно приемная и исходная кассеты; *4*, *6* – соответственно отводной и подающий лотки; *5* – двухкоординатный предметный стол

На линии выполняются три последовательные операции изготовления интегральных микросхем.

1. Нанесение на пластину слоя фоторезиста (капельная подача, центрифугирование с формированием слоя равномерной толщины, сушка слоя).

2. Экспонирование слоя фоторезиста сквозь фотошаблон.

3. Проявление фоторезиста (удаление травлением засвеченных участков и задубливание оставшихся).

В результате топологический рисунок фотошаблона оказывается перенесенным на слой фоторезиста в виде системы взаимосвязанных "окон".

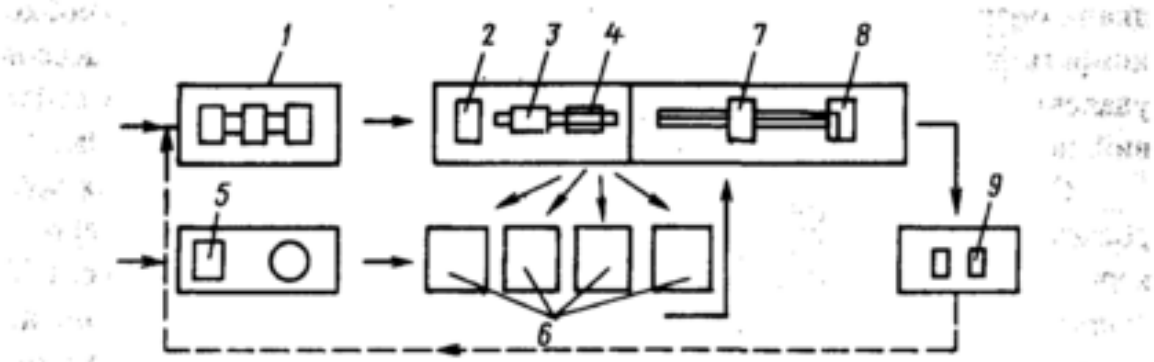


Рис. 1.15. Автоматизированная линия обработки кремниевых пластин:
1 – установка подготовки пластин; *2* – позиция кассетирования; *3* – позиция нанесения фоторезиста; *4* – позиция сушки фоторезиста; *5* – установка подготовки фотошаблона; *6* – установки экспонирования (см. рис. 1.12 – 1.14); *7* – позиция проявления фоторезиста; *8* – позиция задубливания фоторезиста; *9* – установка контроля топологии на пластине

Далее, за пределами линии (см. рис. 1.15), следуют такие операции.

4. Микротехнологические воздействия сквозь "окна": удаление материала пластины (травлением) или его наращивание (вакуумным осаждением), модификация свойств приповерхностного слоя пластины (ионной имплантацией) и др.

5. Удаление участков остаточного фоторезиста; так как поверхности под ними были "заэкранированы" для микровоздействий, на пластине остается лишь топологическая структура, в точности соответствующая рисунку фотошаблона. Это материализованная электросхема с активными и пассивными элементами и межсоединениями в виде дорожек – "проводящий" слой на плоскости сформирован.

6. Нанесение поверх топологии изолирующего слоя (диффузией или иными методами).

В дальнейшем в изолирующем слое с той же последовательностью операций (1 – 5) выполняется система "окон" для межслойных электрических контактов, над изолирующим слоем создается очередной проводящий слой со своей структурой (электросхемой на плоскости). В итоге интегральная схема представляет собой "слоеный пирог" с чередованием токопроводящих и изолирующих слоев, с межслойной коммутацией.

Жесточайшие требования к точности изготовления интегральных микросхем (геометрические размеры элементов и точность координат расположения находятся в микрометровом и даже субмикрометровом

диапазонах), а также требования к чистоте материалов диктуют необходимость высокой степени автоматизации технологических процессов, удаление из рабочих зон человека не только из-за субъективности действий, но и как источника привносимой микродефектности на пластине.

Однако процесс создания АЛ для изготовления интегральных микросхем оказался сложным и длительным. Для механической обработки корпусных изделий (см. рис. 1.7) наряду с многопозиционными (см. рис. 1.10) существовали и однопозиционные агрегатные станки, работающие напроход. Создание АЛ из таких станков (см. рис. 1.11) потребовало лишь решения задач межстаночной транспортировки и управления.

Создавать АЛ для изготовления интегральных микросхем из оборудования по рис. 1.15 сложно и неразумно:

- различна длительность рабочего цикла на операциях, что заставляет прибегать к дублированию оборудования;
- одни установки вертикального типа, другие горизонтального, одно- и многопозиционные.

В этих условиях автоматическая загрузочно-транспортно-накопительная система будет сопоставима по сложности и стоимости с основным технологическим оборудованием.

И вовсе невозможно создать АЛ для всех операций (I – VI), так как одни процессы выполняются в атмосфере, другие – только в вакууме. "Ввести в вакуум" традиционные "мокрые" технологии капельного нанесения фоторезиста, химического травления, отмывки пластин нельзя по требованиям вакуумной гигиены.

Создание АЛ изготовления интегральных микросхем стало возможным и реальным только после революционных преобразований технологии, а именно: разработки по всему технологическому маршруту "сухих" технологических методов и процессов (вакуумное осаждение пленки фоторезиста взамен капельного нанесения и центрифугирования, плазмохимическое травление в вакууме вместо жидкостного и т.д.).

На рис. 1.16, *а* показана планировочная схема модульной АЛ нанесения топологического рисунка на поверхность полупроводниковых пластин. На линии выполняются многократные операции микролитографии, ионной имплантации, плазмохимического травления (ПХТ) резиста, отжига, ионно-химического травления (ИХТ), вакуумного нанесения пленок.

Работа участка линии, состоящего из семи рабочих модулей *1 – 7*, вакуумной транспортной магистрали *8*, шлюзовых устройств *9* и шлюзо-

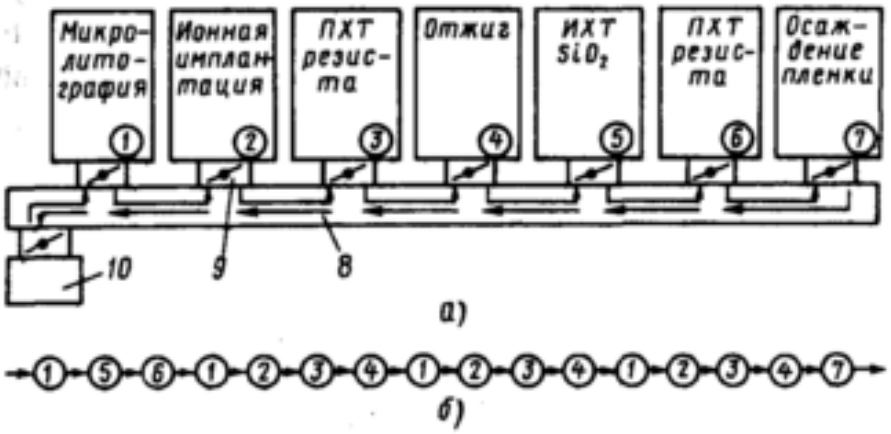


Рис. 1.16. Вакуумная АЛ:
а – структурно-компоновочная схема; *б* – типовой технологический маршрут кремниевой пластины; *1 – 7* – технологические модули (*1* – модуль экспонирования; *2* – модуль ионной имплантации; *3*, *6* – модули ПХТ соответственно; *4* – модуль отжига; *5* – модуль ионно-химического травления; *7* – модуль вакуумного осаждения пленки; *8* – магистральный транспортер; *9* – шлюзовые устройства; *10* – вакуумное загрузочно-разгрузочное устройство)

вого загрузочного устройства *10*, заключается в поштучном прохождении каждой подложкой маршрута от позиции загрузки из кассеты, помещенной в шлюз, на транспортер, перемещающий ее от модуля к модулю в определенной последовательности (см., например, рис. 1.16, *б*). После прохождения всего маршрута подложки выгружаются обратно в кассету, которая затем извлекается из шлюза.

Данная структура участка вакуумной АЛ и принцип его работы приняты, исходя из главного условия – сократить до минимума время прохождения подложкой всего технологического маршрута при минимально возможном числе рабочих модулей. Это позволяет уменьшить влияние технологической среды на загрязняемость подложек при обработке и транспортировке. Однако задача усложняется тем, что часто не удается обеспечить простейшую маршрутизацию перемещений подложек между модулями, прежде всего из-за повторяемости некоторых операций и необходимости возвратных перемещений подложек к соответствующим модулям. При этом "новые" подложки должны "ждать", пока по второму, третьему или даже четвертому разу обработаются на данном модуле запущенные ранее подложки, например для операции микролитографии. Маршрутизация усложняется также из-за возможности сбоев и отказов элементов линии: рабочих модулей, транспортных механизмов, систем контроля, управления и т.д.

Как видно, эта АЛ принципиально отличается от применяемых в машиностроении не только наличием вакуума, но и сложностью маршрутизации изделий, многократным их возвратом на предыдущие позиции.

***Реплика**. Основная целевая функция данного раздела – уберечь будущих специалистов от превратного представления о методах и сущности автоматизации производства. К сожалению, очень доходчивой и растиражированной оказалась такая трактовка: при автоматизации к сверлильному (токарному и т.д.) станку пристыковываются промышленный робот и персональный компьютер, которые вместе якобы образуют "автоматизированный технологический модуль" как основную ячейку автоматизированного производства.*

При этом подразумевается, что станок как комплекс технологических, структурно-компоновочных и конструктивных решений остается в основном неизменным, зато избавляется от постоянного присутствия рабочего, а рабочий – от непривлекательного физического труда и умственных усилий. Против такого представления весь материал разд. 1.4, где на конкретных примерах показано, что переход на любую более высокую ступень автоматизации требует принципиально иных технических решений.

Попытаемся развить этот тезис. Если конкретно "инвентаризировать" все элементарные действия человека при обслуживании радиально-сверлильного станка [поворот и подъем траверсы, перемещение в шпиндельной бабке, подвод и отвод шпинделя вращением рукояток, замена инструмента, включение и выключение подачи и т.д. и т.п. (см. рис. 1.8)], то выясняется, что никакой робот не в состоянии этот комплекс воспроизвести. Человек – самое удивительное и совершенное творение природы, его может заменить только другой человек, желательно более сильный и умный. Любые технические средства, например промышленные роботы, могут выполнять лишь отдельные функции из бесконечного диапазона человеческих возможностей – лишь иногда быстрее и лучше!

Можно представить себе одиозное зрелище, когда промышленный робот своими клешнями-схватами будет вращать маховички и лимбы, катить шпиндельную бабку по траверсе (см. рис. 1.8). Столь же одиозным будет подключение персонального компьютера; его не к чему подключать: в радиально-сверлильном станке все органы управления рассчитаны только на ручное использование.

Будущий специалист должен твердо уяснить: все технические средства неавтоматизированного производства десятилетиями и даже веками создавались и отрабатывались применительно к особенностям и возможностям человека, образуя вместе с ним очень разумную систему человек–машина. Убрать из этой системы человека, сохранив остальное, – нелепость.

Переход на более высокую ступень технического совершенства, в том числе на новую ступень автоматизации, *требует коренного пересмотра технологии, разработки новых, нетрадиционных конструкций и компоновок машин, отличных от неавтоматизированного оборудования.*

Накопленный опыт автоматизации выявил ряд единых методических подходов, облегчающих трудности практической реализации такого процесса.

Укажем первоначально на следующие:

- общность машин различного технологического назначения, но одного уровня автоматизации, что позволяет использовать опыт автоматизации одних отраслей в смежных и даже отдаленных, особенно в отношении структурно-компоновочных решений, конструкций механизмов холостых ходов и САУ (см. разд. 1.5 и 1.6);
- общность методов разрешения вариантности и поиска оптимальных технических решений (см. разд. 1.7).

1.5. ОБЩНОСТЬ МАШИН-АВТОМАТОВ РАЗЛИЧНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Технологическое оборудование с одинаковым уровнем автоматизации (машины-автоматы) в самых разнообразных отраслях (машиностроение, приборостроение, текстильная, пищевая и электронная промышленность и т.д.) имеет единство концептуальных подходов и конструктивно-компоновочных решений.

Например, имеются две типовые детали из различных отраслей: внутреннее кольцо шарикоподшипника (рис. 1.17, *а*) и тарелочка осветительного прибора (рис. 1.17, *б*). Они принципиально отличаются материалами (сталь и стекло), методами и режимами изготовления.

Задача: проработать параллельно принципиальные схемы машин-автоматов для производства обеих деталей (на многопозиционных автоматах).

Токарный автомат изготовления колец подшипников. Технологическая схема токарного автомата приведена на рис. 1.18. Выполняемые операции: наружная обточка, расточка, фасонирование желоба, подрезка торца, снятие фасок, отрезка. Обработка каждого кольца из трубы выполняется в трех позициях, шестипозиционная схема позволяет работать в два потока.

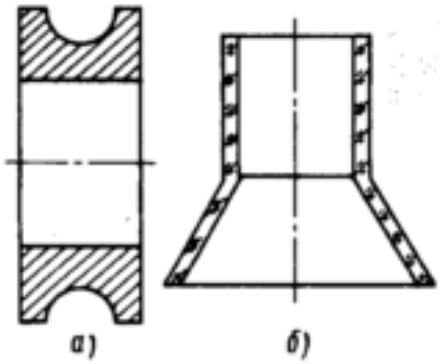


Рис. 1.17. Типовые детали, обрабатываемые на автоматах: *а* – внутреннее кольцо шарикоподшипника; *б* – тарелочка осветительного прибора

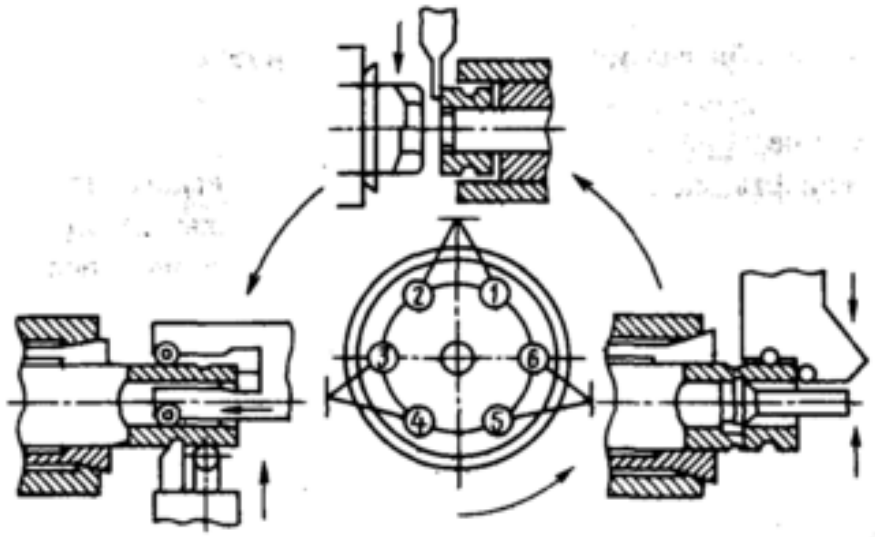


Рис. 1.18. Технологическая схема обработки колец на многошпиндельном токарном автомате

Имея технологическую схему, можно перейти к составлению структурной схемы механизмов и устройств машины, проработке необходимого комплекта конструкций для выполнения функций обработки, вспомогательных, управления. Автомат должен иметь (рис. 1.19) двигатель (в данном случае лучше два), передаточный механизм с зубчатыми, червячными и т.д. передачами и звеньями, а также исполнительный механизм и систему управления. Для токарной обработки необходимы продольный и поперечный суппорты и приспособление для снятия фаски; для холостых ходов – механизмы подачи и зажима материала, упора подачи материала, поворота и фиксации шпиндельного блока.

В САУ, на какой бы базе она ни была реализована (механической, микропроцессорной и т.д.), необходимы функциональные устройства для: управления циклом – координации работы всех механизмов и устройств; контроля и блокировки.

Имея технологическую схему и зная необходимый комплект механизмов и устройств, можно перейти к разработке рабочего цикла машины. Это наглядно иллюстрируется циклограммой (рис. 1.20), которая показывает координацию работы всех дискретно действующих компонентов машины в течение ее рабочего цикла *T*. Нулевым принят момент начала поворота стола. После его завершения следует фиксация стола, что дает одновременный старт всем позиционным механизмам.

Рис. 1.19. Структурная схема механизмов токарного автомата



Рис. 1.20. Циклограмма токарного многошпиндельного автомата

Наиболее сложно их функционирование в загрузочной позиции, где смонтированы механизмы подачи трубы, упора подачи и зажима материала. На рабочих позициях все поперечные суппорты имеют быстрый подвод, медленную рабочую подачу и быстрый отвод в исходное положение. Такие же перемещения имеет продольный суппорт, обслуживающий все позиции. Как только завершена работа последнего из позиционных механизмов (на рис. 1.20 это отвод продольного суппорта), подается команда на расфиксацию. Далее следует снова поворот шпиндельного блока, но это уже новый, очередной рабочий цикл.

Выполним аналогичные процедуры разработки принципиальной схемы **машины-автомата для развертки тарелочек осветительных приборов** (см. рис. 1.17, *б*). Схема обработки изделия из стеклянной трубки приведена на рис. 1.21. Поз. *1* – подача трубки до упора, поз. *2* и *3* – нагрев нижней части (юбки) мягким пламенем горелок, поз. *4* – формирование конуса из горячего стекла. Далее выполняются нагрев острым пламенем места под отрезку (поз. *5*) и отрезка круглыми ножами (поз. *6*).

Для рассмотренных автоматов в конкретных технологических операциях, инструменте и механизмах рабочих ходов нет ничего похожего, но технологии обработки построены на единых принципах. Общий объем обработки дифференцирован на несколько частей, выполняемых на разных позициях. Имеются полные комплекты технологических инструментов и при-

способлений, рассредоточенных в стационарных зонах – позициях. Каждое изделие последовательно переходит от одной позиции к другой, получая в итоге полный объем технологического воздействия.

Одинаковы и принципы действия обоих автоматов: позиции расположены по окружности, обе машины дискретного действия, т.е. обработка проводится во время стоянки поворотного стола; после завершения обработки на всех позициях происходит поворот стола и каждое изделие подходит к новому инструменту или приспособлению. Структурная схема механизмов автомата изготовления тарелочек представлена на рис. 1.22. Как видно, она идентична показанной на рис. 1.19.

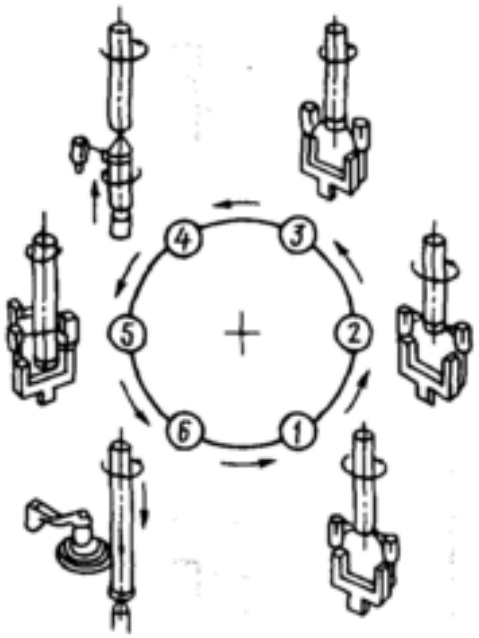


Рис. 1.21. Технологическая схема изготовления тарелочек на многошпинделевом автомате

Различие с токарным автоматом изготовления колец подшипников – в механизмах рабочих ходов; комплекты двигательных и передаточных механизмов, механизмов холостых ходов и управления идентичны. Более того, их конструктивное воплощение, а также методы расчета и выбора параметров одни и те же (на примерах механизмов поворота, зажима, передаточных механизмов, опор).

Рабочие циклы и циклограммы обоих автоматов (см. рис. 1.20 и 1.23) также идентичны.

Подобные примеры можно привести и из других отраслей машино- и приборостроения, из легкой, пищевой, медицинской и т.д. промышленности – отовсюду, где выдаваемая продукция носит дискретный характер.

Принципы построения машин-автоматов и их систем: дифференциация технологического процесса и концентрация операций, способы действия машин, их структура и компоновка, а также номенклатура механизмов холостых ходов и их конструктивные решения, принципы построения и аппаратная реализация САУ – идентичны, их можно и должно изучать обобщенно, иллюстрируя примерами своей отрасли.

Рис. 1.22. Структурная схема механизмов автомата изготовления тарелочек



Рис. 1.23. Циклограмма автомата изготовления тарелочек

Реплика. *Настоящий подраздел при всей скромности объема и иллюстративного материала, отсутствии математического аппарата, по-видимому, центральный в книге; он определяет все дальнейшее ее содержание, интегрируя категории "общности" и "вариантности", формируя основные концептуальные подходы.*

Одно из определений науки как таковой: "Наука – это поиск и нахождение истин и закономерностей, выходящих за рамки очевидности."

Любое самостоятельное научно-техническое направление, чтобы заслужить на то право, должно содержать три основных компонента:

1) ***концептуальные основы*** *(важнейшие понятия, термины и определения; систему взглядов и суждений, отличных от известных и альтернативных проявлений творческой мысли; нетрадиционные принципы и постулаты, используемые при анализе и синтезе);*

2) ***фундаментально-теоретические основы*** *(качественные и количественные методы анализа сущности процессов и явлений с соответствующим математическим аппаратом, количественно раскрывающим функциональные, причинно-следственные связи, взаимозависимость предметов и явлений);*

3) ***прикладную часть****, где должны быть выработаны и изложены методы решения конкретных задач разработки и применения процессов, средств и систем; это должно вытекать из концептуальных и фундаментально-теоретических основ и быть "моментом истины" данного научно-технического направления.*

Сейчас можно утверждать, что наука об автоматизации производственных процессов отвечает этим условиям. Авторская выборка положений данной науки изложена в настоящей книге.

1. ***Концептуальные основы*** *– это трактовка понятий и определений, принципы автоматизации, тезисы общности автоматизированного оборудова-*

ния различного назначения, вариантности технических решений и критериев их выбора. Этому посвящена гл. 1.

*2. **Фундаментально-теоретические основы** – это критериальные начала автоматизации: теория производительности и надежности; инженерные оценки экономической эффективности; принципы построения многопозиционных машин-автоматов и систем машин инструментом теории производительности и надежности. Данные материалы изложены в гл. 2 – 6.*

*3. **Прикладное направление** – это методы выбора оптимальных структурно-компоновочных вариантов машин-автоматов и их систем на этапе технического предложения; анализ их работоспособности в условиях производства. Эти материалы рассмотрены в гл. 7 – 10.*

1.6. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

На уровне функциональных подсистем машин-автоматов наиболее высокую общность имеют современные САУ, что проявляется в принципах действия, структуре, аппаратной и программной реализации.

Сердцем любой электронной управляющей системы является микропроцессор (МП), осуществляющий функции хранения, преобразования и выдачи информации в заданных виде и последовательности.

Микропроцессор включает в себя ряд типовых компонентов. Оперативная память используется как для хранения программ и данных в процессе их выполнения, так и для размещения служебной информации, необходимой для работы МП. Любые обмены информацией осуществляются через шины – стандартизованные информационные магистрали. Порты ввода-вывода информации используются для организации обмена данными между МП и внешними устройствами: ввода и вывода информации, а также используемыми для обмена в обоих направлениях (различные устройства для долговременного хранения информации, сетевые адаптеры, модемы и др.).

В плане аппаратной реализации МП – это большая интегральная схема, которая представляет собой устройство, управляемое тактовыми импульсами и способное в бесконечной последовательности выполнять посылаемые ему команды, управляя самыми разными техническими объектами.

Периферийные устройства, их состав и функционирование определяются конкретным назначением управляемой системы производственного или непроизводственного применения.

Проиллюстрируем общность современных САУ на примере трех систем: а) цветного телевизора; б) персонального компьютера (ПК) офисного назначения; в) промышленного компьютера, выполняющего функции САУ технологическими объектами [2].

На рис. 1.24 показана функциональная схема *современного цветного телевизора*, предназначенного для приема, усиления и преобразования радиосигналов изображения и их звукового сопровождения.

Основная начинка телевизора – это электронные приборы (изделия электронной техники), как электровакуумные (цветные электронно-лучевые трубки – ЦЭЛТ, световые индикаторы), так и полупроводниковые (интегральные схемы, транзисторы), а также сопротивления, конденсаторы и т.д.

Большинство моделей современных телевизоров построено по единой функциональной схеме.

Радиосигнал с антенны поступает на тюнер, где происходит выделение и первичное усиление сигнала, который передается затем на основной функциональный узел телевизора (видеопроцессор). Здесь усиливаются и декодируются сигналы изображения и звука. Видеосигналы трех основных цветов поступают на выходные видеоусилители, где эти сигналы усиливаются до уровней, необходимых для нормальной работы ЦЭЛТ, а именно: формирования электронных потоков катодами электронно-лучевых пушек. Сформированные в схемах видеопроцессоров сигналы кадровой и строчной развертки подаются в соответствующие каскады усиления, а оттуда – на отклоняющую систему (ОС) ЦЭЛТ (см. рис. 1.24).



Рис. 1.24. Функциональная схема цветного телевизора

Напряжение звуковой частоты поступает от видеопроцессора на усилители низкой частоты, а потом на динамики.

Видеопроцессор имеет также: выход на блок соединителя для подсоединения видеомагнитофона, компьютера и т.д. в режиме записи; схему автоматического регулирования работы тюнера и других электронных узлов.

Помимо антенны входные сигналы могут подаваться в режиме воспроизведения от подключаемых устройств: видеомагнитофона, ЭВМ и т.д. через блок соединителя и видеопроцессор, т.е. по тому же тракту, но минуя тюнер.

Блок питания, работающий от сети, формирует постоянное напряжение для питания в рабочем режиме и в режиме ожидания.

Основой системы управления телевизором является процессор управления – микроконтроллер МП, выполняемый в виде отдельного устройства. Управление осуществляется либо с передней панели, либо с пульта дистанционного управления ДУ, который вырабатывает импульсы в инфракрасном диапазоне ИК, принимаемые фотоприемником. Сигналы управления поступают на блок питания, меняя его режим, а также на видеопроцессор, а оттуда – на другие функциональные узлы (усилители и др.).

Рассмотренные основные компоненты телевизора являются составной частью современного офисного ПК (даже внешне – основной вывод информации проводится посредством ЦЭЛТ).

На рис. 1.25 показана функциональная схема аппаратной части ПК, центральным компонентом которого также является МП.

Основные характеристики МП:

- тактовая частота, измеряемая в мегагерцах (МГц);
- набор команд, которые МП "понимает" и может выполнять;
- разрядность шины данных (ШД);
- разрядность шины адресов – ША (ширина адресного пространства).

По ШД МП получает информацию для обработки и затем выдает полученный результат. Разрядность (или "ширина") ШД – число бит, которые МП может одновременно обрабатывать.

Для обращения к памяти используется ША. При обращении в область памяти по указанному в программе адресу МП считывает информацию из ряда ячеек, которые составляют так называемое "машинное слово".

Размер машинного слова обычно соответствует разрядности ШД. Через области памяти, выделяемой для устройств ввода-вывода (порты), осуществляется обмен информацией МП с внешними устройствами.

На аппаратном уровне МП включает в себя следующие основные устройства (см. рис. 1.25).

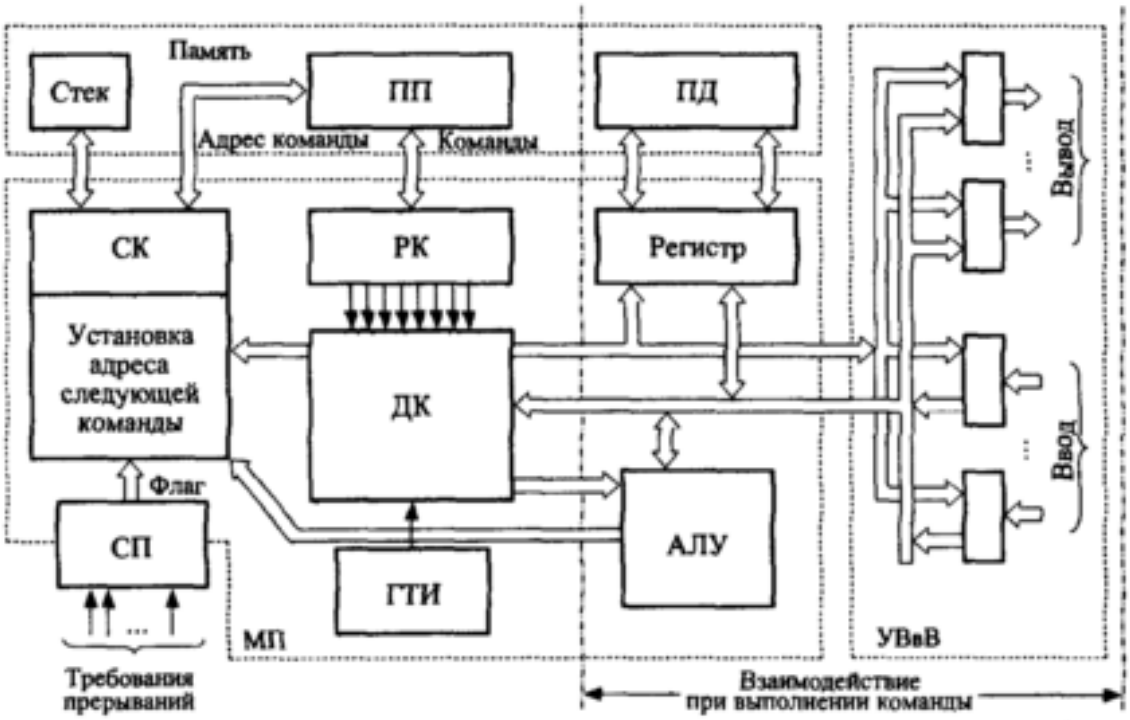


Рис. 1.25. Функциональная схема аппаратной части ПК

1. Устройство СК (счетчик команд) – формирует адреса команд во время выполнения программы в соответствии с заданной очередностью, когда каждый следующий адрес памяти определяется увеличением предыдущего на единицу, а при изменении обстановки (подпрограммы, прерывания, переходы с условием и без) насильно устанавливается по данным из команды.

2. РК (регистр команд) – хранит в течение цикла выполняемую команду и поставляет информацию для дешифратора команд.

3. ДК (дешифратор команд) – по коду команды вырабатывает управляющие сигналы для прочих модулей в соответствии с тактовыми импульсами генератора тактовых импульсов (ГТИ).

4. ГТИ (генератор тактовых импульсов) – формирует опорную тактовую частоту, обеспечивая синхронную работу устройств и пошаговое выполнение действий.

5. СП (система прерываний) – по каналам прерываний воспринимает запросы устройств на прерывание работы МП и устанавливает начальный адрес подпрограммы обслуживания прерывания. Содержимое счетчика СК (адрес откладываемой при прерывании команды) сохраняется в специальной памяти-сетке.

6. АЛУ (арифметико-логическое устройство) – является ядром МП. Управляющий сигнал от ДК обеспечивает выполнение в АЛУ логической или арифметической операции с одним или двумя операндами. Результат – новое двоичное машинное слово.

7. ПП (память программ) – хранит программу. В начале цикла команды по адресу, определяемому СК, команды считываются из ПП в РК.

8. ПД (память данных) – используется для хранения данных в процессе обработки. Передача данных обычно реализуется за несколько тактов.

9. УВвВ (устройства ввода-вывода) – порты ввода-вывода информации для связи с внешними устройствами. Порт представляет собой область памяти, с которой могут выполняться только операции считывания (ввод) или записи (вывод). Внешние устройства работают с соответствующими им областями памяти и проводят обратные действия: запись (ввод) и считывание (вывод).

Устройства на схеме (см. рис. 1.25), обведенные пунктиром, являются управляющими и запускаются от тактовых импульсов, управляемые устройства побуждаются к выполнению действий сигналами управляющих устройств.

При реализации программы, которая располагается в области ПП, по некоторому адресу, начиная с первой команды, происходит считывание этой команды в РК с последующими дешифрацией и формированием ДК управляющих сигналов для других устройств в соответствии с кодом команды и записанной в команде информацией. При выполнении арифметико-логических действий необходимые данные поступают в АЛУ из области ПД по адресам, формируемым ДК, а в случае работы с устройствами ввода – из области пространства памяти УВвВ. Результаты вычислений могут поступать (записываться) в ПД или выводиться в область пространства адресов устройств вывода.

Если в команде заложен переход к подпрограмме, то СК формирует адрес следующей команды и сохраняет его значение в стековой памяти. Дальнейшие действия реализуются, начиная с адреса подпрограммы, который указывается в команде.

Для выполнения условных переходов АЛУ выставляет флаг (признак) результата, влияющий на формирование адреса следующей команды. Флаг служит своего рода сигналом, сообщающим о том, что заложенное в команде перехода условие выполнено.

Команда МП имеет строго определенную структуру. Общим является то, что в начале команды записывается код, затем информация, необ-

ходимая для выполнения команды. МП сначала считывает код команды, потом данные и служебную информацию, а затем приступает к ее выполнению. Последнее может быть совмещено со считыванием кода следующей команды (конвейерный механизм, применяемый во всех современных МП).

На программном уровне в цикле команды МП осуществляет следующие основные действия (рис. 1.26).

1. **Вызов команды** из ПП в РК (местоположение первой команды определяется по начальному адресу программы в памяти).

2. **Выполнение команды**: анализируется и декодируется содержимое РК, а затем реализуется последовательность типовых (для данного МП) элементарных действий (микрокоманд) для выполнения команды.

3. **Формирование адреса** следующей команды (в простом случае путем увеличения адреса на единицу).

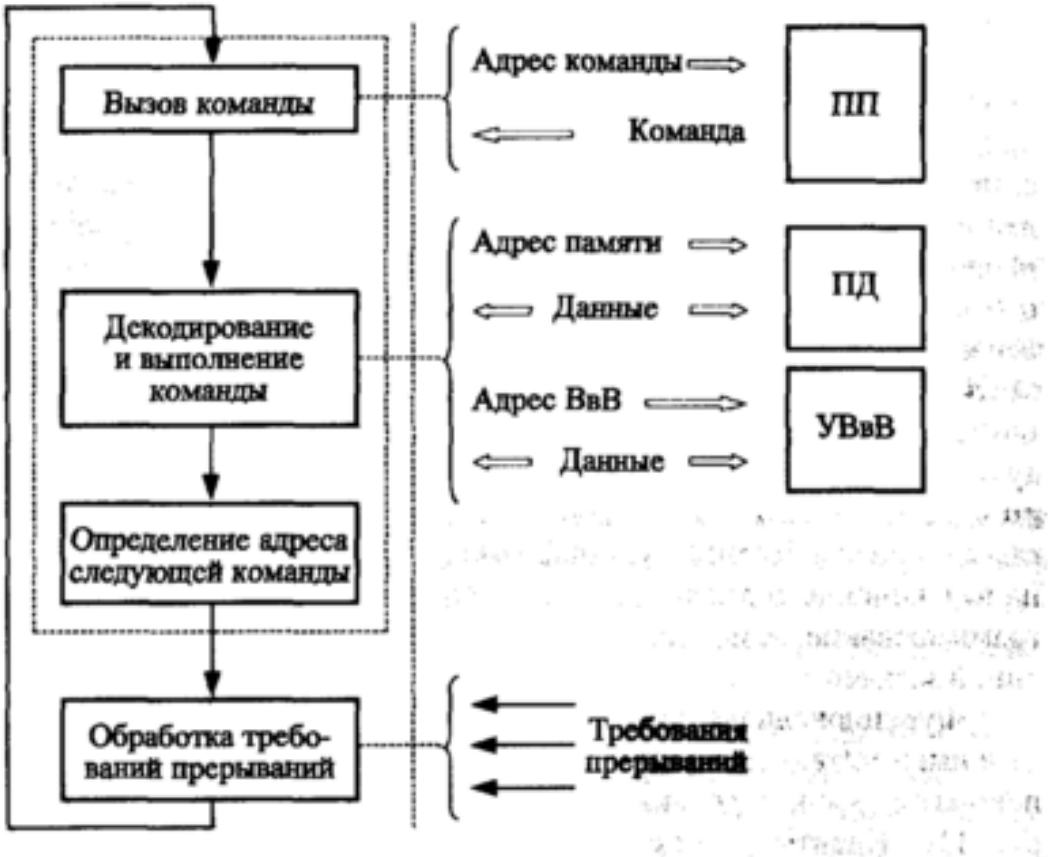


Рис. 1.26. Цикл команд МП и виды взаимодействий при их выполнении

4. **Проверка запросов на прерывание**. Проводится перед выполнением следующей команды. Прерывание – это сигнал, направленный от устройства к МП и сообщающий ему о необходимости обслуживания данного устройства. Если есть запрос, то адрес последующей команды сохраняется в стековой памяти, а СП вырабатывается предусмотренный для каждого конкретного случая начальный адрес (место размещения) подпрограммы обслуживания прерывания. После выполнения подпрограммы обработки прерывания снова вызывается адрес отложенной команды. Далее цикл повторяется.

Круг визуальных, расчетных, ситуационных и других задач, решаемых обычными ПК, все же относительно невелик, их прямое использование для целей управления ограничено. Для этого создаются **промышленные компьютеры**, которые и являются основой современных САУ. Они должны по сравнению с обычными ПК удовлетворять ряду дополнительных требований.

1. **Повышение требования к надежности.** "Зависание" изображения на экране телевизора или обычного офисного компьютера – привычный, хоть и не очень приятный факт. Причиной большинства зависаний является программный или аппаратный сбой, ведущий к нарушению содержимого СК МП. После помехи на экране обычного телевизора изображение восстановится, а вот вероятность того, что после помехи восстановится содержимое СК, практически нулевая. Зависание промышленного компьютера, точнее, центрального процессора, управляющего, например, ядерной электростанцией, – это уже ЧП. В период зависания центральный процессор не в состоянии принять должные меры к поддержанию состояния объекта на предписанном уровне. Это может привести к катастрофическим последствиям.

2. **Повышение требования к гибкости системы**. ПК взаимодействует с человеком (клавиатура, мышь и др.), принтером, плоттером, сканером. При управлении технологическим объектом компьютер должен снимать разнообразнейшую информацию со многих объектов и выдавать на них команды в дискретном либо аналоговом представлении. Перепрограммирование, изменение конфигурации системы и т.п. является постоянной задачей.

Функциональная схема типовой САУ технологическим объектом, например металлорежущим станком, установкой вакуумного нанесения покрытий, экспонирования при микролитографии и др., приведена на рис. 1.27. Идентичными с офисным компьютером являются два основных блока: человеко-машинный интерфейс (аналог УВвВ) и вычислительное ядро.

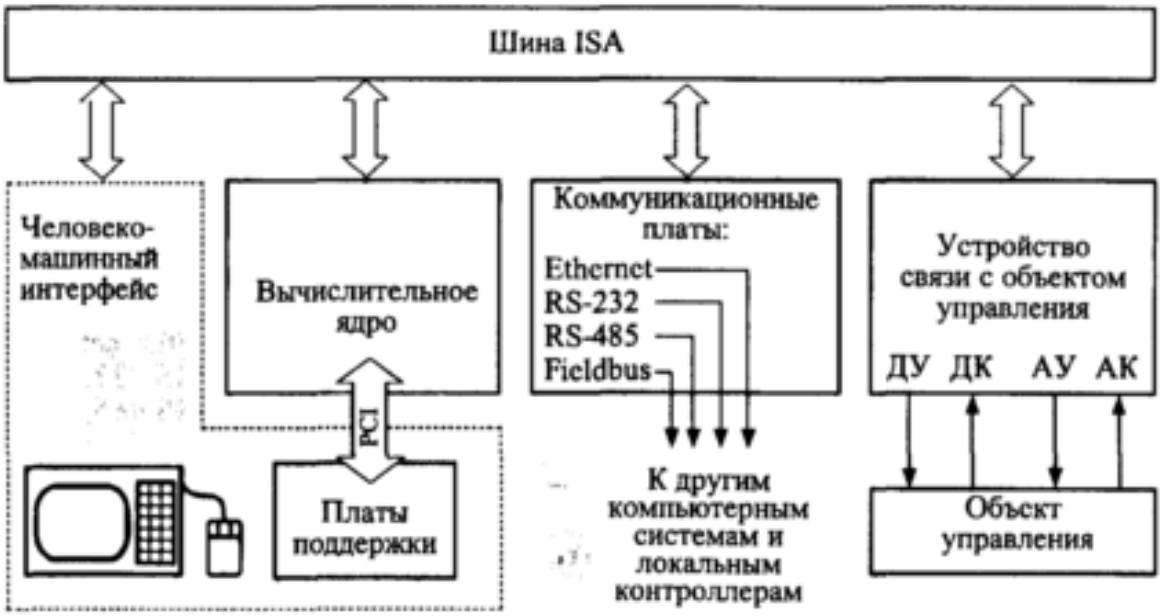


Рис. 1.27. Структурная схема САУ на основе промышленного компьютера:
ДУ – дискретное управление; ДК – дискретный контроль;
АУ – аналоговое управление; АК – аналоговый контроль

Добавлены: 1) блоки коммутации, которые могут связывать САУ с другими системами, например управления АЛ или вышестоящими уровнями организационно-экономического управления; 2) блок связи с объектом управления.

Все компоненты САУ объединяет шина ISA в виде центральной несущей платы.

Конструктивно в зависимости от требований к ней, САУ оформляется различным образом. Если пульт управления представляет собой стандартную стойку и требуется развитый человеко-машинный интерфейс, САУ выполняется как единая рабочая станция. Герметичная клавиатура размещена на лицевой панели рядом с дисплеем. Дисплей может быть оснащен сенсорным экраном, позволяющим вводить информацию указанием на его различные зоны.

Вычислительное ядро САУ оформлено в виде отдельной (процессорной) платы (рис. 1.28).

На плате помимо собственно МП расположены все элементы, необходимые для полноценного функционирования вычислительного ядра. Это контроллеры гибких и жестких дисков, ПЗУ с базовой системой ввода-вывода, оперативная память. Часто в единый модуль интегрированы видеоадаптер и средства коммуникации.

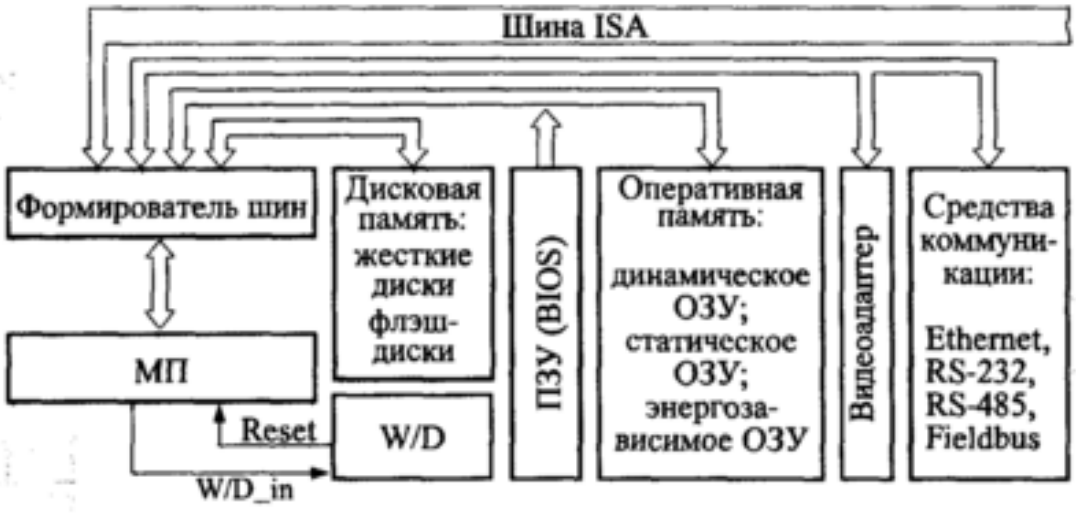


Рис. 1.28. Вычислительное ядро САУ

Главное внимание при разработке процессорной платы обращают на повышение надежности функционирования, что достигается за счет надежности аппаратной части и работы программного обеспечения. Это удается получить прежде всего применением более надежных компонентов. Так, оперативная память формируется из более надежных схем статической памяти. Наиболее важные данные располагают в энергозависимом ОЗУ (см. рис. 1.28). При любых сбоях питания эти данные сохранятся неизменными.

За работой вычислительного ядра постоянно следит специальное устройство, фиксирующее каждый случай зависания управляющей программы. Называют его "сторожевая собака" (W/D-WATCHDOG; см. рис. 1.28). Правильно работающая программа обязана с определенным интервалом подавать в это устройство сигнал W/D_in и сбрасывать W/D. Если этого сигнала не будет, WATCHDOG сам сбросит и перезапустит МП сигналом Reset. Интервал подачи сигнала W/D_in составляет обычно от нескольких десятков миллисекунд до нескольких секунд. Аппаратно контроллер сделан и оснащен таким программным обеспечением, чтобы процесс его перезапуска составлял несколько секунд (иногда десятых или сотых долей секунды) и после перезапуска продолжал работу с прерванного места, восстановив свое состояние.

Средства коммуникации, если они не очень развиты, также размещаются на процессорной плате. В современных конструкциях все большее распространение в распределенных управляющих сетях получает обмен по радиоканалам.

Функциональная схема устройства связи САУ (контроллера) с объектом управления показана на рис. 1.29. Обмен информацией с объектом возможен в дискретном (Д) либо аналоговом (А) представлении. Контроллер должен принимать контрольные сигналы с объекта и выдавать управляющие сигналы. Таким образом, возможно четыре вида сигналов обмена: ДУ – дискретное управление (включить, выключить); ДК – дискретный контроль (включено? выключено?); АУ – аналоговое управление (например, задать число оборотов двигателя); АК – аналоговый контроль (каково напряжение с выхода вакуумметра, контролирующего давление в технологической вакуумной камере?).

Все платы связи с объектом можно разделить на две большие группы: универсальные и специальные. Универсальные платы дискретного, аналогового либо комбинированного обмена (ввода-вывода) предназначены для обмена нормализованными по уровню сигналами. Для последующей связи с объектом эти сигналы необходимо дополнительно усилить и защитить от помех. Эти функции выполняют платы

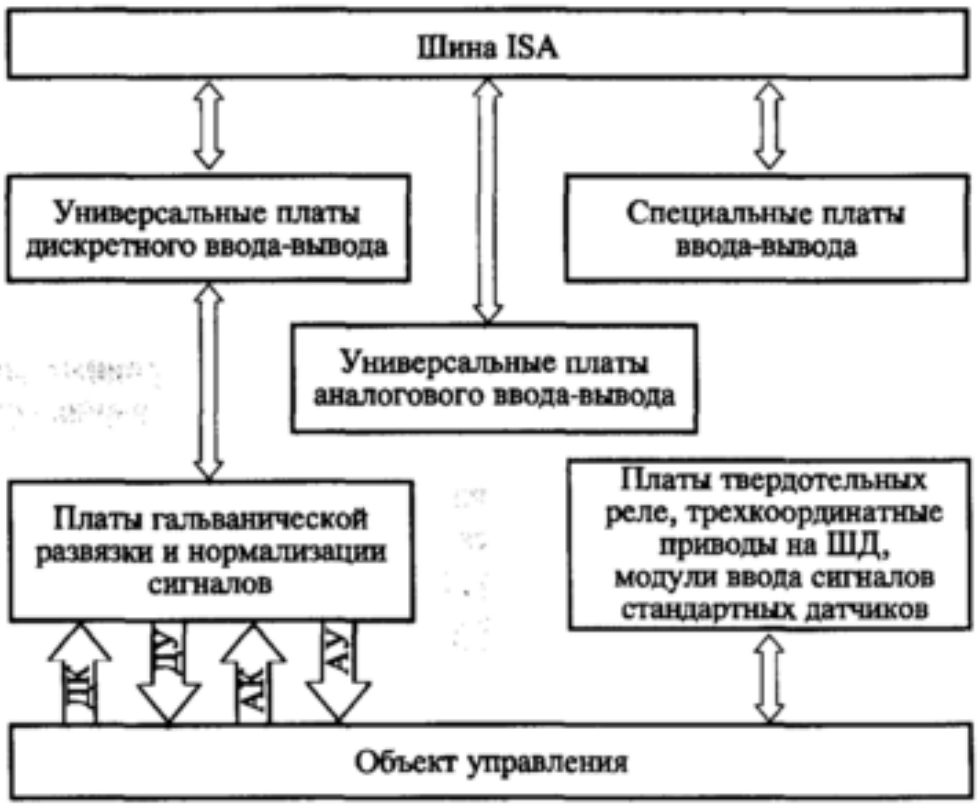


Рис. 1.29. Устройство связи САУ с объектом управления:
ШД – шина данных

развязки и нормализации сигнала. Специальные платы ввода-вывода информационно, а иногда и энергетически связывают промышленный компьютер с каким-либо типовыми элементами объекта управления, например с линейными или вращательными шаговыми двигателями, стандартными датчиками и др.

Программное обеспечение САУ также имеет свою специфику. Главное здесь также надежность работы, но не в ущерб быстродействию. Необходима работа программы в так называемом "жестком" реальном времени. Управляющая программа строится как ряд последовательных взаимодействующих команд, например:

- снять показания датчика температуры в печи;
- рассчитать требуемую температуру и рассогласование с заданным уровнем;
- по данным рассогласования вычислить управляющее воздействие;
- выдать последнее на объект (нагревательные устройства печи);
- ждать некоторый интервал времени, например 1 мин, до следующего цикла регулирования.

За 1 мин температура сильно не изменится, так что квантование с таким интервалом здесь вполне допустимо, чего не скажешь, например, о регулировании давления или иных быстропротекающих процессов. Процессор поочередно перебирает такие кванты регулирования, т.е. параллельно решает ряд задач.

Работает управляющая программа обычно от многозадачных операционных систем, но не WINDOWS или UNIX, а от специализированных операционных систем жесткого реального времени.

Характерная особенность рассмотренных трех электронных систем: несмотря на различия основного функционального назначения, каждая предыдущая входит как функциональный блок в последующую.

Так, цветной телевизор как дисплей входит почти неизменно в состав УВвВ информации ПК, меняются в основном устройства ввода информации (не используются антенна, видеомагнитофон и др.). В свою очередь, ПК с соответствующими изменениями являются ядром промышленного компьютера и всей САУ.

Аналоговые САУ на основе механических (кулачки, копиры, упоры) или пневмогидравлических устройств помимо низкой дистанционности и гибкости при переналадках имели еще один серьезный недостаток – ограниченный перечень функций управления. Он сводился к цикловому управлению (последовательность, величины и скорости перемещений)

для машин дискретного действия, поддержанию стабильности процессов при непрерывном действии, контролю и блокировке.

Микропроцессорные САУ обладают несравненно более широким и разнообразным диапазоном функций. Можно выделить следующие их группы.

1. **Основные целевые функции**: выполнение директивной технологии и заданной циклограммы действий (см., например, рис. 1.19 и 1.22).

2. **Сервисные функции**: контроль работоспособности по выполнению команд и параметров функционирования; сигнализация об отказах (причина, место возникновения).

3. **Фискальные функции**: отслеживание во времени параметров работоспособности с их архивированием, условий функционирования и работы обслуживающего персонала (температура и загазованность окружающей среды, сбросы и выбросы, связанные с работой оборудования).

4. **Функции коррекции цели**: изменение программы управления по последовательности команд, технологических режимов и т.д. при переналадке оборудования на производство иной продукции.

Несмотря на всю прогрессивность микропроцессорных управляющих систем, вариантность и альтернативность САУ сохраняется. Для независимо работающих машин-автоматов, действующих без переналадок или с редкими переналадками, но с большим числом функциональных элементов дискретного действия (например, многопозиционные автоматы; см. рис. 1.18 – 1.23) применение аналоговых САУ рационально. Вращающийся кулачок *4* своим профилированием *3* обеспечивает и величину, и скорость перемещения суппорта *1* (рис. 1.30), и передачу необходимых сил обработки посредством рычажной системы *2*. Все кулачки располагаются на едином вращающемся распределительном валу, что обеспечивает координацию работы всех управляемых механизмов и устройств (суппорты, механизмы упора и зажима материала, поворота и фиксации шпиндельного блока и т.д.).

Для циклового управления проще и надежнее такой системы нет. Однако для контроля и блокировки требуются дополнительные устройства, переналадка связана с частичным демонтажем станка для замены кулачков и перерегулирования звеньев, фискальные функции невозможны.

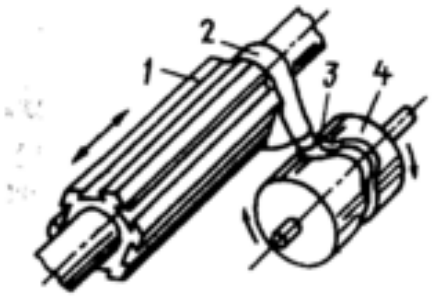


Рис. 1.30. Конструкционная схема механизма перемещения суппорта

1.7. ВАРИАНТНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ. КРИТЕРИИ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ

Неавтоматизированное производство маловариантно; оно включает в себя универсальное технологическое оборудование, ручную или механизированную транспортировку; средства управления основными и вспомогательными процессами отсутствуют.

Все универсальные токарные станки в мире по принципу действия и компоновке похожи друг на друга, различаясь лишь конструктивным исполнением функциональных узлов. Их технические решения длительно формировались и отрабатывались по единому критерию: наибольшему благоприятствованию, удобству действий того, кто за этим станком работает.

Горизонтальное положение оси центров и обрабатываемой заготовки на токарном станке гораздо удобнее для токаря, нежели вертикальное. Более слабой левой руке отводятся несиловые функции: включения и выключения станка, переключения рукояток коробок скоростей и подач; правая рука вращает рукоятки продольного и поперечного движений суппорта, закрепляет заготовку в патроне. Поэтому шпиндельная бабка токарного станка всегда располагается слева, задняя бабка – справа; заготовка вставляется движением справа налево – так удобнее правой руке. Вращение шпинделя – против часовой стрелки, иначе наблюдать сход стружки по передней грани резца и вести его размерную настройку было бы некомфортно.

В машинах-автоматах перечень и трудоемкость ручных действий резко сокращаются, необходимость "привязки" всех действий машины к особенностям человека отпадает. Поэтому автоматическое оборудование, как правило, радикально отличается от неавтоматизированного того же технологического назначения (см. разд. 1.4). Токарные автоматы и полуавтоматы строятся как с горизонтальной, так и с вертикальной осью, при этом заготовки на полуавтоматах всегда загружаются справа налево или сверху вниз.

Токарный многошпиндельный автомат, на котором можно обрабатывать те же детали, как и на универсальном станке (валы, кольца, фланцы и т.п.), не имеет с токарным станком ни одного идентичного конструктивного решения! Здесь нет коробок скоростей и подач, вместо них – гитары сменных шестерен или регулируемые электродвигатели; коробка привода располагается не слева, а справа; задняя бабка отсутствует; суппорты однокоординатные и т.д., не говоря уже о множестве новых меха-

низмов и устройств: шпиндельном блоке с механизмами поворота, фиксации и подъема, механизмах автоматической подачи и закрепления материала и, наконец, САУ на механической или электронной основе (см. рис. 1.27 – 1.30).

"Раскрепощенность" конструкций и компоновок автоматизированного оборудования, отсутствие тесной привязки их к особенностям и возможностям человека обусловливают огромное разнообразие технических решений, а следовательно, необходимость серьезного анализа вариантов при проектировании или покупке оборудования.

При производстве конкретной продукции существует, прежде всего, технологическая вариантность.

Так, кольца подшипников можно изготовлять:

- отрезкой трубы, черновой и чистовой токарной обработкой (см. рис. 1.18), шлифованием, полированием;
- раскатыванием поковки, отделочной токарной обработкой, шлифованием, полированием.

Нанесение тонкопленочных защитных покрытий может быть выполнено гальваническими методами, вакуумным осаждением и т.д.

Вариантность автоматизированного оборудования одинакового технологического назначения (токарная обработка, сварка, вакуумное осаждение тонких пленок, термообработка и т.д. и т.п.) проявляется в принципах действия, структурно-компоновочных и конструктивных решениях.

Структура машины – это состав ее основных компонентов и взаимосвязь между ними в рамках выбранного принципа действия машины.

Компоновка машины – это взаимное пространственное расположение ее компонентов с привязкой к главной оси машины (геометрической).

Перечень вариационных признаков очень велик. Рассмотрим его применительно к одно- и многопозиционным технологическим машинам и их системам (АЛ и т.п.).

Однопозиционное оборудование одинакового назначения имеет следующие вариационные признаки:

- технологические методы и маршруты (способы и последовательность воздействий);
- принцип действия (непрерывный или дискретный);
- расположение геометрической оси (горизонтальное или вертикальное);
- степень автоматизации (с ручным управлением, полуавтомат, автомат);

– универсальность (универсальное, специализированное и специальное);

– число выполняемых операций (одно- или многооперационное).

Многопозиционное оборудование помимо перечисленных признаков отличается: числом позиций; расположением позиций (в линию, по окружности и т.д.); способом взаимодействия между позициями (последовательный, параллельный, последовательно-параллельный).

Системы машин с конструктивной связью между ними для выполнения функций транспортировки, изменения ориентации, накопления межоперационных заделов и т.д. отличаются в основном видом встраиваемого оборудования со всеми перечисленными ранее вариационными признаками, а также имеют следующие системные отличия:

– общее число позиций;

– число потоков обработки (одно- и многопоточные, с ветвящимися потоками и т.д.);

– вид межагрегатной связи (с жесткой связью, с разделением на участки, с гибкой связью);

– число межоперационных накопителей заделов;

– тип межагрегатного транспортирования (сквозное, боковое, верхнее; непрерывное или дискретное.

Большая часть оборудования, обрабатывающего и сборочного, – дискретного действия, с чередованием во времени несовмещенных рабочих и холостых ходов (рис. 1.31).

Пример 3. Рассмотрим цикл работы установки вакуумного нанесения тонких пленок, взяв за начало отсчета момент удаления предыдущей партии подложек (при поднятой камере). Вначале выполняются вспомогательные операции, предваряющие обработку, с длительностью t_{x1}: загрузка очередной партии подложек, герметизация камеры, вакуумирование камеры, нагрев подложек и т.д., в это время рабочего процесса нет. По завершении подготовительных работ начинается процесс осаждения пленок, который включает в себя: предварительную очистку поверхностей подложек, осаждение пленки, стабилизацию ее свойств, остывание и т.д. – с общей длительностью рабочих ходов t_p. После завершения процесса происходят разгерметизация камеры и удаление партии изделий с общей длительностью t_{x2}.

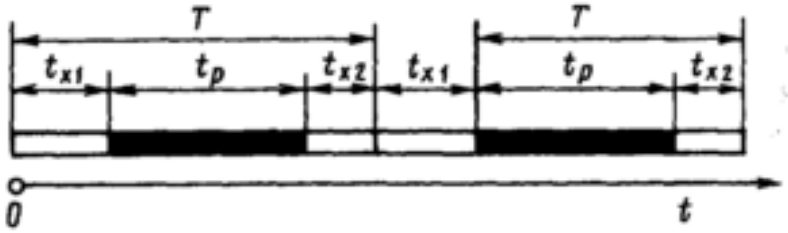


Рис. 1.31. Структура рабочего цикла автомата дискретного действия

Тогда рабочий цикл T – отрезок времени, когда совершается полный набор рабочих и холостых ходов и выдается одна штука или порция изделий

$$T = t_{x1} + t_p + t_{x2} = t_p + t_x. \qquad (1.2)$$

где t_p – суммарное время несовмещенных рабочих ходов цикла;

t_x – суммарное время несовмещенных холостых ходов цикла.

Такая ситуация характерна для любых однопозиционных машин дискретного действия.

Дискретность действия однопозиционных машин связана, как правило, с дискретностью транспортирования, а именно: в интервал времени t_{x1} изделия вводятся в рабочую зону; в интервале t_p они находятся в этой зоне (неподвижно или с необходимыми технологическими перемещениями, например вращении шпинделя токарного автомата); в интервале t_{x2} изделия выводятся из рабочей зоны. Таким образом, транспортные и технологические перемещения в машинах дискретного действия разделены.

В машинах непрерывного действия транспортные перемещения являются непрерывными и одновременно технологическими. Так, в термической тоннельной печи непрерывного действия изделия проходят непрерывно сквозь все рабочие зоны, в каждой из которых поддерживается определенный диапазон температуры (зоны нагрева, выдержки, охлаждения). Длина зоны и скорость транспортирования определяют технологическое время обработки.

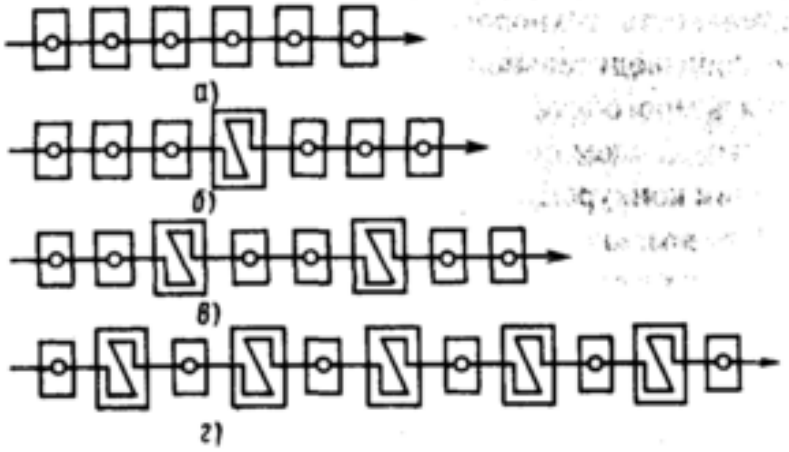


Рис. 1.32. Структурные схемы АЛ с различными вариантами межагрегатной связи

Рассмотрим такие вариационные параметры, как число потоков и участков в АЛ. Простейший вариант – однопоточная линия с жесткой межагрегатной связью (см. рис. 1.32, *а*), где все машины связаны воедино межагрегатным транспортером. Здесь, как и в однопозиционной машине, имеется рабочий цикл T, который складывается из времени рабочего хода $t_р$ и холостого хода $t_х$.

Так как длительность технологического воздействия в каждой из встроенных в линию машин, как правило, неодинакова, $t_р$ есть время технологического воздействия на лимитирующей позиции. При каждом ходе конвейер перемещает изделия в следующие позиции, где они закрепляются и фиксируются, получают технологическое воздействие, затем открепляются; далее следует очередной ход конвейера. Время $t_х$ есть время транспортирования, закрепления и открепления изделий и т.п.

Линии данного типа конструктивно наиболее просты, однако менее надежны, так как отказ в работе любого элемента в любой позиции вызывает останов всей линии. Поэтому пользуются расчленением линии на участки-секции с установкой межоперационных накопителей (см. рис. 1.32, *б* и *в*). Теперь при отказе одной из позиций, например на втором участке, первый продолжает работать, передавая изделия в накопитель, суммарные простои снижаются почти во столько раз, на какое число участков разделена линия.

В предельном случае, когда число участков равно числу машин, мы имеем линию с гибкой межагрегатной связью (см. рис. 1.32, *г*); это самый высокопроизводительный и надежный, но и самый дорогой вариант.

Если оборудование, встраиваемое в линию, имеет существенно различную длительность технологического воздействия, а следовательно, собственную производительность и требования к ней высоки, целесообразно применять многопоточные линии, в том числе разделенные на участки с различным числом потоков на участках.

Такие линии конкурентны с несколькими независимыми АЛ.

Каждый из возможных вариантов построения машин-автоматов и их систем – это неповторяемое сочетание вариационных признаков. Данные признаки и варианты в целом подлежат сравнительному анализу и выбору на ранних этапах принятия технических решений, равным образом при покупке готового оборудования или проектировании нового.

Выбор осуществляется по качественным и количественным критериям.

Важнейшими критериями сравнительной оценки, а следовательно, выбора вариантов существующих или проектируемых технологических машин являются:

- параметры качества получаемой продукции в принятых единицах, например точность обработки при съеме или наращивании материала;
- производительность – количество годной продукции, выдаваемой в единицу времени;
- надежность в работе – степень использования потенциальных возможностей, заложенных в машине;
- трудоемкость обслуживания;
- универсальность – диапазон возможной переналадки на производство различных изделий;
- мобильность – быстрота перехода с одной продукции на другую;
- сроки поставки, включая сроки создания нового оборудования;
- занимаемая площадь;
- энергопотребление;
- экологичность – условия труда и степень влияния функционирования машины на рабочих и окружающую среду;
- длительность жизненного цикла, сроки службы;
- экономические показатели – капитальные затраты на приобретение или создание оборудования, общие эксплуатационные затраты, прибыль от использования, сроки окупаемости и т.д.

Именно экономические характеристики являются решающим доводом в пользу того или иного варианта.

Большинство показателей имеют количественные оценки. Среди качественных показателей можно выделить универсальность, здесь различают:

- **универсальное оборудование**, которое может быть переналажено на производство самых разнообразных изделий (в пределах технологических возможностей), например универсальные токарные станки и другое металлообрабатывающее оборудование;
- **специализированное оборудование**, которое может быть переналажено на определенный диапазон однотипных изделий (например, установки вакуумного нанесения тонких пленок, где можно менять диаметры подложек, виды покрытий, но не более);
- **специальное оборудование**, способное выполнять лишь определенные операции обработки, контроля, сборки только одного вида изделий (например, роторные машины и линии для производства изделий типа колпачков; разлива, укупорки, маркировки напитков).

Не всегда поддаются количественной оценке и экологические показатели, например условия труда рабочих, степень влияния машины на окружающую среду и работников (уровни шума, вибрации, электромагнитных излучений и т.д.).

Технико-экономические показатели условно можно разделить на текущие (мгновенные) и суммарные (интегральные). Текущие показатели можно выразить количественно в каждый момент времени, суммарные характеризуют определенный период жизненного цикла машины или цикл полностью.

Оценка вариантов с последующим выбором проводится по комплексу критериев; при однозначности оценок – некий вариант по всем показателям хорош – конкурентность исчезает и задача выбора легко и безошибочно решается благодаря опыту и интуиции тех, кто этот выбор должен сделать.

Однако в большинстве случаев оценки по критериям противоречивы. Так, агрегатный станок при обработке системы отверстий намного производительнее, чем радиально-сверлильный (см. разд. 1.4), но более дорогой и менее надежный в работе. Переналадки на другую продукцию радиально-сверлильного станка происходит быстро и без дополнительных затрат, а агрегатного – долго и дорого. Поэтому выигрыш в производительности и иные достоинства агрегатных станков проявляются в условиях крупномасштабного выпуска однородной продукции. В единичном и серийном производстве, когда работают по разовым заказам, высокая производительность не нужна, а универсальность и мобильность приобретают первостепенное значение, выгоднее использовать радиально-сверлильные станки.

***Реплика**. Сочетание органических достоинств и недостатков конкретных вариантов применительно к конкретным условиям производства предопределяет многие типовые решения. Поэтому в реальных производственных условиях обширный анализ и выбор вариантов при наличии опытных профессионалов далеко не всегда необходим – ведь конкурентным для человека может быть лишь то, что для него неоднозначно и противоречиво.*

В процессе инженерной подготовки следует еще на студенческой скамье научить будущих специалистов именно таким оценочным подходам; как ни парадоксально – научить их так считать, чтобы в будущей деятельности они делали это пореже. Еще один довод в пользу того, что у будущих инженеров надо формировать в первую очередь эрудицию и аналитическое мышление, а рецептурные методы излагать как иллюстрацию. Построение и содержание учебных дисциплин не всегда должно воспроизводить технологию принятия инженерных решений в реальных условиях.

При сравнительном анализе и выборе вариантов целесообразно начинать с качественных критериев, которые, как правило, также противоречивы (см. примеры в гл. 8 и 9).

Качественный анализ позволяет без особого труда существенно сократить перечень рассматриваемых вариантов, оставив лишь те, которые явно лучше отставленных.

Количественный анализ и отбор следует по возможности проводить поэтапно, рассматривая варианты последовательно по показателям: быстродействия; производительности; стоимости и эксплуатационных затрат; комплексных показателей экономической эффективности. Примеры приведены в гл. 8 и 9.

Все математические зависимости (математические модели, как нынче модно их именовать) можно разделить прежде всего на **функциональные** и **прикладные**.

Функциональные зависимости позволяют выявить причинно-следственные связи, их количественное описание с определением доминирующих и малозначащих факторов и т д., например зависимость стойкости инструмента от режимов обработки, характеристик материала заготовки и самого инструмента или зависимость производительности многопозиционных машин от числа их позиций, времени обработки, надежности в работе (см. гл. 5).

Меняя в расчетах значения определяющих параметров, можно выявить степень их влияния на целевую функцию, что удобно иллюстрировать графически, сопровождая необходимыми резюме.

Прикладные зависимости дают возможность непосредственно выбрать структурные, конструктивные, режимные и другие параметры в однозначных, конкретных условиях, например скорости резания по нормированной стойкости инструмента или по максимальной производительности станка и т.д.

Функциональные и расчетные зависимости опираются, как правило, на одни и те же количественные взаимосвязи, различаясь характером и уровнем допущений, диапазоном или однозначностью определяющих факторов и т.д. (см. примеры в гл. 5 и др.).

Функциональные математические зависимости составляют главное содержание фундаментально-теоретических основ любого научно-технического направления, расчетные – прикладного направления.

В общем виде аналитические зависимости имеют вид

$$y = f_1(x_1, x_2, x_3, ..., x_i, A_1, A_2, ..., A_i), \qquad (1.3)$$

где y – целевая функция расчета (обобщенная характеристика);

x_i – определяющие параметры;

A_i – const.

Инженерные расчеты при анализе и выборе вариантов можно разделить еще на поверочные и проектные.

Задача поверочных расчетов: при известных или выбираемых значениях параметров x_i и A_i получить значение целевой функции y, сравнение которого с альтернативными или доступными (граничными) значениями позволяет оценивать данное сочетание параметров, т.е. конкретные технические решения. Поверочные расчеты требуются для проверки уже принятых технических решений.

Задача проектных расчетов: по заданному значению целевой функции y и другим исходным данным определить необходимые значения параметров x_i (одного или нескольких), т.е. обосновать принимаемые решения.

Для этого нужно выполнить условие $y = y_{\text{треб}}$. Зависимость (1.3) принимает вид

$$x_i = f_2(y_{\text{треб}}, x_2, x_3, ..., x_i), \qquad (1.4)$$

где $y_i = y_{\text{треб}}$ – целевая функция, удовлетворяющая заданным требованиям.

Например, при поверочных прочностных расчетах определяющие параметры x_i – это конструктивные характеристики, например диаметр вала и его длина, а также величины нагрузок и координаты их приложения; пулевая функция y_i – это напряжения в материале.

Проверка сводится к тому, что при значениях конструктивных и типовых характеристик оцениваются возникающие напряжения и сопоставляются с допустимыми значениями, т.е. оценивается прочность конструкции.

В проектных прочностных расчетах, зная допустимые напряжения, а также нагрузки и выбранные конструктивные параметры, например расстояния между опорами вала, определяют его необходимый диаметр, при котором прочность будет гарантирована. Аналогично при поверочных кинематических расчетах по частоте вращения входного вала и всем передаточным отношениям, рассчитывают частоту вращения выходного вала, а при проектных, зная частоту вращения входного вала и требуемую

частоту вращения выходного, а также задаваясь постоянными передаточными отношениями, вычисляют передаточное число звена настройки.

При сравнении вариантов машин одинакового функционального назначения выполняются поверочные расчеты, т.е. каждый вариант представляется как неповторяющееся сочетание значений определяющих параметров. При этом не имеет значения, материализован ли данный вариант или является проектом, различие лишь в степени достоверности численных значений, а следовательно, и результатов расчета; у действующих вариантов они, безусловно, выше.

При технико-экономических расчетах в качестве целевой функции выступают критерии экономической эффективности, а как определяющие параметры x_i прежде всего показатели производительности машин, их надежности в работе, численности обслуживающего персонала, стоимости средств производства; в качестве A_i – показатели норм амортизации оборудования, средней заработной платы, сменности работы и т.д. Расчеты выполняются для всех альтернативных вариантов, после чего значения y_i сравниваются между собой, а при необходимости – с экономическими нормативами.

Следует отметить, что показатели производительности, стоимости и т.д. не первичны, а зависят от многих параметров, например производительность – от технологических режимов, быстродействия механизмов, устройств и их взаимодействия и т.д. Эти функциональные зависимости еще более сложны, чем, например, зависимость себестоимости продукции от производительности машин.

Реплики. *1. Целью любых расчетов должно быть не только получение цифровых значений, но и раскрытие определяющих факторов и причинных связей – только тогда принимаемые по результатам расчетов инженерные решения будут по-настоящему осознанными. Стремление повышать достоверность результатов учетом максимального числа факторов часто оказывается иллюзией.*

Инженерные расчеты должны иметь разумную меру упрощения для принятия правильных и убедительных решений. Пример такого упрощения – курс гидравлики, основанный на изучении несжимаемой жидкости, которой в природе не существует.

2. Помимо функциональных и прикладных математических моделей в научно-технической и учебной литературе немало таких, которые носят лишь иллюстративный характер, так как в явном виде никаких закономерностей не рас-

крывают и для прикладных расчетов даже их авторами не применяются. Их незримое назначение – некий "антураж", повышение "научного уровня" текстовых (особенно описательных) материалов. Например, расхожую истину, что летом теплее, чем зимой, можно облечь в математическую форму, обозначив летнюю температуру через T_2, а зимнюю – через T_1. Тогда первичная выборка математических моделей будет

$$T_2 > T_1;\ T_2 - T_1 > 0;\ \frac{1}{T_2} < \frac{1}{T_1};\ \gamma = \frac{T_2}{T_1} > 1;\ T_2 = T_1\gamma;$$

$$T_1(\gamma - 1) = \Delta T\text{, где } \Delta T > 0 \text{ и т.д.}$$

Если к этому добавить, что $T_2 \neq \text{const}$, $T_1 \neq \text{const}$, *и ввести вероятностную, временну́ю интерпретацию этих величин, мобилизовав весь аппарат теории вероятностей, можно получить неисчислимое количество математических моделей температуры и видимость серьезного подхода, но прогнозировать температуру по этим формулам невозможно, и никаких истин они не раскрывают, помимо того, что зимой холоднее, чем летом, – с чего и начинали.*

Приведенный одиозный пример антуражной, псевдонаучной математики должен заставить задуматься о масштабах ее применения в учебных курсах и учебной литературе. Безусловно, любая "математизация" учебного материала заставляет студентов относиться к нему более серьезно, заучивание студентами антуражных математических выкладок – тоже тренировка памяти. Но не следует упускать возможностей доведения любых математических моделей до уровня функциональных и прикладных.

Глава 2

ЭКОНОМИКА АВТОМАТИЗАЦИИ

2.1. ИНЖЕНЕРНЫЕ ПОДХОДЫ К ЭКОНОМИЧЕСКИМ ОЦЕНКАМ ВАРИАНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Бизнес-процессы (БП) в сфере материального производства (см. разд. 1.1) в условиях рыночной экономики должны быть экономически эффективны, т.е. доходы от реализации выпущенной продукции должны превышать затраты на ее получение. Иначе данное производство нежизнеспособно.

Любые технические решения в области создания новых производств, расширения или модернизации действующих альтернативны. Даже для руководителей экологически вредных производств существует дилемма: тратить средства на оборудование для очистки выбросов и сбросов или платить штраф за загрязнение окружающей среды. К сожалению, последнее зачастую оказывается более выгодным [23].

Все расчеты экономической эффективности автоматизации производственных процессов направляются на отыскание наиболее экономичных технических решений из числа возможных, альтернативных.

Выполнение экономических расчетов и обоснований – задача не только профессионалов-экономистов, но и инженеров. Современные инженеры, технологи и конструкторы непременно должны обладать серьезными знаниями и практическим умением в области экономики.

Эрудиция любого инженера должна заключаться прежде всего в знании основных канонов экономики – от общих закономерностей развития до конкретных показателей и их применения. Для специалистов по автоматизации производственных процессов к этому следует добавить:

- правильную оценку стратегии автоматизации и механизации, основного содержания и направленности работ;
- глубокое понимание, умение качественно и количественно оценивать основные источники технического, экономического и социального эффектов при автоматизации и механизации;
- объективную оценку с учетом фактора времени, перспективности новых и новейших методов и средств, которые столь щедро генерируются современным научно-техническим прогрессом (НТП); умение видеть их целесообразную область применения;

– умение оптимально сочетать новизну и преемственность в технических решениях на основе видения и сравнительной оценки конкурирующих вариантов и направлений НТП;

– понимание на качественном и количественном уровне взаимосвязи параметров машин-автоматов и их систем с экономическими показателями.

Практическое умение должно включать в себя способность выполнять проектные и поверочные расчеты, работая совместно с экономистами, дополняя друг друга.

Проектные расчеты проводятся на стадии создания машины; их основная задача – правильный выбор численных значений технологических, конструктивных, структурных и других параметров машины, исходя из обеспечения ее заданных выходных параметров (мощности, быстроходности, прочности, производительности, долговечности и надежности в работе, а главное – экономических показателей). Например, проектные расчеты на прочность позволяют, основываясь на обеспечении допустимых внутренних напряжений, выбирать диаметры валов, толщину стенок, модуль и ширину шестерен, сечение шпонок и т.д.

Проектные расчеты позволяют решать с учетом заданных технологических, кинематических, прочностных и других характеристик те задачи расчета и конструирования, которые нельзя не решать в процессе создания машины.

Поверочные расчеты выполняются тогда, когда все необходимые параметры машин уже выбраны и необходимо лишь проверить, отвечают ли они заданной целевой функции, правильно ли сделан их выбор. Так, поверочные расчеты на прочность позволяют оценить в спроектированной конструкции соответствие: внутренних напряжений допустимым, вращения шпинделя с нужной частотой, перемещения суппорта с заданной величиной подачи, экономических показателей – нормативам.

Таким образом, проектные и поверочные расчеты экономической эффективности принципиально различны прежде всего по входным и выходным параметрам расчетов. В проектных расчетах входными параметрами являются детерминированные (нормированные) значения целевой функции – показателей экономической эффективности, выходными - конкретные характеристики проектируемых машин. В поверочных расчетах, наоборот, входными параметрами служат конкретные характеристики уже спроектированных машин, выходными – значения целевой функции, которые сравниваются при этом с нормированными. Разнятся и математические расчетные зависимости. В простейших благоприятных слу-

чаях это могут быть одни и те же математические модели взаимосвязи, решаемые в "прямом" и "обратном" направлениях, когда функция становится аргументом, и наоборот.

По существу, критерии заданной экономической эффективности машин эквивалентны критериям обеспечения заданных прочностных, кинематических и других характеристик.

Различие заключается лишь в том, что по прочностным, кинематическим, динамическим критериям выбираются параметры главным образом элементов систем: механизмов и устройств для выполнения рабочих и холостых ходов, привода и управления. По экономическим критериям решаются задачи синтеза, выбора принципиальных решений технических систем в целом – их структуры, конструктивной компоновки и т.д.

Поэтому инженерные методы расчета и оценки экономической эффективности новой техники – это методы расчета и конструирования машин и систем машин, выбора их технологических, конструктивных, структурных параметров по экономическим критериям.

При общем методологическом единстве подходов к экономике производства в любых его масштабах (баланс доходов и расходов) имеются существенные различия в методах и критериях оценки экономичности по производству в целом и отдельным его компонентам.

Для **функционально завершенных производств**, выпускающих товарную продукцию, которая имеет отпускную цену, эффективность производства удобнее всего оценивать величиной получаемой относительной прибыли:

$$\gamma = \frac{Ц - З}{З} 100, \qquad (2.1)$$

где Ц – отпускная цена выпущенной продукции за конкретный период времени, например за год;

З – суммарные затраты, которые понадобились на выпуск этой продукции, за тот же период времени;

γ – коэффициент относительной прибыли, полученный на данном производстве, %.

При этом в суммарные издержки включают интегрально как производственные (капитальные и текущие затраты, стоимость материалов и комплектующих), так и непроизводственные издержки (на маркетинг, рекламу, хранение и доставку, снабженческо-сбытовые издержки и т.д.).

Сопоставляя ожидаемые доходы и издержки по вновь создаваемым производствам с максимальным учетом всех факторов, можно оценивать

возможные варианты создаваемых производств по комплексным технологиям, составу оборудования, организации управления и т.д. Сопоставляя прибыль по годам, можно оценивать динамику данного производства – тенденции процветания или упадка. Наконец, прибыльность производства сама по себе свидетельствует о его состоянии.

***Реплика**. В начале 90-х годов XX века автору в составе делегации российских специалистов довелось побывать на станкостроительном производстве одного из крупнейших западно-европейских автомобильных концернов.*

На вопрос о прибыльности ответ был таким: "В прошлом году было 5 %". На нашу реплику: "Не мало ли?" – последовала реакция недоумения и даже некоторой обиды: "Помилуйте, мы вовремя вернули все кредиты, уплатили налоги, внесли деньги во все фонды – от развития производства до благотворительных, а самое главное, хорошо платили всем своим работникам. И еще 5 % осталось!" По-видимому, это типичная ситуация, которая объясняет, почему молодой российский капитал, гоняясь только за сверхприбылью, длительно не вкладывался в производство материальных ценностей, а промышлял перепродажей, "прокручиванием" денег, кредитными авантюрами и т.д. Замечу, что подобные "отступления" от логической канвы существенно улучшают внимание студентов и их восприятие.

Применяются и иные показатели эффективности производства, например коэффициент рентабельности:

$$R = \frac{Ц - З}{А} = \frac{П}{А}, \qquad (2.2)$$

где П – абсолютная прибыль от реализации;

А – суммарные активы предприятия.

Для локальных компонентов производства – отдельных технологических операций и процессов, средств их оснащения – нужен иной подход. Продукция на промежуточных этапах (вал после токарной обработки, полупроводниковая пластина с нанесенной топологией) не является товаром и *отпускной цены не имеет. Попытки устанавливать "промежуточные цены"*, например после каждой из многих тысяч операций изготовления автомобиля, субъективны и нежизнеспособны. По-иному следует подходить при оценке локальных вариантов и к затратам, абстрагируясь от тех, кого данные мероприятия напрямую не затрагивают (цеховое отопление, вентиляция, освещение; административно-управленческие расходы и др.). Итак, цен Ц нет, издержки производства З учитываются не полностью, показатели γ, R и др. [см. формулы (2.1) и (2.2)] не работают.

Поэтому при оценке и выборе локальных технических решений – на уровне машин и их систем – *используется критерий минимума капитальных и текущих затрат для достижения одинакового конкретного результата, а именно: сопоставляются эти затраты по всем вариан-*

там за некоторый выбранный период. При этом один из вариантов принимается за базовый – 1, остальные – *i* конкурентны с ним и между собой. Здесь следует различать две ситуации.

1. **Выбираются варианты вновь создаваемого или расширяемого производства** с проектируемым или готовым, приобретаемым оборудованием (для технологических систем машин обычно сочетается и то, и другое). Каждый из вариантов характеризуется капитальными (К) и годовыми эксплуатационными затратами (С), имеющими непосредственное отношение к данным технологиям и оборудованию.

На рис. 2.1 представлена концептуальная зависимость суммарных затрат $\sum З$ от времени работы оборудования (N) для различных вариантов новых технических решений:

$$\left.\begin{aligned} \sum З_1 &= К_1 + С_1 N; \\ \sum З_i &= К_i + С_i N. \end{aligned}\right\} \qquad (2.3)$$

Безусловно, все сравниваемые варианты должны быть приведены к одинаковому масштабу выпуска идентичной продукции.

Организовать новое или совершенствовать действующее производство без капитальных затрат на технологическое и вспомогательное оборудование, средства управления невозможно. Поэтому капитальные затраты $К_1$ по самому дешевому и технически наименее совершенному варианту следует признать технологически необходимыми. Они окупаются в общем итоге через разницу между ценой и затратами [см. формулу (2.1)] – тем самым оценивается уровень всего данного производства.

Самое дешевое оборудование неавтоматизированное ($К_1 = К_{min}$), которое, как правило, имеет и самые высокие эксплуатационные затраты ($С_1 = С_{max}$) из-за большой численности обслуживающего персонала и низкой производительности.

Вариант 1 следует принимать за базовый, остальные варианты *i* сравнительные, альтернативные.

Альтернативные варианты – это оборудование с использованием новых, прогрессивных, но недостаточно

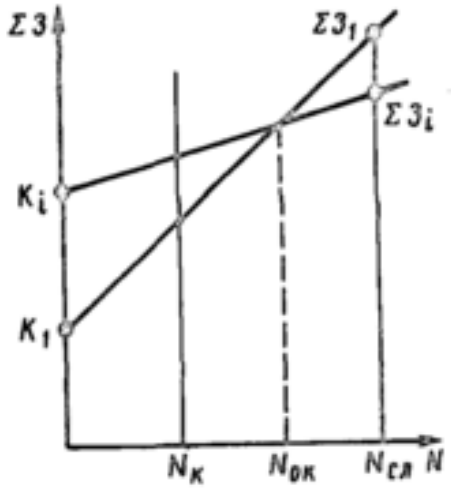


Рис. 2.1. Зависимость суммарных затрат от времени работы оборудования для различных вариантов

апробированных технологических процессов (оно, как правило, очень дорогое), с более высокой степенью автоматизации (машины-автоматы и полуавтоматы, автоматические и автоматизированные линии или и то и другое).

2. **Решается вопрос о целесообразности и вариантах совершенствования действующего производства**. Тогда базовый вариант – это действующее оборудование, за которое уплачено ранее и которое (после снятия с эксплуатации), как правило, утилизируется, поэтому можно принимать

$$\sum З_1 = С_1 N;$$
$$\sum З_2 = К_i + С_i N.$$

В практических расчетах зачастую все же принимают $К_1 > 0$ как некую остаточную стоимость, например стоимость металлолома (иногда старые станки можно и продать), поэтому в общем случае используют выражение (2.3).

Таким образом, во всех случаях дополнительные капитальные затраты сверх технологически необходимых ($К_i - К_1$) не являются обязательными, они целесообразны лишь при условии их окупаемости (возврата). Именно окупаемость необязательных капитальных затрат и есть важнейший фактор выбора варианта технических решений по экономическим критериям.

Общая черта технически сложных и совершенных вариантов машин и их систем – это более высокая стоимость ($К_i > К_1$) и меньшие эксплуатационные затраты ($С_i < С_1$). Самым эффективным должен быть признан вариант с наименьшими суммарными затратами $\sum З_i$ за N лет эксплуатации:

$$\sum З_i = (К_i + С_i N) \to \min . \qquad (2.4)$$

Принципиально важно, каков срок N. Показатели минимума суммарных затрат за весь срок службы необъективен. Так, при сроках службы оборудования N =15…20 лет минимизация общих затрат по самому дорогому варианту лишь к концу службы означает, что ежегодная прибыль от дополнительных капиталовложений (γ) составит $\leq 5…6$ %.

Поэтому устанавливается некий "контрольный" срок эксплуатации ($N = N_к$, см. рис. 2.1), по которому и ведут сравнение. В качестве оптимального принимается тот вариант, который через время $N_к$ требует наи-

меньших суммарных затрат $\sum З_{min}$ (на рис. 2.1 это базовый, наиболее дешевый вариант).

При установлении величины $N_к$ возможны "жесткие" и "мягкие" подходы.

При жестком подходе исходят из рыночной конъюнктуры и минимальности риска. Например, инвестор, не уверенный в ситуации на рынке далее чем на три-четыре года вперед, ставит такие условия: дополнительные капиталовложения на более дорогое оборудование вкладываются только при условии, если через $N_к = 3…4$ года эти затраты не только окупятся, но и принесут ≥ 20 % прибыли – как страхование от любых неопределенностей и неожиданностей. Нетрудно подсчитать, что для этого капиталовложения должны приносить ежегодную прибыль в размере 30…35 %.

При мягком подходе устанавливается некоторый минимально приемлемый коэффициент эффективности капиталовложений, например 12 % годовых ($E_н = 0,12$). Следовательно, окупаемость капиталовложений ($К_i – К_1$) должна наступить не позже, чем через

$$N = 1/E_н = 1,0/0,12 \approx 8 \text{ лет.}$$

Этот срок и принимается как контрольный. Если срок службы оборудования превышает контрольный ($N_{сл} > N_к$), то наиболее выгодным вариантом признается тот, у которого ко времени $N = N_к$ затраты наименьшие; капиталовложения окупятся раньше контрольных (нормативных) сроков ($N_{ок} > N_н$); прибыль будет выше, чем минимально приемлемая ($E > E_н$).

Если сроки эксплуатации оборудования окажутся меньше контрольных ($N_{сл} < N_к$), то самый выгодный вариант тот, у которого суммарные затраты к тому времени наименьшие. Им может оказаться самое несовершенное оборудование.

Если суммарные затраты $\sum З_i$ по любому из вариантов за срок $N_н$ разделить на $N_н$, можно получить величину так называемых приведенных годовых затрат:

$$З_{пi} = \frac{\sum З_i}{N_н} = \frac{К_i + С_i N_н}{N_н} = К_i E_н + С_i .$$

Общая схема расчетов и обоснования выбора экономически наиболее выгодного варианта из числа альтернативных сводится к следующему:

1) рассчитывают приведенные затраты по всем альтернативным вариантам:

$$З_{пi} = К_i E_н + С_i .$$

Условие выбора $З_{пi} \to \min$;

2) выбранный вариант проверяют по критерию абсолютной эффективности – на изменение общей прибыли от реализации данных мероприятий.

Таким образом, задача распадается на две части: сначала выбирают лучший из возможных вариантов производства, а затем решают, целесообразно ли вообще в данной ситуации создавать или совершенствовать производство, не будет ли оно убыточным.

Достаточно нагляден и удобен следующий прием: вместо абсолютных значений приведенных затрат использовать в качестве критерия оценки их разности.

Для этого приведенные затраты по базовому варианту принимают за основу, а для каждого из альтернативных вариантов рассчитывают так называемый годовой экономический эффект:

$$Э_i = З_{п1} - З_{пi} = (К_1 E_н + С_1) - (К_i E_н + С_i) = E_н(К_i - К_1) + (С_1 - С_i). \quad (2.5)$$

Критерий оценки $Э_i \to \max$.

При $Э_i < 0$ наиболее экономичен базовый вариант, при $Э_i = 0$ варианты экономически равновыгодны.

Существуют и иные критерии оценки экономической эффективности; они основаны на сопоставлении тех же параметров: $К_i$, $С_i$, N, но в других формульных комбинациях.

***Реплика**. Оценка сроков возврата окупаемости дополнительных капиталовложений делением их величины на годовую экономию, вызванную этими капиталовложениями, не является строгой.*

Как известно, процесс амортизации средств производства есть постепенное перенесение их стоимости на выпускаемую продукцию в форме ежегодных амортизационных отчислений, которые входят в состав эксплуатационных затрат. Поэтому любые дополнительные капиталовложения окупаются за установленные сроки амортизации, через более высокие ежегодные амортизационные отчисления. Окупаемость затрат ($К_i - К_1$) *через разность годовых затрат* ($С_i - С_1$) *есть некий параллельный процесс. Во избежание "двойного счета" можно не учитывать в годовых затратах ту часть амортизационных отчислений, которая связана с переносом стоимости оборудования. Об этом студенты могут узнать в курсах по экономике и организации производства. Забивать их головы подобными экономическими нюансами в курсах по автоматизации производственных процессов вряд ли целесообразно.*

Расчеты по приведенным выше формулам можно усложнять, например учитывая различные сроки поставки проектируемого и покупного

оборудования, возможности перенастройки на другую продукцию, неодинаковость годовых эксплуатационных затрат ввиду изменения масштабов производства или тарифов и т.д.

2.2. ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Практически любая промышленная продукция может быть получена в условиях неавтоматизированного производства, при использовании универсального оборудования с ручным управлением, стоимость которого определяет минимальные технологически необходимые капитальные затраты на выпуск данной продукции. Однако экономические показатели такого производства весьма невысоки вследствие низкой производительности универсального оборудования и необходимости большего количества рабочих, непосредственно занятых в производстве, особенно на вспомогательных работах.

В автоматизированном производстве, при более высоких капиталовложениях (сверх технологически необходимых) получают снижение себестоимости продукции и другие улучшенные показатели благодаря более высокой производительности автоматизированного оборудования, повышению качества продукции, сокращению численности рабочих, непосредственно занятых в процессе производства. Последний фактор означает и социальный эффект для данного производства, ибо сокращается прежде всего категория рабочих, занятых малоквалифицированным и монотонным ручным трудом. Однако это не всегда свидетельствует об экономической эффективности капиталовложений, все зависит от конкретной величины затрат и полученного выигрыша. Для того чтобы социальный эффект при автоматизации не вступал в противоречие с экономическим, необходимо знать взаимосвязь технико-экономических показателей – ТЭП (производительности, стоимости, надежности в работе, численности обслуживающих рабочих и др.) и показателей экономической эффективности (приведенных затрат, годового экономического эффекта, сроков окупаемости капиталовложений и т.д.). Отсюда можно получить предельно допустимые значения ТЭП (систему технико-экономических допусков) из условий гарантированного экономического эффекта при автоматизации.

Качественно функциональные связи, действующие в масштабах автоматических систем машин, показаны на рис. 2.2. Первичными факторами, от которых в конечном счете зависят все ТЭП, являются технологи-

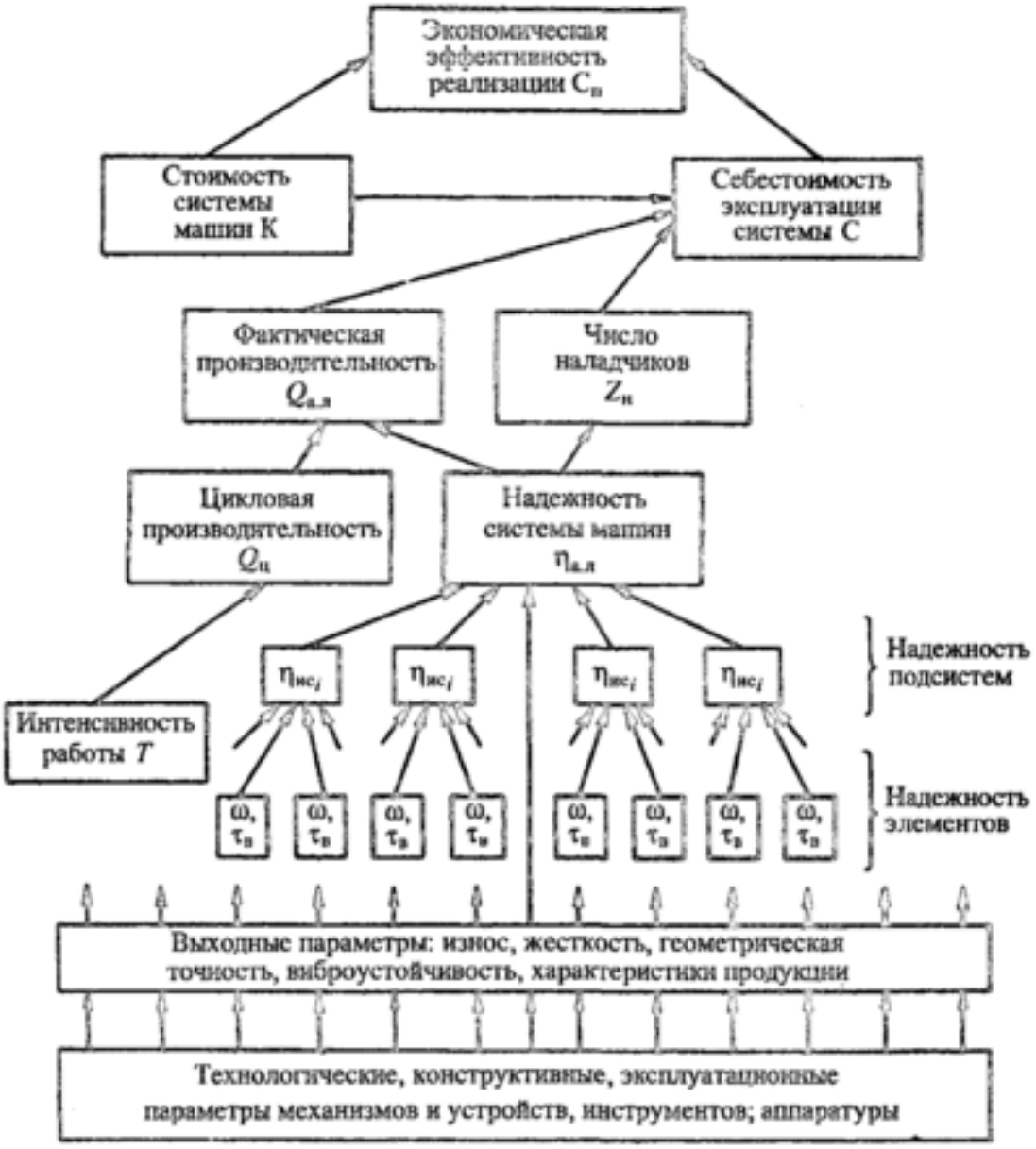


Рис. 2.2. Взаимосвязь ТЭП машин и показателей их экономической эффективности

ческие, конструктивные, эксплуатационные параметры конструктивных элементов: механизмов, устройств, инструментов, аппаратуры, а также внешние воздействия на систему машин (характер энергии окружающей среды, заготовок и полуфабрикатов и т.д.).

Эти факторы однозначно определяют в процессе длительной эксплуатации выходные параметры работы конструктивных элементов: жесткость, геометрическую точность, виброустойчивость, их изменение с

учетом факторов износа сопряжений, старения конструкционных материалов и т.д. и в итоге – характеристики качества выпускаемой продукции и интенсивность работы (T) при функционировании машин.

Здесь T – величина рабочего цикла машины как интервала времени, в течение которого выполняются рабочие и холостые ходы и выдается одна штука или порция изделий (см. гл. 1). Величина T определяет цикловую производительность оборудования ($Q_ц$) – количество продукции, выдаваемой в единицу времени при бесперебойной работе (подробнее см. в гл. 3).

Нестабильность выходных параметров при эксплуатации является причиной нарушения заданных условий взаимодействия между изделиями, инструментами и технологическими механизмами и появления отказов в работе машины.

Нарушение условий взаимодействия приводит к параметрическим отказам, когда выпускаемая продукция не соответствует техническим условиям. Нарушение условий взаимодействия различных механизмов и устройств, а также изделий с механизмами холостых ходов вызывает отказы функционирования, когда продукция машиной вообще не выдается. Параметрические отказы и отказы функционирования конструктивных элементов характеризуются показателями безотказности и восстанавливаемости. На рис. 2.2 ω – параметр потока отказов как среднее число отказов на единицу времени; $\tau_в$ – среднее время обнаружения и устранения одного отказа, мин/отк.

Вопросы надежности подробно рассмотрены в гл. 4.

На данном этапе развития теории функционирования технических систем математические модели зависимости показателей безотказности и ремонтопригодности от конкретных параметров машин и их отклонений не установлены. Поэтому, оценивая численные значения показателей надежности в проектных, прогнозирующих расчетах, приходится пользоваться не аналитически полученными данными, а результатами статистических исследований работоспособности устройства аналогичного назначения (см. гл. 10).

Взаимосвязь на дальнейших уровнях (см. рис. 2.2) описывается функционально соответствующими математическими уравнениями, которые будут приведены в гл. 2 – 4.

Надежность отдельных элементов (механизмов и устройств, инструмента, приспособлений и др.) определяет надежность подсистем (машин-автоматов и полуавтоматов), встраиваемых в системы машин (технологические участки, поточные и автоматические линии). Комплексными показателями надежности здесь могут служить коэффициенты использования отдельных машин ($\eta_{ис}$) и их систем ($\eta_{а.л}$).

Цикловая производительность $Q_ц$ и уровень надежности $\eta_{а.л}$ в работе автоматической линии количественно определяют фактическую производительность Q; при этом уровень надежности – и необходимое число наладчиков ($Z_н$ – число единиц оборудования, обслуживаемых одним наладчиком). Три фактора: стоимость оборудования К, его производительность Q и число обслуживающих рабочих $Z_н$ – определяют себестоимость эксплуатации – технологическую себестоимость С и далее – показатели экономической эффективности, рассмотренные в разд. 2.1.

2.3. ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ

Как было сказано в гл. 1, одной из важнейших задач фундаментального направления науки об автоматизации производственных процессов является установление функциональных взаимосвязей технических и экономических показателей – не только **абсолютных** (производительность, надежность, себестоимость и других конкретных вариантов), но и *в первую очередь – сравнительных как инструмента не только сопоставления конкретных вариантов и направлений развития автоматизации, но и определения ее стратегии.*

Рассмотрим влияние на экономические показатели производственного оборудования основных факторов повышения эффективности (см. гл. 1): улучшения качества продукции; повышения производительности машин; сокращения стоимости (капитальных затрат); снижения численности обслуживающего персонала (рабочих – операторов и наладчиков).

Сравнительные характеристики вариантов можно оценивать безразмерными коэффициентами [7, 26]:

– относительным количеством годной продукции, ее долей в общем выпуске – коэффициентом относительного увеличения выпуска доли годных изделий:

$$\Delta = \eta_{г2} - \eta_{г1},$$

где $\eta_{г1}$ и $\eta_{г2}$ – коэффициенты выхода годных изделий соответственно в неавтоматизированном и автоматизированном производствах;

– относительным количеством годной продукции, выпускаемой единицей технологического оборудования в единицу времени:

$$\varphi' = \frac{Q_2}{Q_1}\frac{\eta_{г2}}{\eta_{г1}}; \qquad \varphi = \frac{Q_2}{Q_1},$$

где Q_1, Q_2 – производительность единицы соответственно неавтоматизированного и автоматизированного оборудования, шт./мин;

φ и φ' – коэффициенты относительного роста производительности соответственно по выпущенной и годной продукции;

– коэффициентом относительного сокращения фонда заработной платы рабочих:

$$\varepsilon = \frac{Зпл_1}{Зпл_2},$$

где $Зпл_1$, $Зпл_2$ – годовой фонд заработной платы рабочих, обслуживающих данную единицу оборудования, с учетом сменности работы, всех видов доплат и начислений соответственно при неавтоматизированном и автоматизированном производствах, р./год;

– коэффициентом относительного увеличения стоимости средств производства:

$$\sigma = \frac{К_2}{К_1},$$

где $К_1$, $К_2$ – соответственно стоимость средств неавтоматизированного и автоматизированного производств, р.

Кроме того, варианты неавтоматизированного и автоматизированного производств могут отличаться: удельными затратами обрабатываемых материалов, электроэнергии, инструмента и др. на единицу изделия, если их технологические процессы существенно различны; длительностью проектирования и освоения, сроками службы после внедрения и т.д.

Если внедрение автоматических средств производства (полуавтоматов и автоматов, автоматических линий и участков и т.д.) не дает существенного повышения качества выпускаемой продукции ($\Delta = 0$), роста производительности ($\varphi = 1{,}0$), то неизбежные затраты, более высокие, чем в автоматизированном производстве ($\sigma >> 1$), окупиться не могут. Иными словами, достигаемый социальный эффект сокращения труда рабочих непосредственно в процессе производства (при автоматизации $\varepsilon > 1$ практически всегда) вступает в противоречие с экономическими результатами. Следовательно, в данном случае либо еще не созрели необходимые технико-экономические предпосылки для автоматизации, либо она проведена неоптимальным образом.

Базовый экономический эффект Э согласно формуле (2.5) и с учетом экономии от сокращения брака $\Delta С_{бр}$ будет

$$Э = (К_1 E_н + С_1) - (К_2 E_н + С_2) + \Delta С_{бр} = (С_1 - С_2) - E_н (К_1 - К_2) + \Delta С_{бр}.$$

Выразим величину Э непосредственно через сравнительные характеристики вариантов (φ, ε, σ, Δ).

Реплика. *При получении концептуальных функциональных зависимостей, как и при расчетах на предпроектных и начальных проектных этапах, учитывая неопределенность и недостоверность численных значений определяющих параметров, неразумно стремиться к высокой точности, упрощая расчеты до той степени, которая позволяет сохранить главную идею и целевые назначения этих самых расчетов.*

Характеристиками базового варианта являются: стоимость $К_1$; годовые эксплуатационные затраты $С_1$ по основным категориям: амортизационные отчисления, ремонт и межремонтное обслуживание, производственная заработная плата основных и вспомогательных рабочих со всеми начислениями, расходы на инструмент и вспомогательные материалы; годовой выпуск годных изделий Q_1, шт.; доля годных изделий, отвечающая требованиям качества, $\eta_{г1}$ (следовательно, $1 - \eta_{г1}$ – доля бракованных изделий). Потери от брака $С_{бр} = (1 - \eta_{г1}) Q_1 М_1$, где $М_1$ – стоимость материалов, необходимых для производства единицы изделия.

Амортизационные отчисления на восстановление стоимости и на ремонт (капитальный и средний) принимаем как долю от капитальной стоимости оборудования $К\alpha_1$, где α_1 – нормативный коэффициент амортизационных отчислений.

Годовые затраты на текущий ремонт и межремонтное обслуживание принято исчислять умножением условных единиц ремонтосложности механической и электрической частей на стоимость содержания единицы ремонтосложности, что проводится с использованием имеющихся нормативов.

Расчеты можно упростить, принимая затраты на текущий ремонт и межремонтное обслуживание также пропорциональными ожидаемой стоимости $К_1$ в размере $К_1\alpha_2$. Для станочного оборудования обычно годовые затраты на текущий ремонт и межремонтное обслуживание составляют 6...10 % стоимости оборудования (α_i = 0,06...0,10). Меньшее значение относится к универсальному оборудованию, большее – к автоматическим линиям. Годовые затраты на инструмент, электроэнергию, вспомогательные материалы определяются методами, маршрутом и режимами обработки, а также объемом выпущенной продукции Q_1, т.е. эти затраты пропорциональны выпуску: $m = m_1 Q_1$, где m_1 – затраты на единицу изделия, которые зависят от технологического процесса.

Годовой фонд производственной заработной платы Зпл рассчитывают в зависимости от числа основных и вспомогательных рабочих, среднемесячной и дополнительной заработной платы, сменности работы и начислений.

Итого, для базового варианта годовые эксплуатационные затраты

$$C_1 = K_1(\alpha_1 + \alpha_2) + Зпл + m. \qquad (2.6)$$

Как видно, общая величина затрат укрупненно определяется минимальным числом первичных показателей: K_1, m, Зпл и нормативными характеристиками α_1 и α_2.

При дальнейших расчетах следует учесть, что бóльшая часть годовых эксплуатационных затрат на данном оборудовании мало зависит от варьирования выпуска (амортизационные отчисления, затраты на ремонт и обслуживание, производственная заработная плата). Текущие затраты на инструмент, электроэнергию, основные и вспомогательные материалы пропорциональны фактическому выпуску продукции (годной и бракованной).

Согласно формуле (2.6) приведенные затраты при базовом варианте составят

$$З_1 = K_1 E_н + C_1 = K_1(E_н + \alpha_1 + \alpha_2) + Зпл + m,$$

где $E_н$ – принятый коэффициент эффективности.

Если при тех же характеристиках базового варианта увеличить выпуск годной продукции в φ раз, то для реализации потребуется φ технологических комплектов исходного варианта. Приведенные затраты по базовому варианту, скорректированные на более высокий уровень выпуска,

$$З_1 = \varphi[K(E_н + \alpha_1 + \alpha_2) + Зпл + m].$$

Искомый второй вариант по сравнению с базовым имеет в φ раз более высокую производительность ($Q_2 = Q_1\varphi$) в σ раз большую стоимость ($K_2 = K_1\sigma$); в ε раз меньшее число обслуживающих рабочих, в δ раз изменяющиеся удельные эксплуатационные затраты, приходящиеся на единицу продукции, доля годных изделий повышается до $\eta_{г_2} > \eta_{г_1}$. Тогда приведенные затраты по сравниваемому варианту (для его объема выпуска $Q_2 = Q_1\varphi$) будут (без учета брака)

$$З_2 = K_1\sigma(E_н + \alpha_1 + \alpha_2) + Зпл/\varepsilon + m\delta\varphi.$$

Годовая экономия от сокращения брака

$$\Delta C_{бр} = (\eta_{г_2} - \eta_{г_1}) Q_1 \varphi M_1 .$$

Отсюда годовой экономический эффект

$$Э = З_1 - З_2 + \Delta C_{бр} = K(\varphi - \sigma)(E_н + \alpha_1 + \alpha_2) + Зпл(\varphi - 1/\varepsilon) + m\varphi(1 - \delta) + $$
$$+ (\eta_{г_2} - \eta_{г_1}) Q_1 M_1 \varphi .$$

Сумма коэффициентов $E_н + \alpha_1 + \alpha_2 = a$ есть константа данного оборудования и при выполнении расчетов может фигурировать в численной форме. Так, в машиностроении ее можно принимать равной 0,30...0,35.

Годовой экономический эффект, выраженный через сравнительные ТЭП вариантов, имеет вид

$$Э = Ka(\varphi - \sigma) + Зпл(\varphi - 1/\varepsilon) + m\varphi(1 - \delta) + (\eta_{г_2} - \eta_{г_1}) Q_1 M_1 . \qquad (2.7)$$

Если при автоматизации не меняются удельные затраты инструмента и электроэнергии ($\delta = 1{,}0$) и качество продукции ($\eta_{г_2} = \eta_{г_1}$), что можно принимать при идентичности технологических процессов, формула (2.7) упрощается:

$$Э = Ka(\varphi - \sigma) + Зпл(\varphi - 1/\varepsilon). \qquad (2.8)$$

Если сравнительные варианты приведены в соответствие по масштабам выпуска ($\varphi = 1$), то можно для каждого варианта оценивать неполные приведенные затраты по простейшим формулам:

$$З_i = Ka + З_i. \qquad (2.9)$$

При этом годовой фонд заработной платы по определению

$$Зпл = \left(\frac{З_{оп}}{Z_{оп}} + \frac{З_{нал}}{Z_{нал}} \right) nk, \qquad (2.10)$$

где $З_{оп}$ и $З_{нал}$ – средний годовой фонд заработной платы одного оператора и наладчика;

$Z_{оп}$ и $Z_{нал}$ – соответственно нормы обслуживания оператора и наладчика;

n – сменность работы ($n = 1, 2, 3$);

k – коэффициент начислений на заработную плату.

По таким формулам можно вести укрупненные прикладные расчеты (см. гл. 8).

Рассмотренные математические зависимости могут служить основой решения ряда задач. В их числе:

– **расчет технико-экономических допусков**, т.е. значений технических характеристик проектируемого оборудования, исходя из гарантированной экономической эффективности его внедрения; знание этих предельных величин позволяет оценить, созрели ли технические и экономические предпосылки для автоматизации данного производства по тем или иным вариантам;

– **расчет оптимальных с экономических позиций значений** отдельных технических характеристик (однопараметрическая оптимизация, проектных решений), т.е. решение задач оптимального проектирования;

– **целенаправленное формирование технически возможных и целесообразных вариантов** построения автоматов и автоматических систем машин и их первичный отбор;

– **определение экономически оптимальных вариантов** из числа множества технически возможных, т.е. комплексная оптимизация проектных решений.

Задачи решаются либо как граничные ($Э = Э_{min} = 0$), либо как экстремальные ($Э = Э_{max}$); при необходимости основное уравнение "реверсируют", т.е. значения $Э = 0$ или $Э = Э_{max}$ ставят аргументом, а искомые характеристики – функцией.

В качестве примера общего анализа на рис. 2.3 показаны графики зависимости экономического эффекта от различных факторов.

Если автоматизация позволяет сократить число обслуживающих рабочих ($\varepsilon > 1$) при неизменном уровне производительности ($\varphi = 1$) и качества продукции ($\eta_{r_1} = \eta_{r_2}$), то достигаемый экономический эффект весьма невысок и может быть отрицательным. Если автоматизация обеспечивает и повышение производительности, и сокращение трудовых затрат при обслуживании, то получаемый экономический эффект намного выше и существен даже при значительных затратах. Чем выше стоимость автоматизированного оборудования и средств управления, тем ниже при прочих равных условиях достигаемый экономический эффект.

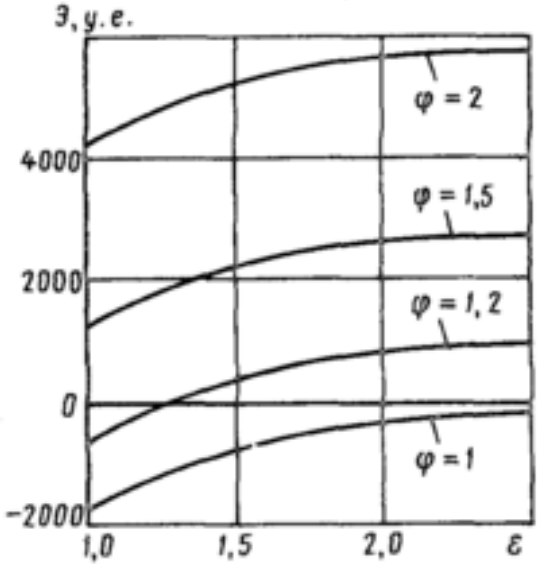


Рис. 2.3. Зависимость годового экономического эффекта Э при автоматизации от сокращения производственной заработной платы ε и повышения производительности оборудования φ

Формулы (2.7), (2.8) позволяют оценить долю участия каждого компонента в достижении суммарного экономического эффекта. Так, например, если стоимость автоматизированных средств производства в 1,5 раза выше стоимости неавтоматизированных средств, а при внедрении обеспечиваются повышение производительности в 2 раза и уменьшение числа обслуживающих рабочих в 2 раза, доля годных деталей возрастает на 5 %, т.е. $\sigma = 1{,}5$; $\varphi = 2$; $\varepsilon = 2$; $\Delta = 0{,}05$, то расчеты по формуле (2.7) показывают, что суммарный экономический эффект достигается: *повышением производительности на* 71 %, *сокращением числа рабочих на* 15 %, *брака на* 14 %. Относительно невысокий эффект от повышения качества продукции объясняется тем, что в установившихся условиях машиностроительного производства процент бракованной продукции обычно невелик (годные до 85...90 %), поэтому возможные резервы $\Delta_{max} = 0{,}05...0{,}10$. Аналогично, если автоматизация с трехкратным увеличением стоимости дает повышение производительности в 3,5 раза, сокращение числа обслуживающих рабочих в 2 раза и увеличение выхода годных на 5 % (т.е. $\sigma = 3$; $\varphi = 3{,}5$; $\varepsilon = 2{,}0$; $\Delta = 0{,}05$), *уже* 88 % *суммарного экономического эффекта достигается благодаря росту производительности оборудования.*

Комплексные расчеты, выполненные для широкого диапазона типовых условий машиностроения, показывают, что такое положение закономерно и важнейшим источником получения экономического эффекта при автоматизации производственных процессов в машиностроении является *не сокращение числа обслуживающих рабочих, а повышение производительности технологического оборудования*. Оно достигается прежде всего путем интенсификации технологических процессов, совмещения операций, повышения быстродействия при выполнении вспомогательных процессов и т.д. (см. гл. 5).

Пример. В цехе вместо поточной линии из отдельных станков, работающих с годовой программой $Q_г = 95\,600$ корпусных изделий, намечается внедрить однопоточную автоматическую линию из агрегатных станков. Показатели базового варианта – действующей поточной линии, рассчитанные обычными методами, достоверны: стоимость $К_1 = 134$ тыс. у.е., годовой фонд заработной платы обслуживающих рабочих (с дополнительной заработной платой и начислениями) при двухсменном графике работы $Зпл_1 = 68{,}5$ тыс. у.е., годовые затраты на инструмент и электроэнергию 12,1 тыс. у.е., расходы на текущий ремонт и межремонтное обслуживание, учитывая трудности их выделения из общецеховых, приняты в размере 8 % балансовой стоимости оборудования (10,8 тыс. у.е.).

Ожидаемая расчетная стоимость проектируемой автоматической линии $К_2 = 288$ тыс. у.е., линия рассчитана на выпуск $Q_г = 130\,000$ корпусных изделий в год. Автоматическую линию в смену должны обслуживать один оператор и два

наладчика, что при двухсменной работе составляет в год (с дополнительной заработной платой и начислениями) $Зпл_2 = 14{,}4$ тыс. у.е.

Таким образом, номинальные показатели проектируемой линии достаточно высоки: повышение стоимости в $\sigma = 288/134 = 2{,}15$ раза обеспечивает увеличение выпуска продукции в $\varphi = 130/95{,}6 = 1{,}38$ раза и сокращение производственной заработной платы в $\varepsilon = 68{,}5/14{,}4 = 4{,}75$ раза. Технологические процессы обработки корпусных изделий остаются в своей основе прежними (фрезерование, сверление, растачивание, нарезание резьбы), поэтому удельные затраты на инструмент и электроэнергию существенно не меняются ($\delta = 1{,}0$).

Следовательно, годовые затраты по этим статьям меняются пропорционально выпуску и на сравнительную эффективность не влияют.

Годовой экономический эффект может быть рассчитан как разность неполных приведенных затрат (без стоимости инструмента и электроэнергии). Тогда согласно формуле (2.8) с учетом расширения базового варианта в φ раз

$$Э = a(К_1\varphi - К_2) + Зпл_1 - Зпл_2 = 0{,}35(134 \cdot 1{,}38 - 288) + $$
$$+ 68{,}7 \cdot 1{,}38 - 14{,}4 = 43 \text{ тыс. у.е.}$$

Однако численные значения ожидаемых показателей производительности и стоимости проектируемой автоматической линии пока остаются неопределенными. Автоматическая линия однопоточна, производительность $Q_{г_2} = 130\,000$ изделий характеризует ее потенциальные возможности при полной загрузке, которая будет определяться реальными условиями производства.

Производственная программа поточной линии $Q_г = 95\,600$ изделий отражает текущие, сегодняшние потребности данного производства, и, хотя планами предусмотрено значительное увеличение программы, реализация этого зависит от многих обстоятельств. Поэтому, возможно, автоматическая линия будет иметь тот же объем выпуска, что и поточная, т.е. автоматизация не даст реального увеличения выпуска, а дополнительные затраты не снизятся, так как меньше одного станка на позиции иметь нельзя. Следовательно, ожидаемый рост производительности как вероятностная величина распределен в значительном диапазоне ($1{,}0 \le \varphi \le 1{,}38$). Аналогично не может считаться достоверной на проектной стадии и ожидаемая стоимость линии ($К_2 = 288$ тыс. у.е.). Эту стоимость следует считать минимальной и предусматривать (по опыту) ее возможное завышение на 20...30 %, т.е. до 340...400 тыс. у.е.

Рассчитаем, как может отразиться недостоверность исходных данных по производительности и стоимости на величине экономического эффекта внедрения линии, для чего воспользуемся формулой (2.8):

$$Э = 0{,}35К_1(\varphi - \sigma) + Зпл_1(\varphi - 1/\varepsilon).$$

Подставив в формулу те численные значения, которые являются в данном случае константами ($К_1 = 134$ тыс. у.е., $Зпл_1 = 68{,}5$ тыс. у.е., $\varepsilon = 4{,}75$), получим

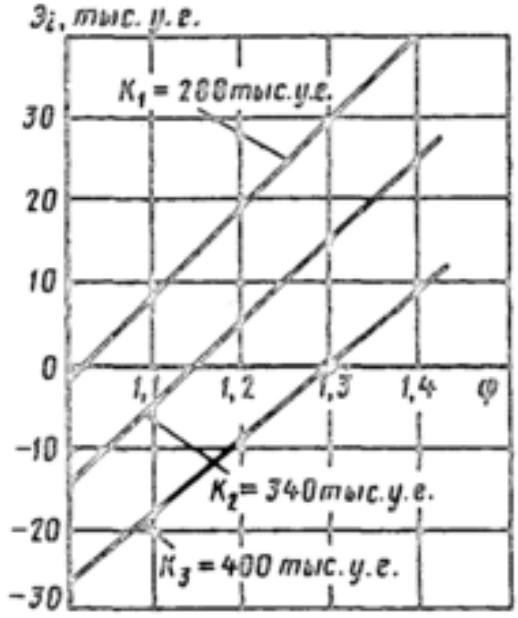


Рис. 2.4. Годовой экономический эффект при варьировании выпуска продукции и стоимости автоматизированного оборудования

$$Э = 0{,}35K_1\varphi - 0{,}35K_2 + Зпл_1(\varphi - 1/\varepsilon) = 47{,}0\varphi - 0{,}35K_2 + 68{,}5(\varphi - 0{,}21).$$

На рис. 2.4 показаны графики зависимости ожидаемого годового экономического эффекта Э от возможного варьирования выпуска продукции (φ = 1,0...1,38) и стоимости линии (K_2 = 288, 340, 400 тыс. у.е.). Как видно, даже небольшие отклонения показателей от номинала (φ = 1,38; K_2 = 288 тыс. у.е.), связанные с удорожанием линии и ее недоиспользованием по производительности, вызывают отрицательный эффект, свидетельствующий о нецелесообразности внедрения. Только при обеспечении минимальной стоимости линии (K_2 = 288 тыс. у.е) ее использование будет достаточно эффективно во всем возможном диапазоне производительности, а при стоимости – 400 тыс. у.е. автоматическая линия вообще не может быть экономически эффективной.

В примере и далее знак "у.е." означает не привязку к конкретной валюте, а масштаб затрат, что полностью соответствует смыслу обозначения, у.е. – условные единицы.

2.4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ДОПУСКИ

При любом сочетании характеристик исходного варианта (K_1, C_1, $Q_г$) и сравнительных характеристик (φ, σ, ε, δ) всегда могут быть найдены предельно допустимые значения одного из параметров, при которых экономический эффект становится равен нулю. Следовательно, отклонение их в худшую сторону означает убыточность автоматизации.

Физический смысл "технико-экономических допусков" иллюстрирует рис. 2.5, где показана функциональная зависимость годового экономического эффекта Э при создании автоматической линии от параметра ее надежности – коэффициента технического использования ($\eta_{а.л}$) при различных значениях номинального повышения производительности (φ).

$$\varphi = \varphi_н \frac{\eta_{а.л}}{\eta_{а.л_н}},$$

где φ – коэффициент повышения производительности как переменная величина;

$\eta_{а.л_н}$ – номинальный коэффициент технического использования, т.е. принятое его численное значение при расчете производительности;

$\eta_{а.л}$ – коэффициент технического использования как переменная величина, поскольку на проектной стадии точно предвидеть будущий уровень надежности невозможно.

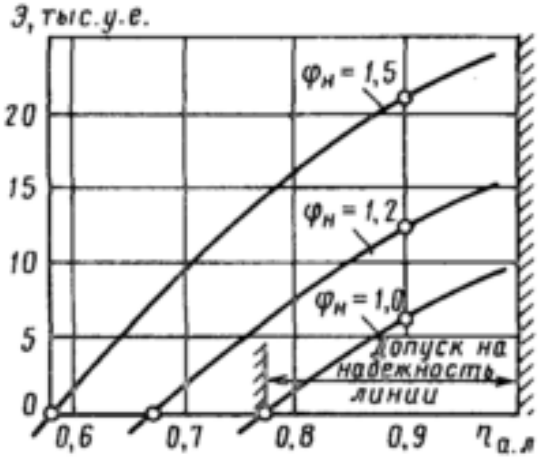


Рис. 2.5. Зависимость годового экономического эффекта Э от коэффициента технического использования автоматической линии $\eta_{а.л}$

Графики зависимости $Э = f(\eta_{а.л})$ соответствуют типовым условиям линий подшипниковой промышленности. Как видно, снижение надежности вызывает резкое сокращение экономии на приведенных затратах, особенно в тех случаях, когда технологические процессы, положенные в основу линии, имеют низкий потенциал производительности ($\varphi_н$ = 1...1,1).

Граничным условием выполнения целевого назначения автоматической линии будет Э = 0, т.е. автоматическая линия при данном уровне надежности уже не обеспечивает минимума приведенных затрат по сравнению с поточной линией. Найдя точку пересечения оси Э = 0 с кривой, соответствующей определенному $\varphi_н$, получим минимально допустимый коэффициент ($\eta_{а.л_{min}}$) использования, который должна обеспечить линия. Например, при $\varphi_н$ = 1,0 (см. рис. 2.5) линия должна обеспечивать коэффициент использования не ниже чем $\eta_{а.л_{min}}$ = 0,77. Следовательно, поле допуска на надежность автоматической линии будет $0,77 \le \eta_{а.л} \le 1,0$.

Аналитически в общем виде технико-экономические допуски можно определять, "реверсируя" уравнения (2.7) – (2.9) и др., т.е. приравнивая Э к нулю и решая уравнение относительно величин φ, σ, ε.

Например, максимально допустимое удорожание автоматизированного оборудования по сравнению с неавтоматизированным согласно формуле (2.8) будет

$$\sigma_{max} = \varphi + \frac{Зпл_1}{K_1 a}(\varphi - 1/\varepsilon). \qquad (2.11)$$

Допустимое удорожание можно определить не в относительных, а в абсолютных денежных единицах.

Если из ранее рассмотренного примера (см. разд. 2.3, рис. 2.4) взять относительные коэффициенты (φ, σ, ε) и воспользоваться формулой (2.11), то можно получить K_1 = 134 тыс. у.е..; $Зпл_1$ = 68.5 тыс. у.е.; $\varphi_н$ = 138; $\sigma_н$ = 2,15; $\varepsilon_н$ = 4,75. При переменных φ и ε

$$\sigma_{max} = \varphi + \frac{3 \cdot 68,5}{134}(\varphi - \frac{1}{\varepsilon}) = 2,5\varphi - \frac{1,5}{\varepsilon}.$$

Логическая проверка. Если рассматриваемый вариант по сравнению с базовым не дает ни повышения производительности (φ = 1), ни сокращения обслуживающего персонала (ε = 1), то никакие более высокие капитальные затраты не окупятся: σ_{max} = 1, Действительно, подставив φ = 1 и ε = 1 в формулу (2.11), получим $\sigma_{max} = 2,5 \cdot 1 - \frac{1,5}{1} = 1$, что и требовалось доказать.

Реплика. *Приводимые здесь и в дальнейшем расчеты могут толковаться как слишком простые. Но поверьте многолетнему опыту автора, что ничто так не доводит истину до понимания студентов, как ее простая наглядная количественная иллюстрация.*

На рис. 2.6 приведены построенные по формуле (2.11) зависимости допустимого увеличения стоимости оборудования от степени сокращения численности обслуживающего персонала ε при различных значениях роста производительности оборудования φ. Сокращение численности рабочих имеет убывающую эффективность, решающим фактором является именно рост выпуска продукции. Если его не предвидится (φ = 1), то допустимое повышение стоимости средств производства, например, при обеспечении трехкратного сокращения численности рабочих составит лишь σ_{max} = 2. На такие деньги автоматическую линию не закупишь и не построишь. В то же время рост выпуска в 1,5 – 2 раза дает возможность иметь достаточно дорогое оборудование. В самых благоприятных условиях пятикратное сокращение (ε = 5) численности обслуживающего персонала позволяет оправдать рост стоимости лишь на 120 % (σ_{max} = 2,2), а повышение при этом выпуска лишь в 2 раза обеспечивает поднятие этой планки до 370 % (σ_{max} = 4,7).

Аналогичным путем можно получить минимально допустимые значения роста производительности автоматизированного оборудования по сравнению с неавтоматизированным – исходя из минимума общих затрат.

Решая уравнение (2.7) относительно φ и приравнивая Э к нулю, получаем значение минимально допустимого повышения производительности автоматизированных средств производства в сравнении с неавтоматизированным производством:

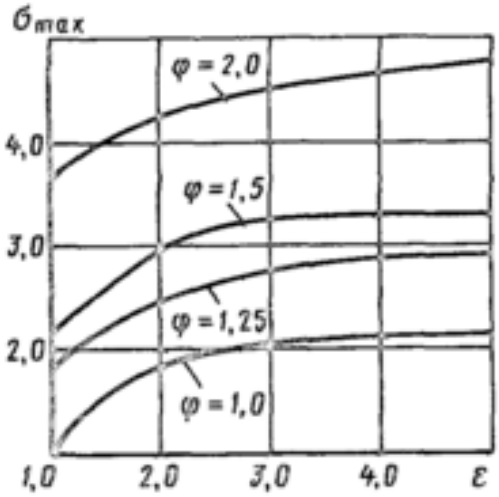


Рис. 2.6. Максимально допустимый рост стоимости средств производства при автоматизации в зависимости от сокращения заработной платы и роста производительности

$$\varphi_{min} = \frac{K\sigma a + Зпл_1/\varepsilon}{Ka + m(1-\delta) + Зпл_1 + \Delta Q_r M_1}. \qquad (2.12)$$

Как уже было сказано, сумма нормативных коэффициентов: эффективности капиталовложений $E_н$, амортизационных отчислений α_1 и текущих затрат на ремонт и обслуживание α_2 – носит характер экономической константы для данного типа средств производства. Обозначив их сумму через a, при укрупненных расчетах можно считать, что a = 0,30...0,35. Произведение $K_1\sigma$ есть не что иное, как стоимость автоматизированных средств производства K_2. Подставив в формулу (2.12) указанные значения, получим

$$\varphi_{min} = \frac{K_2 a + Зпл_1/\varepsilon}{K_2 a + m(1-\delta) + Зпл_1 + \Delta Q_r M_1}. \qquad (2.13)$$

Если создание нового автоматизированного оборудования не связано с внедрением новых технологических методов и процессов, а следовательно, не приводит к изменению качества выпускаемой продукции (Δ = 0) и удельных затрат сырья, электроэнергии, инструмента (δ = 1), требования к производительности могут рассчитываться по простейшей формуле:

$$\varphi_{min} = \frac{K_2 a + Зпл_1/\varepsilon}{K_2 a + Зпл_1}. \qquad (2.14)$$

Как видно, требования к производительности автоматизированных средств производства зависят от их стоимости K_2 в сравнении со стоимостью K_1 базового варианта, а также от степени достигаемого сокращения числа обслуживающих рабочих ε. Абсолютное сокращение числа рабочих, занятых в производстве, мало влияет на требования к производительности. Так, если при ожидаемой стоимости K_2 = 200 тыс. у.е. число обслуживающих рабочих сократится в 1,5 раза, автоматизированное оборудование будет экономически эффективно лишь при условии, если его производительность окажется не менее чем в φ_{min} = 1,17 раза выше, чем у неавтоматизированного. Если удается сократить число обслуживающих рабочих в 3 раза, требования к производительности существенно не снижаются. Значительно заметнее влияет на экономический эффект стоимость оборудования.

Так, если при том же сокращении рабочих в 1,5 раза стоимость автоматизированного оборудования K_2 = 400 тыс. у.е., то окупаемость затрат будет обеспечена лишь при почти двукратном повышении производительности (φ_{min} = 1,95).

Реплика. Приведенные выше формулы и расчеты по ним носят в основном концептуальный характер, помогая студентам лучше понять и осмыслить некоторые закономерности.

Прикладные расчеты на предпроектных и ранних проектных стадиях целесообразности развертывания работ по автоматизации и выбора оптимальных структурно-компоновочных вариантов требуют более глубокого знания технологии и конструкций применительно к каждой решаемой задаче, получения и использования более проработанных зависимостей. Такие примеры будут приведены далее.

2.5. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОВОЙ ТЕХНИКИ – ПУТИ АВТОМАТИЗАЦИИ

Рассмотренные выше методы технико-экономического анализа позволяют концептуально оценивать возможности и перспективность различных направлений автоматизации, ее пути и сравнительную эффективность.

Первый путь – повышение качества выпускаемой продукции (путь $\Delta > 0$), что выражается не только в повышении выхода годной продукции и сокращении брака, но в получении более высоких и стабильных ее ха-

рактеристик по точности размеров, геометрической и координатной точности и т.д. [13].

Характерные тенденции, проявившиеся в конце XX века: перенасыщенность рынка продукцией и обострение конкуренции, повышение жизненного уровня, запросов и потребностей населения – и не только в наиболее развитых странах, сделали проблему высокого качества продукции доминирующей. Оказалось, что зачастую продать продукцию намного труднее, чем ее выпустить, непроизводственные расходы на маркетинг, рекламу и т.п. становятся сопоставимы с производственными. И если в середине XX века наиболее общий девиз материального производства можно было сформулировать как "Больше товаров хороших и разных!", то к концу века его сменил жесткий девиз: "Качество или смерть!"

Именно борьба за качество, с постоянным обновлением выпускаемой продукции стала доминирующим направлением НТП. Возможности повышения качества выпускаемой продукции при переходе от неавтоматизированного производства к автоматизированному весьма многообразны. Они вытекают из ограниченных возможностей человека: физических, физиологических, субъективности действий, подверженности влиянию различных факторов и условий.

Например, при ручной точечной сварке человек не в состоянии обеспечивать стабильность расположения точек сварки, сил нажатия клещей, времени подачи тока и т.д. Такую стабильность гарантирует применение сварочных автоматических линий, оснащенных промышленными роботами. Аналогично применение последних в гальванических линиях позволяет надежно выдерживать заданное время нахождения контейнеров с изделиями в гальванической ванне, время выдержки над ванной, когда стекает электролит, это невозможно получить при ручном обслуживании хотя бы из естественного нетерпения рабочего при многократном повторении рутинных действий. К этому следует добавить автоматический контроль и необходимые корректировки температуры и состава электролита, силы тока и т.д.

При ручном совмещении фотошаблона с подложкой перед экспонированием полупроводниковых пластин в процессе изготовления интегральных микросхем (см. гл. 1) физиологические возможности человека не позволяют выполнять это совмещение с точностью выше 3...5 мкм. Следовательно, новейшие большие и сверхбольшие интегральные схемы с геометрическими размерами элементов и точностью координатного расположения до 0,3...0,5 мкм могут быть получены с использованием только автоматизированного оборудования.

Существует немало процессов, где человек вообще не может находиться в рабочей зоне, так как это недопустимо либо для самого человека (температура, давление, токсичность выбросов и сбросов и т.д.), либо для производимой продукции (привнесенная микродефектность на полупроводниковых пластинах).

Варианты оборудования, которые обеспечивают получение продукции различного уровня качества (например, по точности размеров после обработки), как правило, неальтернативны. Если станки не дают точности, которая необходима для взаимозаменяемости при сборке, незачем рассчитывать экономические показатели: производительность, себестоимость, окупаемость.

Альтернативными являются варианты с одинаковыми потенциальными возможностями по качеству, но с различным выходом годной продукции.

Второй путь – уменьшение числа рабочих, непосредственно занятых в процессе производства (путь ε). Оно достигается благодаря совершенствованию средств производства и управления, изменению организации труда и т.д., когда один рабочий получает возможность обслуживать одновременно несколько машин, выполнять работу, которую раньше осуществляли при обслуживании системы машин ε чел.

Реализацию пути ε можно иллюстрировать следующим образом: за базу принята поточная линия, скомпонованная из станков, обслуживаемых операторами (рис. 2.7, *а*). На первых стадиях автоматизации станки поточной линии оснащаются автоматическими загрузочно-разгрузочными устройствами (манипуляторами), тем самым позиции переводятся из полуавтоматического режима работы в автоматический. Дальнейшая автоматизация связана с установкой автоматических транспортных механизмов для связи станков линии. Управление всем комплексом механизмов и узлов линии в соответствии с циклограммой осуществляется САУ (см. гл. 1).

В итоге оснащение станков поточной линии манипуляторами, введение автоматических транспортных устройств и системы управления позволяет создать автоматическую линию (см. рис. 2.7, *б*). Такой путь автоматизации является одним из самых распространенных, так как дает возможность использовать существующий парк машин, расширяя фронт автоматизации; сократить число рабочих при обслуживании станков. Примерами реализации первого пути являются автоматические линии из типового (универсального) оборудования. Вместе с тем, такой путь автоматизации имеет ограниченные возможности, поскольку при сохранении уровня производительности оборудования экономия живого труда убывает, что можно проиллюстрировать следующим расчетом.

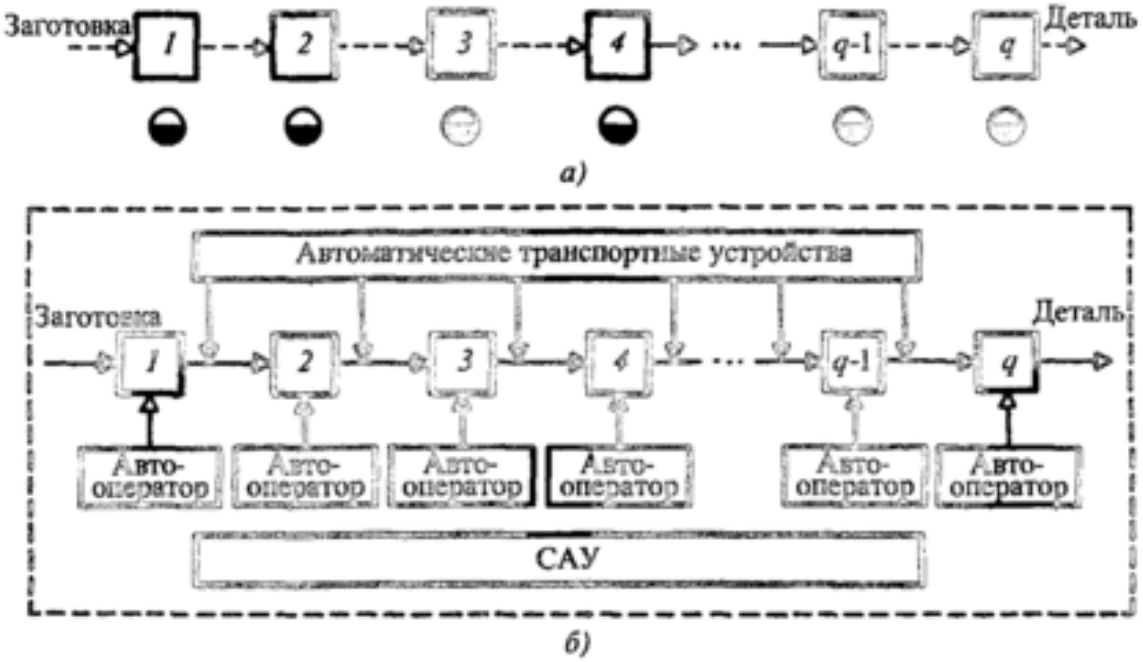


Рис. 2.7. Технологические системы машин:
а – поточная линия с выполнением вспомогательных процессов вручную;
б – автоматическая линия; *1*, *2*, ..., *q* – номера станков

Как известно, при обслуживании неавтоматизированных машин рабочий вручную управляет последовательностью обработки и выполняет все вспомогательные операции (установку и съем заготовок, зажим и разжим их в шпинделе, подвод и отвод инструментов, контроль размеров обрабатываемых изделий, а также передачу заготовок от станка к станку, уборку стружки, переключение режимов обработки и т.д.). Естественно, что в условиях неавтоматизированного производства рабочий обслуживает, как правило, лишь один станок.

Предположим, что имеется участок из 100 станков, которые обслуживают 100 рабочих. При автоматизации затраты живого труда в процессе обработки уменьшаются тем больше, чем выше степень автоматизации системы машин, когда один рабочий получает возможность обслуживать не один, а большее число станков ($Z > 1$). Если в поточной линии общие затраты живого труда при $Z_{ж} = 1$ составляли $T_{ж}$, то при обслуживании рабочим-оператором Z станков и неизменной заработной плате одного рабочего они составляют $T_{ж}/Z$. Следовательно, общая экономия живого труда рабочих-операторов

$$Э = T_{ж} - \frac{T_{ж}}{Z} = T_{ж}(1 - 1/Z).$$

Если относить экономию к первоначальному фонду заработной платы, то

$$\Delta = \frac{Э}{Т_ж} = 1 - 1/Z.$$

Автоматизация рабочего цикла машины, создание автоматов и полуавтоматов, оснащенных САУ рабочими и холостыми ходами, позволяет ограничить обязанности рабочих-операторов сменой заготовок (на полуавтоматах), заправкой материала в механизмы, межстаночной транспортировкой. Это дает возможность одному рабочему обслуживать не один, а два–три станка и, следовательно, сократить число обслуживающих рабочих и получить экономию заработной платы. Так, при обслуживании одним рабочим двух станков ($Z = 2$) экономия уже составляет 50 % заработной платы обслуживающего персонала ($\varepsilon = 0{,}5$; рис. 2.8).

Таким образом, автоматизация рабочего цикла станков (первая ступень автоматизации, см. гл. 1), которая достигается иногда простейшими техническими средствами и с минимальными затратами, позволяет сэкономить значительную часть трудовых затрат, необходимых в условиях неавтоматизированного производства. Дальнейшими усовершенствованиями (оснащением полуавтоматов механизмами автоматической загрузки, контроля, улучшением системы эксплуатации и т.д.) можно достигнуть того, что один рабочий будет обслуживать в поточной линии $Z = 4...5$ станков и экономия трудовых затрат и заработной платы увеличится еще больше, однако, как показывает рис. 2.8, эта экономия не будет пропорциональна числу станков, обслуживаемых одним рабочим. Если увеличение Z в 2 раза (от одного до двух) позволяет сэкономить 50 % фонда заработной платы, то увеличение Z еще в 2,5 раза (от 2 до 5) дает возможность сэкономить только 40 %.

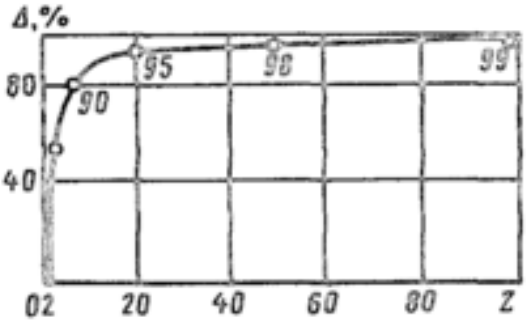


Рис. 2.8. Зависимость экономии ручного труда от числа станков, обслуживаемых одним рабочим

Дальнейшая экономия затрат живого труда возможна только путем создания автоматических линий, т.е. автоматизацией межстаночной транспортировки заготовок и накопления заделов, созданием новых систем управления, сигнализации и блокировки, механизмов автоматического контроля и подналадки, уборки стружки и т.д.

При этом если технологические процессы остаются прежними, то и производительность машин сохраняется на достигнутом уровне, а автоматизация позволяет лишь увеличивать число станков, обслуживаемых одним рабочим. Если при переходе от обслуживания одной машины к двум можно простейшими средствами сэкономить 50 % заработной платы, то при переходе от 50 к 100 станкам – только 1 %.

Итак, с увеличением степени автоматизации системы машин технические трудности и затраты прогрессивно растут, а экономия трудовых затрат падает. Следует отметить при этом, что автоматизация дает снижение числа рабочих-операторов, но не наладчиков, численность которых, как правило, возрастает, особенно при низких показателях надежности оборудования (см. гл. 4). Автоматизация в целях сокращения затрат ручного труда может быть эффективной прежде всего в отраслях с низкой технической оснащенностью, где еще велики затраты живого труда, а следовательно, и резервы их экономии. Создание автоматических линий на базе существующего поточного производства, где один рабочий и без автоматизации обслуживает два–три станка, если эти линии опираются на существующие технологические процессы и имеют целью только сокращение числа рабочих-операторов и подсобных рабочих, малоэффективно.

Автоматизация в расчете на увеличение многостаночного обслуживания выгодна лишь в тех случаях, когда она не требует больших дополнительных затрат сил, средств и времени благодаря применению унифицированных средств автоматизации.

Третий путь – снижение стоимости средств производства (путь σ). Этот путь связан с совершенствованием технологии производства самих средств производства, стандартизацией и унификацией механизмов, узлов и деталей машин, обеспечивающих снижение их себестоимости. Для этого пути характерно развитие агрегатного станкостроения, поточных методов производства новых машин, а также унифицированных средств автоматизации. Важнейшей задачей является создание универсальных встраиваемых станков, пригодных как для самостоятельной эксплуатации, так и для встраивания в автоматические линии. Такие станки в большом количестве могут использоваться в автоматических линиях различного технологического назначения, что позволяет наладить их выпуск в больших масштабах, применяя поточные методы производства, создавая стабильные конструкции, надежные в эксплуатации.

Если на первых этапах автоматизации унифицированными элементами были узлы и механизмы, из которых компонуются станки различного технологического назначения, то теперь элементами компоновки служат уже встраиваемые станки и унифицированные транспортные средст-

ва, что позволяет создавать автоматические линии с меньшими затратами и в кратчайшие сроки. Унификация и стандартизация оборудования дает возможность не только уменьшить стоимость оборудования, но и значительно сократить сроки его проектирования и освоения и, тем самым, повысить производительность общественного труда.

Оценивая перспективность третьего пути повышения экономической эффективности автоматизации, следует учитывать неодинаковые реальные возможности улучшения характеристик ε и σ. Если новые автоматические линии, оснащенные современными средствами автоматизации, позволяют сократить число обслуживающих рабочих в несколько раз ($\varepsilon = 3...5$), то сократить стоимость новой техники во столько же раз практически невозможно. Проектирование, изготовление, монтаж и отладка новых машин – сложные процессы; каждый процент снижения заводской себестоимости новой машины является достижением.

Четвертый путь – повышение производительности средств производства, а следовательно, сокращение трудовых затрат на единицу изделия (путь φ). Это достигается разработкой новых, прогрессивных технологических процессов и созданием высокопроизводительных средств производства.

В истории техники известно немало примеров, когда уровень существующего производства исчерпывал свои возможности, и это неизбежно вызывало появление новых методов производства, новой технологии и новых высокопроизводительных средств производства.

Коренная ломка старых, привычных методов производства, рождение и развитие новых прогрессивных технологических процессов и высокопроизводительных средств производства – радикальный путь повышения его эффективности.

Следовательно, генеральным направлением автоматизации являются разработка новых, прогрессивных технологических процессов и создание таких высокопроизводительных средств производства, которые вообще невозможны, пока человек остается непосредственным участником выполнения технологического процесса.

Характерно появление в последнее время такого понятия, как качество машин [13]. В это понятие вкладываются помимо качества выпускаемой продукции такие свойства, как высокие производительность и надежность машин, комфортность условий обслуживания, отсутствие вредного влияния на окружающую среду и т.д.

Наиболее высоким потенциалом качества обладает высокоавтоматизированное оборудование.

Глава 3

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МАШИН

3.1. ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Основными характеристиками любой технологической машины являются качество и количество выпускаемой продукции (производительность). И если показатели качества бесконечно разнообразны в зависимости от видов продукции и требований к ним, то показатели количества выпускаемой продукции едины для любого вида оборудования. Отсюда – становление и развитие особого раздела науки о машинах: теории производительности машин.

Теория производительности включает в себя:

1) ***научно-методические основы*** (важнейшие понятия и определения, концептуальные положения; количественные показатели, их взаимосвязь и методы оценки и т.д.);

2) ***фундаментальное направление*** (раскрытие причинных связей и закономерностей построения и развития машин методами и средствами данной теории; структурный и функциональный анализ и синтез машин и их систем, в том числе взаимосвязь производительности с технологическими, конструктивными, эксплуатационными и другими параметрами);

3) ***прикладное направление*** (решение практических задач расчета, конструирования, эксплуатации и исследований с использованием критерия производительности).

При создании новой техники расчеты и анализ производительности необходимы:

- на ранних этапах проектирования (техническое задание и техническое предложение), при выборе принципиальных проектных решений (методы и маршрут обработки, структура и компоновка машин);
- на завершающих этапах проектирования (рабочий проект и техническая документация), когда уточняются характеристики реализованного проекта;
- на этапах приемосдаточных испытаний, пуска и освоения при сравнительной оценке расчетных и фактических показателей работоспособности;
- в период стабильной эксплуатации, когда оцениваются возможные резервы производительности в данных конкретных условиях, а также организуется обратная связь: от опыта применения к последующему проектированию.

Во всех случаях количественно рассчитываются и оцениваются одни и те же показатели, однако сначала они выступают как расчетные, ожидаемые величины, а далее – как фактические.

Теория производительности органически связана с такими научными разделами, как теория надежности машин, инженерная теория технико-экономической эффективности, теория дифференциации и концентрации операций, теория оптимального проектирования и т.д.

Производительность машины – это количество годной продукции, выдаваемой машиной в единицу времени.

Для того чтобы численно оценить производительность Q, следует количество годной продукции Z, выпущенное за какой-то период времени Θ, разделить на длительность этого периода:

$$Q = Z/\Theta. \qquad (3.1)$$

Размерность производительности зависит от размерности продукции и времени. Для технологических машин характерна штучная продукция; время может оцениваться в минутах, часах и т.д. Отсюда – размерности:

Q, шт./мин, шт./ч, шт./смена, шт./мес., шт./год.

Вместо двух последних часто употребляют выражения "месячный выпуск", "годовой выпуск".

Разумеется, выпущенная продукция должна соотноситься не с абсолютным календарным временем, а лишь с плановым фондом, когда машина должна работать.

Рассмотрим показатели производительности.

Номинальная производительность – это производительность машины при ее бесперебойной работе и отсутствии брака.

Для машин *дискретного* (иначе *"циклического"*) действия характерно чередование несовмещенных рабочих и холостых ходов цикла T:

$$T = t_{\text{р}} + t_{\text{х}}, \qquad (3.2)$$

где $t_{\text{р}}$ – время рабочих ходов как время технологического воздействия (обработка, контроль, сборка и т.д.);

$t_{\text{х}}$ – время холостых ходов, не совмещенных с рабочими ходами.

Отметим первое концептуальное положение теории производительности. *Так как технологическая машина создается именно для технологического воздействия, любое время функционирования, когда технологический процесс прерывается, является бесполезно затраченным, потерянным для основного функционального назначения.* Поэтому несовме-

щекные с обработкой холостые ходы, сколь бы необходимыми они ни были (зажим, разжим и т.п.), по существу, есть цикловые потери времени.

Если машина дискретного действия за время цикла T, мин, выдает p шт. изделий, номинальная производительность есть *цикловая производительность*, шт./мин:

$$Q_{\text{ц}} = \frac{p}{T} = \frac{p}{t_{\text{р}} + t_{\text{х}}}. \qquad (3.3)$$

В простейшем случае, когда за цикл выпускается одно изделие,

$$Q_{\text{ц}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{\text{р}} + t_{\text{х}}}. \qquad (3.3\text{а})$$

Реплика. Математические зависимости, предлагаемые студентам, могут быть обоснованы и доведены до их понимания либо математическим путем, либо иллюстративно. Формулы (3.3) и (3.3а) можно строго вывести (для примера это будет сделано ниже), но проще обосновать их иллюстративно, арифметически. Так, если цикл равен 0,5 мин и за это время выдается одно изделие, то за 1 мин машина, разумеется, выдаст 2 шт.

$$Q_{\text{ц}} = \frac{1}{0{,}5} = 2 \text{ шт./мин}.$$

Для студента это наглядно и убедительно; он и не заметит отсутствия строгого доказательства.

В машинах непрерывного действия холостые ходы либо отсутствуют, либо полностью совмещены с рабочими (круглошлифовальные станки, работающие напроход: прокатные и волочильные станы, тоннельные термические агрегаты, бумагоделательные машины и т.д.).

Если считать $t_{\text{р}}$ за интервал выдачи одного изделия, то при $t_{\text{х}} = 0$

$$Q_{\text{ц}} = \frac{1}{t_{\text{р}}} = K, \qquad (3.4)$$

где K – технологическая производительность как производительность машины непрерывного действия, работающей без остановов, ее технологический потенциал. Однако K – это характеристика и машин дискретного действия. Для машин дискретного действия

$$Q_{\text{ц}} = \frac{1}{t_{\text{р}} + t_{\text{х}}} \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{р}}} = \frac{1}{t_{\text{р}}} \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{р}} + t_{\text{х}}} = K\eta, \qquad (3.5)$$

где $\eta = \frac{t_р}{t_р + t_х}$ – коэффициент производительности, численно равный доле рабочих ходов в длительности цикла.

Концептуально, без всякой математики, можно утверждать, что полезная отдача машины (а это Q) зависит прежде всего от прогрессивности технологического процесса, положенного в основу машины (K), и совершенства ее конструкции (η). Формула (3.5) позволяет количественно оценить оба фактора просто и наглядно. Так, если K = 2 шт./мин и η = 0,5, то в идеальном случае (когда η = 1), при полном использовании возможностей технологии, машина выдавала бы K = 2 шт./мин, но конструкция такова, что эти возможности используются лишь наполовину, значит Q = 2·0,5 = 1 шт./мин. И если машина оказалась малопроизводительной, то в этом виноваты либо непрогрессивная технология, либо несовершенная конструкция, либо и то и другое.

Отсюда – еще одно концептуальное положение теории производительности: *идеальной считается машина непрерывного действия с полным использованием возможностей технологии; всякая дискретная машина есть частное вынужденное решение, и следует искать пути всемерного сокращения холостых ходов и приближения к непрерывности действия.*

Важнейшим движущим фактором совершенствования любых машин является прогресс технологии, достигаемый интенсификацией режимов, дифференциацией и концентрацией операций, применением новых высокоинтенсивных методов и процессов. Все это сокращает $t_р$ и повышает K, рост K есть мера прогресса технологии. Но как это отражается на производительности машин? Ведь, например, применение скоростного резания никак не связано напрямую с временем установки и закрепления заготовок, подвода и отвода суппортов, т.е. $t_х$ = const. Аналогично применение высокоинтенсивных испарителей при вакуумном нанесении тонких пленок никак не влияет на длительность откачки технологической камеры.

Если преобразовать формулу (3.3.а) к виду

$$Q_ц = \frac{1}{t_р + t_х} = \frac{1}{(1/K) + t_х}$$

и построить график $Q_ц = f(K)$ при $t_х$ = const (рис. 3.1), то можно понять, что зависимость эта асимптотическая т.е. рост производительности машин при неизменности конструкций непропорционален прогрессу технологии.

Отсюда вытекает следующее концептуальное положение теории производительности. *Каждый раз, когда прогресс технологии уже не может обеспечить значительный рост производительности, на смену существующей машине приходит новая, более совершенной конструкции, с меньшими холостыми ходами. Это дает новый толчок развитию технологии, что будет продолжаться до тех пор, пока и новая машина не исчерпает себя.*

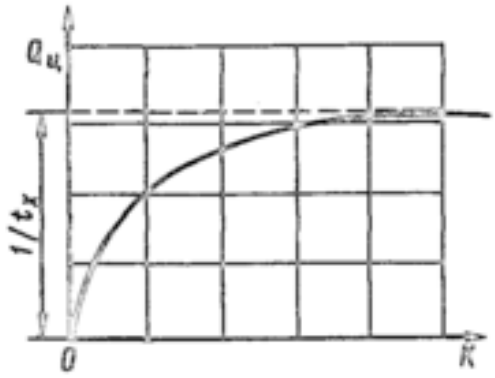


Рис. 3.1. Зависимость цикловой производительности от технологической производительности машины при неизменных холостых ходах

Таким образом, развитие технологических машин есть сочетание непрерывного прогресса технологии с периодическими революционными преобразованиями конструкции.

Приведем примеры. Высокоскоростное резание стало эффективным лишь с появлением быстрозажимных патронов, механизмов быстрого подвода и отвода суппорта и т.д. Ускорение поездов метро эффективно при новых конструкциях вагонов, с более широкими дверями.

Фактическая производительность. Ни одна машина не может функционировать бесперебойно. Рассмотрим типовую диаграмму функционирования, например в течение одной рабочей смены $\Theta_{см}$ (рис. 3.2).

Если бы машина всю смену работала без останова, то зависимость выпущенной продукции от проработанного времени при неизменности рабочего цикла T выражалась бы прямой линией. К концу смены при полностью использованном для работы времени $\Theta_{см} = \Theta_р$ было бы получено z_T шт. продукции; производительность по общему определению

$$Q = \frac{z_T}{\Theta_{см}} = \frac{z_T}{\Theta_р}.$$

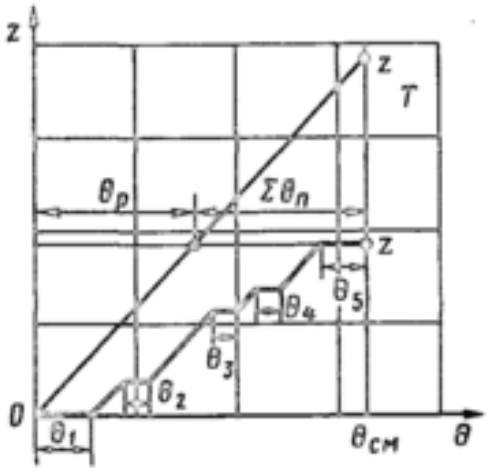


Рис. 3.2. Диаграмма времени работы и простоев при эксплуатации машин

Ясно, что $\Theta_р = z_T T$, при $T = 2$ мин за смену произведено $z_T = 240$ шт., тогда $\Theta_р = 2 \cdot 240 = 480$ мин. Отсюда

$$Q = \frac{z_T}{z_T T} = \frac{1}{T} = Q_ц .$$

Это и есть вывод $Q_ц$, о котором было сказано выше.

Но реально за смену будет произведено не z_T, а гораздо меньше продукции, так как наряду с интервалами бесперебойной работы у машин были простои Θ_i. Последние могли произойти из-за неполадок в самой машине, смены и регулировки инструмента, отсутствия обрабатываемых изделий и т.д. Кроме того, существуют и регламентированные простои в начале смены (разогрев, выведение на режим и т.д.) и ее конце (уборка и очистка), часто это время называют подготовительно-заключительным.

Итак, плановый фонд времени работы Θ включает в себя две категории временны́х затрат: интервалы бесперебойной работы и время простоев $\sum \Theta_п$, т.е.

$$\Theta = \Theta_р + \sum \Theta_п .$$

Фактическая производительность

$$Q = \frac{z}{\Theta} = \frac{z}{\Theta_р + \sum \Theta_п} = \frac{z}{\Theta_р + \sum \Theta_п} \frac{\Theta_р}{\Theta_р} = \frac{z}{\Theta_р} \frac{\Theta_р}{\Theta_р + \sum \Theta_п} = Q_ц \eta_{ис} . \qquad (3.6)$$

Здесь $\eta_{ис} = \dfrac{\Theta_р}{\Theta_р + \sum \Theta_п}$ – коэффициент использования, численно равный доле планового фонда времени Θ, когда машина работает и выдает продукцию. Так, $\eta_{ис} = 0{,}8$ означает, что за произвольный период машина 80 % времени работала, а 20 % простаивала. С учетом формулы (3.5)

$$Q = Q_ц \eta_{ис} = K \eta \eta_{ис} . \qquad (3.7)$$

Продолжая интерпретацию критериев оценки, можно сказать, что производительность машины зависит от прогрессивности технологии, конструктивного совершенства и использования этих возможностей во времени.

Формулы (3.6) и (3.7) дают оценку по всей выпущенной продукции (или в допущении, что вся она годная). В реальных условиях, которые отражаются диаграммой на рис. 3.2, разделить выпущенную продукцию

сразу на годную и бракованную не всегда удается, обычно это делается позже. Для того чтобы перейти к оценке по годной продукции, необходимо ввести коэффициент выхода годных $\eta_г$, численно показывающий, какая часть выпущенной продукции отвечает технологическим требованиям.

Тогда фактическая производительность

$$Q = Q_ц \eta_{ис} \eta_г . \qquad (3.8)$$

В отличие от интервалов времени рабочего цикла, которые имеют стабильные значения, периоды безотказной работы и простоев случайны по своей природе; все численные показатели, включая коэффициент использования $\eta_{ис}$ и фактическую производительность Q, являются случайными величинами и должны оцениваться по численным значениям как математические ожидания, их достоверность зависит от объема информации. В качестве примера на рис. 3.3 приведена диаграмма значений коэффициента использования автоматической линии по результатам наблюдений в течение N рабочих смен, продолжительность которых одинакова: $\Theta_{см} = 480$ мин. В первую рабочую смену (N = 1) автоматическая линия фактически проработала $\Theta_р = 450$ мин, имела лишь $\sum \Theta_п = 30$ мин простоев. Коэффициент использования по итогам одной смены наблюдения

$$\eta_{ис1} = \frac{\Theta_{р1}}{\Theta_{см}} = \frac{450}{480} = 0{,}94.$$

Однако это значение есть лишь одна реализация случайной величины. Уже во вторую смену из-за крупной поломки линия проработала только $\Theta_р$ = 50 мин, коэффициент использования по итогам двух смен наблюдения (N = 2) составил

$$\eta_{ис2} = \frac{\Theta_{р1} + \Theta_{р2}}{2\Theta_{см}} = \frac{450 + 50}{960} = 0{,}52.$$

Третья смена оказалась относительно благополучной: коэффициент использования по итогам трех смен составил $\eta_{ис3} = 0{,}72$.

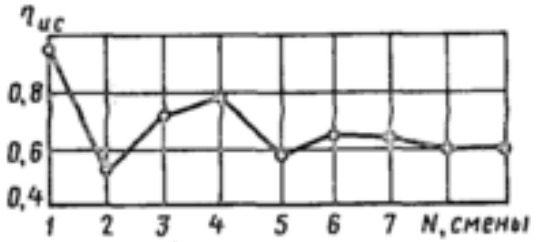


Рис. 3.3. Значения коэффициента использования нарастающим итогом по сменам наблюдения N

При увеличении объема информации численное значение коэффициента использования стабилизируется. Таким образом, оценка показателей производительности, учитывающих простои оборудования, требует значительных по объему эксплуатационных наблюдений с последующей обработкой полученных данных статистическими методами.

Виды простоев. Простои можно разделить на:

1) *собственные* $\sum\Theta_{с}$, обусловленные "внутренними" причинами (конструкцией механизмов и инструментов, их надежностью в работе, режимами эксплуатации: смена и регулировка инструмента, обнаружение и устранение отказов в работе, уборка и очистка и т.п);

2) *организационно-технические* $\sum\Theta_{от}$, зависящие от внешних причин (отсутствия обрабатываемых изделий, инструмента, электроэнергии; несвоевременного прихода и ухода рабочих и т.п.);

3) для переналадки $\sum\Theta_{пер}$. Частота их обусловлена организационными факторами, а длительности единичных простоев – техническими (заменой технологической оснастки, инструмента, управляющих программ; обработкой пробных изделий с корректировкой программ работы и инструментального оснащения и т.п.).

Итак, суммарная длительность простоев

$$\sum\Theta_{п} = \sum\Theta_{с} + \sum\Theta_{от} + \sum\Theta_{пер}. \qquad (3.9)$$

Если машина работает без переналадок или они занимают мало времени в общем фонде ($\sum\Theta_{пер} \approx 0$),

$$\sum\Theta_{п} = \sum\Theta_{с} + \sum\Theta_{от}.$$

Если в формуле для $\eta_{ис}$ умножить числитель и знаменатель на одну и ту же величину, можно получить

$$\eta_{ис} = \frac{\Theta_{р}}{\Theta_{р} + \sum\Theta_{п}} \frac{\Theta_{р} + \sum\Theta_{с}}{\Theta_{р} + \sum\Theta_{с}} = \frac{\Theta_{р}}{\Theta_{р} + \sum\Theta_{с}} \frac{\Theta_{р} + \sum\Theta_{с}}{\Theta_{р} + \sum\Theta_{п}} = \eta_{тех}\eta_{загр}. \qquad (3.10)$$

Здесь

$$\eta_{тех} = \frac{\Theta_{р}}{\Theta_{р} + \sum\Theta_{с}} - \qquad (3.11)$$

коэффициент технического использования, численно показывающий, какую долю времени машина при полном обеспечении всем необходи-

мым ($\sum\Theta_{от} = 0$) действительно работает и выдает продукцию; это характеристика собственной работоспособности машины;

$$\eta_{загр} = \frac{\Theta_р + \sum\Theta_с}{\Theta_р + \sum\Theta_п} = \frac{\Theta - \sum\Theta_{от}}{\Theta} = 1 - \frac{\sum\Theta_{от}}{\Theta} - \qquad (3.12)$$

коэффициент загрузки, численно показывающий, какую часть планового фонда времени машина обеспечена всем необходимым для функционирования.

Введение частных безразмерных коэффициентов позволяет более полно и дифференцированно оценивать влияние различных факторов на производительность машины.

Так, значение $\eta_{ис} = 0{,}45$ говорит лишь о том, что машина использует свои производственные возможности только на 45 %. Если выразить $\eta_{ис}$ через $\eta_{тех} = 0{,}90$ и условиться, что $\eta_{загр} = 0{,}5$, становится понятно, что машина не имеет требуемых условий для работы, а ее надежность высокая. Бывает и наоборот.

Следовательно, можно сказать, что производительность машин зависит от:

- прогрессивности технологии;
- конструктивного совершенства;
- надежности функционирования;
- выхода годной продукции;
- условий функционирования и обеспечения всем необходимым для работы.

Тогда с учетом (3.7) – (3.12) получим

$$Q = K\eta\eta_{тех}\eta_г\eta_{загр}. \qquad (3.13)$$

Каждый фактор имеет оценку численно и наглядно. Для машин, работающих с переналадками, необходимо ввести еще один коэффициент, учитывающий удельный вес времени работы без переналадок в общем фонде времени. Однако можно просто оценивать производительность для каждого вида изделий.

Внецикловые потери времени. Оценка влияния простоев машин на их производительность через безразмерные коэффициенты $\eta_{ис}$, $\eta_{тех}$, $\eta_{загр}$ наглядна и проста при анализе работы действующего оборудования. Однако она неудобна при расчетах ожидаемой производительности в процессе сравнительного анализа. Поясним это примером.

Рассматривается *автоматическая линия* (рис. 3.4) *из четырех станков с единым циклом и различной надежностью*: коэффициенты технического использования равны соответственно η_1, η_2, η_3, η_4. Какова будет производительность линии? Забегая вперед, запишем формулу

$$Q = \frac{1}{T}\frac{1}{1+\frac{1-\eta_1}{\eta_1}+\frac{1-\eta_2}{\eta_2}+\frac{1-\eta_3}{\eta_3}+\frac{1-\eta_4}{\eta_4}}. \qquad (3.14)$$

Ей неудобно пользоваться при любом варьировании параметров.

Поэтому существует второй метод учета влияния простоев на производительность – через так называемые "внецикловые потери времени".

Внецикловые потери времени – это простои, приведенные к какому-то масштабу оценки, например отнесенные к одному выпущенному изделию. Тогда по определению

$$\sum t_{\text{п}} = \frac{\sum \Theta_{\text{п}}}{z}, \qquad (3.15)$$

где $\sum t_{\text{п}}$ – внецикловые потери времени, мин/шт.;

$\sum \Theta_{\text{п}}$ – суммарные простои за некоторый период времени функционирования машины;

z – число изделий, выпущенных за тот же период.

Внецикловые потери, как и коэффициент использования, являются случайной величиной, их достоверные значения должны оцениваться достаточно продолжительными производственными наблюдениями. Определим взаимосвязь внецикловых потерь времени с другими параметрами производительности, для чего обратимся к формуле (3.6):

$$\eta_{\text{ис}} = \frac{\Theta_{\text{р}}}{\Theta_{\text{р}}+\sum\Theta_{\text{п}}} = \frac{1}{1+\frac{\sum\Theta_{\text{п}}}{\Theta_{\text{р}}}} = \frac{1}{1+\frac{\sum\Theta_{\text{п}}}{zT}} = \frac{1}{1+\frac{\sum t_{\text{п}}}{T}}. \qquad (3.16)$$

Соответственно фактическая производительность

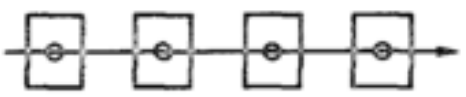


Рис. 3.4. Структурная схема автоматической линии из четырех машин

$$Q = \frac{1}{T}\eta_{\text{ис}} = \frac{1}{T}\frac{1}{1+\frac{\sum t_{\text{п}}}{T}} = \frac{1}{T+\sum t_{\text{п}}} =$$

$$= \frac{1}{t_{\text{р}}+t_{\text{х}}+\sum t_{\text{п}}}. \qquad (3.17)$$

Показатели T = 1 мин/шт.; $\sum t_{\text{п}}$ = 0,5 мин/шт, должны трактоваться следующим образом: на изготовление одного конкретного изделия машиной регулярно затрачивается по одной минуте, а из-за простоев в среднем "набегает" еще полминуты. Поэтому внецикловые потери времени можно интерпретировать как среднее "условное" удлинение каждого рабочего цикла из-за простоев машины.

Достоинство параметра внецикловых потерь в том, что они имеют ту же размерность, что и регулярные затраты времени на рабочие и холостые ходы цикла.

Суммарные внецикловые потери времени в соответствии с видами простоев складываются из собственных потерь $\sum t_{\text{с}}$, организационно-технических $\sum t_{\text{от}}$ и потерь на переналадку $\sum t_{\text{пер}}$:

$$\sum t_{\text{п}} = \frac{\sum \Theta_{\text{п}}}{z} = \frac{\sum \Theta_{\text{с}} + \sum \Theta_{\text{от}} + \sum \Theta_{\text{пер}}}{z} = \sum t_{\text{с}} + \sum t_{\text{от}} + \sum t_{\text{пер}}. \quad (3.18)$$

Техническая производительность машины (при $\sum t_{\text{от}} = 0$), работающей без переналадок,

$$Q_{\text{т}} = \frac{1}{T + \sum t_{\text{с}}} = \frac{1}{t_{\text{р}} + t_{\text{х}} + \sum t_{\text{с}}}. \quad (3.19)$$

Еще одно достоинство параметра внецикловых потерь – в простоте "увязки" с другими параметрами и между собой. Производительность автоматической линии с жесткой межагрегатной связью (см. рис. 3.4) выражается формулой

$$Q = \frac{1}{T + \sum t_{\text{с1}} + \sum t_{\text{с2}} + \sum t_{\text{с3}} + \sum t_{\text{с4}}},$$

что гораздо удобнее в сравнении с формулой (3.14).

Если все машины имеют одинаковую надежность, то

$$Q = \frac{1}{T + \sum t_{\text{с1}} q},$$

где q – число сблокированных машин.

Параметр внецикловых потерь удобен и при оценке производительности машин, работающих с переналадками. Очевидно, что

$$\sum t_{\text{пер}} = \frac{\Theta_{\text{пер}}}{z_{\text{пер}}},$$

где $\Theta_{\text{пер}}$ – среднее время единичной переналадки машины на производство иной продукции; $z_{\text{пер}}$ – число изделий между двумя переналадками.

Техническая производительность машины, работающей с переналадками

$$Q_{\text{т}} = \frac{1}{T + \sum t_{\text{с}} + \dfrac{\sum \Theta_{\text{пер}}}{z_{\text{пер}}}}. \qquad (3.20)$$

Собственные внецикловые потери раскрываются функционально в зависимости от показателей надежности, структурных и конструктивных характеристик машин. В этом отличительная особенность анализа и синтеза машин инструментом теории производительности.

Качественные характеристики выпускаемой продукции в формулах для расчета производительности могут учитываться по-разному. По первому методу исходят из того, что время, затраченное на производство бракованной продукции, $\sum \Theta_{\text{бр}}$ есть, по существу, простой оборудования, так как оно работало без полезной отдачи. Поэтому простои по браку добавляют к реальным простоям, а следовательно, к перечисленным видам внецикловых потерь добавляются потери по браку:

$$Q = \frac{p}{T + \sum t_{\text{с}} + \sum t_{\text{от}} + \sum t_{\text{пер}} + \sum t_{\text{бр}}}. \qquad (3.21)$$

Неудобство метода заключается в соединении явных простоев с "неявными", что затрудняет эксплуатационные исследования. Простои по техническим и организационным причинам измеряются непосредственно в процессе работы оборудования. Бракованная продукция отбирается, как правило, позднее, простои по браку, таким образом, не измеряются, а рассчитываются, например по формулам

$$\sum \Theta_{\text{бр}} = z_{\text{бр}} T;$$

$$\sum t_{\text{бр}} = \frac{\sum \Theta_{\text{бр}}}{z} = \frac{z_{\text{бр}}}{z} T = T(1 - \eta_{\text{г}}),$$

где $z_{бр}$ – число бракованных изделий за время $\sum \Theta_{бр}$;

T – длительность рабочего цикла;

$\eta_г$ – коэффициент выхода годной продукции, численно равный доле годной продукции во всем количестве выпущенных изделий.

Этот показатель имеется в отчетных документах технического контроля.

Подставив в (3.21) $\sum t_{бр}$, получим

$$Q = \frac{p}{T + \sum t_с + \sum t_{от} + \sum t_{пер} + T(1-\eta_г)}. \qquad (3.22)$$

Второй метод – напрямую учитывать в формулах производительности коэффициент выхода годных $\eta_г$, относя коэффициенты использования и внецикловые потери только к явным простоям и количеству номинально выпущенной продукции.

Уравнения производительности, в которых используются и безразмерные коэффициенты, и внецикловые потери, наиболее удобны для использования по следующим соображениям. Собственные простои и простои для переналадки являются функцией многих конструктивных, структурных и других параметров, что требует их расшифровки для конкретных видов оборудования, поэтому употребление единой величины $\eta_{тех}$ нецелесообразно, используются показатели внецикловых потерь с их дальнейшей дифференциацией. Что же касается организационных простоев и качественных характеристик, то выразить их в виде конкретных функций, как правило, не удается, поэтому лучше учитывать их влияние через безразмерные коэффициенты. Отсюда формула производительности принимает вид

$$Q = \frac{p}{t_р + t_х + \sum t_с + \sum t_{пер}} \eta_{загр} \eta_г. \qquad (3.23)$$

3.2. ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО И СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В массовом производстве технологическое оборудование, работая без переналадок, выпускает одну и ту же продукцию. Время рабочих и холостых ходов $t_р$ и $t_х$ однозначно, величина собственных внецикловых

потерь $\sum t_c$ определяется с учетом всех компонентов и их взаимодействия двумя относительно стабильными факторами: суммарной интенсивностью отказов механизмов, инструментов, оснастки и средней длительностью восстановления работоспособности.

Поэтому производительность в соответствии с (3.23) определяется простейшими формулами:

$$\left.\begin{aligned} Q &= Q_ц \eta_{нс} \eta_г = \frac{p}{t_р + t_х + \sum t_c} \eta_г \eta_{загр}; \\ Q_т &= Q_ц \eta_{тех} \eta_г = \frac{p}{t_р + t_х + \sum t_c} \eta_г. \end{aligned}\right\} \qquad (3.23а)$$

Значительно сложнее вывести формулы производительности для автоматического оборудования, работающего в условиях серийного производства, например для станков – полуавтоматов и автоматов с ЧПУ. Трудность здесь заключается не только в необходимости учета потерь на переналадку, но и в неопределенности численных значений рабочих и холостых ходов, которые для каждого типоразмера обрабатываемых деталей имеют свои значения. Кроме того, при обработке каждой конкретной детали время рабочих и холостых ходов цикла складывается из многих составляющих, число которых определяется многооперационным технологическим процессом.

В этом случае возможны следующие подходы к расчету и оценке производительности:

1) по типовой детали – представителю;

2) по интегральным характеристикам комплекта изделий, закрепленных за данным оборудованием;

3) по комплексу показателей производительности при обработке типовых изделий.

Рассмотрим эти подходы.

1. Из числа деталей, закрепленных за данным оборудованием, или тех, которые могут здесь обрабатываться, выделяется одна, которая принимается за типовой представитель. В формулах учитываются характеристики оборудования при обработке данной конкретной детали, т.е. задача, по существу, сводится к выводу формул и расчету при массовом производстве. Дополнительно следует лишь учесть потери на переналадку через характеристики среднего времени переналадки $\Theta_{пер}$ и среднего размера партии обработки между двумя переналадками z:

$$Q = \frac{1}{t_p + t_x + \sum t_c + \frac{\Theta_{пер}}{z}} \eta_{загр} \eta_r .$$

Недостаток метода заключается в трудности достоверного подбора типового представителя, так как выбранная деталь может иметь средние характеристики по длительности обработки, но далеко не средние по холостым ходам или времени переналадки. Кроме того, такой расчет не содержит ни одного параметра станка, технологического процесса и пр. Между тем, очевидно, что производительность станков с ЧПУ определяется:

– характером комплекта обрабатываемых деталей и технологических процессов их обработки;

– техническими характеристиками оборудования;

– условиями эксплуатации в данном конкретном производстве.

Эти факторы должны найти отражение в формулах для оценки производительности.

2. Допустим, на станке с ЧПУ обрабатывается n типоразмеров деталей, каждая из которых имеет неповторяющееся сочетание характеристик:

– числа переходов, при обработке S_i;

– числа обрабатывающих инструментов A;

– длительности отдельных переходов t_{pi};

– величины партии обработки z_i и т.д.

Рассмотрим интегральные характеристики времени обработки комплекта деталей, закрепленных за станком.

а. Время рабочих ходов цикла

$$t_p = t_{p1} S,$$

где t_{p1} – среднее время единичного перехода при обработке;

S – среднее число переходов при обработке одной детали.

Разумеется,

$$t_{p1} = \frac{\sum_1^n \sum_1^{S_i} t_{pi} z_i}{\sum_1^n S_i z_i},$$

где числитель – суммарное время обработки для всех деталей комплекта (с учетом партионности), знаменатель – число переходов при этом.

Аналогично

$$S = \frac{\sum_{1}^{n} S_i z_i}{\sum_{1}^{n} z_i},$$

где числитель – число переходов при обработке всего комплекта, знаменатель – число изделий в комплекте (с учетом партионности).

б. **Время холостых ходов цикла** складывается из трех основных компонентов: замены координаты обработки (быстрый отвод инструмента, координатное перемещение стола, быстрый подвод инструмента); замены инструмента в рабочем шпинделе (с использованием инструментального магазина); загрузки-съема изделий,

$$t_x = t_{x_1} S + t_{x_2} A + t_{x_3},$$

где t_{x_1} – среднее время единичной замены координаты;

S – среднее число переходов при обработке одной детали, т.е. среднее число замен координат в одном рабочем цикле;

t_{x_2} – среднее время замены инструмента в шпинделе;

A – среднее число инструментов при обработке одной детали;

t_{x_3} – среднее время загрузки-съема.

Величины t_{x_1}, t_{x_2}, t_{x_3} являются среднестатистическими, как и t_{pi} или S.

в. **Собственные внецикловые потери** – по оборудованию, инструменту (аварийная замена и регулировка) и техническому обслуживанию могут быть выражены как простои, отнесенные к единице выпущенной продукции ($\sum t_c$). Для многооперационных станков с ЧПУ, где длительность рабочего цикла при обработке некоторых корпусных деталей достигает нескольких часов, более перспективна оценка внецикловых потерь как простоев, приходящихся не на единицу продукции ($\sum t_п$), а на единицу отработанного времени ($\sum B$). Например, $\sum B = 0{,}05$ (5 %) означает, что на каждые 100 мин отработанного времени приходилось в среднем 5 мин собственных простоев. Взаимосвязь между двумя видами исчисления потерь простейшая: $\sum t_c = \sum B_c T$.

По тем же причинам (значительная длительность рабочего цикла *T*) целесообразно рассчитывать не минутную, а сменную производительность, умножая числитель во всех формулах на длительность сменного фонда времени в минутах $\Theta_{см}$ (например, $\Theta_{см} = 480$ мин). Цифры получаются более осязаемые.

Выражая потери через характеристики безотказности и ремонтопригодности, получаем

$$\sum B_c = \omega\tau_в ,$$

где ω – параметр потока отказов как обратная величина среднего времени безотказной работы, выраженной в абсолютном времени; $\tau_в$ – среднее время восстановления.

г. Внецикловые организационные потери могут быть выражены через $\eta_{загр}$; функционально связать их с какими-либо характеристиками производства, как правило, не удается, численные значения организационных потерь характеризуют условия данного производства в целом.

д. Внецикловые потери по переналадке целесообразнее исчислять по отношению к единице выпущенной продукции (общее время переналадки станка на обработку конкретной партии делится на величину этой партии):

$$\sum t_{пер} = \frac{\Theta_{пер}}{z} = \frac{\Theta_1 + \Theta_2 S}{z} ,$$

где $\Theta_{пер}$ – среднее время переналадки станка на обработку различных деталей комплекта, закрепленного за станком, мин;

z – средний размер партии обработки, шт.;

Θ_1 – составляющая среднего времени переналадки, не зависящая от числа переходов при обработке (замена и выверка приспособлений, замена программоносителей и т.д.);

Θ_2 – составляющая среднего времени переналадки, пропорциональная числу переходов при обработке (замена комплекта инструмента, обработка пробных деталей с измерением размеров и корректировкой инструментов или программ обработки и т.д.).

Подставив значения длительности цикла и внецикловых потерь в общую формулу для расчета производительности многооперационного оборудования в условиях серийного производства, получим:

$$Q = \frac{\Theta_{см}\eta_{загр}}{t_{p_i} S + t_{x_1} S + t_{x_2} A + t_{x_3} + \sum t_c + \dfrac{\Theta_1 + \Theta_2 S}{z}} , \qquad (3.24)$$

где $\Theta_{см}$ – фонд времени работы в смену.

Таким образом, здесь сменная производительность оборудования с ЧПУ в условиях серийного производства выражена как функциональная зависимость: 1) характеристик комплекта обрабатываемых деталей и технологических процессов – средней длительности единичного перехода t_{p_1}, среднего числа переходов S и обрабатывающих инструментов A при обработке детали; 2) характеристик самого технологического оборудования и его оснастки – быстроты выполнения вспомогательных ходов t_{x_1} и t_{x_2}, быстроты процессов загрузки и съема t_{x_3}, надежности в работе ω и $\tau_в$, гибкости при переналадках Θ_1 и Θ_2; 3) характеристик того конкретного производства, где эксплуатируется данное оборудование, – организационных потерь $\eta_{загр}$ и партионности обработки z.

Рассмотрение всех составляющих формулы (3.24) и способов их подсчета показывает, однако, что данный подход к расчету средней производительности при всей его ортодоксальной правильности весьма сложен и обезличен (вспомним крылатое выражение "средняя температура больных в больнице"). Данный метод применим скорее для функционального анализа (см. разд. 3.3), нежели для практических оценок.

3. Делается выборка из общей номенклатуры изделий (1, 2, 3, …, n), подсчитываются по простейшей формуле (3.23а) численные значения Q_1, Q_2, Q_3, …, Q_n.

Эта совокупность – тоже интегральная характеристика производительности данного оборудования. Зная для каждого изделия величины Q_i и S_i (как наиболее информативной характеристики объекта обработки), можно построить, например, корреляционные диаграммы $Q_i = f(S_i)$ (производительность от числа переходов) и пользоваться ими в прикладных расчетах, оценивая для каждого нового изделия ориентировочную производительность или укрупненное суммарное время получения изделия $(t_p + t_x)\left(1 + \sum B\right)$.

3.3. ЗАВИСИМОСТЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Как было сказано в разд. 3.1, все расчеты, связанные с показателями производительности, равно как и экономической эффективности, надежности в работе и т.д., имеют функциональную или прикладную направленность.

И для фундаментально-теоретических, и для проектных расчетов необходимо знать зависимость показателей производительности машин от конкретных характеристик технологии и конструкции. Общий подход был рассмотрен в разд. 1.7. Следует отметить, что для каждого вида оборудования получаются свои, специфические уравнения производительности. Проиллюстрируем это примерами.

Пример 1. Установление функциональных взаимосвязей для роторных машин параллельного действия (более подробно см. в гл. 5).

Как показано на рис. 3.5, *а*, роторный автомат включает в себя три непрерывно вращающихся ротора: два транспортных и один рабочий (технологический), который имеет p позиций с одинаковыми инструментальными блоками. В процессе совместного транспортного перемещения в зоне угла α° инструментальные блоки выполняют перемещения, задаваемые профилем неподвижных копиров.

Тем самым проводится обработка, например давлением.

Рабочий цикл T роторной машины соответствует одному обороту ротора, в течение которого выдается p изделий (равное числу позиций и инструментальных блоков). Угол α°, как правило, является конструктивно заданным при проектировании автомата; различная длительность рабочих ходов $t_р$ согласно технологическому процессу достигается настройкой привода вращения ротора. Из условия равномерности вращения ротора

$$\frac{T}{t_р} = \frac{360^\circ}{\alpha^\circ};\ T = t_р \frac{360^\circ}{\alpha^\circ}.$$

Собственные внецикловые потери складываются из внецикловых потерь рабочего и транспортных роторов:

$$\sum t_с = p(t_{ин} + t_{об}) + t_{тр},$$

где $t_{ин}$ – потери, вызванные заменой и регулировкой инструментов одного инструментального блока;

$t_{об}$ – потери из-за обнаружения и устранения отказов механизмов инструментального блока (зажимное устройство, выталкиватель, корпус и др.);

$t_{тр}$ – потери из-за транспортных роторов.

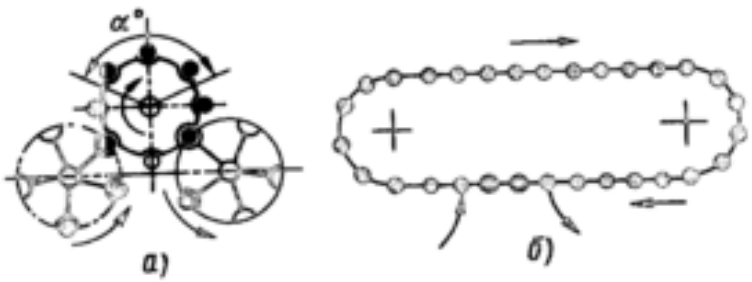


Рис. 3.5. Схемы роторной (а) и конвейерной (б) машин

Подставив значения T и $\sum t_c$ в выражение (3.23а), получим формулу для расчета производительности роторной машины:

$$Q_p = \frac{p}{t_p \frac{360^\circ}{\alpha^\circ} + p(t_{ин} + t_{об}) + t_{тр}} \eta_{загр}\eta_г$$

или, переходя к показателям надежности ω и $\tau_в$ при $\eta_г = 1{,}0$ и $\eta_{загр} = 1{,}0$,

$$Q_p = \frac{p}{t_p \frac{360^\circ}{\alpha^\circ} + p\left(\frac{\tau_{в_1}}{N} + \omega_1\tau_{в_2}\right) + \omega\tau_{в_3}},$$

где $\tau_{в_1}$ – среднее время замены инструментального блока (обычно он заменяется полностью при любых неполадках инструмента или механизмов);

N – средняя стойкость инструмента, выраженная в числе обработанных изделий;

ω_1 – параметр потока отказов механизмов и устройств инструментального блока;

ω_2 – параметр потока отказов транспортных роторов;

$\tau_{в_3}$ – среднее время обнаружения и устранения отказов транспортных роторов.

Таким образом, производительность роторной машины выражается функционально через технологические t_p; конструктивные α и структурные характеристики, а также через параметры надежности конструктивных элементов (ω_1, N, $\tau_в$).

Зависимость производительности роторных машин параллельного действия от числа позиций имеет не пропорциональный, а асимптотический характер: с увеличением числа позиций она монотонно увеличивается, приближаясь к некоторому пределу, который определяется только надежностью механизмов и инструментов (рис. 3.6):

$$Q_{max} = \lim_{p\to\infty} Q_p = \frac{1}{\tau_в\left(\frac{1}{N} + \omega_1\right)}.$$

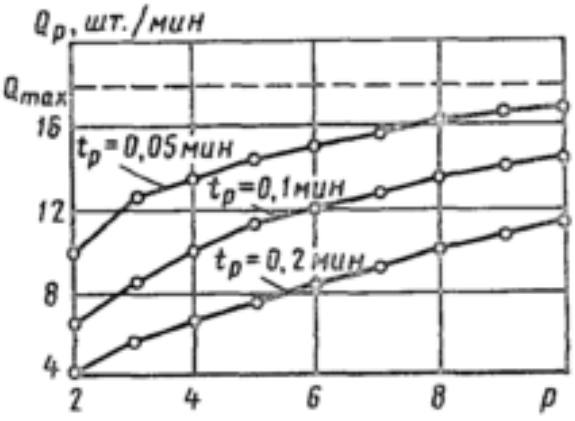


Рис. 3.6. Зависимость производительности роторных машин от числа позиций

Пример 2. *Установление функциональной зависимости для многооперационных станков с ЧПУ* (см. рис. 1.9) *в условиях серийного производства* с использованием числовых констант и переменных величин – числа технологических переходов S_i и величины партии обработки z.

Станок с ЧПУ для корпусных деталей имеет следующие характеристики быстродействия, надежности в работе и мобильности при переналадках: среднее время замены координаты $t_{x_1} = 0{,}25$ мин, среднее время замены инструмента в шпинделе $t_{x_2} = 0{,}15$ мин, собственные внецикловые потери $\sum B = 0{,}15$, среднюю длительность переналадки $\Theta_{пер} = 70 + 6S$.

В данных конкретных условиях обрабатывается комплект деталей с интегральными характеристиками: средним временем единичного перехода $t_{p_1} = 0{,}9$ мин, средним числом переходов при обработке одной детали $S = 18$; каждый переход выполняется, как правило, новым инструментом ($A = 18$), время съема-загрузки $t_{x_3} = 1{,}5$ мин. Условия производства характеризуются организационными потерями из-за случайных перебоев в снабжении инструментами, заготовками и пр. $\eta_{загр} = 0{,}76$, средней величиной партии обработки $z = 100$ шт.

Необходимо проанализировать, как отразятся на производительности изменение партионности z и переход к обработке других деталей при $\eta_г = 1{,}0$.

Подставив в формулу (3.24) все конкретные характеристики обрабатываемых деталей, станка и условий производства, получим (при $\Theta_{см} = 480$ мин)

$$Q = \frac{480 \cdot 0{,}76}{[0{,}9 \cdot 18 + 1{,}5 + 18(0{,}25 + 0{,}15)](1 + 0{,}15) + \dfrac{70 + 6 \cdot 13}{100}} = 12{,}2 \text{ шт./смена}$$

Для того чтобы исследовать зависимость производительности от партионности обработки z и числа переходов S, оставляем эти величины в общем виде, остальные – в численных значениях:

$$Q = \frac{480 \cdot 0{,}76}{(1{,}3S + 1{,}5)1{,}15 + \dfrac{70 + 6S}{z}}.$$

Графики зависимости, приведенные на рис. 3.7, показывают, что с уменьшением размера партий обрабатываемых деталей z производительность монотонно снижается, однако особенно резко этот фактор начинает сказываться лишь при $z < 20$ шт. Уменьшение станкоемкости обработки сказывается на повы-

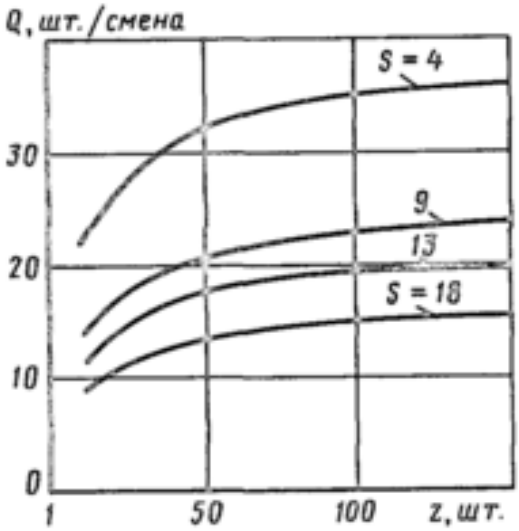


Рис. 3.7. Зависимость производительности многооперационного станка с ЧПУ от числа технологических переходов и партионности обработки

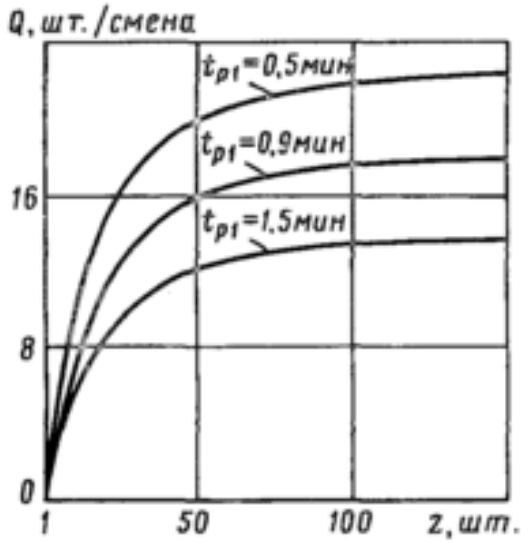


Рис. 3.8. Зависимость производительности многооперационного станка с ЧПУ от партионности обработки и средней длительности технологических переходов

шении производительности почти пропорционально. На рис. 3.8 приведены аналогичные графики для случая, когда меняется не число переходов, а их длительность t_{p_1}. Как видно, характер зависимостей не изменяется, но влияние величины t_{p_1} на производительность значительно меньше влияния z.

В ряде случаев при сопоставлении вариантов технических решений целесообразно использовать критерий не абсолютной производительности, а ее изменения, что было уже использовано при технико-экономических расчетах (см. гл. 2).

Рост производительности φ в результате организационно-технических мероприятий

$$\varphi = Q_2 / Q_1 ,$$

где φ – коэффициент роста производительности;

Q_1 – исходная производительность;

Q_2 – результирующая производительность.

Идея расчета в том, что Q_1 принимается за константу, а изменение факторов производительности выражается через безразмерные коэффициенты их изменения β_i:

$$\varphi = \frac{1}{\frac{t_p}{\beta_1} + \frac{t_x}{\beta_2} + \frac{\sum t_c}{\beta_3} + \frac{\sum t_{от}}{\beta_4}} \frac{1}{Q_1}. \qquad (3.25)$$

Удобство данного подхода – в дифференцированной оценке "вклада" по отдельным составляющим.

Пример 3. *Сопоставление производительности многооперационных станков с ЧПУ в условиях массового и серийного производства.*

В соответствии с (3.23) производительность при переналадках в условиях серийного производства

$$Q = \frac{p}{t_p + t_x + \sum t_c + \sum t_{от}}.$$

В массовом производстве простои по переналадке отсутствуют, остальные факторы не меняются ($\beta_i = 1{,}0$):

$$Q = \frac{1}{t_p + t_x + \sum t_c + \sum t_{от}}.$$

Считая массовое производство базовым вариантом, а любые варианты серийного производства – анализируемыми ($1 \le z \le \infty$), имеем

$$\varphi = \frac{Q_i}{Q_1} = \frac{1}{1 + \Theta_1 \dfrac{\Theta_1 + \Theta_2 S}{z}}.$$

Если примем за основу исходные условия примера 1 ($t_{p_1} = 0{,}9$ мин; $S = 18$ мин; $t_{x_3} = 1{,}5$ мин; $t_{x_1} + t_{x_2} = 0{,}4$ мин; $\sum B = 0{,}15$; $\sum t_{от} = 4{,}9$ мин), то получим $Q_1 = 18{,}2$ шт./смена. Подставив в формулу значения составляющих средней длительности переналадок ($\Theta_1 = 70$ мин, $\Theta_2 = 6$ мин), найдем графическую зависимость $\varphi = f(z)$, приведенную на рис. 3.9.

Как видно, при средней величине партии обработки $z = 100$ шт. производительность станков с ЧПУ составляет $\varphi = 0{,}94$ производительности их в условиях массового производства. Однако при размере партии $z = 10$ шт. относительная производительность $\varphi = 0{,}6$. Если требуется оценить, как зависит относительная производительность от других определяющих параметров, необходимо каждый раз пересчитывать значение Q_1.

На рис. 3.9 приведен график зависимости для малотрудоемких изделий ($S = 4$), который близко совпадает с кривой $S = 18$. Следовательно, относительная производительность станков с ЧПУ в условиях серийного и крупносерийного производства мало зависит от сложности обрабатываемых деталей.

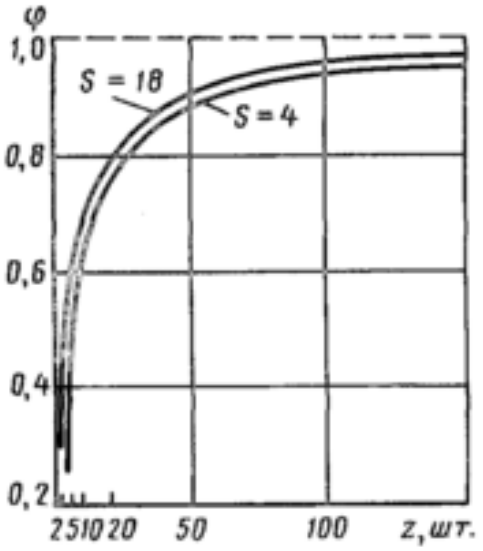


Рис. 3.9. Сравнение производительности станков с ЧПУ в условиях массового и серийного производства

Пример 4. *Определение характера функциональной зависимости производительности металлорежущих станков-автоматов от интенсификации скорости резания.*

Токарный многошпиндельный автомат при принятых режимах обработки v_0 имеет производительность $Q_1 = 1{,}41$ мин$^{-1}$, при этом элементы затрат времени, согласно эксплуатационным исследованиям, имеют следующие численные значения: время рабочих ходов цикла $t_р = 0{,}5$ мин, время холостых ходов цикла $t_х = 0{,}05$ мин, собственные внецикловые потери $\sum t_с = 0{,}08$ мин, из них потери по инструменту $\sum t_{ин} = 0{,}06$, потери по оборудованию $\sum t_{об} = 0{,}02$ мин, потери по организационным причинам $\sum t_{орг} = 0{,}08$ мин. Автомат работает в условиях массового производства ($\sum t_{пер} = 0$), ручная загрузка и съем изделий в загрузочной позиции полностью совмещены с операциями обработки.

Необходимо оценить возможности повышения производительности полуавтомата при интенсификации режимов обработки в x раз (новая скорость $v = v_0 x$) и найти режим x_{max}, обеспечивающий максимальный рост производительности автомата в данных, конкретных условиях.

В соответствии с формулой (3.25) при $\sum t_{пер} = 0$

$$\varphi = \frac{1}{\left(\frac{t_р}{\beta_1} + \frac{t_х}{\beta_2} + \frac{\sum t_{ин}}{\beta_3} + \frac{\sum t_{об}}{\beta_4} + \frac{\sum t_{орг}}{\beta_5}\right) Q_1} =$$

$$= \frac{1}{1{,}41\left(\frac{0{,}5}{\beta_1} + \frac{0{,}05}{\beta_2} + \frac{0{,}06}{\beta_3} + \frac{0{,}02}{\beta_4} + \frac{0{,}08}{\beta_5}\right)}.$$

Изменение режимов обработки не изменяет качества изделий, поэтому потерями по браку тоже пренебрегаем.

Определим значения β_i для всех элементов затрат времени при интенсификации режимов обработки в x раз.

Время рабочих ходов будет сокращено во столько раз, во сколько будут повышены режимы обработки ($\beta_1 = x$). Длительность холостых ходов, которые выполняются при ускоренном вращении распределительного вала (быстрый подвод и отвод суппортов, поворот и фиксация шпиндельного блока), от интенсификации режимов обработки не изменится ($\beta_i = 1{,}0$). Потери по инструменту резко возрастут из-за снижения стойкости инструмента; они увеличатся в x^{m-1} раз, где m – показатель степени функциональной зависимости скорость – стойкость. Для твердосплавного инструмента можно принять $m = 5$. Отсюда коэффициент изменения потерь по инструменту $\beta_i = 1/x^4$.

На величину потерь по оборудованию интенсификация режимов обработки практически не повлияет, так как эти потери определяются в основном механизмами холостых ходов, интенсивность работы которых в цикле не изменится ($\beta = 1{,}0$). Аналогично, без специальных на то мероприятий не могут измениться условия эксплуатации и организационные потери ($\beta = 1{,}0$).

Коэффициент повышения производительности

$$\varphi = \frac{1}{1{,}41\left(\frac{0{,}5}{x} + 0{,}15 + 0{,}06/x^4\right)}.$$

При исходных режимах обработки ($v = v_o$; $x = 1{,}0$) коэффициент $\varphi = 1{,}0$ (это проверка формулы на правильность); при интенсификации режимов обработки ($x > 1{,}0$) сокращается ее длительность t_p, но одновременно растут внецикловые потери по инструменту.

Пока выигрыш от сокращения рабочего цикла больше проигрыша от увеличения простоев для замены и регулировки инструментов, производительность растет ($\varphi > 1{,}0$), как это показано на рис. 3.10. Однако с увеличением скорости резания относительный выигрыш от длительности цикла непрерывно уменьшается, а проигрыш от простоев возрастает из-за резкого снижения стойкости инструмента. Таким образом, с увеличением скорости резания при прочих неизменных условиях производительность оборудования сначала повышается, а затем резко падает. Экстремальное значение скорости, соответствующее максимуму роста производительности φ_{max}, можно определить и аналитически, взяв производную функции $d\varphi/dx$ и приравняв ее нулю.

В результате получим

$$x_{max} = \sqrt{\frac{t_p}{t_{ин}(m-1)}} = \sqrt{\frac{0{,}5}{4 \cdot 0{,}06}} = 1{,}24.$$

Таким образом, чтобы достигнуть максимальной производительности, необходимо скорость резания увеличить на 24 %; при этом производительность полуавтомата, как это можно рассчитать по формуле (3.25), повышается в 1,1 раза.

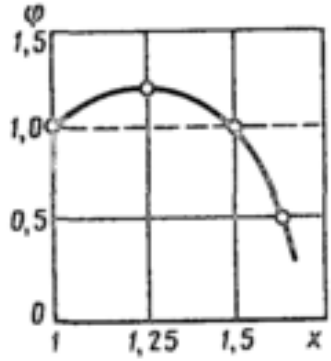


Рис. 3.10. Зависимость роста производительности токарного многошпиндельного автомата от интенсификации скоростей резания

Глава 4

НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

4.1. ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ В РАБОТЕ

Основные понятия. Важнейшей характеристикой работоспособности любого производственного оборудования является надежность в работе.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [1].

Для технологического оборудования такой заданной функцией является *выпуск годной продукции, отвечающей техническим условиям, в масштабах, обусловленных производственной программой*, в течение всего срока эксплуатации – от пуска до списания.

Любое оборудование может находиться в двух состояниях: работоспособном, когда оно функционирует (при условии обеспечения всем необходимым) и при этом выдает годную продукцию, и неработоспособном. Переход машины из работоспособного состояния в неработоспособное называется *отказом*. Состояние отказа соответствует случаям, когда машина не выдает или не может выдавать годную продукцию либо когда она получена, но не соответствует заданным техническим условиям, т.е. бракованная. Существуют *отказы элементов* (*или функционирования*), при которых продукция не выпущена потому, что какой-либо элемент машины (суппорт, механизм загрузки, фиксации и т.д.) не сработал, и *отказы параметров* (*или параметрические*), когда все элементы сработали, однако полученные результаты не отвечают заданным условиям.

Общность отказов элементов и отказов параметров, несмотря на различные формы их проявления, заключается в том, что в обоих случаях их возникновение обязательно приводит к простоям машины и вмешательству человека для ремонта или размерной подналадки механизмов и инструмента, очистки от стружки и т.д. Отказы функционирования и параметрические отказы имеют одинаковую природу, так как их причины аналогичны и заключаются в нестабильности числовых значений определяющих параметров и в нарушении заданных условий взаимодействия между элементами систем.

Таковы некоторые исходные положения теории надежности. Они в одинаковой мере относятся к любым техническим устройствам: как к функционально самостоятельным (машинам и их системам), так и к их компонентам любого уровня.

Важнейшими факторами нарушения заданных условий взаимодействия между механизмами, инструментом и заготовками являются не только вредные воздействия на машины в процессе их длительной эксплуатации [21], но и циклическая нестабильность параметров работы, которая проявляется с самого начала эксплуатации.

Классификация факторов возникновения отказов при работе машин приведена на рис. 4.1.

Систематическими факторами нарушения заданных условий взаимодействия между механизмами, заготовками и инструментом являются такие факторы, числовые значения которых стабильны при различных последовательных реализациях работы машин, например погрешности сборки узлов (непараллельность, неперпендикулярность и т.п.). Большинство из них формируется в процессе сборки и наладки машины и служит характеристикой качества конструкции, ее сборки, наладки и эксплуатации.

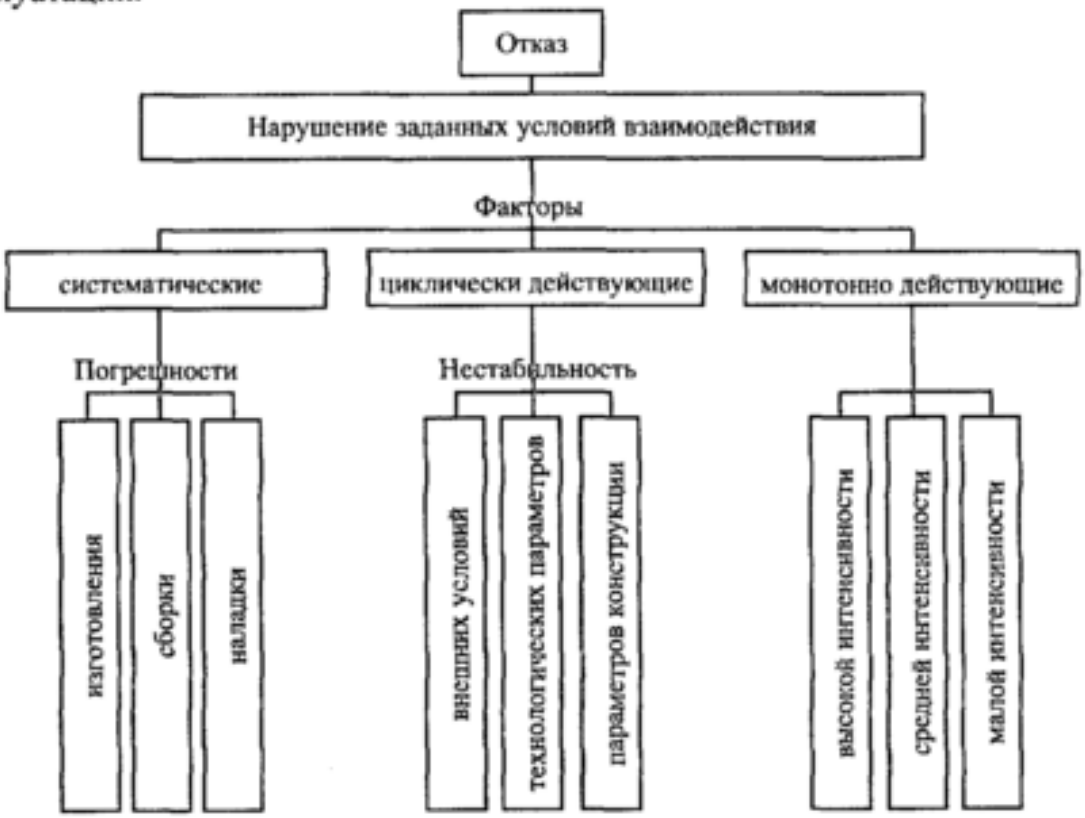


Рис. 4.1. Факторы возникновения отказов при эксплуатации машин

К числу *циклически действующих, обратимых факторов* относятся те, у которых числовые значения при каждой реализации есть случайные величины, распределенные в определенном диапазоне. Их характерная особенность – изменение по величине (увеличение или уменьшение) без вмешательства человека. Эти факторы обусловлены нестабильностью внешних условий, технологических и конструктивных параметров: размеров и формы заготовок; физико-химических свойств обрабатываемых материалов; температуры и влажности окружающей среды; режимов и сил обработки; температуры и свойств рабочих жидкостей и газов; скоростей рабочих и холостых перемещений; конечных положений механизмов (их позиционирования); коэффициентов трения, взаимного расположения конструктивных элементов; воспроизведения управляющих программ и т.д.

Отличительная особенность *монотонно действующих, необратимых факторов* заключается в том, что характеризующие их числовые значения могут изменяться в процессе эксплуатации машин (только увеличиваться или уменьшаться). Этот процесс может быть остановлен человеком или использованием специальных компенсирующих механизмов. Необратимые факторы различают по интенсивности изменения характеризующих числовых значений: высокой, средней и малой интенсивности (деление является условным).

К числу необратимых факторов относят: износ инструмента; разрегулирование механизмов и устройств; засорение и загрязнение рабочей зоны; ухудшение свойств рабочих жидкостей и газов; утечку жидкостей и газов; приработку поверхностей; износ деталей и сопряжении; снижение сопротивления усталости; коррозию; изменение формы (коробление) и физико-химических свойств (старение) конструкционных материалов; изменение квалификации обслуживающего персонала; ухудшение организации обслуживания и др. Большинство из этих факторов, способствующих возникновению отказов в работе машин, обусловлено внешними воздействиями на машину в процессе ее эксплуатации, влиянием различных видов энергии (механической, тепловой, химической, электромагнитной).

Систематические и циклически действующие факторы определяют вероятность возникновения параметрических отказов и отказов элементов, начиная с момента ввода автомата или линии в эксплуатацию. При каждом очередном срабатывании машины числовые значения циклически действующих факторов получаются как реализации случайных величин. Благоприятное сочетание числовых значений последних обеспечи-

вает заданные условия взаимодействия и нормальное срабатывание машины; неблагоприятное означает отказ, когда либо не выполняется какой-нибудь элемент рабочего цикла машины, либо выдается некачественная продукция.

Действие необратимых, монотонных факторов любой интенсивности приводит к увеличению циклической нестабильности определяющих параметров технологического процесса и конструкции: ухудшению точности позиционирования и взаимного расположения конструктивных элементов: увеличению мгновенного поля рассеяния размеров, диапазона рассеяния рабочих сил, опорных реакций, коэффициентов трения; снижению жесткости узлов и т.д.

Пример 1. Рассмотрим причины отказов при выполнении операции штабикования электронно-оптических систем (ЭОС) кинескопов.

ЭОС – это система конструктивно независимых соосных электродов с весьма точным и стабильным взаимным положением, что достигается следующим образом. К наружным поверхностям всех электродов привариваются специальные иголки с радиально направленными остриями. Затем ЭОС собирают на специальной оправке, которая обеспечивает как соосность, так и осевые зазоры. Далее выполняют операцию штабикования, а именно: нагревая стеклянные штабики, последовательно накалывают каждый из них на ряд линейно расположенных иголок всех электродов, тем самым обеспечивается закрепление взаимного положения, достигнутого с помощью оправки. Впоследствии оправку разбирают и удаляют, а электроды ЭОС остаются в положении, необходимом для общей сборки.

Конструктивная схема позиции полуавтомата штабикования показана на рис. 4.2. На ползуне *1* с вертикальным ходом закреплена оправка *3* собранной ЭОС, на которой уже зафиксированы два штабика *2*; необходимо закрепить третий. Штабик подается на призму *4*, на которой и нагревается в стороне от зоны сборки до размягчения стекла. Далее следует быстрый ход призмы (перпендикулярно к плоскости рисунка) и сразу же – вертикальный ход ползуна *1*, в конце хода острия иголок внедряются в штабик, который и уносится при возврате ползуна.

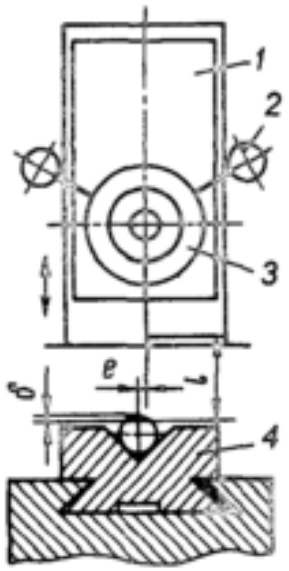


Рис. 4.2. Конструктивная схема позиции полуавтомата штабикования ЭОС

Казалось бы, налицо простейшая сборочная процедура. Однако для высококачественного выполнения процесса необходимо соблюсти ряд условий: выдержать определенную температуру шта-

бика в момент внедрения иголок (не выше и не ниже некоторого предела), заданную глубину внедрения иголок δ в разогретое стекло; соосность между траекторией перемещения концов иголок и осью штабика ($e = 0$) и др.

Но эти условия даже в начальные периоды эксплуатации оборудования не могут быть гарантированы, поскольку определяющие их факторы меняются по величине как циклически (от срабатывания к срабатыванию), так и монотонно с течением времени.

Температура штабика в момент накалывания есть случайная величина, которая при каждом очередном рабочем цикле определяется давлением газа в сети и его теплотворной способностью, а следовательно, температурой пламени горелок; теплоемкостью самого штабика, которая зависит от его массы и химического состава стекла; теплоотвода при нагреве, определяемого и температурой окружающей среды (воздуха в цехе), и теплопотоком от штабика через призму, и т.д. Неблагоприятное сочетание факторов может привести к тому, что при очередном срабатывании штабик будет нагрет ниже критической температуры и внедрения иголок не произойдет (либо треснет штабик, либо иголки согнутся).

Глубина внедрения иголок δ также является случайной величиной, она определяется наладкой величины хода механизма накалывания l и меняется во времени вследствие разрегулирования, износа, снижения жесткости и т.д. От цикла к циклу машины величина δ меняется случайно вследствие колебаний диаметра штабика и длины иголок, а также диаметров элементов ЭОС, к которым по периферии приварены иголки. При неблагоприятном сочетании этих параметров внедрения иголок может не произойти.

Эксцентриситет e между осью штабика и траекторией перемещения иголок (по их остриям) практически неизбежен уже вследствие погрешностей сборки направляющих призмы и направляющих механизма накалывания, погрешности расположения гнезд шпинделя под оправку в конусе механизма накалывания, пространственной погрешности расположения оправки с элементами ЭОС в шпинделе и т.п.

Случайными факторами являются: наличие зазоров в направляющих призмы и механизма накалывания; геометрическая неточность приварки иголок по окружности; их изогнутость; уровень заострения и т.д. В результате при тех или иных неблагоприятных сочетаниях в очередном рабочем цикле иголка может войти в стекло не по центру и согнуться.

Таковы факторы возникновения отказов только на одной рабочей позиции. Но таких позиций три, и в каждой накалываются новые свои, так что к моменту завершения сборки каждый из штабиков будет находиться в своем температурном режиме, в различных фазах температурного расширения стекла, и это после разборки оправки может привести к перекосам элементов, нарушению их пространственного расположения по соосности и перпендикулярности.

Все указанные факторы усугубляются при длительной эксплуатации, когда все больше проявляются износ сопрягаемых поверхностей, коррозия, коробление, загрязнение и разрегулирование.

Приведенный пример иллюстрирует ситуацию, когда появление отказа означает отсутствие результата – сборка ЭОС не выполнена.

Пример 2. Иллюстрацией технологической (параметрической) надежности, когда отказ означает получение продукции, не соответствующей требованиям качества, может служить процесс глубокого сверления отверстий в корпусных деталях на агрегатных станках или на станках с ЧПУ (рис. 4.3).

Идеальная схема с направлением инструмента посредством кондукторной втулки приведена на рис. 4.3, *а*. Соответствующие кинематические, прочностные и другие расчеты позволяют обеспечить частоту вращения сверла и подачу, а также прочность инструмента диаметром d, а следовательно, получение отверстия без каких-либо отклонений центра сверла от заданной координатной точки O (отклонение $x_i = 0$). Тем самым, при идеальных условиях взаимодействия между шпинделем, инструментом, кондукторной втулкой и обрабатываемым изделием нахождение оси отверстия в пределах допуска δ должно обеспечиваться независимо от длины втулки l_1, расстояния между втулкой и торцом l_2, зазора между втулкой диаметром D и инструментом диаметром d. Однако стабильное условие $x_i = 0$ может быть обеспечено при абсолютной соосности между шпинделем и кондукторной втулкой, т.е. при отсутствии биения шпинделя и погрешностей закрепления детали в зажимном приспособлении.

Реально даже в новых, неизношенных станках при каждом очередном рабочем цикле станка x_i, т.е. отклонение оси отверстия от номинальной точки O, будет случайной величиной (рис. 4.3, *б*). Это обусловлено несоосностью между осью втулки и шпинделем Δ_1, погрешностью изготовления и сборки, а также биением оси инструмента, которое в процессе его вращения имеет переменный знак ($\pm\Delta_2$). При движении инструмента вдоль кондукторной втулки он контактирует с кромками втулки, происходит его изгиб, величина которого зависит от зазора между отверстием втулки и сверлом диаметром d, от длины втулки l_1, а также несоосности Δ_1 и биения Δ_2. Поэтому ось инструмента неизбежно отклоняется от оси втулки на величину, зависящую и от расстояния между торцом и деталью l_2.

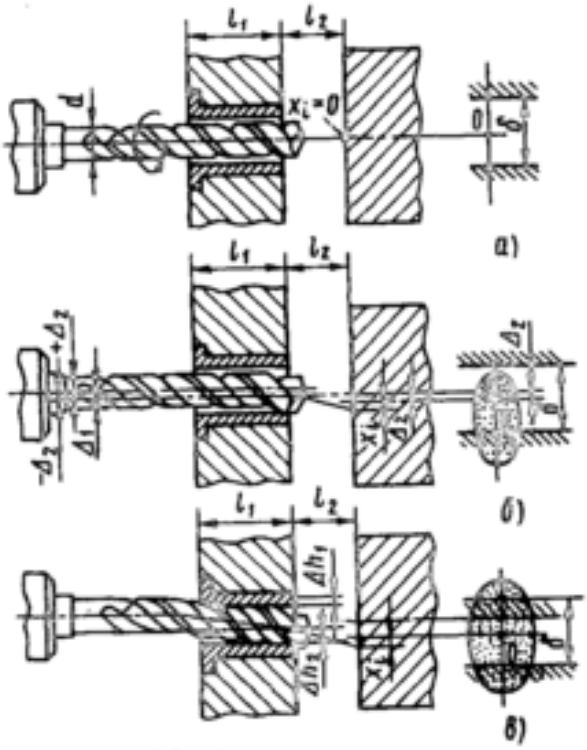


Рис. 4.3. Конструктивная схема позиции сверления

Так как Δ_2 является знакопеременной величиной в процес-

се каждого оборота, момент соприкосновения вершины сверла с изделием случаен при каждом новом ходе сверла. Отклонение оси отверстия относительно оси кондукторной втулки является случайной величиной не только по абсолютному значению, но и по направлению. Поле рассеяния положений оси отверстия с различной величиной вероятности попадания оси в каждую точку внутри эллипса показано на рис. 4.3, *б*.

При каждом новом срабатывании станка благоприятное сочетание числовых значений определяющих параметров (например, погрешность базирований данной детали имеет тот же знак, что и несоосность шпинделя со втулкой) говорит о нормальном срабатывании и получении изделия, отвечающего требованиям качества. Неблагоприятное сочетание свидетельствует о параметрическом отказе: деталь обработана, однако требования качества не выдержаны.

В процессе эксплуатации станка числовые значения определяющих параметров не остаются неизменными во времени. Так, износ кромок кондукторной втулки (функция исходных погрешностей, зазора и длины втулки, сил обработки и т.д.) приводит к увеличению хаотичности положения вершины сверла в момент соприкосновения с изделием (рис. 4.3, *в*), а следовательно, и эллипса рассеяния положения оси отверстия. Поскольку в общем случае износ кромок по окружности неодинаков (Δh_1, Δh_2), может измениться не только величина, но и форма эллипса рассеяния, а также его положение по отношению к точке O, так как одновременно происходит износ направляющих силовой головки или стола (смещение шпинделя относительно втулки), а также износ и ослабление зажимного приспособления.

Как видно, ***постоянно действующими факторами***, порождающими отказы, являются: несоосность шпинделя с кондукторной втулкой, зазор между втулкой и инструментом и др.; *циклическими* – отклонение вершины инструмента от оси вращения, биение, погрешность позиционирования и др.; ***монотонно-действующими*** – износ кондукторных втулок и направляющих, разрегулирование зажимного приспособления, попадание грязи и стружки в зазоры.

Пример 3. Рассмотрим причины отказов при сборке магнитоуправляемых герметизированных контактов (герконов), которые широко применяются в САУ, разнообразных контрольно-блокировочных устройствах т.д. В обычном состоянии геркон (рис. 4.4, *ж*) тока не проводит, для этого нужно приложить посредством электромагнитной катушки внешнее поле.

Герконы, работая в режиме замыкания-прерывания, значительно более надежны и долговечны, чем обычные контакты того же назначения. При сборке (см. рис. 4.4, *а*) сначала в сборочные головки подаются верхний *1* и нижний *3* контакты-детали и стеклянная трубка-баллон *2*. Затем путем перемещений в сборочной

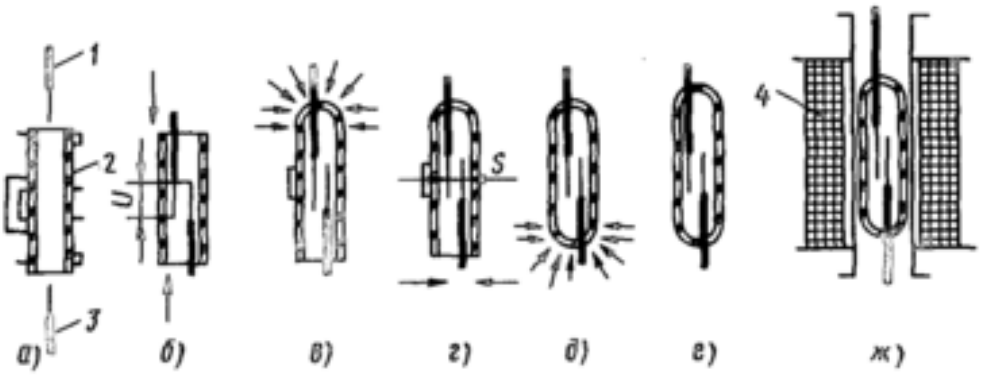


Рис. 4.4. Технологический процесс сборки и заварки герконов:
1 – верхний контакт-деталь; *2* – стеклянный баллон-корпус;
3 – нижний контакт-деталь; *4* – электромагнитная катушка

головке контакты-детали вводятся внутрь баллона и взаимно устанавливаются по вертикали с заданным перекрытием U (см. рис. 4.4, *б*). После этого заваривают верхний контакт с баллоном посредством инфракрасного нагревательного устройства, с интенсивной продувкой через баллон инертного газа (см. рис. 4.4, *в*). После охлаждения верхнего спая проводится взаимная настройка контактов в радиальном направлении на величину S (см. рис. 4.4, *г*). Теперь заваривают нижний контакт (см. рис. 4.4, *д*), что выполняется при подаче газа в зону спая. После охлаждения нижнего спая (см. рис. 4.4, *е*) готовый прибор выгружают из сборочной головки и контролируют его на магнитодвижущую силу (МДС) срабатывания совместно с катушкой *4* (см. рис. 4.4, *ж*).

Однако не всегда обеспечивается получение годных изделий. Основные виды брака и их причины проиллюстрированы эскизами на рис. 4.5, *а – г*. Причинами отказов, как показали исследования, являются прежде всего циклически действующие факторы, а именно нестабильность:

– кривизны контактов-деталей, их толщины, магнитных и упругих характеристик;
– толщины, диаметров и длины стеклянных баллонов;
– параметров энергоносителей (колебания давления азота, примеси в газах);
– условий окружающей среды по температуре и запыленности и т.д.

Часть отказов обусловлена монотонно действующими факторами: загрязнением лотков, по которым подаются детали из вибробункеров при загрузке; ослаблением креплений вследствие вибраций и колебания температуры, износа зажимов сборочных головок и т.д.

Среди всех видов брака превалирует брак по МДС срабатывания (см. рис. 4.5, *г*), что выявляется путем контроля по завершении сборки и заварки. Это объясняется наличием контактов-деталей с большой кривизной и разбросом физико-механических свойств, а также нестабильностью системы настройки на взаимное

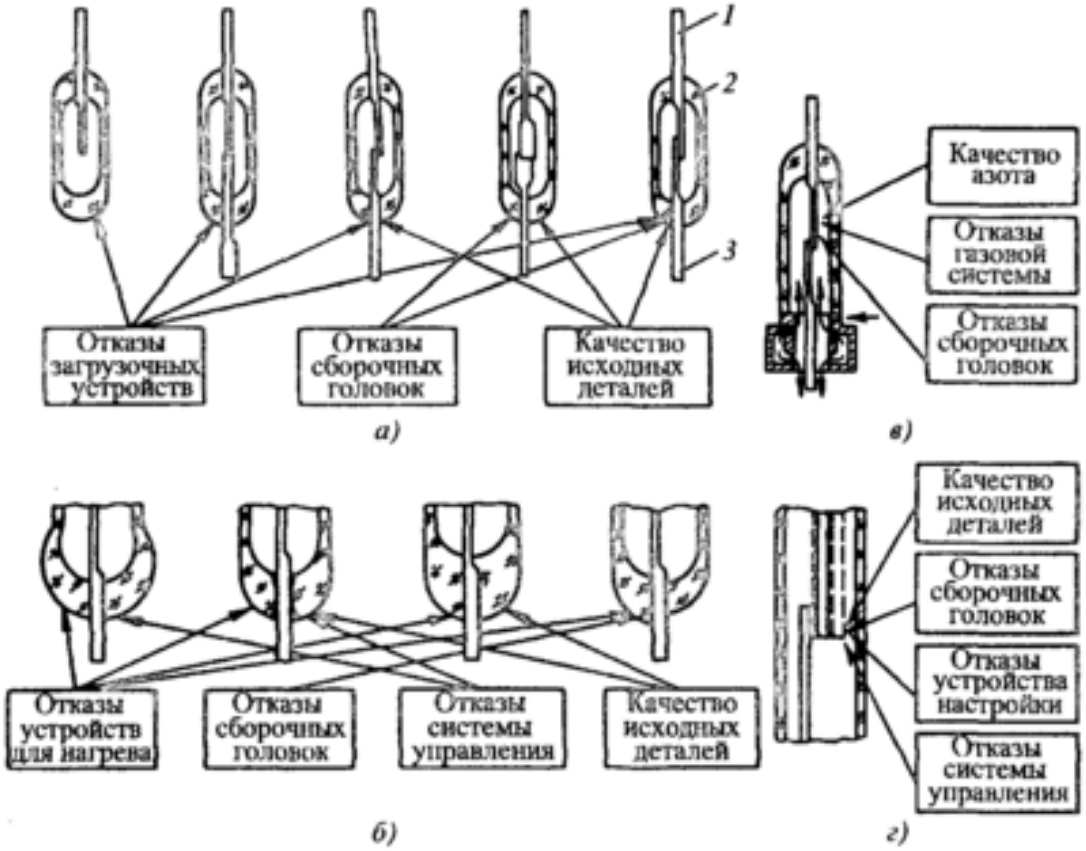


Рис. 4.5. Основные виды брака при сборке и заварке герконов:
а – из-за нарушения взаимного положения деталей; *б* – из-за нарушения спаев стекла с металлом; *в* – из-за окисления контактов; *г* – из-за нарушения МДС срабатывания; *1* – верхний контакт; *2* – баллон; *3* – нижний контакт

положение контактов по расстоянию S (см. рис. 4.4, *г*). В первых конструкциях машин-автоматов была применена система настройки по жестким упорам, в которой упирался корпус сборочной головки в конечном положении хода. Поэтому в дальнейшем появилась конструкция с настройкой величины S по МДС срабатывания. По этому способу контакты-детали после заварки верхнего спая (см. рис. 4.4, *г*) разводят на величину, заведомо большую, чем S, затем их постепенно сближают в магнитном поле (см. рис. 4.4, *д*) до момента, пока не замкнется контакт под действием МДС, что служит сигналом для фиксации положения головок. В данном фиксированном положении и заваривают нижний контакт-деталь (см. рис. 4.4, *е*).

Пример 4. Рассмотрим ситуацию, когда подавляющее большинство отказов вызываются монотонно действующими факторами средней и малой интенсивности, которые проявляются в процессе длительной эксплуатации. Это в первую очередь износ контактных поверхностей, а также старение конструкционных материалов, что приводит к снижению прочности и жесткости, а следовательно к деформациям, выкрашиванию поверхностного слоя и т.д.

На рис. 4.6 приведена конструктивная схема транспортера-подъемника автоматической линии для обработки изделий типа колец. Штанга *2* совершает возвратно-поступательные движения от гидро- или пневмопривода *1* (возможен и механический привод от электродвигателя через редуктор и кривошипно-шатунный механизм). При нижнем положении штанги (см. рис. 4.6, *а*) в шахту *4* транспорта-подъемника из приемного лотка поступает очередная заготовка. При ходе вверх штанга перемещает весь столб заготовок на один шаг, при этом верхняя заготовка скатывается по лотку выдачи. При обратном ходе штанги (вниз) столб заготовок удерживается от опускания подпружиненным стопором *3* (см. рис. 4.6, *б*), который при каждом ходе вверх утапливается очередной заготовкой.

Такое несложное устройство должно, по идее, работать безотказно, если бы не было износа и деформаций стенок, что приводит к заклиниванию и застреванию колец.

Схемы наиболее типовых отказов при работе подъемников толкающего типа показаны на рис. 4.7. При опускании ползуна столб колец *2* значительной силы тяжести задерживается отсекателем *3* (см. рис. 4.7, *а*, *б*), при этом нижние кольца из-за создавшегося момента сил разворачиваются с ударом о стенку шахты, постепенно образуя на стенке выемку. Со временем последняя достигает размеров, достаточных для заклинивания колец. Устранение подобных отказов занимает значительное время, так как шахта подъемника не просматривается. В подводящих лотках, а также в шахтах подъемника при увеличении зазора между кольцами и бортом из-за неточности изготовления или деформации может произойти западание буртов заготовок и их заклинивание (рис. 4.7, *б*).

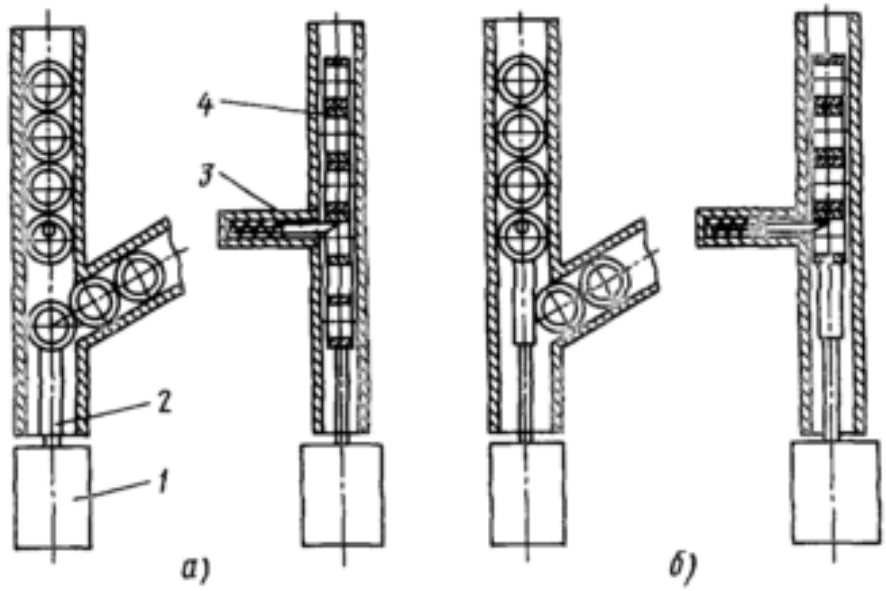


Рис. 4.6. Транспортер-подъемник толкающего типа с толкателем в нижнем (*а*) и верхнем (*б*) положениях

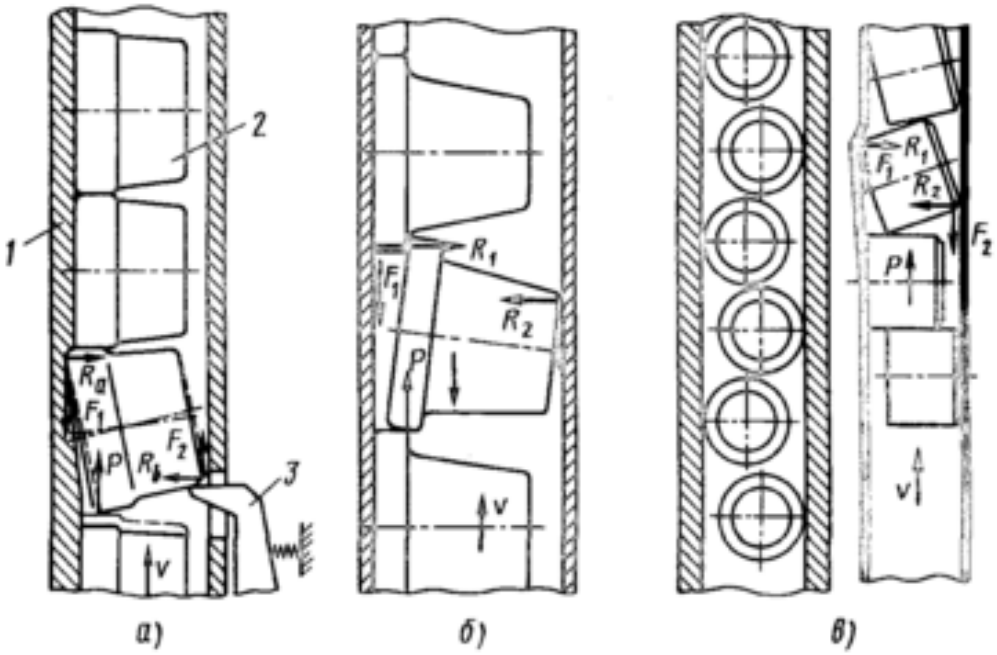


Рис. 4.7. Схема возникновения отказов при работе толкающего подъемника:
а – при местном износе стенок; *б* – при деформации стенок по ширине; *в* – при местной деформации; *R* – опорная реакция; *F* – силы трения; *P* – движущая сила; *G* – сила тяжести изделий; v – направление скорости перемещения изделий; R_1, R_2, R_a, R_b – опорные реакции

На рис. 4.7, *в* показана схема заклинивания колец конических подшипников в шахте подъемников при возникновении шероховатостей, деформации тонкостенных бортов канала шахты, появляющейся в результате их износа, попадания посторонних предметов вместе с кольцами. Подобные неполадки могут привести к поломке и разрушению механизмов подъемников, особенно при несрабатывании блокировочных устройств.

Итак, при конструировании подъемников требования высокой точности изготовления и сборки, жесткости и износоустойчивости являются такими же необходимыми, как и для конструкций, воспринимающих большие силы обработки.

Концептуальное положение теории надежности: *создавая новую конструкцию, инженер обязан не только руководствоваться традиционными критериями прочности, кинематики, но и уметь предвидеть все возможные факторы отклонений, их предупреждения и локализации.*

Надежность машин не остается постоянной во времени. На рис. 4.8 показана типовая зависимость интенсивности отказов машины от проработанного времени (*N* лет), которая позволяет отметить ряд периодов:

I – период пуска и освоения, когда прежде всего проявляется действие систематических факторов, в первую очередь погрешностей сборки и наладки, а также недостаточной квалификации обслуживающего персонала;

II – период стабильной эксплуатации, когда интенсивность отказов определяется в основном случайными факторами;

III – период старения машины, когда доминирующими становятся процессы износа сопрягаемых поверхностей, старения конструкционных материалов и т.д.

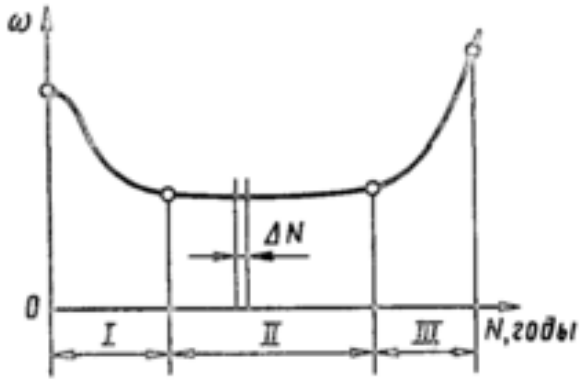


Рис. 4.8. Интенсивность отказов во времени эксплуатации машин: ΔN – срок исследования надежности

Интересно, что кривая на рис. 4.8 была известна задолго до создания теории надежности из медицинской статистики как "кривая смертности" по возрастным категориям, где *I* – период детства; *II* – период зрелости; *III* – период старости, с аналогичными, по сущности, факторами возникновения отказов (генетическая предрасположенность, старение организма и т.д.).

4.2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность машин обусловливается такими свойствами, как безотказность, ремонтопригодность, долговечность, сохраняемость. Показатели надежности можно разделить на две категории:

– единичные, которые характеризуют лишь одно свойство, например, только безотказность или только долговечность;

– комплексные, характеризующие несколько свойств.

Показатели безотказности. *Безотказность* – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Чем реже отказы в работе, тем выше безотказность. Согласно определению, основным показателем безотказности является вероятность P того, что машина после включения проработает безотказно некоторое время t. Так, $P(50) = 0{,}8$ означает: вероятность того, что машина проработает 50 мин после включения, составляет 80 %. Простейшие испытания приборов на безотказность заключаются, например, в том, что 100 приборов ставятся параллельно на испытания и включаются в работу, после чего через желаемые промежутки времени определяется число отказавших и продолжающих работать. В упомянутом случае через 50 мин 20 приборов уже отказали (в любом интервале времени от 0 до 50 мин), а 80 продолжают работать, т.е. их отказы наступят после 50 мин.

Безусловно, вероятность безотказной работы P зависит от величины t. Функциональная зависимость вероятности $P(t)$ получила наименование "функция надежности" (правильно было бы назвать "функция безотказности", но термин утвердился). Это первый из показателей безотказности. Некоторые характеристики этой функции:

1) $P(0) = 1$, т.е. любое техническое средство должно включаться в исправном состоянии;

2) $P(\infty) = 0$, т.е. любое техническое средство рано или поздно будет иметь отказы в работе.

Это одно из концептуальных положений теории надежности, отличное, например, от концепций сопротивления материалов, где подразумевается, что если напряжения в материале меньше предельных, то конструкция проработает вечно.

Между этими крайними условиями реальные показатели функции надежности имеют убывающий асимптотический характер (рис. 4.9). Теоретическая функция надежности – это специально подобранная математическая зависимость $P(t) = f(t)$. Таких математических кривых, у которых теоретические значения достаточно хорошо совпадают со статистическим распределением (см. рис. 4.9), можно подобрать немало. В теории надежности обычно используется формула

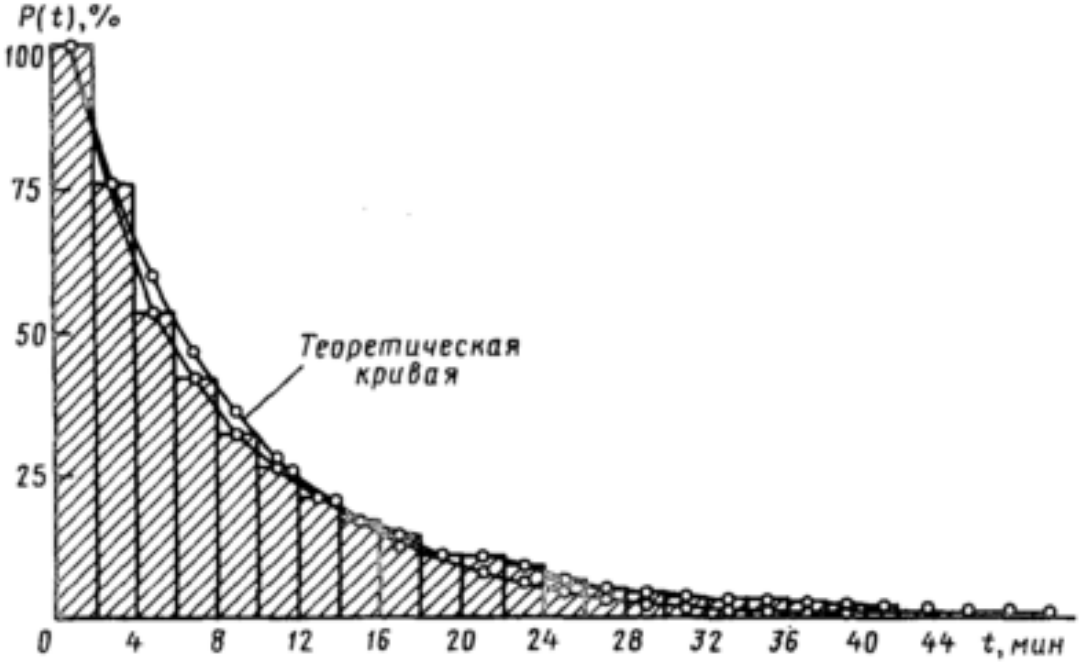


Рис. 4.9. Статистическая и вероятностная функции надежности

$$P(t) = \mathbf{e}^{-\omega t}, \qquad (4.1)$$

где **e** – основание натуральных логарифмов; ω – так называемый параметр потока отказов как характеристика их интенсивности.

При этом подразумевается, что и $P(t)$, и ω являются "мгновенными" показателями безотказности, т.е. характеризуют ее в конкретный момент времени. Это правомерно, так как период наблюдений ΔN, когда численно оцениваются эти значения, несоизмеримо меньше, чем время любого из периодов функционирования N_I, N_{II}, N_{III} (см. рис. 4.8). За период $\Delta N = 16...20$ рабочих смен (такова обычная длительность наблюдений) не успевают измениться уровень изношенности механизмов и устройств, квалификация наладчиков и другие факторы, определяющие уровень отказов.

Величина ω есть второй показатель безотказности, который можно исчислять как в календарном времени, так и в отработанных рабочих циклах. Так, ω = 0,015 означает, что при работе машины возникает в среднем 1,5 отказа за 100 мин, т.е. размерность ω будет отказ/мин.

Количественно это выражается цифрами, существенно меньшими единицы, что весьма некомфортно для восприятия.

Заметим, что психологически человек наиболее осязаемо воспринимает цифры в диапазоне 1...100.

Поэтому более приемлема величина, обратная ω, а именно:

$$m_{\text{ср}} = 1/\omega, \qquad (4.2)$$

где $m_{\text{ср}}$ – среднее время между отказами, или средняя наработка на один отказ (показатель безотказности).

Действительно, $m_{\text{ср}} = 1/\omega = 1/0{,}015 = 66$ мин/отказ, т.е. один отказ в среднем за 66 мин.

Тогда функцию надежности можно представить в виде

$$P(t) = \mathbf{e}^{-\frac{t}{m_{\text{ср}}}}. \qquad (4.3)$$

Значения ω и $m_{\text{ср}}$ могут выражаться не только в абсолютном времени функционирования машины, но и в отработанных рабочих циклах, что следует оговаривать при конкретных расчетах.

Показатели ремонтопригодности. *Ремонтопригодность* – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Чем меньше время обнаружения и устранения отказов, тем выше ремонтопригодность.

Длительность простоев для обнаружения и устранения отказов является такой же случайной величиной, как и длительность безотказной работы.

Для оценки ремонтопригодности существует ряд показателей. Основной из них – среднее время восстановления работоспособности $\tau_в$ – аналогичен $m_{ср}$.

Комплексные показатели надежности интегрируют показатели и безотказности, и ремонтопригодности. Комплексным показателем надежности является коэффициент технического использования. В соответствии с формулой (3.11)

$$\eta_{тех} = \frac{\Theta_р}{\Theta_р + \sum \Theta_с} = \frac{1}{1 + \dfrac{\sum t_с}{T}} = \frac{1}{1 + \dfrac{\omega_ц \tau_в}{T}}. \qquad (4.4)$$

Как видно, здесь нашли отражение и интенсивности отказов, и быстрота их устранения, и интенсивность работы самой машины. Интенсивность отказов исчисляется в рабочих циклах ($\omega_ц$).

Также комплексным показателем являются собственные внецикловые потери $\sum t_с$, мин/шт. [см. формулы (3.10) и (3.19)]:

$$\sum t_с = \frac{\sum \Theta_с}{z},$$

где $\sum \Theta_с$ – суммарные собственные простои машины за некоторый период времени; z – число изделий выданных машиной за этот же период.

Если за произвольной период времени было x отказов, а следовательно, x периодов безотказной работы, то

$$\sum \Theta_с = \tau_в x; \quad z = m_{ср.ц} x = \frac{x}{\omega_ц}; \quad \sum t_с = \frac{\sum Q_с}{z} = \frac{\tau_в}{m_{ср.ц}}.$$

Показатели долговечности. *Долговечность* – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Это в отличие от безотказности и ремонтопригодности "интегральное" свойство, которое характеризует весь процесс функционирования во времени. Ведь именно процессы монотонного увеличения интенсивности

отказов и длительности их устранения (несмотря на ремонты и межремонтное обслуживание) приводят к тому, что объекты становится невозможно или нецелесообразно использовать далее. Долговечность оценивается несколькими показателями.

Важнейший показатель долговечности – это технический ресурс R – суммарное время от начала эксплуатации до предельного состояния.

Технический ресурс деталей, сопряжений, механизмов и устройств оценивается по физическому износу, предельное состояние означает невозможность дальнейшей эксплуатации, после чего должен следовать либо восстановительный ремонт, либо замена.

Пример 4. Призма автомата сборки электронной оптики (см. рис. 4.2) перемещается в направляющих при наличии некоторого зазора $\Delta(\Delta_{max} \geq \Delta \geq \Delta_{min})$. Минимальный зазор ($\Delta_{min} > 0$) обеспечивает возможность скольжения поверхностей без задиров и заклиниваний, он несет смазку, в нем собираются продукты износа при трении (часто Δ_{min} называют "грязевым зазором"). Максимально допустимый зазор Δ_{max} определяется потерей стабильности работы сопряжения, ухудшения жесткости и стабильности положения с возникновением перекосов, вибраций и т.п., а следовательно, отказами от несоосности $\varepsilon > 0$ (см. рис. 4.2).

Между тем, в процессе эксплуатации машины зазор Δ не остается стабильным, он увеличивается ввиду износа сопряжения (рис. 4.10), достигая через некоторое время R_1 предельного состояния (Δ_{max}). После этого выполняется ремонт, который в простейшем случае сводится к восстановлению первичного зазора ($\Delta = \Delta_{min}$) посредством регулировочного клина (на рис. 4.2 зачернен).

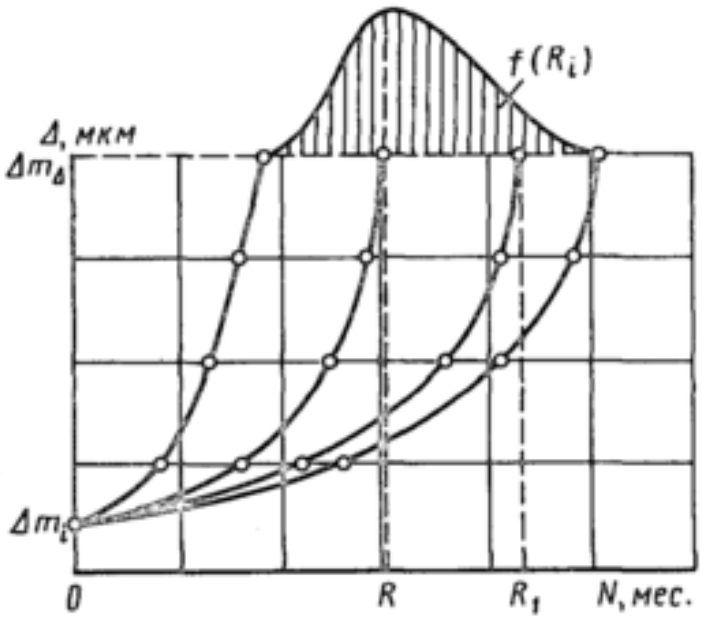


Рис. 4.10. Зависимость увеличения зазора в направляющих от времени эксплуатации

Далее следует новый период эксплуатации, вновь до предельного состояния ($\Delta = \Delta_{max}$).

Заметим, что интенсивность износа и время достижения предельного состояния являются случайными величинами (см. рис. 4.10), хотя эксплуатируется одно и то же сопряжение.

В итоге $f(R_i)$ есть распределение плотности вероятности времени достижения предельного состояния $\Delta = \Delta_{max}$. Среднестатистическая величина R и есть по определению показатель долговечности – технический ресурс данного сопряжения. При достаточном числе измеренных реализаций представляет интерес размах значений: R_{min} и R_{max}.

Для машины в целом технический ресурс – это общая длительность чистого проработанного времени (исключая время ремонта и любых других простоев), которая может определяться как физическим, так и моральным износом.

Чем сложнее система, тем менее заметным становится зависимость ее выходных параметров – качества обработки, производительности, эффективности использования – от технического состояния конкретных элементов (степени изношенности деталей и сопряжений, качества поверхностного слоя и т.д.); эти связи приобретают корреляционный характер с весьма малой теснотой связи.

Даже в токарном многошпиндельном автомате, где точность обработки зависит от состояния целого комплекта механизмов и устройств (шпиндельный блок, механизмы зажима, фиксации, продольного и поперечного суппортов и т.д.), трудно выделить один или два элемента, износ которых определял бы долговечность автомата как системы. Тем более не может быть таких определяющих элементов в автоматических линиях, где производительность и качество изделий зависят от десятков механизмов и устройств, сотен инструментов, которые содержат тысячи стыков, сопряжений, контактных поверхностей, поверхностей трения.

Поэтому при анализе долговечности сложных систем необходимо исследовать не только процессы изнашивания, но и их последствия, в конечном счете – изменение качества продукции, производительности машин и их экономических показателей в ходе эксплуатации.

Опыт эксплуатации различных типов оборудования показывает, что первоначальная точность обработки, обусловленная жесткостью, виброустойчивостью, геометрической точностью узлов, режимами обработки, качеством заготовок, сохраняется лишь в течение определенного периода времени. В дальнейшем вследствие процессов изнашивания, снижения жесткости и геометрической точности механизмов и сопряжений по-

грешности обработки увеличиваются, что не может быть в полной мере локализовано при выполнении планово-предупредительного ремонта.

На рис. 4.11 показана диаграмма точности обработки на токарно-револьверных автоматах с различной длительностью эксплуатации. Как видно, новые токарно-револьверные автоматы обеспечивают обработку изделий с погрешностью не более δ = 30...40 мкм, что сохраняется на протяжении 6... 7 лет; после 15 лет эксплуатации $\delta \geq 200$ мкм, далее обеспечивается точность только свободных размеров. Если считать δ_{max} = 200 мкм, то технический ресурс по точности R = 15 лет.

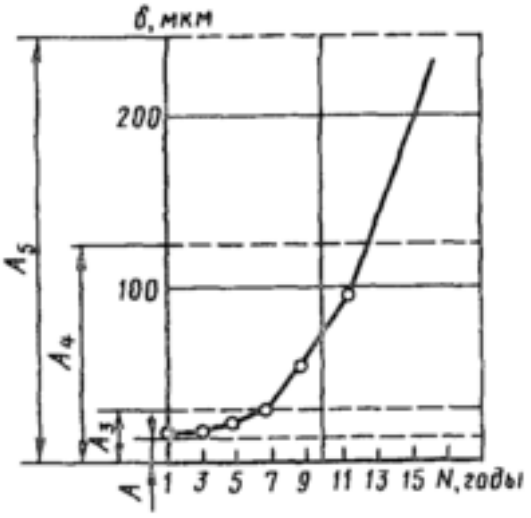


Рис. 4.11. Погрешности обработки деталей на токарно-револьверных автоматах с различной длительностью эксплуатации:
A, A_3, A_4, A_5 – квалитеты точности

Если в конкретной ситуации допустима погрешность, например, δ_{max} = 100 мкм, то срок ее достижения и есть технический ресурс данной машины (согласно рис. 4.11 R = 13 лет).

Под **моральным износом** понимают процесс, когда машина сохраняет возможности получения продукции, отвечающей требованиям качества, но ее эксплуатация становится экономически неэффективной ввиду низкой производительности, чрезмерных эксплуатационных затрат. Отсюда и выражения "машина морально устарела", "морально устаревшее оборудование".

Первым критерием морального износа-старения машины является снижение выпуска, что можно оценить изменением количества выпускаемой продукции (производительности) или комплексного показателя надежности (коэффициента технического использования).

Длительность периода стабильной эксплуатации определяется интенсивностью процессов изнашивания, которые зависят от технологических и динамических сил, возникающих при эксплуатации машин; износоустойчивости конструктивных материалов и т.д. Чем выше интенсивность использования машины в процессе эксплуатации, меньше длительность рабочего цикла, больше динамические нагрузки, тем меньше период стабильной эксплуатации.

Период старения машины следует за периодом стабильной эксплуатации вплоть до конца срока службы и определяется характером оборудования, его универсальностью. Специальное оборудование снимается с эксплуатации при замене выпускаемых изделий; универсальное – вследствие достижения предельных состояний по физическому или моральному износу.

Так как сочетания перечисленных характеристик (отработанности конструкции, интенсивности использования, универсальности и др.) для различных типов оборудования различны, характер изменения показателей работоспособности во времени в течение сроков службы носит неодинаковый характер.

На рис. 4.12 показаны типовые диаграммы изменения во времени коэффициента технического использования некоторых типов автоматов и автоматических линий.

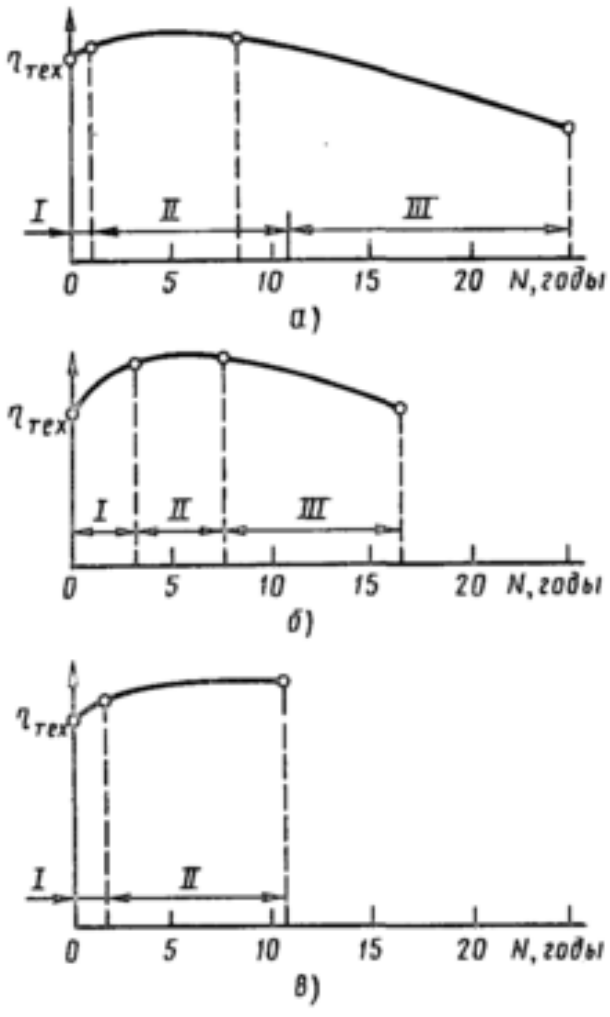


Рис. 4.12. Основные этапы эксплуатации оборудования различных типов:
а – универсальные автоматы и полуавтоматы; *б* – специальные автоматы и полуавтоматы для стабильной продукции; *в* – то же, для продукции с ограниченным сроком выпуска

Для универсальных автоматов (см. рис. 4.12, *а*), например токарных, период пуска и освоения весьма короток (меньше года) и связан лишь с квалификацией наладчиков и устранением некоторых дефектов изготовления и сборки конкретных образцов. Так как в автоматах имеются значительные динамические нагрузки при выполнении рабочих и холостых ходов, период стабильной эксплуатации также продолжается примерно 10 лет и менее, после чего следует старение машин. Оно в итоге может занимать более половины общего срока службы, поскольку универсальные автоматы эксплуатируются до 25 лет и более.

С увеличением длительности эксплуатации, несмотря на занижение режимов, число подналадок и процент бракованных изделий увеличиваются. В результате производительность автоматов, работающих 25... 28 лет, составляет не более 55...60 % производительности новых автоматов, что само по себе, без дальнейших экономических расчетов свидетельствует о нецелесообразности столь длительных сроков эксплуатации.

Специальные автоматы, в том числе автоматы, встроенные в автоматические линии, имеют менее длительные сроки службы (см. рис. 4.12, *б*) и при этом период пуска и освоения занимает уже не несколько месяцев, а 2...3 года и более. Если при этом автоматы работают с высокой интенсивностью, длительность периода стабильной эксплуатации невелика.

Иные закономерности существуют для автоматов и линий, компонуемых из нормализованных узлов (см. рис. 4.12, *в*). Хорошая отработанность конструкций составляющих элементов, типовые компоновочные решения позволяют ограничить период пуска и освоения, который определяется лишь технологическими параметрами и исходным уровнем квалификации наладчиков.

Так как интенсивность использования агрегатных станков и линий из них невысока (T = 1...2 мин), а узлы обладают высокой жесткостью с хорошей отработкой конструкции сопряженных поверхностей, то процессы износа протекают медленно и локализуются путем повышения квалификации наладчиков, освоения технологии и т.д. Показатели работоспособности сохраняются на стабильном уровне в течение длительного периода с общей тенденцией к повышению. А поскольку общие сроки службы ограничиваются длительностью периода выпуска данных изделий (N = 10...15 лет), то период старения и снижения показателей работоспособности может и не наступить.

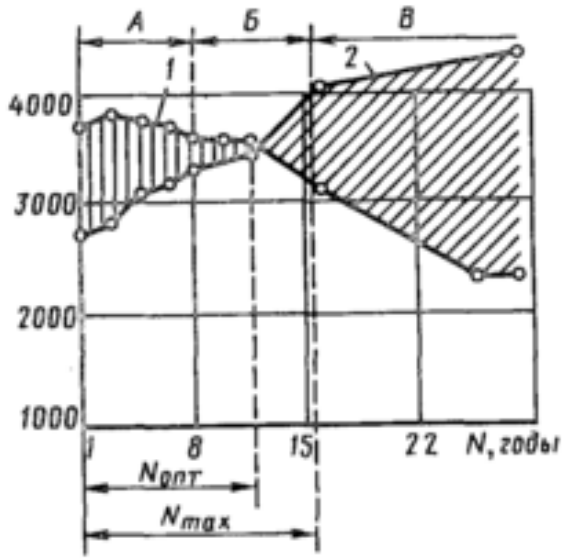


Рис. 4.13. Изменение во времени цены выпущенной за год продукции (Ц) и годовых эксплуатационных затрат:
А, Б, В – периоды, когда автомат выпускает продукцию в пределах квалитетов точности; $N_{опт}$ – экономически оптимальный срок службы

Наиболее полная оценка долговечности машины по критерию морального износа может быть сделана по экономическим критериям путем сопоставления дохода от эксплуатации – цены выпущенной продукции (Ц) и издержек эксплуатации (С), которые необходимы для такого выпуска.

На рис. 4.13 приведены в едином масштабе величины стоимости продукции в денежных единицах Ц (линия *1*) и эксплуатационных затрат С (линия *2*) во времени эксплуатации автоматов.

Диаграмма показывает, что в первые годы эксплуатации, когда технические характеристики достаточно высоки (производительность, точность обработки), эксплуатация автомата высокоэффективна. Однако в дальнейшем полезная отдача уменьшается, а расходы растут; в результате стоимость выпущенной продукции уже не покрывает эксплуатационных затрат, автоматы становятся для предприятия убыточными (при $N > N_{опт}$ показатель Ц < С).

Как видно из диаграммы, это наступает значительно раньше, чем автомат перестает удовлетворять точностным требованиям, что определяет срок его физической годности N_{max}, т.е. моральный износ наступает раньше физического.

Здесь N_{max} = 15 лет – срок, когда автомат в состоянии выпускать продукцию с погрешностью δ = 200 мкм (см. рис. 4.11).

Основные причины роста эксплуатационных затрат в процессе старения машин – это увеличение стоимости ремонта и зарплаты наладчиков, так как нормы обслуживания приходится занижать. Поэтому важнейшая мировая тенденция – менять оборудование не по физическому, а по моральному износу.

Реплика. Все понятия и определения, относящиеся к надежности, количественные показатели и важнейшие постулаты имеют широчайшую общность, равно описывая и человеческое существование, и эксплуатацию машин (см., например, рис. 4.8). Заимствование примеров и аналогий из сферы человеческой деятельности (а также телевизионной, автомобильной и т.д.) воспринимается студентами очень хорошо и способствует лучшему усвоению материала. Теория надежности давно приобрела всеобщую, надотраслевую направленность, с широкими обобщениями и, к сожалению, с превратными представлениями многих ученых о том, что есть главное в теории надежности.

История становления развития теории надежности интересна и поучительна; более подробно можно прочесть об этом в дополнительных разделах данной книги, в частности Д2.

Автор надеется, что данная реплика и дополнительные материалы позволят преподавателям лучше сориентироваться в обширной литературе по надежности технических систем, составить собственное мнение о приоритетах и необходимой информации для студентов. По мнению автора, главное здесь – соблюсти известный театральный канон: "Если в первом акте на стене висит ружье, в четвертом оно должно выстрелить". Иными словами, декларирование показателей надежности только тогда имеет смысл, если далее фигурируют численные значения и технические решения по их улучшению.

4.3. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОТ НАДЕЖНОСТИ

Надежность является важнейшим фактором эффективности новой техники, так как влияет напрямую на производительность машин и число обслуживающего персонала. При низких показателях надежности рост отказов и простоев сокращает фактический выпуск продукции по сравнению с номинальным, низкая технологическая надежность – это брак продукции. Зависимость показателей производительности от надежности достаточно проста: для этого необходимо в формулу (3.20) подставить значение собственных внецикловых потерь, выраженных через показатели безотказности и ремонтопригодности (4.4):

$$Q = \frac{1}{T + \sum t_c} = \frac{1}{T + \omega_ц \tau_в}. \qquad (4.6)$$

На рис. 4.14 приведены графики зависимости производительности от интенсивности отказов, откуда видно, что сильнее всего влияние низких показателей надежности (высоких $\omega_ц$) сказывается именно при высо-

ком быстродействии (малом T), т.е. на самом производительном и прогрессивном оборудовании.

Несколько сложнее оценка влияния надежности на численность обслуживающего персонала, хотя качественно эта зависимость однозначна: чем ниже уровень надежности, т.е. чаще и дольше простои, тем выше трудоемкость восстановления работоспособности, а следовательно, больше численность рабочих-наладчиков.

Рабочий-оператор трудится тогда, когда машина функционирует, затраты времени на его работу носят регулярный характер. Поэтому норму обслуживания оператора выбирают так, чтобы, выполнив свои действия на последней из обслуживаемых машин, он успел вернуться к первой к моменту, когда в ней завершатся автоматически выполняемые действия. Например, если коэффициент производительности [см. формулу (3.5)]

$$\eta = \frac{t_{\text{р}}}{T} = 1 - \frac{t_{\text{х}}}{T} = 0{,}90\,,$$

то доля участия человека, выполняющего ручные операции, не может быть выше 10 %. Формально он может обслуживать число машин, равное

$$z_{\text{оп}} = \frac{T}{t_{\text{х}}} = \frac{1{,}0}{0{,}10} = 10.$$

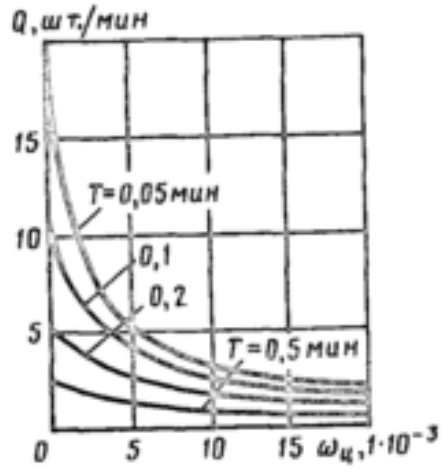


Рис. 4.14. Зависимость производительности машин от интенсивности отказов и длительности рабочего цикла

На самом деле необходимо предусмотреть дополнительное время на переходы от машины к машине, что учитывается коэффициентами, несколько снижающими норму обслуживания оператора, например до $z_{\text{оп}} = 7...8$.

Наладчик работает, когда машина простаивает по собственным причинам. Время каждого простоя есть время работы наладчика, которое ему необходимо для обнаружения и устранения причины, вызвавшей данный простой.

Простои отдельных машин не совпадают ни по времени возникновения, ни по продолжительности. Если наладчик обслуживает больше од-

ной машины, неизбежно возникают несовпадающие во времени простои, тогда ко времени обнаружения и устранения отказов прибавляется время ожидания наладчика, занятого устранением других отказов, а также время переходов.

Исследованиями [7] доказано, что оптимальная занятость наладчика при функционировании оборудования (чередовании работы и собственных простоев) должна быть в пределах 0,70, т.е. 70 % календарного времени занимает работа по ремонту и обслуживанию, обнаружению и устранению отказов и т.д., а 30 % – это время активного наблюдения и предупреждения отказов.

Тогда интенсивность обслуживания, т.е. частота устраняемых наладчиком отказов в единицу времени

$$\omega_{нал} = \frac{1}{\tau_в} = 0{,}70\,. \qquad (4.7)$$

Например, за один час эксплуатации машин наладчик должен действовать в течение 60·0,75 = 45 мин; при длительности единичного простоя в среднем $\tau_в$ = 2,5 мин целесообразная интенсивность работы наладчика по устранению отказов составит согласно формуле (4.7)

$$\omega_{нал} = 60\frac{0{,}70}{\tau_в} = 17 \text{ отказов/ч}.$$

Это достаточно высокая интенсивность, допустимая при обслуживании отдельных машин.

Преобразуем формулу (4.5):

$$\eta_{тех} = \frac{1}{1+\dfrac{\omega_ц \tau_в}{T}}; \quad \frac{\omega_ц}{T} = \left(\frac{1}{\eta_{тех}} - 1\right)\frac{1}{\tau_в}.$$

Здесь величина $\dfrac{\omega_ц}{T}$ есть интенсивность отказов в единицу времени, т.е. размерность та же, что и в (4.7).

Отсюда интенсивность отказов одной машины в единицу времени

$$\omega_1 = \frac{\omega_ц}{T} = \frac{1-\eta_{тех}}{\eta_{тех}\tau_в}.$$

Интенсивность работы наладчика есть суммарная интенсивность появления (и устранения) отказов оборудования, которое он обслуживает

($z_{нал}$). Тогда при оптимальных нормах обслуживания и равнонадежности всех машин

$$\omega_{нал} = \omega_1 z_{нал}.$$

Значит, оптимальное число независимо работающих машин, обслуживаемых одним наладчиком

$$z_{нал} = \frac{\omega_{нал}}{\omega_1} = \frac{0,7}{\tau_в}\frac{\eta_{тех}\tau_в}{1-\eta_{тех}} = 0,7\frac{\eta_{тех}}{1-\eta_{тех}}. \qquad (4.8)$$

Эта простейшая формула пригодна как для теоретического анализа, так и для прикладных расчетов.

В табл. 4.1 приведены рассчитанные по формуле (4.8) рекомендуемые нормы обслуживания: число машин, обслуживаемых одним наладчиком, в зависимости от уровня надежности. При снижении коэффициента технического использования в 1,5 раза целесообразная численность наладчиков возрастает в 6 раз!

4.1. Рекомендуемые нормы обслуживания машин

$\eta_{тех}$	0,90	0,85	0,80	0,60
$z_{нал}$	6	5	3	1

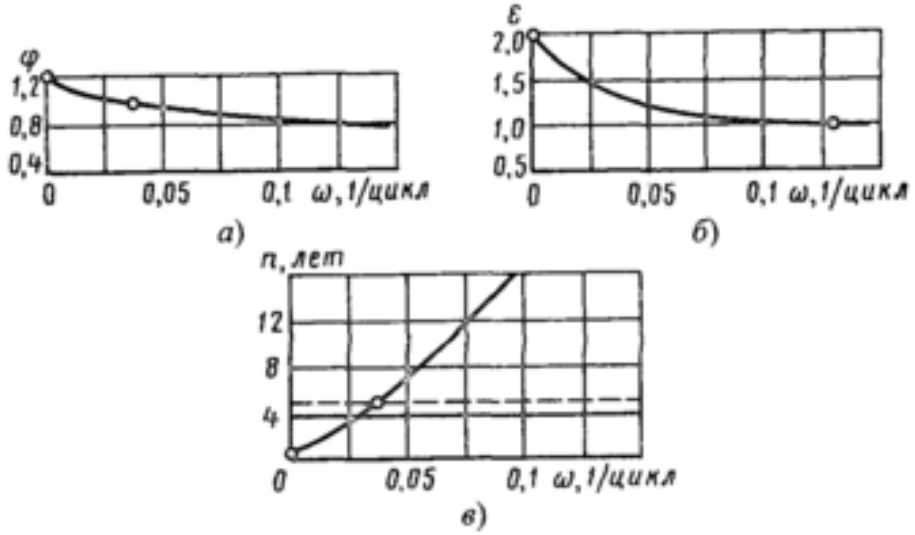


Рис. 4.15. Зависимость изменения производительности φ (*а*), сокращения численности рабочих ε (*б*) и сроков окупаемости новой техники в годах *n* (*в*) от безотказности машин

Зная сравнительные характеристики любых двух вариантов по длительности рабочего цикла T и удельному весу времени ручного обслуживания, а также по надежности ω, можно рассчитать как номинальные величины роста производительности (φ) и сокращения численности рабочих (ε), так и их изменение при варьировании уровня надежности. Типовые зависимости приведены на рис. 4.15.

В рассмотренных вариантах номинальные показатели весьма высоки: при удорожании оборудования в 1,3 раза наблюдаются рост производительности $\varphi = 1{,}2$, сокращение численности $\varepsilon = 2$. Срок окупаемости $n = 1$ год. Однако чем выше интенсивность отказов автоматизированного оборудования ω, тем они ниже: уже при $\omega = 0{,}1$ (средняя наработка на отказ $m_{ср} = 10$ мин) производительность не возрастет, а снизится ($\varphi < 1$); сокращения численности работающих не будет, а следовательно, этот вариант убыточен (срок окупаемости уходит к $n = 20$ годам).

Поэтому внедрение нового автоматического оборудования взамен неавтоматизированного эффективно либо при высокой надежности, либо при высоком потенциале производительности, который может обеспечить только многопозиционное оборудование.

4.4. ДОПУСКИ НА НАДЕЖНОСТЬ

Надежность в работе является одним из определяющих характеристик качества машин. Прежде всего, низкая надежность создает серьезный психологический дискомфорт для тех, кто эту технику обслуживает [25].

Реплика. *Это всеобщая закономерность. Кому приятно смотреть телевизор, экран которого регулярно "рябит" и мигает, не говоря уже о перегорании. Любой владелец автомобиля предпочтет от него отказаться, если двигатель то не заводится с первого оборота, то глохнет в самых неподходящих местах. Аналогично подмечено, что наладчики отказываются обслуживать оборудование, если коэффициент технического использования составляет порядка 0,6 и ниже, т.е. при стабильной эксплуатации 40 % и более времени наладчик вынужден устранять всевозможные неполадки.*

Отсюда – социально неприемлемый уровень надежности.

Помимо этого, низкий уровень надежности отрицательно влияет на два основных источника получения экономического эффекта от автоматизации: снижает производительность оборудования и вызывает необходимость увеличения числа рабочих-наладчиков.

В результате номинально прогрессивная, высокопроизводительная и "безлюдная" новая техника по экономическим показателям может оказаться хуже примитивного неавтоматизированного оборудования (см., например, рис. 4.15) и в итоге будет снята с эксплуатации (или сразу не принята заказчиком!).

Разработка теории и методов расчета требований к надежности создает научные предпосылки для построения системы допусков на надежность по аналогии с системой допусков на точность с разделением уровней надежности на классы, разработкой соответствующих таблиц и других нормативных материалов.

Предельными показателями надежности называются два предельных значения контролируемого показателя надежности, между которыми должно находиться действительное значение этого показателя. Допуском на надежность именуется разность между наибольшими и наименьшими предельными показателями надежности, исходя из функционального назначения элемента или системы.

Одним из предельных значений (наибольшим или наименьшим) является значение этого показателя, соответствующее бесконечно высокой надежности, например коэффициент технического использования, равный единице ($\eta_{тех}$ = 1,0); бесконечно большая наработка на отказ ($m_{ср} = \infty$) и т.д. Задача расчета сводится к определению второго предельного показателя, при котором автомат или автоматическая линия выполняет свою целевую функцию "на пределе".

Такие значения, например $\eta_{тех} = \eta_{доп}$, будем называть допустимыми. Понятия и определения допусков на надежность по своей форме аналогичны соответствующим понятиям и определениям, принятым в теории допусков на точность. Основные различия между ними могут быть сформулированы следующим образом.

1. Понятие "точность" относится главным образом к геометрическим размерам конструктивных элементов – деталей машин (диаметр вала, ширина шпоночного паза и т.д.). Понятие "надежность" относится прежде всего к системам (станки, автоматы, автоматические линии) как совокупностям множества взаимосвязанных конструктивных элементов и теряет физический смысл при последовательном расчленении системы на части. Такие характеристики надежности, как безотказность и восстанавливаемость, применимы лишь к машинам и их механизмам, но не к отдельно взятым деталям машин.

2. Требования к точности определяются, как правило, независимо для отдельных деталей или их сопряжений, исходя из индивидуальной взаимозаменяемости (в том числе функциональной); функциональные связи между точностью размеров элементов и габаритными размерами машин отсутствуют. Надежность же системы определяется надежностью составляющих ее механизмов и устройств, поэтому требования к надежности автоматических линий, встроенных станков, механизмов и устройств взаимосвязаны.

3. Требования к точности ставятся по отношению к конкретным параметрам (размерам) и носят детерминированный характер. Требования к надежности ставятся по отношению к случайным величинам (как правило, их математическому ожиданию) и поэтому имеют вероятностный смысл. Все математические зависимости и методы расчета требований к надежности принципиально отличны от тех, которые общеприняты в теории допусков на точность.

Метод расчета допустимых показателей надежности заключается в том, что система уравнений, связывающих технико-экономические показатели машин и их систем с показателями их надежности, решается "в обратном порядке".

Задаваясь необходимой величиной годового экономического эффекта, коэффициента эффективности капиталовложений и т.д., определяют, при каком уровне надежности линий, встроенных станков, механизмов и устройств они будут обеспечены. Требования к эксплуатационной надежности следует рассчитывать как требования к некоторым ее показателям, которые должны удовлетворять ряду условий:

- контролируемые показатели надо функционально связывать с показателями производительности и экономической эффективности;
- фактические значения контролируемых показателей нужно определять на основе эксплуатационных исследований ограниченной длительности;
- при выборе из нескольких возможных предпочтение необходимо отдавать тем показателям надежности, значения которых могут находиться в более широких пределах;
- контролируемые показатели надежности должны иметь в данных конкретных условиях однозначные величины.

Преимущество следует отдавать тем показателям надежности, которые одновременно являются и параметрами производительности, в первую очередь коэффициенту технического использования.

Нецелесообразно включать в число контролируемых показателей надежности и среднее время $\tau_в$ обнаружения и устранения случайных отказов, которое в линиях одного типа различается в узких пределах.

Как показали эксплуатационные исследования, среднее время устранения случайных отказов шаговых конвейеров, механизмов зажима и фиксации, поворотных столов и т.д., а также всех совокупностей этих механизмов в каждой линии группируется, как правило, в пределах $\tau_в$ = 1,5...3 мин, несмотря на существенную разницу в конструкции, технологии изготовления, режимах работы и т.д. В то же время интенсивности отказов этих элементов разнятся в десятки раз. Итак, в качестве контролируемых показателей надежности целесообразно принимать:

1) **для автоматических линий в целом** – минимально допустимые значения коэффициента $\eta_{а.л}$ технического использования линии, исходя из обеспечения значения производительности и эффективности линии (допустимых сроков окупаемости, минимальных приведенных затрат, выполнения производственной программы и т.д.);

2) **для станков, встраиваемых в автоматические линии**, – минимальное значение коэффициента η_{min} технического использования в целях получения требуемого коэффициента использования линии при принятой структурной схеме;

3) **для механизмов и устройств** – минимально допустимую наработку $m_{ср\,min}$ на отказ, исходя из заданного коэффициента использования при принятой структурной схеме и объективном характере других частных показателей надежности (например, средней длительности восстановления работоспособности).

Все расчеты, связанные с надежностью, по природе своей являются приближенными. Поэтому и расчеты допустимых показателей надежности автоматических линий и их элементов должны давать результаты в первом приближении. Нецелесообразно рассчитывать требования к параметрам с большей точностью, чем могут быть определены фактические значения.

Для коэффициентов технического использования линий достоверность фактических значений составляет обычно не выше 10 %, поэтому требуемый $\eta_{а.л\,min}$ не должен быть рассчитан с большей точностью. В пользу такого приближения говорит и дискретность функциональной зависимости численности наладчиков от уровня надежности, где оптимальные значения рассчитаны для коэффициентов технического использования 0,9; 0,85; 0,80; 0,75 и т.д., т.е. с интервалом 5 %.

Наиболее просто рассчитывают допуски на надежность механизмов, машин и систем машин в целом по критерию обеспечения заданного уровня производительности.

1. Допуск на надежность автоматической линии устанавливают, исходя из требуемого годового выпуска, сменности работы:

$$\eta_{а.л\,min} = \frac{Q_г T p}{F_г \eta_{загр}}, \qquad (4.9)$$

где $Q_г$ – заданная годовая программа выпуска на данной линии; $F_г$ – номинальный годовой фонд времени с учетом сменности, регламентированных ремонтных простоев и т.д.; T – длительность рабочего цикла; p – число изделий, выдаваемых за цикл; $\eta_{загр}$ – ожидаемый коэффициент загрузки линии, обусловленный организационными факторами.

2. Допуск на надежность отдельных машин зависит от общих требований к системе и ее структуры.

Минимально допустимый коэффициент технического использования

$$\eta_{\text{тех min}} = \frac{1}{1 + \dfrac{\left(1 - \eta_{\text{а.л min}}\right)}{\eta_{\text{а.л min}}} \dfrac{n_y}{q\gamma}}, \qquad (4.10)$$

где q – число последовательных позиций (машин) в автоматической линии; n_y – число участков секций, на которое разделена линия (см. подробнее в гл. 6); γ – коэффициент возрастания простоев из-за неполной их компенсации накопителями.

Минимально допустимая средняя наработка на отказ

$$m_{\text{ср min}} = \frac{\tau_{\text{в}} \eta_{\text{а.л min}}}{T(1 - \eta_{\text{а.л min}})} \frac{q}{n_y} \gamma, \qquad (4.11)$$

где $\tau_{\text{в}}$ – среднее время восстановления работоспособности при отказе.

3. Допуски на надежность конструктивных компонентов (механизмов, устройств, инструмента, оснастки и др.) следует рассчитывать только к показателям безотказности (в том числе стойкости, размерной стойкости и т.д.), так как комплексные показатели ($\eta_{\text{тех}}$) здесь физического смысла не имеют (механизмы сами по себе продукцию не выдают).

$$m_{\text{ср min}} = \frac{p_i S_i \tau_{\text{в}}}{\alpha_i} \frac{\eta_{\text{а.л min}}}{T(1 - \eta_{\text{а.л min}})} \frac{q}{n_y} \gamma, \qquad (4.12)$$

где p_i – число данных механизмов в машине; S_i – число срабатываний механизма за один рабочий цикл; α_i – допустимая доля простоев данного вида в общих собственных простоях машины $\left(\sum \alpha_i = 1\right)$. Такое "долевое участие" оценивают на основе опыта эксплуатации аналогичных систем.

Пример 5. Рассчитать минимально допустимую стойкость инструментальных блоков в автоматической роторной линии для штамповки мелких изделий. Число роторов в линии $q = 7$, линия одноучастковая ($n_y = 1$, $\gamma = 1{,}0$), число позиций ротора (а следовательно, одинаковых инструментальных блоков) $p_i = 6$; длительность процесса штамповки $t_p = 0{,}3$ с при рабочем угле поворота ротора 180°.

Следовательно, время рабочего цикла (полный оборот ротора) $T = 0{,}6$ с = = 0,01 мин; время останова линии для ручной замены инструментального блока $\tau_{\text{в}} = 2$ мин; требуемый коэффициент технического использования роторной линии $\eta_{\text{а.л min}} = 0{,}85$, при этом инструментальные простои должны составлять не более 50 % всех простоев ($\alpha_i = 0{,}5$).

Подставив все данные в формулу (4.12), получим

$$m_{\text{ср min}} = \frac{6 \cdot 1 \cdot 20}{0{,}5} \frac{0{,}85 \cdot 7}{(1-0{,}85)0{,}01} = 95\,000 \text{ циклов.}$$

Как видно, требования к инструментальной оснастке в высокопроизводительных роторных линиях (в данном случае $Q_{\text{в.л}}$ = 600 шт./мин) весьма высоки. Указанные численные значения могут быть использованы при конструировании оснастки, приемосдаточных испытаниях и т.д. Расчет допусков на надежность, исходя из обеспечения заданных показателей эффективности (положительного экономического эффекта, окупаемости капиталовложений и т.д.), еще более важен (см. рис. 2.5 и 4.15). Однако он требует применения достаточно сложного математического аппарата, который содержит функциональные зависимости:

1) роста производительности φ в зависимости от номинально принятых $\varphi_{\text{ном}}$, $\eta_{\text{тех ном}}$ и переменного значения $\eta_{\text{тех}}$ на основе формулы (4.10);

2) сокращения численности рабочих, операторов и наладчиков (ε) с учетом изменения норм обслуживания ($z_{\text{оп}}$, $z_{\text{нал}}$) при несовпадении номинального $\eta_{\text{тех ном}}$ и переменного значений $\eta_{\text{тех}}$ на основе формулы (4.12);

3) экономического эффекта (Э) от переменных значений φ и ε, а также других исходных данных, в результате чего формируется зависимость $Э = f(\eta_{\text{тех}})$ (см. гл. 2).

Функциональная зависимость при граничных условиях "реверсируется", т.е. аргумент $\eta_{\text{тех}}$ становится предметом расчета ($\eta_{\text{тех}} \rightarrow \eta_{\min}$), а функция (Э = 0) – аргументом.

В итоге допуск на надежность ($\eta_{\min} \le \eta_{\text{тех}} \le 1{,}0$) количественно определяется характеристиками не только данной машины (T) и системы машин (q, $n_{\text{у}}$, $\eta_{\text{в.л min}}$), что выполняется по формуле (4.10), но и экономическими факторами: стоимостью, фондом зарплаты, необходимым возвратом средств и т.д. Все это может быть рассчитано с использованием формул из гл. 2.

***Реплика**. Отсутствие в данном подразделе полных численных примеров, что как бы нарушает общую канву книги, объясняется не только громоздкостью расчетов, которые могут оказаться неподъемными для среднего студента, но и тем, что у преподавателя отнимут много времени. Постановка численных требований к надежности наиболее востребована при согласовании технического предложения, а также для приемосдаточных испытаний. В обеих ситуациях исходные данные для расчета укрупненные и недостоверные, отсюда и результатам можно не доверять. Поэтому в реальной практике без всяких расчетов и обоснований предпочитают ставить некоторые типовые требования (например, $\eta_{\text{в.л min}}$ = 0,80...0,90). Что же касается студентов, то для них самое главное – понять смысл, физическую сущность подходов; по мнению автора, представленный материал эти задачи решает.*

Глава 5

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАШИН-АВТОМАТОВ

5.1. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И КОНЦЕНТРАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ

Для получения современного цветного кинескопа требуется около 400 разнообразных технологических. воздействий, для автомобильного двигателя – намного больше, что не может быть реализовано на одной машине. Поэтому общее технологическое воздействие, необходимое для получения любого изделия, неизбежно разделяется: *дифференцируется* на составные части, выполняемые в различных рабочих позициях на разном оборудовании.

Первичная дифференциация технологического процесса (ТП) – это разделение его на разнородные операции, которые невозможно или неразумно осуществить в одной позиции.

Пример 1. Завершающими операциями изготовления цветного кинескопа (рис 5.1) являются:

1) склеивание конуса с экранно-масочным узлом;
2) проверка герметичности шва;
3) заваривание электронно-оптической системы (ЭОС) в горловину;
4) откачка и герметизация кинескопа;
5) контроль и тренировка.

Даже эти пять операций невозможно осуществить на одной машине, одно- или многопозиционной; необходимо иметь, по меньшей мере, пять рабочих позиций и пять однопозиционных машин с последовательной передачей изделий (рис. 5.2) при различной длительности выполняемых операций.

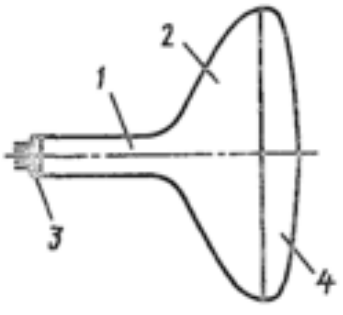


Рис. 5.1. Цветной кинескоп:
1 – горловина; *2* – конус;
3 – ножка; *4* – экран



Рис. 5.2. Схема технологической цепочки машин для завершающих операций изготовления цветных кинескопов:
$t_{p\,01}$, $t_{p\,02}$, ... – время обработки на каждой операции

Первичная дифференциация ТП есть вынужденная мера; общее число позиций q, в которых реализуется ТП, не может быть меньше некоторого минимального значения q_{min}.

Пример 2. Для изготовления вала-шестерни (рис. 5.3) необходимо выполнить операции:

1) формообразования (например, горячей штамповкой);
2) подрезки и зацентровки торцов;
3) обточки шеек;
4) нарезания зубьев;
5) термообработки;
6) шлифования шеек;
7) шлифования зубьев.

Обработку торцов и обточку шеек можно осуществить в одной позиции, для остальных операций нужно специфическое оборудование.

Первичная дифференциация требует наличия для обработки вала, по меньшей мере, шести рабочих позиций и шести однопозиционных машин.

Вторичная дифференциация ТП означает, что конкретные операции, которые технически можно выполнить в одной позиции, расчленяются на части, реализуемые на нескольких позициях.

В табл. 5.1 приведены данные по длительности всех технологических переходов при токарной обработке вала-шестерни по рис. 5.3 инвариантно к тому, на каком оборудовании это будет сделано.

Учитывая, что вал имеет два торца, пять канавок и две фаски, суммарная длительность обработки, согласно данным табл. 5.1, составит $t_{po} = \sum t_i = 4{,}58$ мин $\approx$ $\approx 4{,}6$ мин.

Всю обработку в простейшем варианте можно выполнить в одной позиции на универсальном токарном станке (рис. 5.4, *а*). Тогда рабочий цикл T помимо времени рабочего хода $t_{po} \approx 4{,}6$ мин будет включать в себя множество холостых ходов t_x, не совмещенных с рабочим: установку и зажим вала в патроне с последующими разжимом и перевертыванием (для обработки с другой стороны), вторичный зажим и снятие; подводы и отводы суппорта; неоднократные замены инструментов и т.д. Много времени занимает настройка резцов на глубину резания, что необходимо практически перед каждым проходом.

Из опыта эксплуатации подобных станков известно, что вспомогательное время на совершение всех холостых ходов превышает технологическое в 4 – 5 раз. Если принять $t_x = 4t_{po} = 18$ мин, то производительность однопозиционного токарного станка при коэффициенте использования $\eta_{ис} = 0{,}9$ и длительности смены $\Theta_{см} = 480$ мин:

$$Q = \frac{1 \cdot 480}{t_{po} + t_x}\eta_{ис} = \frac{1 \cdot 480}{4{,}6 + 18}0{,}9 = 20 \text{ шт./смена}.$$

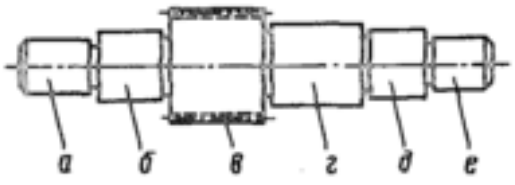


Рис. 5.3. Вал-шестерня:
а, ..., е – шейки вала

5.1. Длительность технологических переходов при обработке вала-шестерни

Наименование перехода	Обозначения шейки вала (см. рис. 5.3)	t_i, мин
Подрезка торца	–	0,35
Зацентровка торца		0,15
Черновая обточка шейки	*а*	0,10
	б	
	в	0,25
	г	0,20
	д	0,10
	е	0,12
Чистовая обточка шейки	*а*	
	б	
	в	0,30
	г	0,25
	д	0,12
	е	0,15
Прорезка канавки	–	0,25
Снятие фаски		0,05

Вторичная дифференциация ТП, когда число позиций $q > 1$ (см. рис. 5.4, *б*, *в*), состоит в том, что тот же объем обработки распределяется на ряд однопозиционных станков таким образом, что каждое изделие в соответствии с технологическим маршрутом получает в итоге полное технологическое воздействие. Окончательно обработанные валы снимают лишь с последнего станка.

Данный подход обладает несколькими преимуществами. Так как необходимый комплект инструмента распределяется по нескольким станкам, они становятся специализированными, отпадает необходимость в замене инструмента, пробных проходах и т.п. Вместо подрезки торцов можно применить более производительное фрезерование (t_i = 0,25 мин вместо 0,35 мин); обрабатывать можно сразу оба торца; получать все фаски и канавки одновременно. Проще решаются вопросы автоматизации станков.

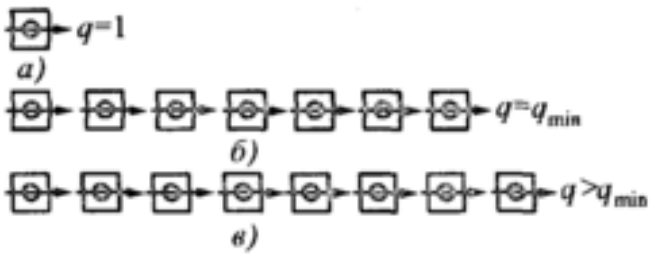


Рис. 5.4. Варианты технологического оборудования для токарной обработки вала:
а – универсальный токарный станок;
б, *в* – системы специализированных однопозиционных станков

При этом поточная линия (см. рис. 5.4, *б*) будет состоять из фрезерно-центровального, нескольких гидрокопировальных и одного многорезцового станка. Степень вторичной дифференциации ТП и число последовательно действующих станков может варьироваться в широких пределах.

Рассмотрим четырехпозиционный вариант:

первый станок – фрезерование торцов и их зацентровка:

$$t_{\text{I}} = 0{,}25 + 0{,}15 = 0{,}40 \text{ мин (см. табл. 5.1)};$$

второй станок – черновая и чистовая обточка шеек *а*, *б*, *в*:

$$t_{\text{II}} = 0{,}10 + 0{,}10 + 0{,}25 + 0{,}12 + 0{,}12 + 0{,}30 = 0{,}99 \text{ мин};$$

третий станок – черновая и чистовая обточка шеек *г*, *д*, *е*:

$$t_{\text{III}} = 0{,}20 + 0{,}10 + 0{,}12 + 0{,}25 + 0{,}12 + 0{,}15 = 0{,}94 \text{ мин};$$

четвертый станок – одновременная прорезка всех канавок и снятие фасок, где время равно времени обработки одной канавки:

$$t_{\text{IV}} = 0{,}25 \text{ мин}.$$

Итак, при четырехпозиционном варианте, когда $q = 4$, лимитирующим по производительности в однопоточной технологической цепочке будет второй станок с $t_{\text{II}} = 0{,}99$ мин. Его производительность

$$Q = \frac{1 \cdot 480}{t_{\text{II}} + t_{\text{x}}} \eta_{\text{ис}} = \frac{480}{0{,}99 + 0{,}3} 0{,}80 = 300 \text{ шт./смена}.$$

Здесь $t_{\text{x}} = 0{,}3$ мин – время холостых ходов, которое включает в себя в основном время установки и съема вала; $\eta_{\text{ис}} = 0{,}80$ – коэффициент использования, который ниже, чем у универсального станка.

Повышение производительности достигается сокращением длительности обработки почти в 5 раз (благодаря дифференциации ТП) и холостых ходов почти в 50 раз (благодаря упрощению рабочего цикла и его автоматизации). При увеличении степени дифференциации $q > q_{\min}$ производительность будет расти.

Так, при шести станках разделяются по позициям черновая и чистовая обработка, что благоприятно сказывается на точности изделий. Рассмотрим данный вариант:

первый станок – фрезерование торцов и зацентровка; $t_{\text{I}} = 0{,}40$ мин;

второй станок – черновая обточка шеек *а*, *б*, *в*; $t_{\text{II}} = 0{,}45$ мин;

третий станок – черновая обточка шеек *г*, *д*, *е*; $t_{\text{III}} = 0{,}42$ мин;

четвертый станок – чистовая обточка шеек *а*, *б*, *в*; $t_{\text{IV}} = 0{,}54$ мин;

пятый станок – чистовая обточка шеек *г*, *д*, *е*; $t_{\text{V}} = 0{,}52$ мин;

шестой станок – прорезка канавок и снятие фасок; $t_{\text{VI}} = 0{,}25$ мин.

Лимитирующим по производительности будет четвертый станок с длительностью цикла

$$T = t_{\text{IV}} + t_{\text{x}} = 0{,}54 + 0{,}3 = 0{,}84 \text{ мин}$$

и производительностью Q = 460 шт./смена, что в 1,5 раза больше, чем при четырехстаночной дифференциации.

При q = 14 на одном гидрокопировальном станке будет обрабатываться чистовым проходом только одна из шеек (*в*), лимитирующим по производительности становится фрезерно-центровальный станок с длительностью обработки $t_р$ = 0,40 мин, рабочим циклом T = 0,65 мин и производительностью почти 600 шт./смена, т.е. эффективность вторичной дифференциации в отношении роста производительности постепенно снижается.

Для теоретического анализа и отыскания закономерностей примем, что ТП дифференцируется по позициям равномерно, тогда производительность однопозиционной машины с дифференцированным ТП

$$Q = \frac{1}{\frac{t_{р\,о}}{q} + t_х}\,\eta_{ис},$$

где $t_{р\,о}$ – общее время обработки, дифференцированное на q позиций;

$t_х$ – время несовмещенных холостых ходов;

$\eta_{ис}$ – коэффициент использования.

На рис. 5.5 показана зависимость производительности оборудования Q от степени вторичной дифференциации ТП, т.е. числа позиций или однопозиционных машин q. Она имеет асимптотический характер, в то время как суммарная стоимость оборудования K пропорциональна числу машин:

$$K = K_1 q,$$

где K_1 – стоимость одного станка.

Даже без специальных расчетов можно сделать вывод, что максимальная степень дифференциации ТП экономически невыгодна.

Следует напомнить, что при этом все сопоставления должны проводиться при одинаковых масштабах выпуска. Так, для того же выпуска, как на поточной линии из шести станков с Q = 460 шт./смена, альтернативным вариантом является участок из параллельно работающих токарных станков (Q = 20 шт./смена); всего

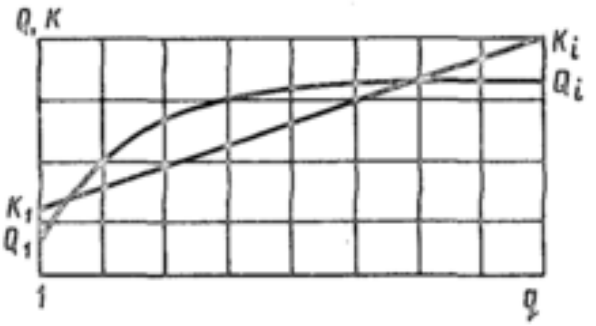


Рис. 5.5. Зависимость производительности Q и стоимости K оборудования от степени вторичной дифференциации ТП

необходимо иметь $\frac{460}{20} = 23$ станка. Поскольку токарный гидрокопировальный полуавтомат намного дороже токарного станка, то суммарная стоимость оборудования может оказаться сопоставимой. Тогда основным фактором экономии станет сокращение численности рабочих.

Однако не все ТП можно просто дифференцировать и "заложить" в однопозиционное оборудование, так как паузы между отдельными фрагментами обработки становятся во времени произвольными и неконтролируемыми. Если для токарной обработки это не имеет значения, то для термических, вакуумных и других операций недопустимо.

Поэтому вторичная дифференциация ТП дополняется *концентрацией* операций.

Концентрация операций – это объединение операций дифференцированного ТП в одной многопозиционной машине или автоматической линии (рис. 5.6).

ТП длительностью $t_{p.o}$ можно выполнить в однопозиционной машине (см. рис. 5.6, *а*) или дифференцировать на q частей. Однако вместо q однопозиционных машин (см. рис. 5.4, *б*, *в*) можно применить одну многопозиционную с q рабочими позициями, расположенными линейно (см. рис 5.6, *б*) или по окружности (см. рис. 5.6, *в*).

Принципиальное отличие многопозиционной машины от группы однопозиционных для того же ТП состоит в конструктивном объединении и регламентированных интервалах времени между обработкой на соседних позициях, что позволяет свести паузы между ними к минимуму и, тем самым, приблизить процесс к непрерывному воздействию; это особенно важно для термической, вакуумной и других видов обработки. Исчезает необходимость в многократных загрузках и съемах изделий при переходе от позиции к позиции, сокращается число рабочих-операторов или механизмов автоматической загрузки.

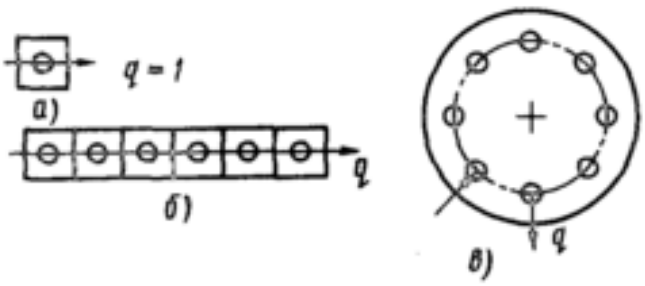


Рис. 5.6. Одно- (*а*) и многопозиционные (*б*, *в*) машины

И, наконец, холостые ходы, характерные для однопозиционных машин, в большинстве своем становятся совмещенными и выполняются на специальных холостых позициях (загрузка, съем и т.п.). Единственным несовмещенным рабочим ходом в многопозиционных машинах дискретного действия остается передача изделий с одной позиции на другую: либо линейно (рис. 5.6, *б*) – посредством штанговых или цепных транспортеров, либо по окружности (рис. 5.6, *в*) – поворотом стола.

Итак, лишь *первичная дифференциация ТП является необходимостью; вторичная дифференциация и концентрация порождены стремлением к более высокой производительности, что может быть реализовано только на базе автоматически действующего оборудования:* машин-полуавтоматов и автоматов. В дальнейшем для краткости будем употреблять только термин "автоматы".

Обобщая все изложенное, можно проследить процесс борьбы за высокую производительность во взаимосвязи с формированием различных видов машин (рис. 5.7).

При невысоких требованиях к производительности изделия обрабатывают на однопозиционных машинах (см. рис. 5.7, *б*), которые имеют технологически необходимый комплект механизмов рабочих и холостых ходов и инструментов. Повышение требований к производительности приводит к дифференциации ТП на отдельные операции, выполняемые системой однопозиционных машин, каждая из которых осуществляет, как правило, одну составную и совмещенные с ней операции, допустимые конструкцией детали и принятым ТП (многоинструментальная обработка). Тем самым формируется технологическая цепочка, состоящая из q однопозиционных машин (см. рис. 5.7, *б*).

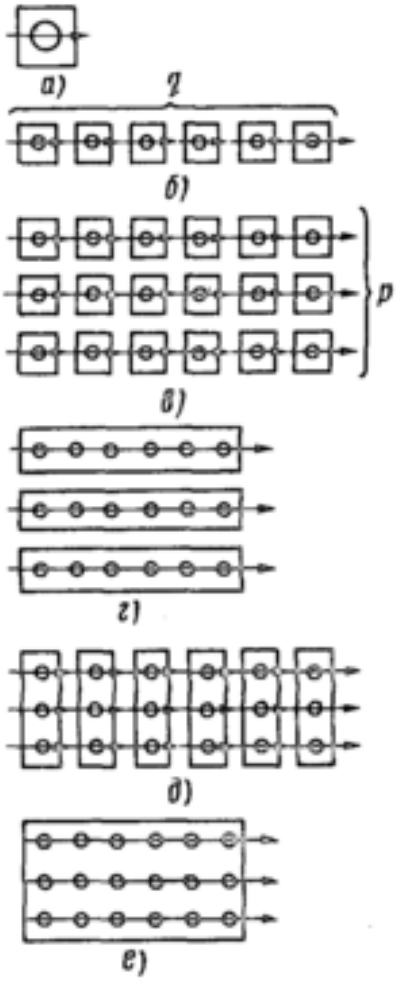


Рис. 5.7. Виды одно- и многопозиционных машин

Изделия последовательно передаются с позиции на позицию, получая постепенно весь объем технологического воздействия. При этом существенно повышается производительность, так как интервал выпуска равен длительности одной составной операции обработки плюс время холостых ходов на загрузку изделий, зажим и разжим, подвод инструментов и т.д.

Дальнейшее возрастание требований к производительности приводит к тому, что одна технологическая цепочка машин с дифференцированным ТП уже не в состоянии обеспечить производственную программу, поэтому появляются дублеры – p технологических цепочек из q машин (см. рис. 5.7, *в*). Такие машины конструктивно воплощают дифференцированный ТП (с многоинструментальной обработкой в одной позиции).

Наращивая число параллельно работающих технологических цепочек p, можно довести производительность системы машин (см. рис. 5.7, *в*) до сколь угодно высокого уровня. Однако такое структурно-компоновочное решение неразумно по нескольким соображениям: велика общая конструктивная сложность – ведь у каждой из машин числом pq необходимо иметь свой привод, свою систему управления, механизмы загрузки и съема изделий; велики общая площадь и численность обслуживающего персонала. Отсюда – неизбежный переход к многопозиционным автоматам.

Принцип построения многопозиционных автоматов заключается в том, что в них концентрируются одно- или разноименные, или одновременно и те и другие операции ТП. В зависимости от типа концентрируемых операций различают автоматы последовательного, параллельного и последовательно-параллельного действия.

В автоматах *последовательного действия концентрируют разноименные операции* обработки, контроля, сборки, последовательно выполняемые на одном изделии (см. рис. 5.7, *г*). Если составные операции ТП не дифференцированы, то машина последовательного действия имеет один комплект инструмента, рассредоточенный по рабочим позициям в порядке, заданном технологическим маршрутом обработки данного изделия.

В автоматах *параллельного действия концентрируют одноименные операции* дифференцированного ТП (см. рис. 5.7, *д*).

В автоматах *последовательно-параллельного* (*смешанного*) *действия концентрируют как разноименные, так и одноименные операции* (см. рис. 5.7, *е*).

Как показывает опыт, многопозиционную машину с фиксированным общим числом позиций можно, как правило, построить по всем трем структурным вариантам.

Метод концентрации операций позволяет при проектировании автоматов и автоматических линий широко использовать принципы стандартизации, так как большая часть позиционных механизмов идентична. В автоматах параллельного действия, где на всех позициях выполняются одни и те же операции обработки, имеется комплект из похожих механизмов рабочих и холостых ходов, которые и по конструкции, как правило, одинаковы. В автоматах последовательного действия даже самого разного назначения имеются идентичные механизмы, например поворотный стол, механизмы его поворота и фиксации, приводы шпинделей и т.д., которые можно унифицировать. Широки возможности унификации и позиционных механизмов.

Известна общая формула технической производительности [см. формулу (3.19)]

$$Q = \frac{1}{t_p + t_x + \sum t_c}. \qquad (5.1)$$

Формулы производительности для конкретных видов машин можно получить следующим образом.

Первоначально находятся частные зависимости времени: рабочих ходов $t_p = f_1(x_1, x_2, ...)$, холостых ходов, не совмещенных с рабочими $t_x = f_2(x_1, x_2, ...)$, собственных внецикловых потерь $\sum t_c = f_3(x_1, x_2, ...)$, – которые затем подставляются в общую формулу.

В однопозиционных машинах все технологические воздействия выполняются в одной рабочей зоне, где изделие либо находится стационарно и совершает необходимые технологические движения типа вращения (машины дискретного действия), либо проходит сквозь рабочую зону с необходимой скоростью (машины непрерывного действия).

На рис. 5.8 показана конструктивная схема полуавтомата электронно-лучевой обработки, где могут выполняться операции микросварки, размерной микрообработки (отверстия, прорези), удаления микрослоев материала и т.д.

Обработка проводится в вакууме в специальной камере, куда помещают обрабатываемые плоские изделия.

Электронный луч формирует электронно-оптическая система (ЭОС), которая включает в себя электронную пушку *1*, системы стабилизации *2*, фокусировки *3* и отклонения *4* электронного луча. Взаимные перемещения электронного луча и изделия *5* в плоскости проводятся посредством отклонения электронного луча или перемещением координатного столика *6* в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях от раздельного привода *7* и *8*.

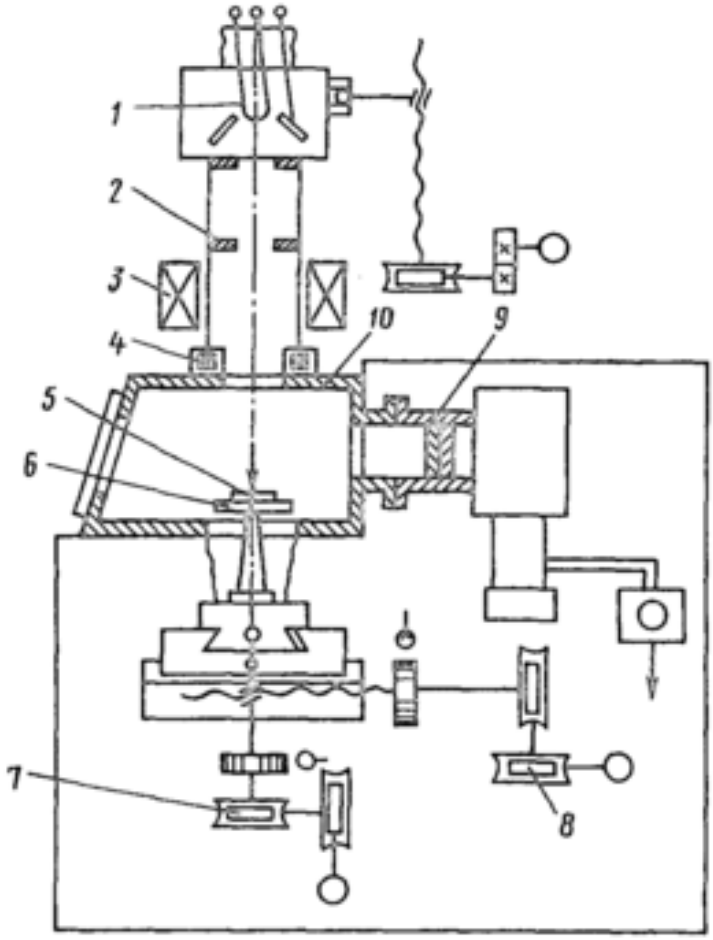


Рис. 5.8. Конструктивная схема полуавтомата электронно-лучевой размерной обработки

Обработку начинают с установки изделия на координатный столик и герметизации камеры *10*. Затем проводят откачку объема камеры и ЭОС. После достижения требуемой степени вакуумирования включают ЭОС и начинают обработку. По завершении обработки перекрывают вакуумпровод *9* и напускают воздух. Происходит разгерметизация камеры. Готовое изделие заменяют новой заготовкой, и цикл повторяется.

Несовмещенными ручными операциями на данном полуавтомате являются загрузка обрабатываемых изделий в вакуумную камеру и закрепление их на столике, герметизация камеры, а после завершения обработки и напуска воздуха – вскрытие камеры и съем изделий.

Автоматически выполняются следующие холостые ходы: откачка воздуха из камеры и объема ЭОС и координатные установочные перемещения стола.

Например, суммарное вспомогательное время замены изделия в камере 2 мин, время откачки 15 мин, общее время координатных установочных перемещений стола 1 мин, время электронно-лучевой обработки 40 мин, время напуска воздуха и вскрытия камеры 2 мин.

Интервал выдачи одного изделия при бесперебойной работе установки составит $T = 60$ мин.

Типовые характеристики однопозиционных автоматов

$$t_{\text{р}} = t_{\text{ро}};\ t_{\text{х}} = t_{\text{х}_1} + t_{\text{х}_2} + t_{\text{х}_3},$$

где $t_{\text{ро}}$ – суммарное время технологического воздействия (здесь $t_{\text{ро}} = 40$ мин); $t_{\text{х}_1}$ – время холостых ходов, предшествующих обработке ($t_{\text{х}_1} = 17$ мин); $t_{\text{х}_2}$ – время холостых ходов в интервалах между двумя единичными технологическими воздействиями ($t_{\text{х}_2} = 1$ мин); $t_{\text{х}_3}$ – время холостых ходов после завершения обработки ($t_{\text{х}_3} = 2$ мин).

Между однооперационными автоматами и многооперационными, например обрабатывающими центрами с ЧПУ, нет различия. Сколько бы инструментов ни было в инструментальном магазине, рабочие и холостые ходы совмещения во времени не имеют.

Производительность однопозиционных автоматов

$$Q = \frac{1}{t_{\text{ро}} + t_{\text{х}_1} + t_{\text{х}_2} + t_{\text{х}_3}} \eta_{\text{ис}}. \qquad (5.2)$$

Даже при возможностях многоинструментной обработки в одной позиции производительность однопозиционных автоматов минимальна, в данном случае (см. рис. 5.8) это $Q = 1$ шт./ч.

5.2. АВТОМАТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

В автоматах последовательного действия (см. рис. 5.7, *г*) *концентрируются разноименные операции, последовательно выполняемые над изделием, т.е. в каждой позиции осуществляются различные воздействия.*

Автоматы и линии последовательного действия, как правило, создают для полной или частичной обработки, сборки, контроля сложных изделий. Обработку дифференцируют, стремясь к одинаковой продолжительности в различных позициях согласно принятой технологической последовательности. Обработку ведут сразу во всех позициях; изделие последовательно проходит через все из них, где обрабатывается различ-

ными группами инструментов так, что в обработке одновременно находится число изделий, равное числу позиций.

Разнообразные конструкции машин последовательного действия классифицируются по следующим признакам:

- *характеру межоперационного (межпозиционного) перемещения* изделий – дискретному или непрерывному. В машинах последовательного дискретного действия рабочие процессы протекают при стационарном положении изделий в позициях; шаговые перемещения между позициями представляют собой несовмещенный холостой ход, когда ТП прерывается. В машинах последовательного непрерывного действия изделия проходят сквозь все рабочие зоны непрерывно, скорость перемещения является одним из технологических режимов, все технологические механизмы и инструменты функционируют непрерывно, без пауз на холостые ходы;
- *взаимному расположению рабочих позиций в пространстве* – по окружности, по прямой линии, по сложным замкнутым траекториям;
- *числу рабочих позиций,* в которых дифференцированно выполняются обработка, контроль, сборка в холостых позициях.

Именно число рабочих позиций является определяющим в выборе принципиальной схемы автомата.

Рассмотрим зависимость производительности от числа рабочих позиций, условившись о полной загрузке, равномерности дифференциации и отсутствии ограничений на число позиций $1 < q < \infty$. В соответствии с общим подходом [см. с. 169 и формулу (5.1)] запишем функциональную зависимость всех затрат времени от числа позиций:

- время рабочих ходов $t_p = t_{p\,o}/q$;
- время холостых ходов (время поворота стола или шагового движения транспортера) $t_x = \text{const}$;
- время собственных внецикловых потерь

$$\sum t_c = t_{c\,o} + t_{c1} q\,,$$

где $t_{c\,o}$ – время потерь по вине общих механизмов автомата (привод, система управления, механизмы зажима и фиксации); t_{c1} – среднее время потерь по вине механизмов и устройств одной позиции (механизмы зажима изделий, инструментальная оснастка).

Подставляя в формулу (5.1) приведенные выражения для t_p, t_x и t_c, получаем формулу производительности автоматов последовательного действия:

$$Q_q = \frac{1}{t_{po}/q + t_x + t_{co} + t_{cl}q}. \qquad (5.3)$$

На рис. 5.9 приведен график зависимости производительности автоматов последовательного действия от числа позиций. Эта зависимость экстремальная: при увеличении числа позиций производительность автоматов сначала растет, а затем резко падает. Цикловая производительность $Q_ц$ (без учета внецикловых потерь времени) имеет асимптотический характер. Заштрихованная зона – это потери производительности из-за наличия собственных (технических) простоев.

Отсюда сделаем вывод, что при создании многопозиционных автоматов нерационально завышать число позиций. Создавая сложное и технически совершенное многопозиционное оборудование, можно получить меньшую полезную отдачу, чем от однопозиционных станков!

Оптимальное число рабочих позиций, при котором имеется теоретический максимум производительности, получим, взяв производную и приравняв ее к нулю:

$$\frac{dQ_q}{dq} = 0.$$

Произведя соответствующие преобразования, получим

$$q_{опт} = \sqrt{\frac{t_{po}}{t_{cl}}}, \qquad (5.4)$$

но собственные внецикловые потери – это комплексный показатель надежности, характеризующий как интенсивность отказов, так и их обнаружение и устранение:

$$t_{cl} = \omega_1 \tau_в;$$

здесь ω_1 – интенсивность отказов механизмов и устройств одной позиции, отнесенная к рабочему циклу; $\tau_в$ – среднее время обнаружения и устранения отказов.

Наиболее динамичный параметр – это интенсивность отказов, которая для различных видов оборудования порой отличается в десятки раз; в то же время $\tau_в$ = 1,5…2,5 мин стабильно для разных условий.

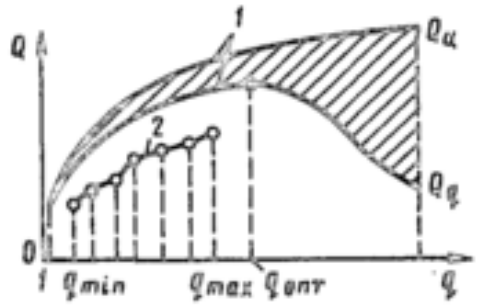


Рис. 5.9. Зависимость производительности Q машин последовательного действия от числа позиций q:
1 – теоретические; *2* – практическая

Существует еще одна закономерность построения машин-автоматов. Известно, что токарные многошпиндельные автоматы при огромном разнообразии моделей строятся либо шести-, либо восьмишпиндельными, т.е. $q_{ток} = 6...8$, $\Delta q = 2$. Ранее выпускали и четырехшпиндельные автоматы, теперь их нет.

А вот автоматическое оборудование для откачки электровакуумных приборов строится числом позиций от 16 до 48, т.е. и число позиций, и их разброс несоизмеримо больше ($q_{ток} = 16...48$; $\Delta q = 32$). Выражает ли этот набор цифр закономерность? В этом можно убедиться, построив график зависимости $q_{опт} = f(\omega_1)$, где показаны зоны рассеяния уровня надежности токарного и откачного оборудования, при этом бесспорно, что $\omega_{ток} >> \omega_{отк}$ по физической сущности (рис. 5.10).

Закономерность: *в зоне низкой надежности даже существенное ее повышение мало сказывается на наивыгоднейшем числе позиций, а в зоне высокой надежности – наоборот.*

Прогресс автоматостроения неизбежно связан с повышением надежности, в том числе однотипных механизмов и устройств. Четырехшпиндельные автоматы – это закономерный этап развития токарных многошпиндельных автоматов.

Формула (5.3) использована для поиска и формулировки некоторых закономерностей структурного построения автоматов. Для прикладных расчетов она не подходит, так как реальные процессы невозможно дифференцировать по позициям равномерно; кроме того, вариантность числа позиций не безгранична. Поясним это на примере оценки вариантности построения автомата изготовления тарелочек осветительных приборов (см. рис. 1.17, *б*). Согласно технологическому маршруту (см. циклограмму на рис. 1.23) выполняются следующие операции: нагрев торцовой части стеклянной трубки ($t_р$ = 19 с); развальцовка конуса ($t_р$ = 4 с); нагрев места под отрезку ($t_р$ = 10,0 с); отрезка ($t_р$ = 3,5 с). Имеются также совмещенный холостой ход – подача трубки до упора (с разжимом и зажимом ее; $t_х$ = 2,5 с) и несовмещенный – поворот стола с его расфиксацией и фиксацией ($t_х$ = 1,5 с).

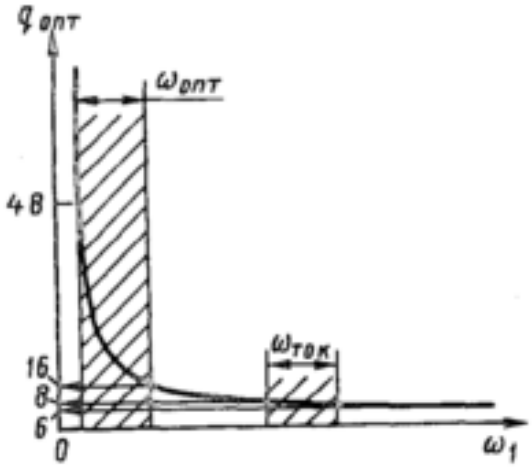


Рис. 5.10. Зависимость оптимального по производительности числа позиций машин последовательного действия от интенсивности отказов механизмов и устройств

Пример 3. Рассмотрим вариантность числа позиций и длительность рабочих ходов в каждом варианте автомата изготовления тарелочек.

Минимальное число позиций автоматов последовательного действия определяется компоновкой позиционных механизмов в предположении, что один осевой и один радиальный механизмы в позиции совместимы, а два радиальных или два осевых несовместимы.

Расчет ведем по ходу процесса.

В первой позиции автомата, безусловно, должна проводиться подача стеклянной трубки до упора, который расположен по оси шпинделя. В этой же позиции можно нагреть торцовую часть радиально расположенными горелками. Развальцовку здесь провести уже невозможно, так как осевая зона занята.

Во второй позиции выполняется развальцовка, сюда можно добавить и нагрев под отрезку, но не саму отрезку, для которой понадобится еще одна позиция – третья: таким образом, $q_{min} = 3$. Длительность обработки на всех позициях записываем в табл. 5.2. При $q = 3$ имеем $t_I = 21{,}5$ с, $t_{II} = 14{,}0$ с; $t_{III} = 3{,}5$ с, лимитирующей во времени является обработка на первой позиции ($t_I = 2{,}5 + 19{,}0 = 21{,}5$ с).

Итак, при трехпозиционном варианте $t_p(3) = 21{,}5$ с; это будет время необходимой стоянки поворотного стола (см. рис. 1.23); рабочий цикл

$$T = t_p(3) + t_x = 21{,}5 + 1{,}5 = 23{,}0 \text{ с}.$$

Дальнейший процесс дифференциации: обработка на лимитирующей позиции расчленяется на две части, желательно на разнородные воздействия. Тогда при четырехпозиционном варианте:

I – подача трубки до упора ($t_p = 2{,}5$ с);

II – нагрев торцовой части ($t_p = 19{,}0$ с);

III – развальцовка и нагрев ($t_p = 14{,}0$ с);

IV – отрезка ($t_p = 2{,}5$ с).

Снова наблюдается неравномерность дифференциации, лимитирующая – поз. II; $t_p(4) = 19$ с. Все данные записываем в табл. 5.2.

В пятипозиционном варианте дифференцируем на две части операцию нагрева $t_I/2$ (9,5 + 9,5 = 19,0), т.е. дифференцироваться могут не только разнородные, но и однородные воздействия; так, обточку вала (см. табл. 5.1) можно дифференцировать на две и более частей по длине.

5.2. Длительность технологических переходов при изготовлении тарелочки осветительного прибора

Позиция	t_i при q											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
I	21,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
II	14,0	19,0	9,5	9,5	9,5	6,3	4,8	4,8	3,8	3,8	3,2	3,2
III	3,5	14,0	9,5	9,5	9,5	6,3	4,8	4,8	3,8	3,8	3,2	3,2

Окончание табл. 5.2

Позиция	t_i при q											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
IV	–	3,5	14,0	4,0	4,0	6,3	4,8	4,8	3,8	3,8	3,2	3,2
V	–	–	3,5	10,0	5,0	4,0	4,8	4,8	3,8	3,8	3,2	3,2
VI	–	–	–	3,5	5,0	5,0	4,0	4,0	3,8	3,8	3,2	3,2
VII	–	–	–	–	3,5	5,0	5,0	3,3	4,0	2,0	3,2	3,2
VIII	–	–	–	–	–	3,5	5,0	3,3	3,3	2,0	2,0	2,0
IX	–	–	–	–	–	–	3,5	3,3	3,3	3,3	2,0	2,0
X	–	–	–	–	–	–	–	3,5	3,3	3,3	3,3	2,5
XI	–	–	–	–	–	–	–	–	3,5	3,3	3,3	2,5
XII	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,5	3,3	2,5
XIII	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,5	2,5
XIV	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,5
$t_p(q)$	21,5	19,0	14,0	10,0	9,5	6,3	5,0	4,8	4,0	3,8	3,5	3,5

В 12-позиционном варианте (см. табл. 5.2) нагрев будет проводиться в пяти позициях подряд.

Максимальное число позиций определяется наличием недифференцированных операций, т.е. таких воздействий, которые нельзя дробить на части. В данном примере это отрезка тарелочки (t_p = 3,5 с).

Как только данная операция становится лимитирующей $t_p(13)$ = 3,5 с, процесс дифференциации прекращается. В самом деле, можно дробить другие операции далее (см. табл. 5.2 для q = 14), но останов поворотного стола не может быть меньше чем на 3,5 с; производительность расти не будет, а ведь только для этого мы и дифференцируем ТП и концентрируем операции. Итак, в рассмотренном случае $3 \le q \le 13$.

Прикладная формула производительности автоматов последовательного действия принимает вид

$$Q_q = \frac{1}{t_p(q) + t_x} \eta_{нс}. \qquad (5.5)$$

Расчеты имеют смысл лишь в диапазоне $q_{min} \le q \le q_{max}$, который всякий раз определяется конкретно.

В формуле (5.5) необходимо для каждого варианта q подставлять значения длительности обработки на лимитирующей позиции $t_p(q)$, получаемые в результате расчетов, выполненных выше (см. табл. 5.2).

Целесообразно влияние простоев учитывать через коэффициенты использования, которые следует задавать в численном виде с учетом не

только собственных, но и неизбежных организационно-технических простоев.

В первом приближении для неметаллорежущего оборудования, если нет более точных данных, можно рекомендовать следующие значения:

q	2...5	6...10	11...15	16...25	> 25
$\eta_{ис}$	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70

Реальный график зависимости $Q_q = f(q)$ будет иным, чем теоретический, что показано на рис. 5.9.

5.3. АВТОМАТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

В автоматах параллельного действия концентрируются одноименные операции дифференцированного ТП, т.е. во всех p позициях выполняются одинаковые или идентичные технологические воздействия (см. рис. 5.7).

Структурно-компоновочные варианты машин параллельного действия показаны на рис. 5.11. Простейшим вариантом является однопозиционная машина: $p = 1$ (см. рис. 5.11, *а*).

При более высоких требованиях к производительности приходится применять несколько параллельно работающих машин, выполняющих одни и те же операции (см. рис. 5.11, *б*). При объединении таких автоматов в одну конструкцию появляется простейший автомат параллельного действия (см. рис. 5.11, *в*), который представляет собой группу однопозиционных автоматов, скомпонованных на одной станине.

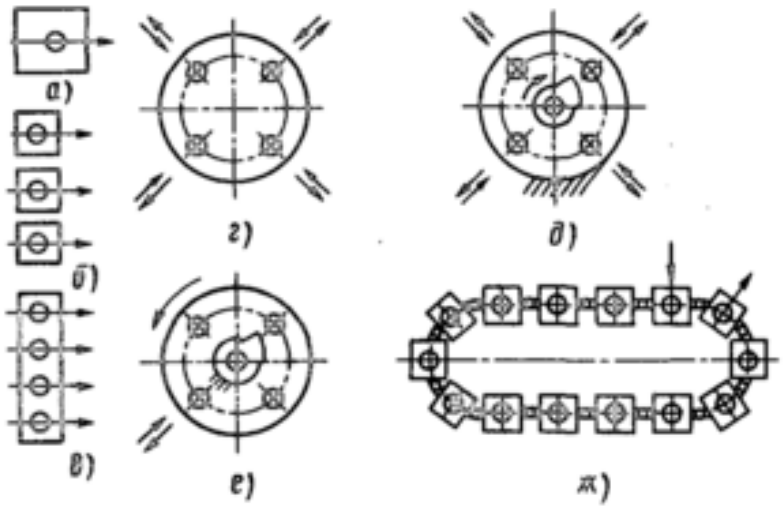


Рис. 5.11. Структурно-компоновочные варианты машин параллельного действия

Это позволяет не только сократить занимаемую площадь, но и упростить конструкцию по сравнению с отдельными автоматами. Например, привод получается общий, а число электродвигателей и их суммарная мощность уменьшаются. Вместе с тем, отказы на любом из шпинделей вызывают простои всех остальных, чего нет в отдельных однопозиционных автоматах.

Более удобным по обслуживанию является автомат с расположением рабочих шпинделей по окружности (см. рис. 5.11, *г*) как более компактный. Однако при ручной загрузке полуавтомат нельзя запустить, пока все заготовки не будут сменены. С этой точки зрения более приемлема схема, показанная на рис. 5.11, *д*.

Здесь автомат или полуавтомат имеет центральный распределительный вал с равномерным вращением, а блок шпинделей остается неподвижным.

При вращении распределительного вала, на котором закреплены кулачки всех механизмов, циклы обработки на всех шпинделях смещаются по фазе. Иными словами, если на первом шпинделе происходит загрузка, то на втором в это время – зажим заготовки, на третьем – обработка и т.д.

Неудобство такой схемы заключается в том, что при ручной загрузке-выгрузке рабочий вынужден ходить вокруг станка одновременно с вращением распределительного вала, так как зона загрузки-выгрузки меняется, следуя вращению кулачка. При автоматической загрузке по той же самой причине станки практически невозможно встраивать в автоматическую линию. Производительность автоматов параллельного действия, построенных по всем трем указанным схемам (см. рис. 5.11, *в – д*), остается практически постоянной.

Важным этапом в развитии машин параллельного действия стало появление конструкций, в которых первоначально распределительный вал остановлен и превращен в систему неподвижных путевых копиров, а круглому столу было задано вращение в противоположном направлении (см. рис. 5.11, *е*). В этом случае детали обрабатываются при непрерывном вращении стола. Такие автоматы получили название *"роторные"* и нашли широкое применение в самых разных отраслях производства.

При большом числе позиций расположение их по окружности становится невыгодным из-за незанятого пространства в центре. В этих случаях применяется *конвейерная* схема компоновки (см. рис. 5.11, *ж*).

Роторный принцип работы дает возможность загружать и снимать обрабатываемые детали всегда в одной зоне, что позволяет легко встраивать автоматы в линию, а при ручной загрузке – обеспечивать максималь-

ную простоту и удобство. Таким образом, применение роторных автоматов особенно эффективно при обработке, контроле, сборке мелких деталей простой конфигурации круглого или прямоугольного сечения с короткими рабочими циклами, высокой частотой загрузки-выгрузки заготовок.

Роторные и конвейерные машины – это машины с непрерывным транспортированием изделий, однако с дискретным технологическим воздействием на них.

Функционируют автоматы последовательного и параллельного действия по-разному. Так, если в автоматах последовательного действия длительность рабочего цикла совпадает с интервалом выпуска $T = T_в$, то в автоматах параллельного действия за период рабочего цикла (для роторной машины, например, равный одному обороту ротора) выпускается p изделий и $T = T_в p$.

Соответственно, иной вид имеют и формулы производительности в зависимости от числа позиций. Здесь $t_р$ = const по параметру p и $t_х$ = const по параметру p, а собственные внецикловые потери растут с числом позиций:

$$\sum t_с = t_{со} + t_{с1} p .$$

Здесь, как и ранее, имеем собственные потери по вине общих механизмов $t_{с\,о}$ и механизмов одной позиции ($t_{с1}$).

Производительность машин параллельного действия

$$Q_р = \frac{p}{t_р + t_х + t_{со} + t_{с1} p} . \qquad (5.6)$$

Зависимость $Q_р = f(p)$ носит асимптотический характер при пропорциональном росте номинальной (цикловой) производительности.

Заштрихованная область на рис. 5.12 характеризует потери производительности из-за технических простоев. Таким образом, по сравнению с p однопозиционными машинами, выполняющими те же операции длительностью $t_р$ (см. рис. 5.11, *б*), машины параллельного действия в производительности проигрывают из-за связанных простоев, но выигрывают в суммарной конструктивной сложности, стоимости, занимаемой площади, трудоемкости обслуживания и т.п.

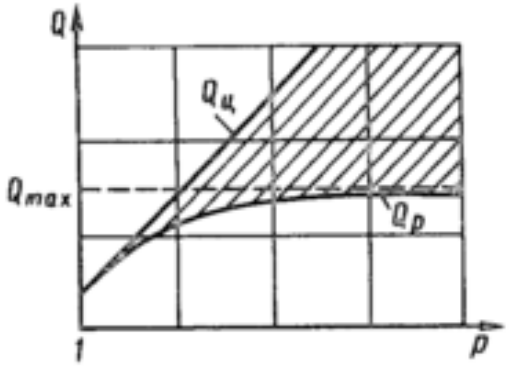


Рис. 5.12. Зависимость производительности Q машин параллельного действия от числа изделий p

5.4. АВТОМАТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

В машинах последовательно-параллельного (смешанного) действия (см. рис. 5.7, *е*) концентрируются и разноименные, и одноименные операции. Машина имеет p параллельных потоков обработки (p = 2, 3, ...), в каждом из них q последовательных позиций, на которые дифференцирован ТП, а также выполняет совмещенные холостые ходы цикла (загрузка, съем и т.д.). Поэтому машины последовательно-параллельного действия с pq позициями являются наиболее общим случаем многопозиционных машин, а предыдущие типы – частными. Так, при p = 1 мы имеем машину последовательного действия, при q = 1 – машину параллельного действия.

По схеме последовательно-параллельного действия создаются наиболее сложные по конструкции и производительные автоматы, а также все многопоточные автоматические линии.

На рис. 5.13 показаны схемы различных вариантов автоматов и линий параллельно-последовательного действия.

На рис. 5.13, *а* представлена система из p параллельных потоков с линейно расположенными последовательными позициями. По такой схеме строят автоматические линии с жесткой связью, когда после каждого шага конвейера две или несколько деталей последовательно перемещаются на очередные позиции для обработки.

По схеме, показанной на рис. 5.13, *б*, работают автоматы параллельно-последовательного действия с расположением рабочих позиций по окружности. Автоматические линии последовательно-параллельного действия можно строить по двум основным вариантам:

– из автоматов параллельного действия, соединенных последовательно; если это автоматы роторного типа, автоматические линии также называются роторными;

– из многошпиндельных автоматов последовательного действия, соединенных параллельно.

На рис. 5.13, *в* изображена схема автоматической линии из роторных автоматов, связанных между собой транспортными роторами. В каждом роторе параллельно (со смещением по фазе) обрабатывается пять деталей. На каждом из роторов выполняется одна операция; детали, перемещаясь последовательно из одного ротора в другой, постепенно проходят весь процесс обработки. На рис. 5.13, *г* представлена схема автоматической линии, состоящая из многошпиндельных автоматов последовательного действия, работающих параллельно.

Закономерности изменения производительности машин последовательно-параллельного действия в зависимости от числа позиций наиболее сложны. При варьировании числом позиций на длительность рабочего

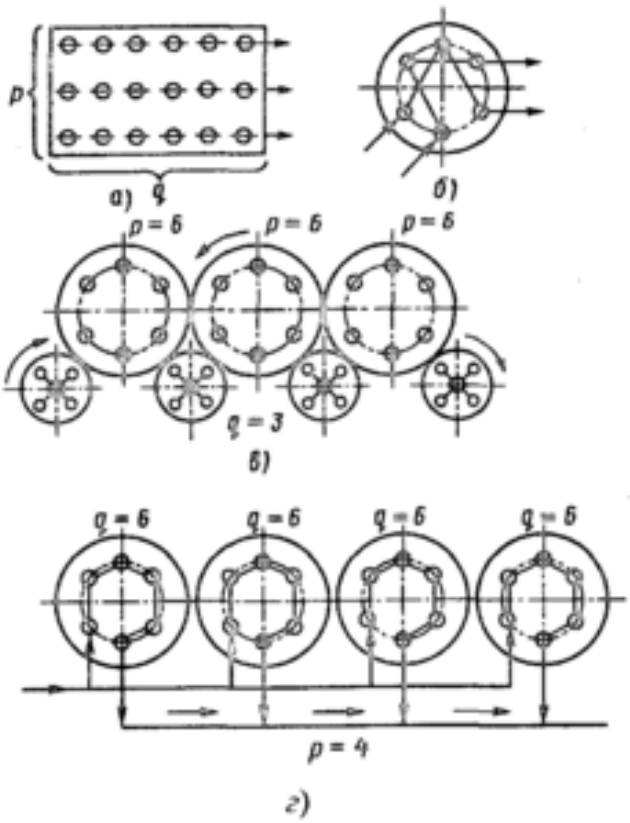


Рис. 5.13. Структурно-компоновочные варианты машин последовательно-параллельного действия

цикла влияет только изменение числа последовательных позиций q. Число параллельных потоков p определяет число единиц изделий, выдаваемых за цикл. В итоге формула производительности машины последовательно-параллельного действия имеет вид

$$Q_{pq} = \frac{p}{t_{po}/q + t_x + t_{co} + t_{c1}pq}. \qquad (5.7)$$

Графики зависимости производительности машин последовательно-параллельного действия от числа позиций приведены на рис. 5.14.

Диаграмма производительности показывает, что и здесь имеется максимум производительности при определенном значении $q_{опт}$. При этом чем больше число параллельных потоков, тем выше производительность и ниже значение $q_{опт}$.

Автоматы и автоматические линии последовательно-параллельного действия обладают наиболее высоким потенциалом производительности. Однако большое количество сблокированных механизмов, устройств и инструментов обусловливает высокие внецикловые потери. Поэтому чем

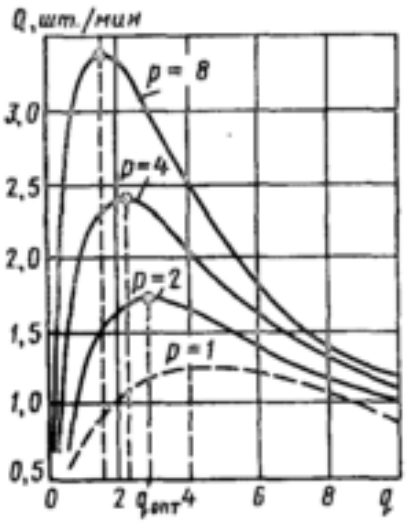


Рис. 5.14. Зависимость производительности Q машин последовательно-параллельного действия от числа позиций q

сложнее автомат (больше значения p и q), тем жестче требования к надежности работы механизмов и устройств, стойкости и стабильности инструментов, уровню системы эксплуатации.

Реальные расчеты производительности автоматов последовательно-параллельного действия следует проводить по тем же правилам, что и для автоматов последовательного действия.

Выбор типа автомата, как и числа позиций, является сложной многофакторной задачей, которая не всегда может быть формализована. Выскажем лишь некоторые общие соображения.

Прежде всего, необходимо видеть все возможные варианты построения автоматов. Так, шестипозиционный автомат с расположением позиций по окружности можно реализовать по четырем структурно-компоновочным схемам (рис. 5.15, соответственно *а*, *б*, *в*, *г*):

- как автомат последовательного действия (см. рис. 5.15, *а*), когда $q = 6, p = 1$;
- в виде двухпоточного автомата последовательно-параллельного действия (см. рис. 5.15, *б*), когда $q = 3, p = 2$;
- как трехпоточный автомат последовательно-параллельного действия (см. рис. 5.15, *в*), когда $q = 2, p = 3$;
- в виде автомата параллельного действия (см. рис. 5.15, *г*), когда $q = 1, p = 6$.

С увеличением общего числа позиций число вариантов растет.

При анализе возможных вариантов следует обращаться к сложившимся традициям, к которым всегда надо относиться уважительно.

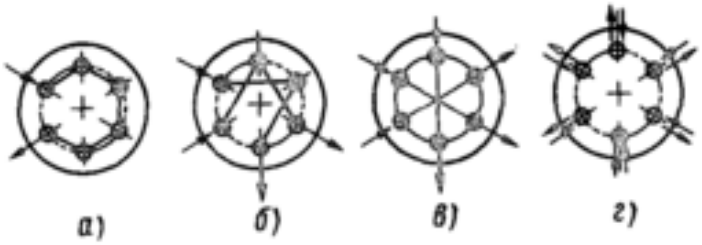


Рис. 5.15. Вариантность шестипозиционных машин

Так, в машиностроении автоматы последовательного действия традиционно применяются при обработке резанием (многошпиндельные токарные автоматы, многопозиционные агрегатные станки и т.п.), а также в сборочных и других процессах, где относительно велика длительность технологического воздействия и высок эффект дифференциации и концентрации операций. Компоновка позиций определяется во многом удобством межоперационного транспортирования: для относительно мелких изделий и небольшого числа позиций предпочтительнее расположение позиций по окружности; для крупногабаритных изделий, особенно при большом числе позиций, – в линию. Машины последовательного непрерывного действия для термообработки имеют, как правило, линейную компоновку.

В качестве примера на рис. 5.16 показана конструктивная схема диффузионной печи последовательного действия для обработки полупроводниковых пластин. Технологическая часть находится в корпусе *10* и имеет нагревательное устройство *3* и кварцевую оболочку *4*.

Транспортирующее устройство содержит кассеты загрузки и выгрузки *1*; шлюзовые устройства *9* с поворотными платформами *7*, уплотняющими рабочий объем; перегрузочные лотки *8*; контролирующий фотодиод *2*; манипулятор *11* и кварцевый лоток *5* со шлифованной дорожкой с отверстиями для подачи газа для перемещения кремниевых пластин *6*.

Эта конструкция интересна с двух сторон: во-первых, здесь не инструментальная, а аппаратная обработка, рабочие позиции представляют собой стационарные зоны с различным уровнем температур; во-вторых, загрузка и выгрузка пластин дискретны, а технологическое воздействие непрерывно.

Тем не менее, данная схема полностью укладывается во все концепции автоматов последовательного действия.

Машины параллельного действия строятся, прежде всего, для кратковременных операций, дифференциация которых не принесет значительного выигрыша в производительности при высоких требованиях к ней. Наибольшее распространение получили в настоящее время роторные машины: в машиностроении – при выполнении операций штамповки, вытяжки, сборки простых изделий, контроля и т.д.; в пищевой промышленности – при производстве напитков на операциях заливки жидкости, герметизации емкостей, наклеивания этикеток; в парфюмерной и медицинской промышленности – при производстве туб, ампул, шприцов и т.п.

На рис. 5.17, *а* и *б* показаны соответственно схема роторной машины для штамповки и развертка ее рабочей зоны.

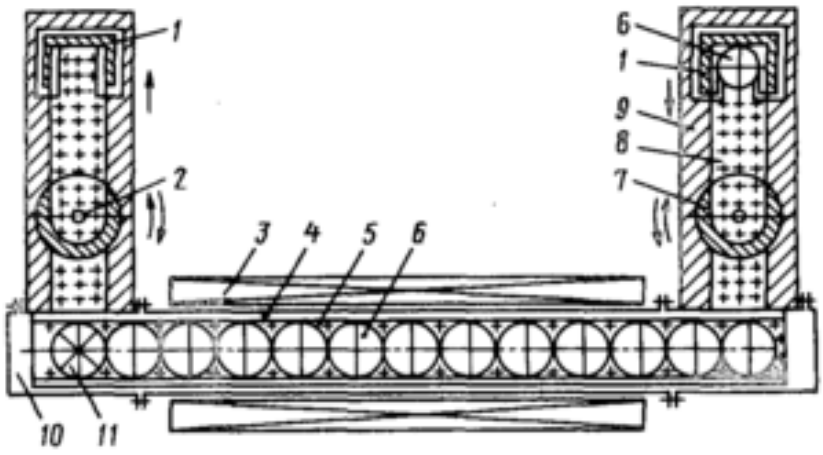


Рис. 5.16. Конструктивная схема диффузионной печи *для полупроводниковых пластин*

При вращении рабочего ротора в позиции, оснащенные инструментальными блоками, заготовки поступают на ходу посредством транспортного ротора, заталкивателя или вручную. Затем на ходу в той же зоне β_1 происходит быстрый подвод инструмента; после этого в зоне β_3 следует технологическое перемещение (штамповка, вытяжка и т.д.), а в зоне β_2 – отвод инструмента.

Во время прохождения зоны β_2 инструментальный блок находится уже в раскрытом, исходном положении. При этом осуществляются съем готового изделия, свободный пробег (когда могут проводиться осмотр инструмента, его замена, очистка и т.д.) и загрузка в инструментальный блок новой заготовки.

Таким образом, орудия обработки (инструментальные блоки) перемещаются непрерывно по окружности и многократно дискретным образом воздействуют на обрабатываемые объекты, которые перемещаются по окружности с той же транспортной скоростью и вступают однократно в контакт с орудиями обработки.

Автоматы и автоматические линии последовательно-параллельного действия применяются при длительных по времени технологических операциях и высоких требованиях к производительности. Так, линии из многопозиционных автоматов, работающих параллельно (см. рис. 5.13, *г*), типичны для кондитерской промышленности, например на операциях завертки карамели, конфет и т.д. Линии с независимыми параллельными потоками широко распространены при металлообработке, линии со связанными потоками – при термообработке.

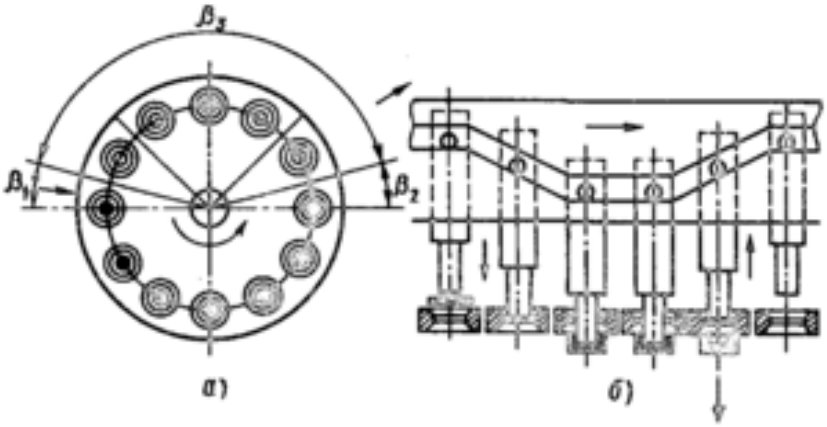


Рис. 5.17. Схема роторной машины

На рис. 5.18 дан поперечный разрез многопоточного термического агрегата непрерывного действия.

Печь разделена на пять секций, в каждой из которых под воздействием вентиляторов циркулирует нагреваемый нагревателями *4* воздух, температура которого измеряется термопарой *5* и автоматически поддерживается на заданном уровне. Таким образом, изделия *2*, размещенные на транспортной сетке *3*, постоянно находятся в потоке воздуха заданной температуры.

Печь имеет устройства, позволяющие равномерно и быстро нагревать изделия до заданной температуры, регулировать ее, равномерно охлаждать изделия, автоматически поддерживать установленную температуру, контролировать заданную температуру, механически транспортировать изделия через всю печь и изменять скорость транспортирования.

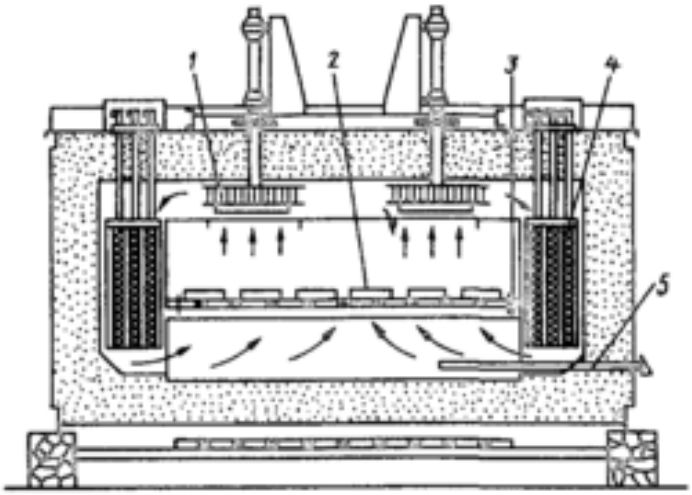


Рис. 5.18. Поперечный разрез конвейерной печи

Печь состоит из передней, средних и задней секций, зоны охлаждения, стола разгрузки, калорифера с нагревателями и сетки. По длине печь имеет зоны нагрева, выдержки, медленного и быстрого охлаждения. Проходя через зоны нагрева и выдержки, изделия равномерно нагреваются и поступают в зону медленного охлаждения, а затем в зону быстрого охлаждения, где окончательно остывают.

Факторы, определяющие выбор вида технологического оборудования:

– тип изделий, их габаритные размеры, все требования качества и т.п.;

– виды и длительность технологического воздействия;

– требуемая производительность; на первое место следует поставить технологические факторы.

В качестве примера на рис. 5.19 приведены оптимально сложившиеся структурные схемы типового оборудования для завершающих операций производства цветного кинескопа (см. рис. 5.1, 5.2) в условиях крупномасштабного производства.

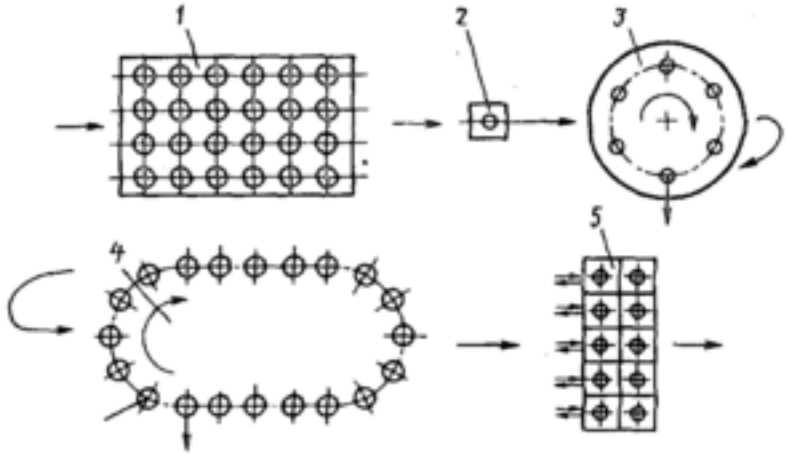


Рис. 5.19. Структурные схемы типового оборудования для завершающих операций изготовления цветных кинескопов

Склейка конуса с экраном выполняется в шестипоточной линейной печи *1* последовательно-параллельного непрерывного действия; контроль герметичности шва – на однопозиционной установке *2* дискретного действия; заварка электронной оптики – на автомате *3* последовательного дискретного действия с расположением позиций по окружности; откачка и герметизация приборов – на конвейерной линии *4* параллельного действия; тренировка и контроль – на стационарных стендах *5*, действующих параллельно.

Общая тенденция – при любых масштабах выпуска следует иметь минимальное количество задействованного технологического оборудования.

Глава 6

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

6.1. ВИДЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Автоматическая линия – это система машин-автоматов, расположенных, как правило, в технологической последовательности и объединенных системой автоматической загрузки, межоперационного транспортирования, накопления межоперационных заделов изделий, автоматического управления (см. гл. 1).

В современном промышленном материальном производстве функционирует множество автоматических линий, которые применяются везде, где выпуск продукции имеет крупномасштабный характер, а объекты относительно стабильны во времени.

Цель создания автоматических линий, как и любого автоматизированного оборудования, – обеспечение высокого качества и заданного количества продукции, избавление человека от монотонного и тяжелого физического труда, создание комфортных условий обслуживания.

Приоритет тех или иных задач определяется видом продукции и характером технологических процессов (ТП). В химической, металлургической и других отраслях промышленности, при изготовлении, например, боеприпасов, присутствие человека в рабочих зонах недопустимо из-за опасности для здоровья и жизни самого человека; в фармацевтической, электронной и подобных отраслях его присутствие непозволительно с позиции качества продукции (стерильность, привносимая дефектность и т.п.).

При высокоинтенсивных процессах, когда минутная производительность составляет сотни и тысячи штук, десятки и сотни погонных метров, присутствие человека как участника ТП затруднительно или невозможно физически, равно как и в производстве тяжелых "неподъемных" изделий.

Таким образом, при решении многих производственных задач устранение человека как непосредственного участника выполнения технологических и вспомогательных процессов – непременное условие. Создание автоматически действующих систем машин, где за человеком остаются лишь функции наладки, контроля протекания ТП, устранения отказов, технического обслуживания, социально необходимо. Экономические критерии используются для сравнения и выбора вариантов таких систем.

Однако в большинстве ситуаций конкурентными по отношению к автоматическим линиям являются производственные участки из незави-

симо действующих машин-автоматов и полуавтоматов или даже из неавтоматизированного оборудования. И если при переходе к более высокой ступени автоматизации не меняются радикально основные ТП, на первый план выходят следующие вопросы: совместимости последовательно действующего оборудования, полноты замещения механизмами автоматизации ручных операций, надежности в работе всех компонентов и системы в целом. Примеры тому были приведены в разд. 1.4 гл. 1.

Бесконечное разнообразие современной промышленной продукции и методов ее получения предопределяет множественность конструктивных и компоновочных вариантов автоматических линий в различных отраслях и даже внутри отраслей.

Так, в металлообработке на различных технологических переделах, в рамках общей технологии конструкционных материалов давно созданы и функционируют внешне не схожие автоматические литейные, штамповочные, сварочные линии, линии механической и термической обработки, нанесения покрытий, а также узловой сборки, сортировки, упаковки и т.д. Линии для обработки резанием подшипниковых колец совсем не похожи на линии обработки корпусных изделий и т.д.

Тем не менее, принципиальная общность для автоматических линий самого различного назначения прослеживается столь же отчетливо, как и для отдельных образцов машин-автоматов (см. разд. 1.5).

Любые автоматические линии можно отнести к тому или иному виду по следующим отличительным признакам:

– **инструментальной или аппаратной обработке**, когда технологическое воздействие осуществляется либо инструментами (пуансон, фреза, сварочный электрод, лазерный или электронный луч), либо средой (химическое, термическое, жидкостное, вакуумное);

– **непрерывности или дискретности действия**, когда обрабатывающие инструменты или среды при работе линии взаимодействуют с изделиями непрерывно или с паузами;

– **непрерывности или дискретности транспортирования обрабатываемых объектов** с обработкой их на ходу или в остановленном состоянии, с закреплением и фиксацией в рабочих зонах;

– **характеру встраиваемого оборудования**: универсальное, из унифицированных узлов, специальное; одно- или многопозиционное (последовательного, параллельного действия);

– **характеру межагрегатной связи** (жесткая или гибкая), когда оборудование в линии работает либо синхронно, либо несинхронно – при делении на участки и установке межоперационных накопителей;

– **взаимной компоновке** технологического и транспортного оборудования с прохождением трассы транспортирования изделий сбоку, сверху, сквозь рабочие зоны;

– **способности к переналадкам** – невозможности или возможности перехода на производство иной продукции путем переналадки, перекомпоновки, структурного резервирования и т.п.

По всем названным признакам возможна не только общая систематика вариантов, но и единые методы анализа, сравнительной оценки и выбора вариантов.

Едиными для линий любого назначения, в любой отрасли являются источники социального и экономического эффекта (см. гл. 2), а также критерии сравнительного анализа, в первую очередь производительность, надежность в работе, стоимость, комплексные экономические показатели (прибыль, окупаемость затрат и т.д., см. разд. 1.7).

6.2. СТРУКТУРНАЯ ВАРИАНТНОСТЬ

Как отмечалось в гл. 1, **структура любого технического объекта – это состав его компонентов и их взаимосвязь**. Любая автоматическая система машин включает в себя:

– технологическое оборудование с тем или иным видом межагрегатной связи;

– транспортную систему, которая обеспечивает передачу изделий из позиции в позицию;

– накопители межоперационных заделов изделий;

– систему автоматического управления (САУ).

Линии одинакового технологического назначения могут иметь не только разное число позиций в соответствии с выбранной степенью дифференциации и концентрации операций, но и различные виды межагрегатной связи.

В качестве примера на рис. 6.1 показаны структурные варианты однопоточной системы из 12 ед. оборудования ($q = 12$), объединенных единым транспортным потоком изделий. Простейший структурный вариант – автоматическая линия с жесткой межагрегатной связью (иначе – синхронно работающая линия), которая построена как единый участок – число участков равно единице ($\eta_y = 1$) (см. рис. 6.1, вариант *I*).

Здесь все встроенные в системы машины работают в едином ритме. Если межоперационное транспортирование осуществляется дискретно, рабочий цикл построен так же, как и в традиционных карусельных машинах (см., например, циклограмму на рис. 1.20). Обработка (контроль, сборка) изделий на всех позициях начинается одновременно, синхронно.

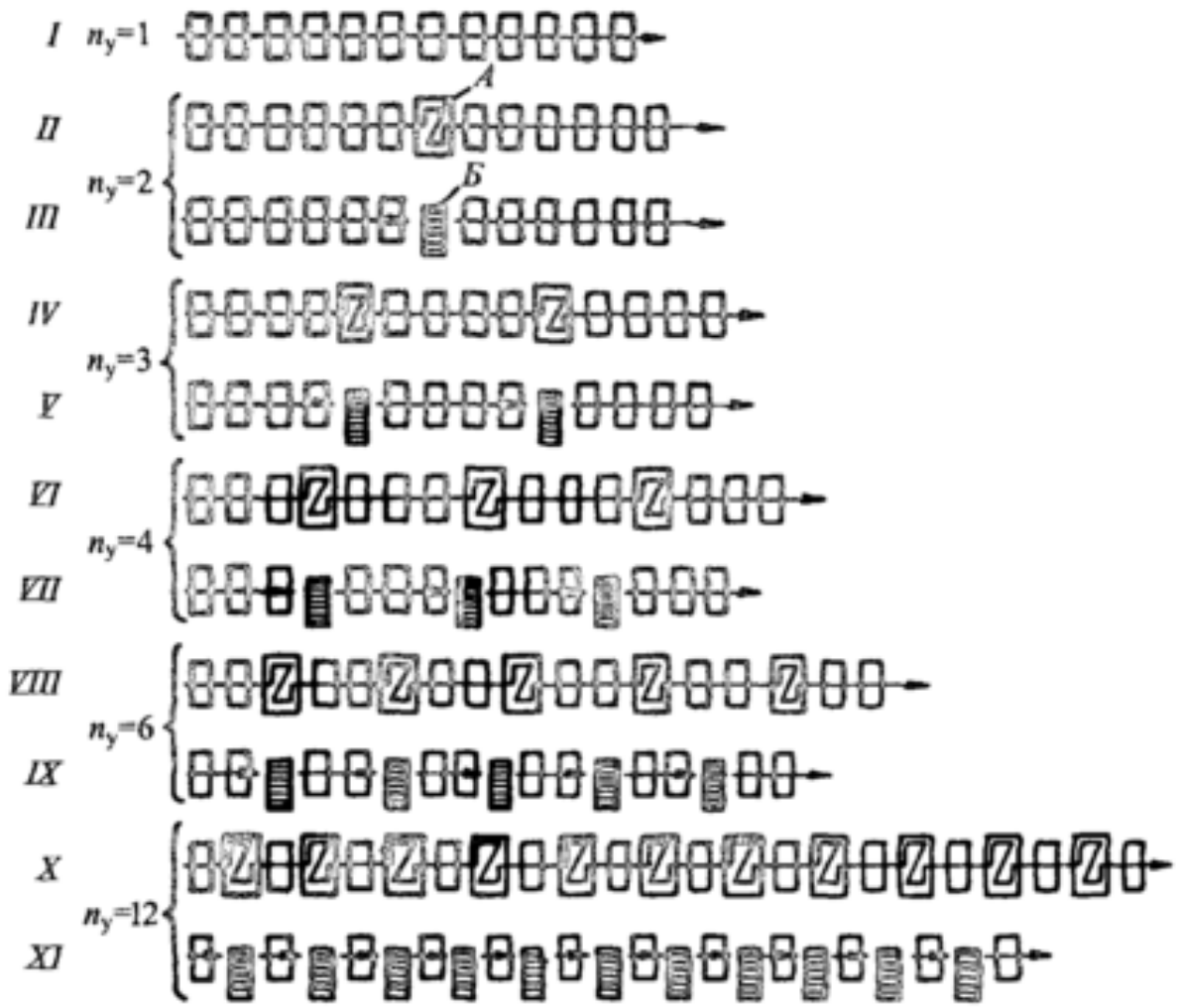


Рис. 6.1. Структурные варианты однопоточной системы из q = 12 машин-автоматов:
А – автоматические накопители;
Б – механизированные накопители с ручным обслуживанием

После того как завершится технологическое воздействие на той позиции, которая является лимитирующей по длительности, следуют разжим и расфиксация изделий на всех позициях одновременно, затем ход транспортера вперед и перемещение каждого из изделий на следующую позицию, далее изделия закрепляются на позициях и цикл повторяется.

Автоматические системы машин с жесткой межагрегатной связью – наиболее простой структурный вариант, который имеет наименьшие конструктивную сложность и стоимость, занимает минимальную производственную площадь. Однако автоматические линии с жесткой межагрегатной связью наименее надежны в работе, так как отказ любого меха-

низма, устройства, инструмента в линии означает отказ всей системы и простой для обнаружения и устранения отказа.

Как уже было сказано, важнейшим структурным методом повышения производительности систем машин является их структурное усложнение – встраивание в системы промежуточных накопителей межоперационных заделов изделий, создание автоматических систем, разделенных на участки, или автоматизированных систем из нескольких, более коротких линий.

Так, по варианту *II* на рис. 6.1 автоматическая линия разделена накопителем на два участка, которые могут функционировать автономно. Теперь при отказе первого участка второй может продолжать работать – происходит накопление промежуточного задела изделий. Если отказ произошел на втором участке, первый все равно будет функционировать, получая изделия из промежуточного задела. При наличии развитой системы управления все переключения режимов функционирования происходят автоматически. Линия работает как единая система, у которой длительность рабочего цикла такая же, как при жесткой межагрегатной связи, а надежность и производительность выше благодаря компенсации внецикловых простоев смежных участков.

Однако вместо единой автоматической двухучастковой системы машин можно создать автоматизированную систему из двух независимо работающих линий, разделенных механизированным накопителем межоперационного задела изделий с ручным или механизированным обслуживанием (см. рис. 6.1, вариант *III*). По сравнению с исходным, базовым вариантом (линия с жесткой межагрегатной связью, $\eta_y = 1$) в обоих случаях повышаются надежность и производительность, но вместе с этим увеличиваются и занимаемая площадь и стоимость, усложняется конструкция. Более дорогой вариант – линия с автоматическим накопителем. Система с механизированным накопителем дешевле, проще в управлении и обслуживании, но с необходимыми затратами ручного труда.

Дальнейшее структурное усложнение системы связано с увеличением числа участков ($\eta_y = 3, 4, 6$), что иллюстрировано диаграммами на рис. 6.1, варианты *IV – IX*.

Предельный вариант – когда система разделяется на предельное число участков, равное числу единиц встроенного технологического оборудования ($\eta_y = q$, см. рис. 6.1, варианты *X*, *XI*). Здесь между каждыми двумя единицами оборудования встраивается автоматический или механизированный накопитель. Вариант *X* по рис. 6.1 получил название автоматической линии с гибкой межагрегатной связью; вариант *XI* (см. рис. 6.1) – автоматизированной поточной линии.

Таким образом, однопоточная система из $q = 12$ машин может быть построена по 11 структурным вариантам, каждый из которых отличается занимаемой площадью, стоимостью, производительностью и надежностью в работе. Номинально внецикловые простои линии по сравнению со сблокированным вариантом (см. рис. 6.1, вариант *I*) уменьшаются во столько раз, на сколько участков разделена линия ($1 < \eta_y \le q$). Однако полная компенсация простоев смежных участков возможна лишь при накопителях с бесконечно большой вместимостью, чего не бывает. Поэтому в каждом конкретном случае существует какая-то доля некомпенсированных простоев.

Автоматические линии с жесткой межагрегатной связью при выбранном числе позиций q конструктивно наиболее просты, имеют минимальную стоимость. Однако им свойственны минимальные производительность и надежность в работе, так как любой отказ любого механизма или инструмента приводит к отказу всей линии. Если считать все станки равнонадежными в работе ($B_1 = \text{const}$), то каждый станок будет простаивать в составе линии с жесткой связью в q раз больше, чем при независимой эксплуатации; следовательно, $B_o = B_1 q$.

Производительность линии с жесткой связью

$$Q = \frac{1}{T}\eta_{а.л} = \frac{1}{T}\frac{1}{1+B_o} = \frac{1}{t_p + t_x}\frac{1}{1+B_1 q}, \qquad (6.1)$$

где B_1 – средние потери одного встроенного в линию станка (простои, отнесенные не к единице продукции, а к единице времени безотказной работы); t_p – время рабочих ходов цикла, определяемое длительностью обработки на лимитирующей рабочей позиции; t_x – время холостых ходов цикла (межстаночное транспортирование, зажим и разжим изделий, быстрый подвод и отвод рабочих органов).

Коэффициент технического использования автоматической линии с жесткой связью согласно общему определению (см. гл. 3)

$$\eta_{а.л} = \frac{1}{1+B_1 q}. \qquad (6.2)$$

Производительность линии с жесткой связью, выраженная через коэффициент использования,

$$Q = Q_ц \eta_{а.л}. \qquad (6.3)$$

Деление автоматической линии на участки с установкой межоперационных накопителей заделов (автоматических или механизированных) позволяет локализовать влияние отказов отдельных механизмов, устройств инструментов.

Так, при делении линии на три участка-секции (см. рис. 6.1, варианты *IV* и *V*), например при отказе одного из станков второго участка, останавливается только данный участок, поскольку внутри него межагрегатная связь жесткая. Первый участок продолжает работать, накапливая изделия в накопителе, третий продолжает работать, получая изделия из накопителя.

Следовательно, если увеличение числа рабочих позиций линии (дифференциация и концентрация операций технологического процесса) позволяет сократить длительность рабочего цикла при одновременном росте внецикловых потерь, деление линии на участки позволяет уменьшить внецикловые потери при сохранении длительности рабочего цикла.

Рассмотрим зависимость производительности автоматических линий от их структурного построения для простейшего случая, когда у всех станков линии одинаковые период рабочего цикла T и уровень внецикловых потерь B_1. Тогда при различных структурных вариантах линия имеет одинаковую цикловую производительность $Q_{\text{ц}}$ и разную величину коэффициента использования.

Коэффициент использования автоматической линии с жесткой межагрегатной связью согласно формуле (6.2)

$$\eta_{\text{а.л}} = \frac{1}{1 + B_{\text{о}}} = \frac{1}{1 + B_1 q}, \tag{6.4}$$

где $B_{\text{о}}$ – суммарные потери сблокированной линии.

Если автоматическая линия делится на участки-секции по методу равных потерь, то при полной компенсации накопителями потерь соседних участков коэффициент использования

$$\eta_{\text{а.л}} = \frac{1}{1 + B_{\text{о}}/n_{\text{у}}}. \tag{6.5}$$

Нетрудно видеть, что величина $B_{\text{о}}/n_{\text{у}}$ представляет собой потери одного участка, в котором жестко сблокировано $q/n_{\text{у}}$ станков. Таким образом, коэффициент использования линии, разделенной на $n_{\text{у}}$ участков, при полной компенсации потерь равен коэффициенту использования одного участка.

Однако полная компенсация возможна лишь теоретически при бесконечной вместимости накопителей, поэтому в реальных условиях каждый участок линии простаивает не только по собственным причинам и вследствие некомпенсированных простоев соседних участков.

Тогда

$$\eta_{а.л} = \frac{1}{1 + (B_0/n)w}, \qquad (6.6)$$

где w – коэффициент возрастания внецикловых потерь i-го участка из-за неполной компенсации потерь накопителей на границах участков ($w > 1$).

Наиболее удобно оценивать работоспособность линии по последнему, выпускному участку, который окончательно формирует качество обрабатываемых изделий. Тогда B_0/n_y представляет собой потери выпускного участка, а w характеризует величину дополнительных потерь данного участка, которые выражаются в потерях из-за отсутствия заготовок, так как простои предыдущих участков компенсируются не полностью.

Аналитически дополнительные потери могут быть выражены через коэффициенты межучасткового наложения потерь Δ, которые показывают численно, какая доля потерь i-го участка передается на выпускной участок через накопители. Например, величина $\Delta = 0{,}2$ означает, что благодаря накопителю на границе между первым и вторым участками 80 % потерь второго участка компенсируется, а 20 % их передается на первый участок при предельных состояниях накопителя (переполнение или опустошение).

Если выпускной участок обозначить индексом 1, а остальные 2, 3, 4 и т.д. в технологическом порядке (рис. 6.2), то в общем виде можно получить

$$\eta_{а.л} = \frac{1}{1 + B_1 + B_2\Delta_{21} + B_3\Delta_{31} + \ldots + B_n\Delta_{n1}}, \qquad (6.7)$$

где $B_1, B_2, \ldots, B_n$ – потери отдельных участков; Δ_{21} – коэффициент наложения потерь второго участка на первый выпускной; Δ_{31} – то же, третьего участка на выпускной.

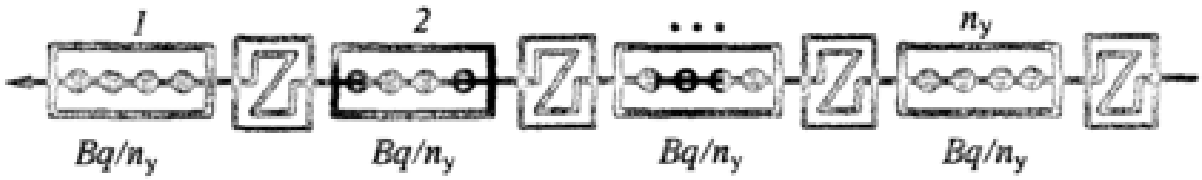


Рис. 6.2. Расчетная схема многоучастковой автоматической линии

Если линия делится на участки по методу равных потерь (B_i = const), формула (6.7) упрощается:

$$\eta_{a.л} = \frac{1}{1 + B(1 + \Delta_{21} + \Delta_{31} + ... + \Delta_{n1})}. \quad (6.8)$$

Численно величины межучасткового наложения потерь $0 < \Delta \leq 1{,}0$ зависят от двух факторов: вместимости накопителей E и отдаленности i-го участка от выпускного. При отсутствии накопителей ($E = 0$) коэффициент межучасткового наложения потерь равен единице ($\Delta = 1$), т.е. все простои данного участка вызывают эквивалентные простои соседнего. Чем больше вместимость межоперационных накопителей, тем меньше межучастковое наложение потерь. В предельном случае, когда $E \to \infty$, $\Delta \to 0$, коэффициенты наложения потерь отдельных участков на выпускной тем меньше, чем дальше расположен данный i-й участок от выпускного, т.е. $\Delta_{21} > \Delta_{31} > \Delta_{41}$ и т.д.

Сравнивая формулы (6.6) и (6.8), получаем общее выражение для коэффициента возрастания потерь w через показатели потерь отдельных участков:

$$w = 1 + \Delta_{21} + \Delta_{31} + \ldots + \Delta_{n1}. \quad (6.9)$$

На практике определение числовых значений коэффициентов межучасткового наложения потерь связано, однако, со значительными трудностями. Так, в процессе эксплуатационных исследований сложных многоучастковых линий обычно среди всей совокупности дополнительных простоев исследуемого участка трудно выяснить, какая доля данных простоев приходится на каждый из остальных участков.

Поэтому наиболее просто непосредственно определить величину возрастания потерь участка, взятого за основу, т.е. величину w. Это тем более целесообразно, что во время прогнозирования производительности и надежности проектируемых автоматических линий расчет межучасткового наложения потерь не может являться самоцелью.

Числовые значения коэффициентов возрастания потерь в многоучастковых автоматических линиях можно определить двумя методами:

– путем обобщения результатов эксплуатационных исследований однотипных действующих автоматических линий;

– математическим моделированием функционирования автоматических линий по тем же исходным данным.

Достоинством первого метода является получение достоверной информации о работе реально действующих объектов любой сложности,

т.е. с любым числом участков и параллельных потоков в каждом из них. Анализ и обобщение такой информации позволяют установить исходные данные, вполне пригодные для расчета проектируемых систем.

Так, исследования работоспособности линий подшипниковой промышленности, каждая из которых включает в себя десятки единиц технологического оборудования, показывает, что даже для станков лимитирующих операций возрастание общ.их простоев составляет не более 15...20 %. т.е. $w = 1{,}15...1{,}25$.

Эту цифру и можно принимать за основу укрупненных расчетов при проектировании новых линий. В двух-, трехучастковых линиях из агрегатных станков при достаточно высокой вместимости накопителей (E = 40...60 мин) коэффициенты возрастания простоев находятся в пределах $w = 1{,}10...1{,}20$. Такие укрупненные данные оказываются тем менее достоверными, чем ниже вместимость накопителей, что является тенденцией развития автоматических линий.

Наиболее перспективный метод оценки величины межучасткового наложения потерь и их возрастания в сложных автоматических линиях – статистическое моделирование их работы.

В основу статистического моделирования положен метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), по которому согласно задаваемой системе случайных чисел, характеризующих интервалы безотказной работы и простоев, "проигрываются" ситуации, возникающие в реальных автоматических линиях.

На рис. 6.3 показана диаграмма зависимости межучасткового наложения потерь от накопителей, полученная математическим моделированием. Из нее видно, что при принятых в настоящее время вместимостях накопителей (E = 60...80 мин) межучастковое наложение потерь, которое можно определить с достаточной точностью как производительность лимитирующего участка, с учетом длительности его цикла и собственных внецикловых потерь составляет 10...15 % от их величины даже при весьма низких показателях надежности (B_0 = 0,66...1,5).

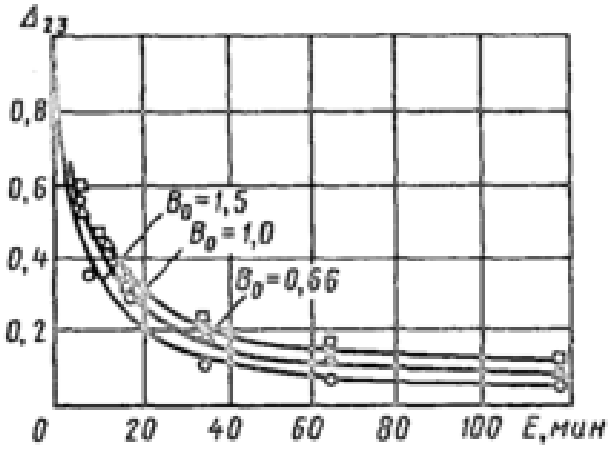


Рис. 6.3. Зависимость коэффициента межучасткового накопления потерь от вместимости накопителей и внецикловых потерь

Для теоретического анализа и выявления характера влияния определяющих параметром на производительность многоучастковых автоматических линий целесообразно применение упрощенных аналитических зависимостей. Введем понятие "средний коэффициент наложения потерь" Δ, который численно показывает, какую долю потерь в среднем каждый из остальных $(\eta_y - 1)$ участков передает на выпускной участок.

Тогда

$$\Delta_{21} + \Delta_{31} + \ldots + \Delta_{n1} = \Delta(n_y - 1) \qquad (6.10)$$

Отсюда согласно формуле (6.9) коэффициент возрастания

$$w = 1 + (n_y - 1)\Delta. \qquad (6.11)$$

Подставляя значение w в формулу (6.6), получаем зависимости коэффициента технического использования автоматической линии и ее производительности от числа участков n_y и надежности встроенного оборудования (B или $\sum t_п$):

$$\eta_{а.л} = \frac{1}{1 + \frac{Bq}{n_y}[1 + \Delta(n_y - 1)]}; \qquad (6.12)$$

$$Q_{а.л} = \frac{1}{T + \frac{t_п q}{n_y}[1 + \Delta(n_y - 1)]}. \qquad (6.13)$$

Формулы (6.12) и (6.13) являются обобщенными и справедливы для всех возможных структурных вариантов: от поточной линии до автоматической линии с жесткой связью. Эти варианты при одинаковых числе станков q и величине внецикловых потерь $t_п$ отличаются числом участков, величинами компенсируемых потерь и их межучасткового наложения (n_y, Δ), а следовательно, и величиной производительности.

В поточной линии, где каждый станок работает независимо и межоперационные заделы при мелких деталях достаточно велики, $n_y = q$; $\Delta \approx 0$; $w \approx 1{,}0$. Подставляя эти значения в формулу производительности (6.13), получаем:

$$Q_{п.л} = \frac{1}{t_р + t_х + t_п} = \frac{1}{T + t_п}.$$

В поточных линиях для обработки крупных деталей создание больших межоперационных заделов затруднительно. Так, в линиях для обработки корпусных деталей, где заготовки между станками транспортируются по рольгангам, величина межоперационных заделов ограничивается длиной рольгангов, поэтому коэффициент наложения потерь больше нуля ($\Delta > 0$).

В автоматических линиях с гибкой связью, где число участков равно числу станков $n_y = q$, $\Delta > 0$; $w > 1{,}0$. Отсюда производительность линии с гибкой связью

$$Q_{а.л} = \frac{1}{t_р + t_х + t_п[1 + \Delta(n_y - 1)]} = \frac{1}{T + t_п}. \qquad (6.14)$$

Учитывая, что любая линия с гибкой связью состоит из значительного числа параллельно и последовательно работающих станков, весьма мало зависящих друг от друга, единое понятие "коэффициент технического использования" для линий данного типа физического смысла не имеет.

Подставляя в обобщенную формулу (6.13) различные значения n_y, Δ, q, можно получить производительность автоматической линии при любом структурном варианте: от линии с гибкой связью ($n_y = q$) до линии с жесткой связью ($n_y = 1{,}0$). Минимальную производительность имеет линия с жесткой межагрегатной связью, а также линия, конструктивно выполненная из нескольких участков, однако без заделов между ними. В этих случаях $n_y = 1$, $\Delta = 1{,}0$ и внецикловые потери каждого станка возрастают в q раз.

На рис. 6.4 показана зависимость производительности от выбранной схемы компоновки и степени компенсации потерь для линии из $q = 18$ станков. Возможные значения производительности находятся между Q_I – производительностью линии с жесткой связью и Q_{IV} – производительностью поточной линии. На графике показаны также значения Q_{III} – производительность линии с гибкой связью при $\Delta = 0{,}1$ и Q_{II} – производительность линии, разделенной на три участка при такой же степени компенсации потерь.

Графики показывают, что деление линии на участки имеет убывающую эффективность повышения производительности, особенно при неполной компенсации потерь. Чем больше участков линии, тем меньший прирост производительности дает прибавление каждого нового накопителя.

При высоких требованиях к производительности необходим переход к многопоточным автоматическим линиям, которые, как правило, также делятся на участки-секции с помощью автоматических накопителей. При этом в зависимости от длительности рабочего цикла на различных участках число параллельных потоков в них также может быть различным, тем самым уравнивается производительность отдельных участков-секций.

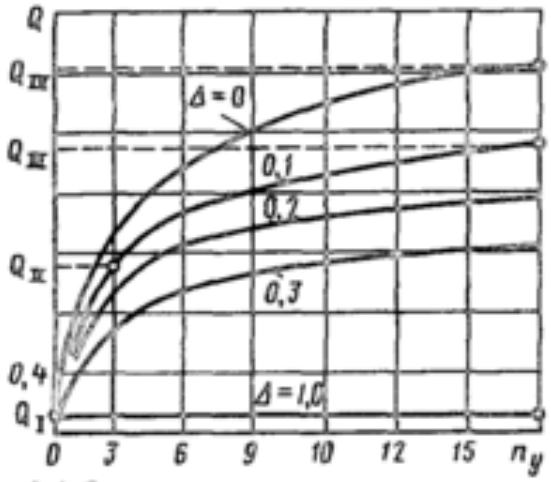


Рис. 6.4. Зависимость производительности автоматических линий от числа участков-секций и степени компенсации потерь

В многопоточных линиях

$$p_i / T_i = \text{const},$$

где p_i – число параллельных потоков i-го участка; T_i – рабочий цикл i-го участка.

Если линия разделена на участки по методу равных потерь, то собственная (при независимой эксплуатации) производительность отдельных участков становится одинаковой.

Так как параллельные потоки обработки конструктивно независимы (рис. 6.5), то производительность при p параллельных потоках выше по сравнению с однопоточной линией в p раз; расчет, как и для любых линий, целесообразно проводить по выпускному участку. Производительность многопоточной линии

$$Q_{\text{а.л}} = \frac{p}{T} \frac{1}{1 + \dfrac{Bq}{n_y} w}, \quad (6.15)$$

где p – число потоков выпускного участка; T – длительность рабочего цикла последнего участка; w – коэффици-

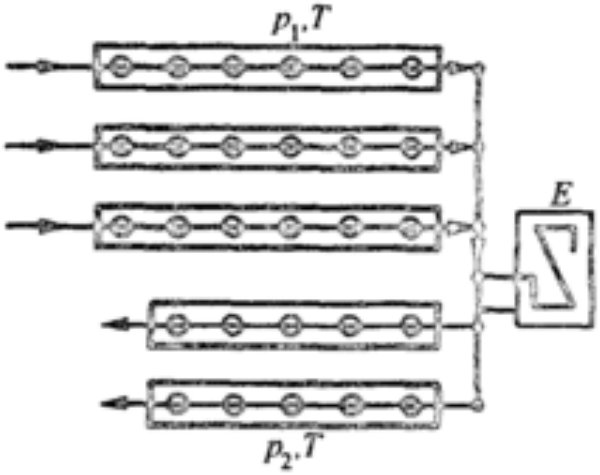


Рис. 6.5. Структурная схема многопоточной многоучастковой автоматической линии

ент возрастания простоев выпускного участка из-за неполной компенсации отказов предыдущих участков; B – внецикловые потери одного станка (рабочей позиции); q – число рабочих позиций.

В тех случаях, когда равенство $p/T = \text{const}$ по каким-либо причинам не соблюдается и один из участков по собственной производительности является лимитирующим, необходимо определять производительность линии именно по этому участку.

Рост производительности при делении на участки-секции для многопоточных линий имеет такую же тенденцию убывания, как и для однопоточных.

Поскольку от введения накопителей рабочий цикл не меняется, относительный рост производительности

$$\varphi = \frac{Q_{n_y}}{Q_1} = \frac{1 + Bq}{1 + \frac{Bq}{n_y} w} = \frac{1 + Bq}{1 + \frac{Bq}{n_y}[1 + \Delta(n_y - 1)]}. \qquad (6.16)$$

В то же время дополнительные затраты (накопители, усложнение транспортной системы) растут пропорционально числу участков-секций n_y:

$$K_{доп} = 1 + K_н(n_y - 1).$$

Относительное удорожание линии

$$\sigma = \frac{K_1 q + K_н(n_y - 1)}{K_1 q} = 1 + \frac{K_н(n_y - 1)}{K_1 q} = 1 + \frac{\alpha}{q}(n_y - 1), \qquad (6.17)$$

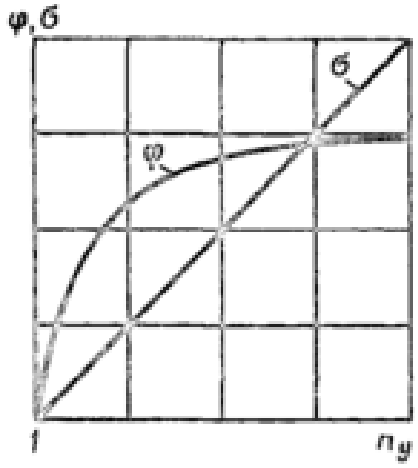


Рис. 6.6. Относительный рост производительности φ и удорожания σ автоматической линии при делении ее на участки-секции

где K_1 – средняя стоимость одной позиции при жесткой межагрегатной связи; $K_н$ – стоимость одного накопителя; α – относительная стоимость накопителя.

На рис. 6.6 представлены графики зависимости роста производительности φ и удорожания σ линии при делении ее на участки-секции. Поскольку один из параметров (σ) изменяется монотонно, а другой – асимптотически (φ), существует экономический оптимум, т.е. оптимальные структурные варианты.

Реплика. Здесь тот же подход (сопоставления выигрыша и проигрыша при изменении ведущего параметра с различными закономерностями их изменения), который был ранее использован при оценке оптимальных режимов обработки (см. разд. 3.3) и оптимального числа позиций в автоматах последовательного действия (см. разд. 5.2). Это универсальный подход к сравнительному анализу и оптимальному выбору вариантов по широкому кругу технических решений и критериев оценки. В данном случае ставится задача экономически оптимального уровня надежности линии, так как максимальная надежность при $n_y = q$ и минимальная при $n_y = 1$, как правило, неоптимальны.

Экономически оптимальный структурный вариант линии определяется по общей формуле (см. разд. 2.1):

$$C_{n_i} = \left(0{,}35K_1\sigma + \frac{Зпл}{\varepsilon}\right)\varphi,$$

где К и Зпл – характеристики стоимости и эксплуатационных затрат исходного варианта – линии с жесткой межагрегатной связью; σ, φ, ε, – сравнительные характеристики вариантов с делением линии на участки-секции согласно функциональным зависимостям (6.16) и (6.17).

Так как итоговый результат оптимизации неизбежно округляется – линию можно разделить только на целое число участков – расчеты целесообразно упростить, приняв для сравниваемых вариантов

$$Зпл = \text{const};\ w = 1{,}0;\ \varepsilon = 1{,}0. \qquad (6.18)$$

Тогда

$$C_{n_i} = \left\{0{,}35K_1 q\left[1 + \frac{\alpha}{q}(n_y - 1)\right] + Зпл\right\}\frac{1 + Bq}{1 + \frac{Bq}{n_y}}.$$

Взяв производную $\frac{dC_{n_i}}{dn_y}$ и приравняв ее к нулю, получим

$$n_{y\,опт} = \sqrt{\frac{Bq}{\alpha}\,\frac{0{,}35K_1 + Зпл}{0{,}35K_1}}. \qquad (6.19)$$

Таким образом, экономически оптимальная структура автоматической линии зависит от ее протяженности q, стоимости основного оборудования K_1 и накопителей α, надежности оборудования в работе B.

Отсюда можно рассчитать, например, максимальную протяженность q_{max} автоматической линии с жесткой межагрегатной связью ($n_y = 1$).

Подставляя в формулу (6.19) значение $n_y = 1{,}0$ и пренебрегая показателем фонда заработной платы Зпл = 0 (в реальных случаях это дает ошибку около 5 %, что сопоставимо с последующим округлением результата), получаем

$$q_{max} = \sqrt{\frac{\alpha}{B_1}} . \qquad (6.20)$$

Как видно, максимальная протяженность линий или их участков с жесткой связью зависит только от надежности оборудования в работе B_1 и относительной стоимости α накопителей.

В автоматических линиях из агрегатных станков надежность работы оборудования достаточно высока, собственные внецикловые потери невелики (B_1 = 0,02…0,03; см. разд. 10.3), накопление изделий происходит на горизонтальных приводных рольгангах, стоимость одного накопителя которых значительно выше стоимости однопозиционного двустороннего агрегатного станка (α = 2…3). Тогда q_{max} = 8…10 позиций, что подтверждается практикой конструирования.

В то же время в автоматических линиях обработки колец подшипников межоперационные заделы создаются, как правило, в подводящих лотках транспортных систем; варьирование величиной межоперационных заделов требует лишь изменения длины лотков с минимальными дополнительными затратами (α = 0,03…0,05). Внецикловые потери значительно выше, чем в линиях из агрегатных станков, например в линиях токарной обработки B = 0,15…0,20 и более, в шлифовальных линиях B = 0,05…0,08. Практически во всех линиях подшипникового производства $B \geq \alpha$, а следовательно, $q_{max} = 1$ (меньше одного станка в линии не бывает!). Поэтому данные линии всегда создаются с гибкой межагрегатной связью ($n_y = q$).

6.3. ТРАНСПОРТНО-НАКОПИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Транспортно-накопительные системы автоматических линий по принципу действия, конструкции и компоновке зависят от вида обрабатываемых изделий, в меньшей степени – от выполняемых операций.

Рассмотрим в качестве примера системы для двух видов дискретных изделий:

– корпусных, неподвижных при обработке, которые могут иметь только принудительное транспортирование. Такие изделия обрабатываются, как правило, на линиях с жесткой межагрегатной связью (по линии целиком или в пределах одного участка-секции);

– изделий типа тел вращения (кольца, втулки, фланцы и т.п.), способных перемещаться качением или скольжением, принудительно или под действием сил собственной тяжести.

Такие изделия обрабатываются в основном на линиях с гибкой межагрегатной связью, т.е. с накоплением заделов между каждой парой станков.

В линиях с жесткой межагрегатной связью транспортно-накопительная система включает в себя следующие виды механизмов и устройств:

– шаговые линейные транспортеры для перемещения изделий из позиции в позицию;

– поперечные транспортеры для подачи изделий при боковом транспортировании;

– механизмы изменения ориентации между позициями;

– механизмы зажима и фиксации на рабочих позициях;

– накопители межоперационных заделов;

– приспособления-спутники для закрепления и транспортирования изделий с неустойчивым базированием;

– механизмы транспортирования и уборки стружки.

На рис.6.7 показаны конструктивные варианты шаговых транспортеров.

Наибольшее применение нашли шаговые штанговые транспортеры с собачками (см. рис. 6.7, *а*). При перемещении обрабатываемых деталей *3* вперед (по схеме вправо) штанга *1* транспортера совершает возвратно-поступательное движение (медленное вперед и быстрое назад). В качестве привода обычно служит гидроцилиндр. При движении вперед собачки *2* с пружинами захватывают детали, перемещая их на следующую позицию. При движении назад собачки утапливаются и проходят под деталями.

Основное достоинство шагового штангового транспортера с собачками – штанга совершает простое прямолинейное возвратно-поступательное движение; конструкция пневмо- или гидропривода транспортера простая.

Главный недостаток шаговых штанговых транспортеров с собачками – сложность обеспечения точного позиционирования деталей на рабочих позициях станков.

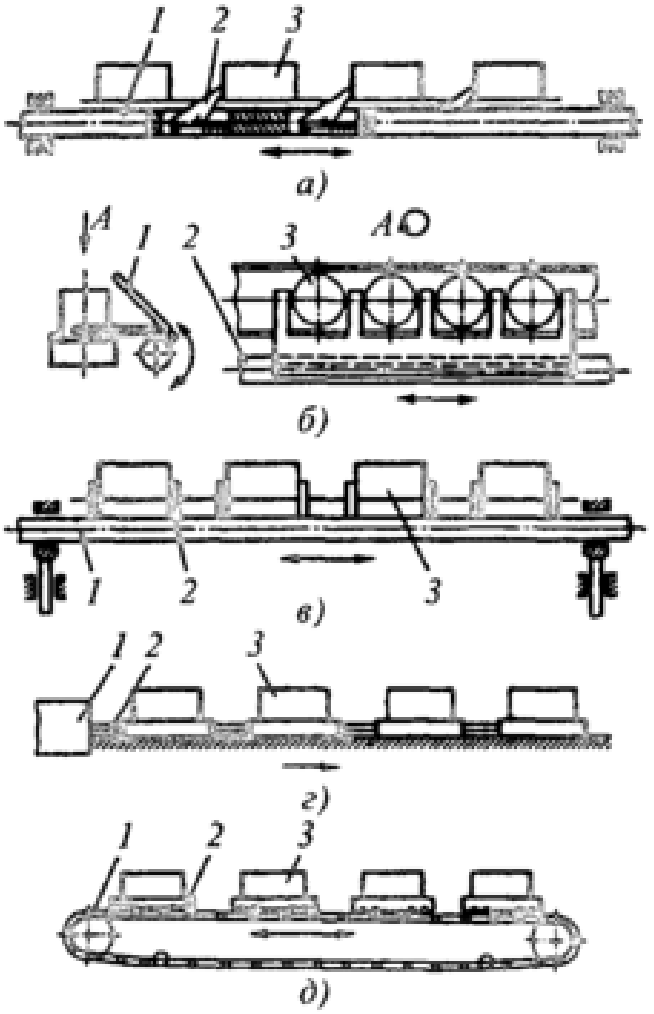


Рис. 6.7. Шаговые транспортеры линий с жесткой межагрегатной связью

Штанговые транспортеры с флажками (см. рис. 6.7, *б*) обеспечивают более точное перемещение и базирование обрабатываемых деталей на рабочих позициях линии. Точность положения деталей на рабочих позициях при перемещении их флажковыми транспортерами определяется в основном допуском зазора между флажками *1* и деталью *3*. Эти транспортеры вследствие более точного обеспечения конечного положения деталей допускают и большую скорость перемещения.

Штанги *2* таких транспортеров совершают прямолинейное возвратно-поступательное движение и поворотное движение вокруг своей оси. Обрабатываемые детали перемещаются только при движении штанги вперед.

Конструктивно транспортеры с флажками гораздо сложнее, чем с собачками, так как для штанги кроме возвратно-поступательного движения требуется и поворотное движение вокруг своей оси. Поворот штанги

с флажками вокруг оси для освобождения детали осуществляется дополнительным приводом, вследствие чего управление усложняется.

Грейферные шаговые транспортеры с флажками (см. рис. 6.7, *в*) перемещают обрабатываемую деталь *3* флажками *2*. Конструкция таких транспортеров получается сложной, потому что штанга *1* транспортера совершает два возвратно-поступательных движения: в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Транспортеры подобного вида применяют обычно в тех случаях, когда захват обрабатываемых деталей может быть проведен лишь с одной стороны, т.е. когда обрабатываемые детали установлены на рабочих позициях станков таким образом, что сначала их необходимо поднять, а затем переместить на следующие операции для дальнейшей обработки.

Цикл работы транспортера: ход вверх (подъем всех заготовок), перемещение заготовок на один шаг вправо (по схеме), опускание их на направляющие и возврат транспортера в первоначальное положение. В качестве привода такого транспортера может быть использован гидроцилиндр с применением механических устройств.

К шаговым транспортерам относятся и толкающие шаговые транспортеры (см. рис. 6.7, *г*). Они просты по конструкции, так как шток *2* гидроцилиндра *1*, перемещая изделия *3* вплотную друг за другом, воздействует лишь на последнее из них. При движении штока *2* вперед все находящиеся на транспортере обрабатываемые детали перемещаются одновременно вдоль линии благодаря взаимному давлению деталей или транспортных устройств.

Недостатками таких систем являются возрастание накопленной ошибки положения каждой последующей детали и усложнение вследствие этого фиксации на рабочих цилиндрах.

Для сквозного транспортирования деталей в автоматических линиях широко применяются цепные транспортеры (см. рис. 6.7, *д*). Цепь *1* получает возвратно-поступательное движение. Изделия *3* на тележках *2* перемещаются с помощью собачек. Из-за невозможности обеспечения точности базирования деталей цепные транспортеры, как правило, не используются в качестве шаговых, хотя близки к ним.

Если детали могут быть на каждой позиции зафиксированы и зажаты, они перемещаются по транспортеру свободно на плоскостях и закрепляются в местах обработки в стационарных приспособлениях.

Детали сложной формы, не имеющие обработанной базовой поверхности, например корпуса вентилей, трудно автоматически фиксировать и закреплять на позициях обработки, поэтому их устанавливают в начале

обработки в спутники, на которых детали закрепляются и проходят всю зону обработки – от загрузки до выгрузки. Спутники имеют плоскости скольжения и опорные базы для закрепления в позициях обработки. Они перемещаются вдоль линии и на каждой позиции фиксируются и закрепляются.

Необходимыми условиями надежной работы являются контроль правильной фиксации и достаточная сила зажима, осуществляемого автоматически. Постоянство силы зажима в течение всего периода обработки обеспечивается применением активного зажима, при котором сила гидро- или пневмопривода поддерживается постоянной.

На рис. 6.8 представлены две схемы фиксации, осуществляемые двумя пальцами. По первой схеме (см. рис. 6.8, *в*) фиксация заготовки происходит более точно, чем по второй (см. рис. 6.8, *г*). Однако вторая схема обладает рядом преимуществ: в ней проще система передающих рычагов; меньше отказов в работе; лучше доступ к рабочему месту; легко устраняются возникшие неисправности.

Деталь (см. рис. 6.8, *а*) прижимается к направляющим *5*, по которым она и скользит. С течением времени эта поверхность истирается и деталь с приспособлением-спутником опускается, что приводит к длительному

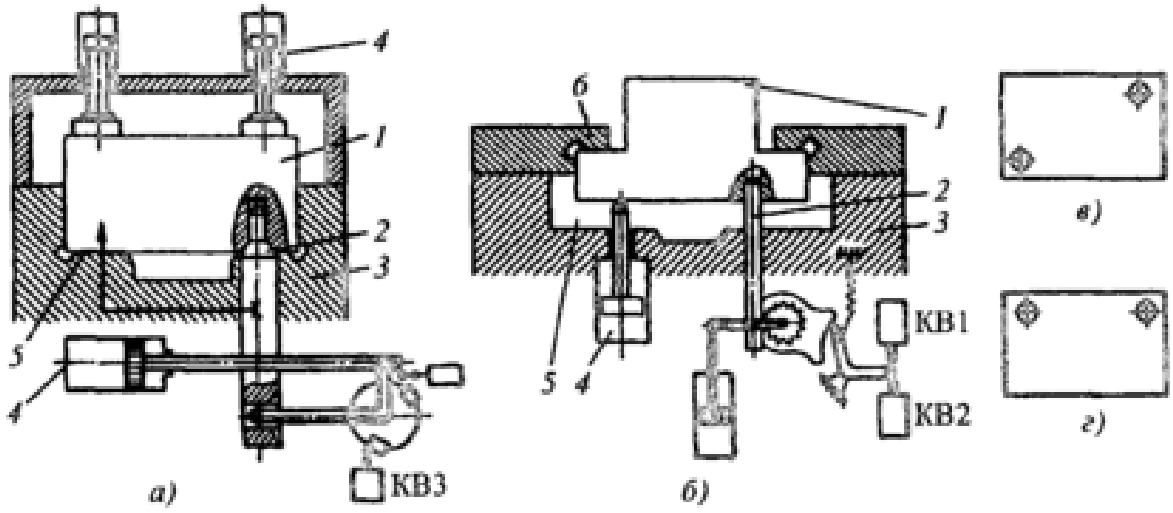


Рис. 6.8. Типовые схемы фиксации корпусных деталей на приспособлении-спутнике в рабочей позиции автоматической линии:
а – с прижимом вниз; *б* – с поджимом вверх; *в* и *г* – первая и вторая схемы фиксации соответственно; *1* – обрабатываемая деталь; *2* – фиксатор; *3* – стационарное приспособление; *4* – цилиндры для зажима и фиксации деталей; *5* – опорная поверхность стационарного приспособления; *6* – верхняя направляющая приспособления; КВ1 – КВ3 – конечные выключатели

простою, так как неисправность можно устранить либо поднятием опорных поверхностей, либо опусканием агрегатных головок.

На рис. 6.8, *б* представлена схема, не имеющая этого недостатка. Деталь установлена в приспособлении-спутнике, который движется по направляющим *5*, а прижимается во время обработки к верхним опорным поверхностям по направляющей плоскости *6*. В этом случае сила зажима не передается через всю деталь, которая при зажиме не деформируется. Кроме того, открыт свободный доступ к детали.

Сложные корпусные изделия, обрабатываемые с нескольких сторон на протяженных автоматических линиях, требуют зачастую неоднократного изменения базирования (рис. 6.9).

Механизмы поворота вокруг вертикальной оси называют обычно поворотными столами, вокруг горизонтальной – поворотными барабанами.

Конструктивная схема поворотного стола приведена на рис. 6.10. Отличительная черта: данный стол благодаря механизмам зажима дает возможность после поворота и проводить обработку изделий.

Накопители межоперационных заделов в линиях для корпусных деталей располагаются между участками-секциями (см. рис. 6.5), компонуются по горизонтали и поэтому занимают значительную площадь.

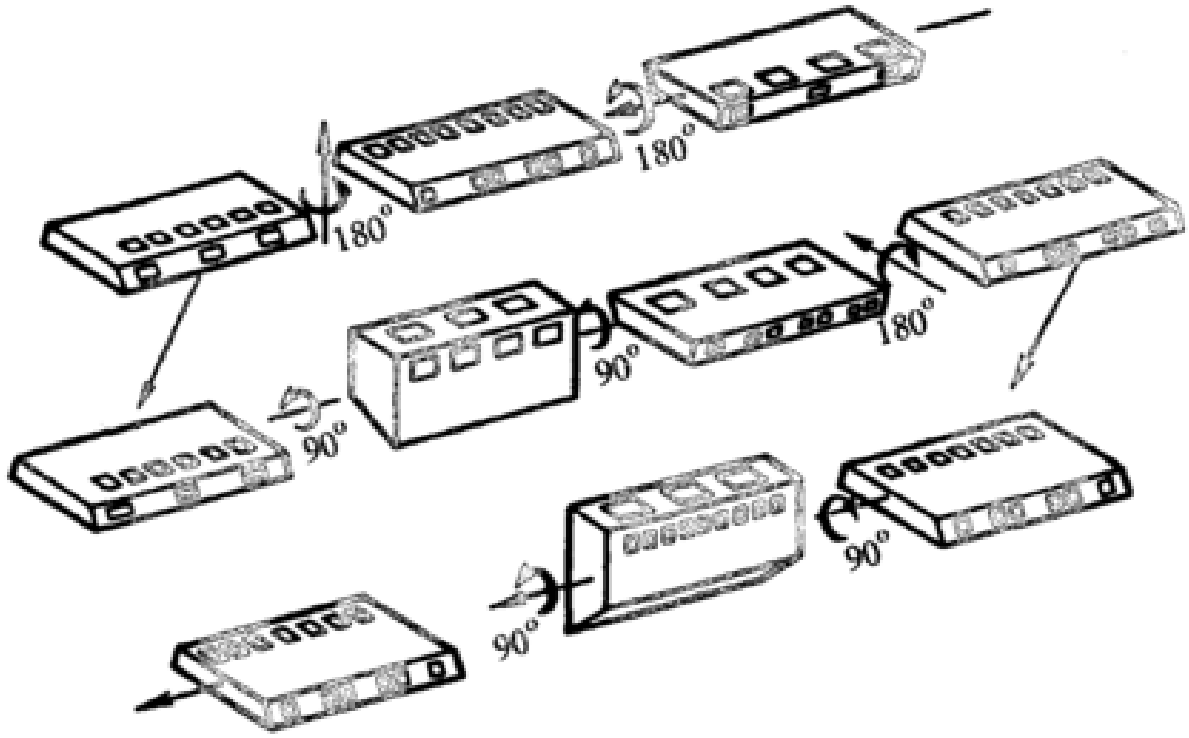


Рис. 6.9. Последовательность изменения базирования корпусной детали при многосторонней обработке

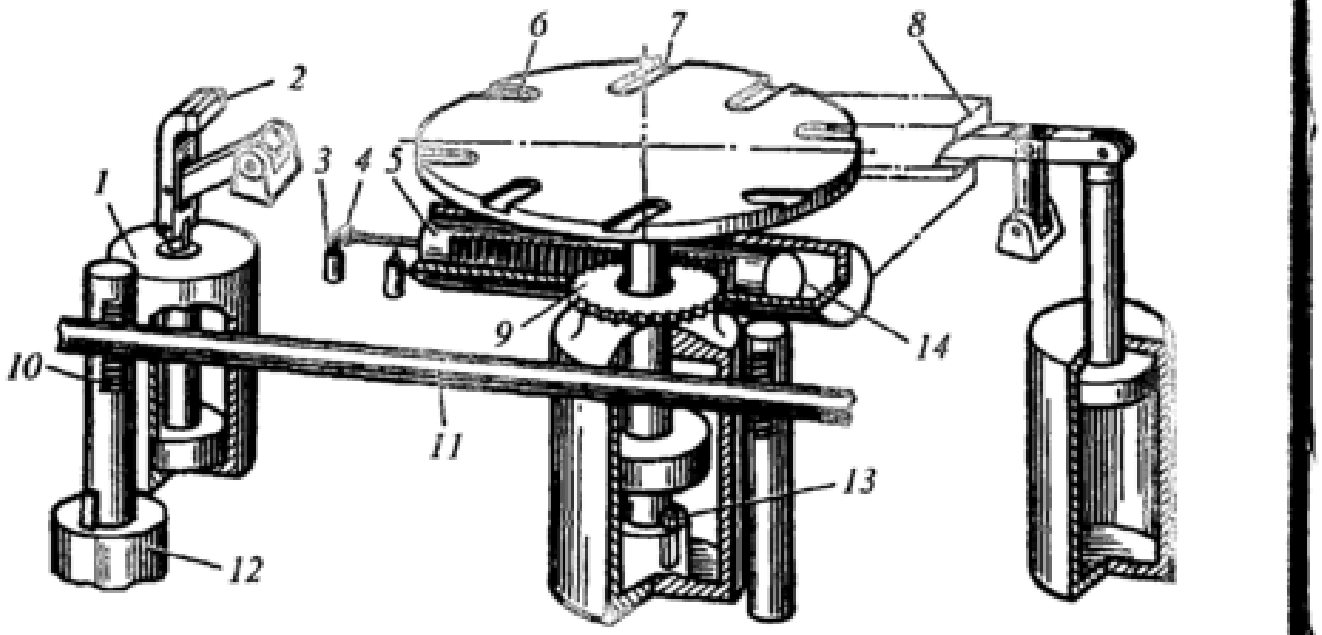


Рис. 6.10. Конструктивная схема поворотного стола для корпусного изделия в приспособлении-спутнике:
1 – гидроцилиндр зажима спутника; *2* – кронштейн зажима; *3* – датчики крайних положений стола; *4* – путевой кулачок контроля; *5* – гидроцилиндр поворота; *6*, *7* – пазы на плоскости поворотного стола; *8* – транспортер продольного перемещения спутника; *9* – зубчато-реечный механизм привода поворота; *10* – шток фиксатора; *11* – тяга фиксатора; *12* – направляющая фиксатора; *13* – направляющая шпонка механизма подъема стола; *14* – гидроцилиндр поворота стола

Автоматический накопитель, приведенный на рис. 6.11, контактирует со смежными участками посредством их шаговых транспортеров *1* и *11* и поворотных столов *2* и *10*. Накопитель имеет четыре транспортные трассы *3* – *6*; изделия перемещаются по направляющим планкам *7* посредством штанг *8* с подпружиненными собачками *9*.

Магазин-накопитель работает в такой последовательности. При нормальной работе автоматической линии изделия передаются транспортером *3* на транспортер *11*, а затем к автоматам последующего участка. При останове этого участка автоматически выключаются транспортеры *3* и *11*, а включаются транспортеры *4* – *6*, которые имеют общий привод, а следовательно, работают синхронно. При заполнении транспортера *11* детали подаются в магазин транспортерами *4* – *6*. Для совершения одного хода последних транспортер *1* выполняет три хода. При заполнении транспортеров деталями магазин выключается, и вместе с ним прекращается работа участка автоматической линии.

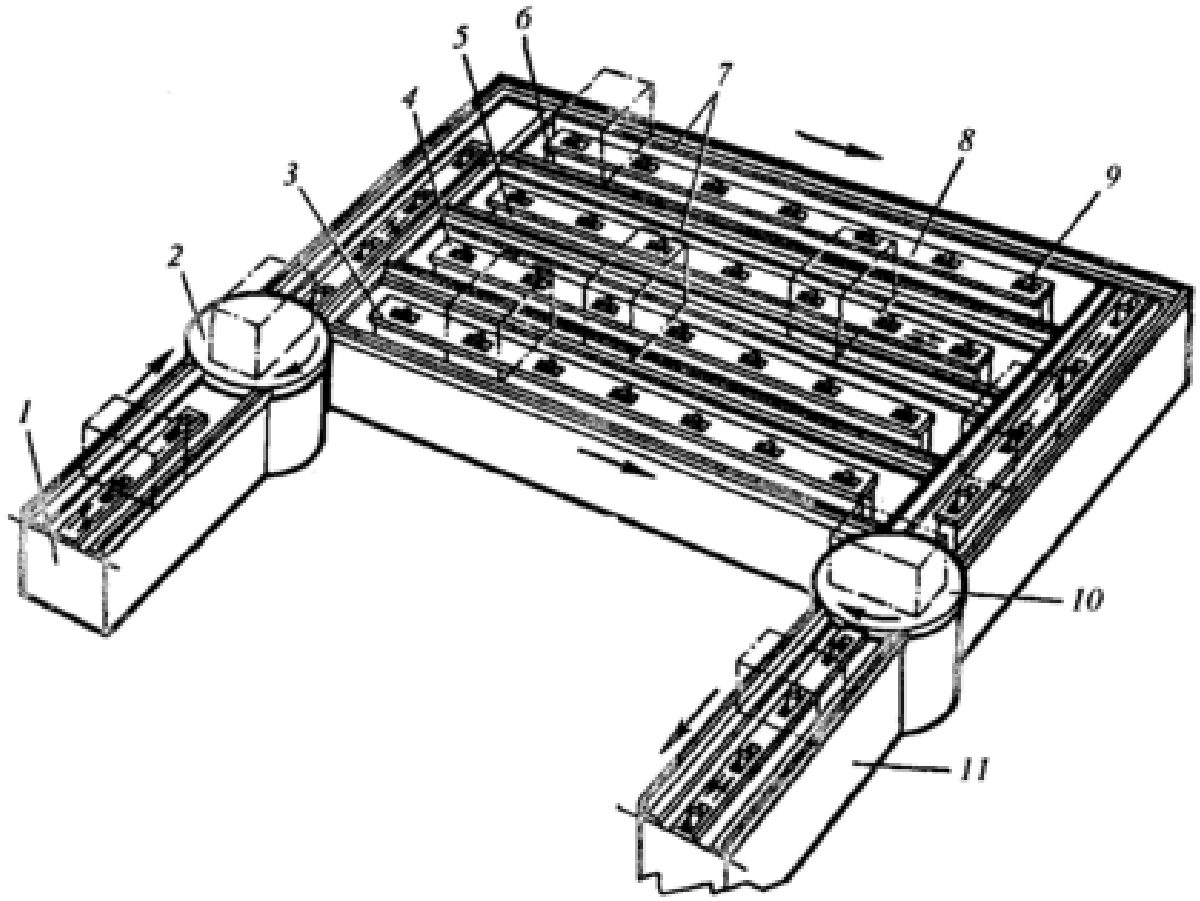


Рис. 6.11. Накопитель межоперационных заделов в линии обработки корпусных изделий

При останове предыдущего участка линии последующий может работать, используя запас изделий в магазине. В этом случае выключаются транспортеры *1* и *3*, а работают транспортеры *4 – 6* и *11*. С помощью транспортеров *4 – 6* изделия выдаются на транспортер *11*. За один ход транспортеров *4 – 6* транспортер *11* совершает три хода. Когда изделия из магазина будут израсходованы, работа последующего участка автоматически прекратится.

Особенностью конструкции транспортеров *4 – 6* является возможность перемещения изделий в обе стороны. Для этого подвижные штанги транспортера снабжены двумя рядами крановых упоров, причем расположение одного ряда диаметрально противоположно расположению другого (второй ряд собачек на рисунке не виден).

При одном положении штанг изделия перемещаются в направлении к транспортеру *11*, а при повороте на 180° – в сторону транспортера *1*. Необходимость обратного движения изделий в магазины возникает при переключении работы линии на магазин, имеющий некоторый запас из-

делий, находящихся в конце магазина. В этом случае нужно, прежде всего, переместить их назад к транспортеру *1*, а затем запустить предыдущий и последующий участки линии.

Механизмы и устройства, примеры которых приведены на рис. 6.7 – 6.11, компонуются в единые системы в соответствии с выбранной структурной схемой линии (см. рис. 6.1).

Один из простейших вариантов приведен на рис. 6.12. Он включает в себя девять силовых головок *2*, пять стационарных приспособлений *4* для зажима и фиксации изделий, шаговый транспортер *3* для перемещения изделий из позиции в позицию.

В позиции *1* заготовка устанавливается на транспортер, в позиции *5* обработанная деталь снимается и передается на последующую обработку.

Автоматические линии с гибкой связью строятся преимущественно для обработки изделий типа коротких тел вращения (кольца подшипников, шестерни, всевозможные колпачки, втулки, гильзы, фланцы и др.). Их особенностью является возможность перемещения под действием силы собственной тяжести, что широко используется при межстаночном транспортировании, накоплении заделов и т.д.

Исходным материалом служат как непрерывные (труба, пруток), так и штучные заготовки, получаемые прокаткой, ковкой, штамповкой, реже литьем.

Наиболее распространенные операции обработки токарные и шлифовальные, что позволяет для данных типов изделий создавать типовые технологические процессы как стабильную основу для создания автоматических систем машин.

Широкое применение нашли так называемые групповые автоматические линии как системы последовательно-параллельного действия (см. разд. 5.4). Каждая линия – это, по существу, блок коротких линий с единой транспортно-накопительной системой (рис. 6.13). Каждая заготовка из накопителя попадает через подъемник на транспортер-распределитель, обрабатывается сначала на одном станке, затем на другом в одной из параллельно работающих ветвей (на рис. 6.13 их восемь), возвращается на транспортер-распределитель, который и передает ее на выход линии.

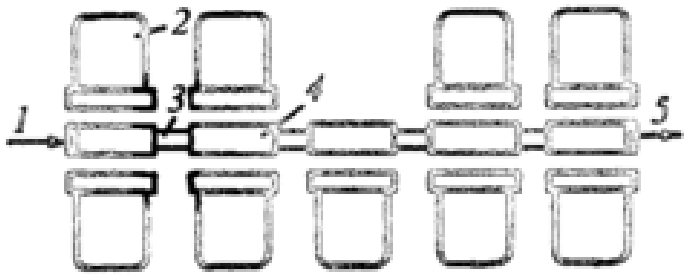


Рис. 6.12. Компоновка участка автоматических линий для обработки корпусных изделий

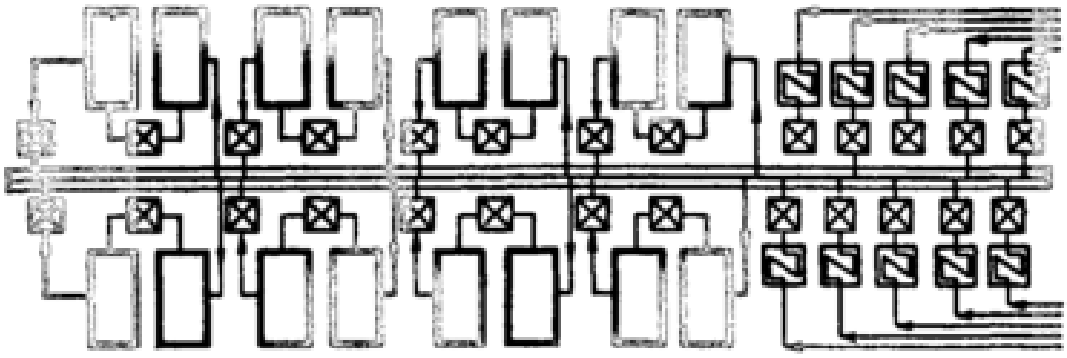


Рис. 6.13. Структурная схема групповой линии с гибкой межагрегатной связью

Другой вариант автоматической системы последовательно-параллельного действия приведен на рис. 6.14. Здесь станки первой и второй операций дистанционно разнесены и сгруппированы в два участка, число параллельно работающих станков на каждом участке определяется заданной величиной производительности (на рис. 6.14 в обоих участках по четыре станка).

По способам перемещения изделий и распределения общего потока по параллельно-работающим машинам-автоматам можно отметить следующие виды транспортных систем линий с гибкой межагрегатной связью:

– транспортные с гравитационным перемещением – простейшие системы, где перемещение и распределение деталей по станкам происходит под действием сил тяжести в наклонных лотках качением либо скольжением;

– транспортные принудительного перемещения деталей качением – системы, в которых используется свойство деталей типа дисков и колец катиться в направляющих;

– транспортные принудительного перемещения деталей скольжением – системы, где детали транспортируются проталкиванием, скольжением по направляющим;

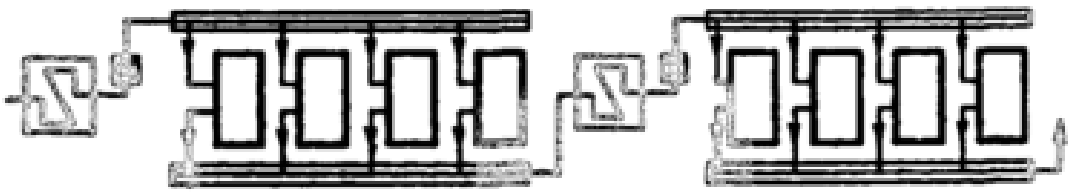


Рис. 6.14. Структурная схема многопоточной линии с гибкой межагрегатной связью

– транспортные принудительного перемещения деталей на транспортирующем органе – системы, в которых детали перемещаются фиксированными либо покоящимися на движущихся и колеблющихся органах транспортных устройств.

Основные виды механизмов и устройств:

– транспортеры-распределители, расположенные обычно над технологическим оборудованием;

– транспортеры-подъемники, поднимающие изделия на транспортер-распределитель от позиции загрузки или после обработки;

– подающие устройства – от транспортера-распределителя или от подъемника непосредственно к технологическому оборудованию;

– механизмы загрузки-съема изделий в рабочих позициях (автоматические манипуляторы);

– отводящие транспортеры для обработки изделий;

– накопители межоперационных заделов;

– механизмы отвода и транспортирования технологических отходов (стружка, облой, смазочно-охлаждающие жидкости и т.д.).

Типовые конструктивные схемы транспортеров-распределителей приведены на рис. 6.15.

Система с гравитационным перемещением изделий показана на рис. 6.15, *е*. Это лотковый транспортер, по которому изделия скатываются к окнам выдачи.

В системах, представленных на рис. 6.15, *г* и *ж*, перемещение деталей происходит поштучно качением поводками цепи тягового органа. Схема на рис. 6.15, *ж* отличается от схемы на рис. 6.15, *г* замкнутой траекторией качения деталей с распределением их по станкам на нижней ветви.

В системе, изображенной на рис. 6.15, *а*, транспортирование деталей осуществляется путем проталкивания их скольжением по направляющим с применением возвратно-поступательного движения механизма с откидными захватами или кулачками. Деталь перемещается при поступательном движении приводного органа, кулачки которого проталкивают детали по лотку или плоскости желоба к окнам выдачи. При обратном движении кулачки откидываются, пропуская очередную деталь, а затем захватывают их, повторяя цикл движений.

На рис. 6.15, *в* представлена схема ленточного транспортера для подачи деталей вплотную с подпором, когда они перемещаются до заслонок окна выдачи, при этом лента проскальзывает под деталями; детали с окон направляются стенками лотка. Транспортная лента может представлять собой прорезиненное полотно, стальную ленту, различного рода цепи.

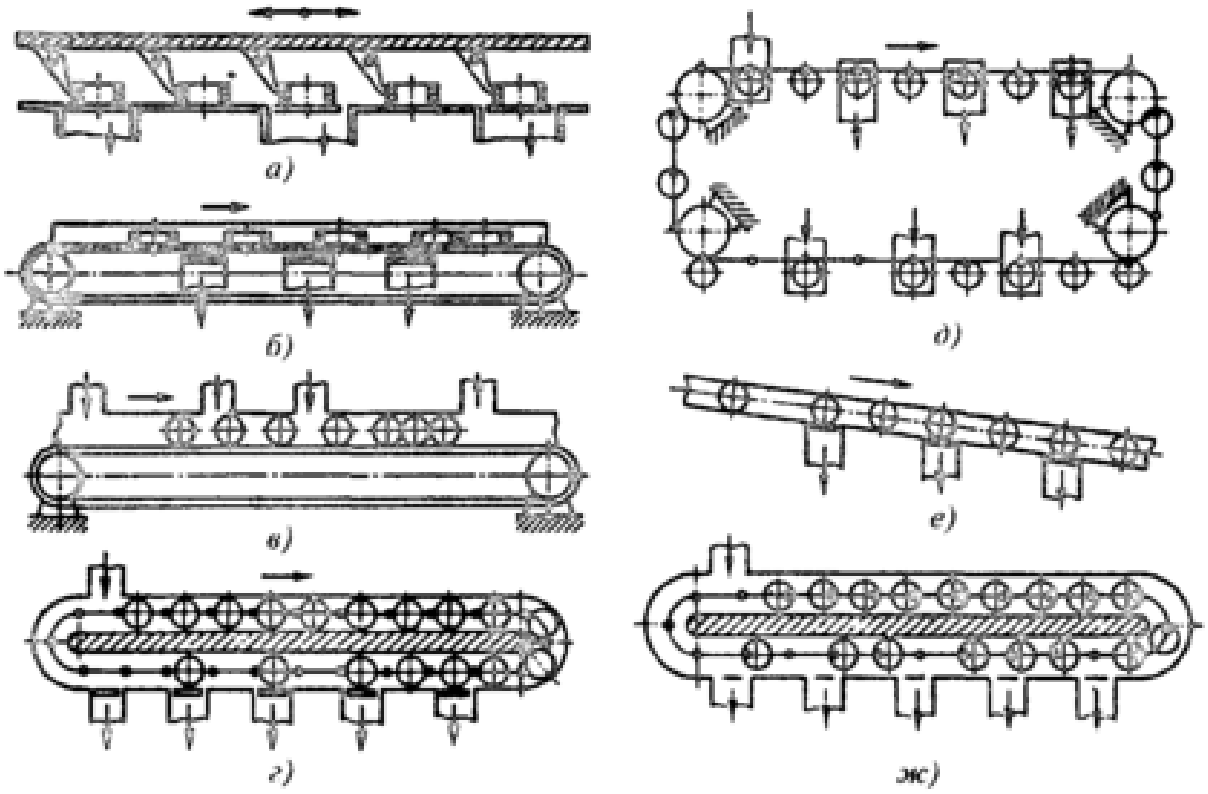


Рис. 6.15. Типовые варианты схем транспортеров-распределителей

Схема, показанная на рис. 6.15, *б*, отличается от схемы на рис. 6.15, *в* тем, что детали лежат здесь торцом на ленте и могут проскальзывать только при наличии препятствия в виде упоров или заслонки. На схеме рис. 6.15, *в* при движении ленты детали контактируют с ней и со стенками лотка, в результате чего они могут перекатываться, а скорость перемещения – уменьшаться. Детали, дошедшие до упора, останавливаются, и лента транспортера проскальзывает под ними.

На схеме, приведенной на рис. 6.15, *д*, изображен штыревой транспортер, в котором детали типа колец перемещаются подвешенными на штыри, в этом случае детали транспортируются в пространстве и снимаются в нескольких местах выдачи.

Наверх, к транспортеру-распределителю, детали подаются разнообразными подъемниками шахтного типа. В разд. 4.1 была показана конструкция подъемника дискретного толкающего типа. Такие подъемники малопроизводительны и функционируют обычно между двумя соседними станками.

На рис. 6.16 показана конструктивная схема цепного элеваторного подъемника непрерывного действия. Подъемник состоит из корпуса *2*, по концам которого смонтированы натяжные *11* и приводные *1* звездочки. Через них переброшены две параллельные цепи *13* с захватами *10*, вы-

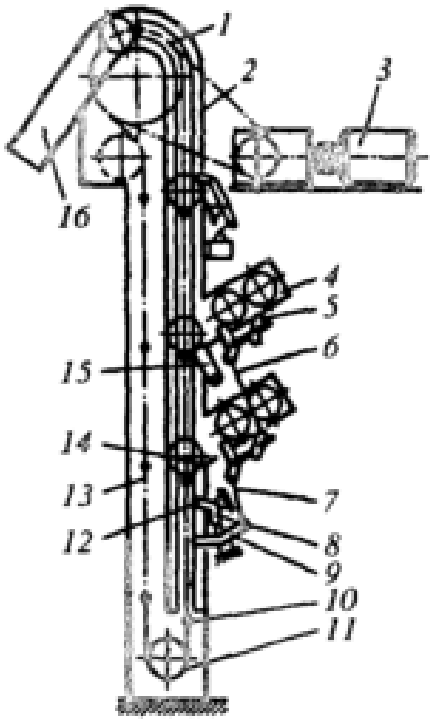


Рис. 6.16. Транспортер-подъемник элеваторного типа

полненными в виде перекладин. В зависимости от числа приемных лотков цепь снабжается утолщенными перекладинами для привода синхронизирующего механизма через одно, два и т.д. звена цепи.

В некоторых конструкциях подъемников изделия поступают несинхронно с захватами. Вследствие этого нередки случаи, когда изделие не успевает попасть в захват под действием сил собственной тяжести и заклинивается, что приводит к авариям.

В данном случае подъемники с несколькими приемными лотками, расположенными друг над другом (в вертикальной плоскости), снабжены синхронизирующими механизмами, пропускающими изделия в соответствии с движением захватов цепи, которое осуществляется от индивидуального привода *3*.

Рабочие ветви цепей проходят между направляющими пластинами. В верхней части корпуса имеется лоток выдачи *16*, а в нижней – один или несколько лотков приема *4*, расположенных друг над другом. Лотки приема снабжены отсекателями *5*, укрепленными на общем валике и связанными подпружиненными в продольном направлении тягами *6* и *7*, одна из которых соединена с рычагом *9*, свободно укрепленным на оси. Этот рычаг имеет отросток, связанный серьгой *8* с рычагами *12*, также свободно укрепленными на другой оси.

Во время работы подъемника в приемные лотки *4* изделия поступают под действием собственной силы тяжести и задерживаются левыми отсекателями. Утолщенная перекладина цепи *10* отклоняет левое плечо рычага *9* вверх. Вследствие этого рычаг *12* отклоняется вниз, навстречу движению перекладины. Одновременно отсекатели *5* поворачиваются на определенный угол и пропускают в подъемник по одному изделию из каждого лотка. Остальные изделия задерживаются отсекателями. Изделия, попавшие в подъемник задолго до прихода захватов, ориентируются на языке *14* и откидной собачке *15*, опираясь на стенку корпуса подъемника.

Когда утолщенная перекладина оказывается за рычагом *9*, она отклоняет рычаг *12* и, тем самым, ставит отсекатели *5* в прежнее положение; при этом отсекатели пропускают очередные изделия. При дальнейшем движении цепи изделия, находящиеся в подъемнике, транспортируются в лоток выдачи к транспортеру-распределителю.

В ряде конструкций цепных элеваторных подъемников вместо перекладин применяют захваты, на которые ложатся обрабатываемые заготовки, соприкасающиеся с боковыми стенками шахты. По сравнению с толкающими цепные элеваторные подъемники обеспечивают более плавную работу с меньшей вероятностью отказов. Возможные застревания заготовок (при редком подходе колец к подъемнику отдельные из них могут подходить к захвату не вовремя) легко устраняются реверсом тягового органа от предохранительного устройства.

Передача изделий из окон выдачи от транспортеров-распределителей (см. рис. 6.15) в рабочие зоны станков под захваты автоматических манипуляторов, а после обработки – на отводящие транспортеры проводится обычно устройствами лоткового типа, в которых изделия перемещаются под действием сил собственной тяжести скольжением или качением.

На рис. 6.17 показана конструктивная схема взаимной пространственной компоновки встроенного станка, транспортера-распределителя и отводящего транспортера, объединенных с помощью двух лотковых устройств: подводящего и отводящего. Как видно, лотковые системы посредством гибких элементов позволяют передавать изделия в любом направлении. Лотки служат также для изменения ориентации транспортируемых изделий (рис. 6.18).

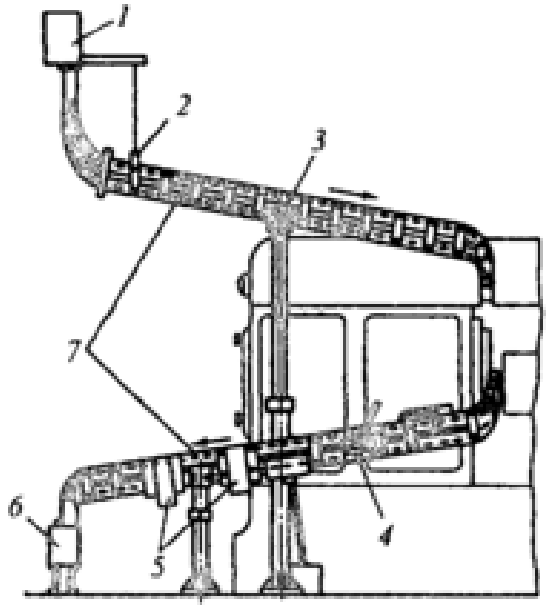


Рис. 6.17. Конструктивная схема лотковых транспортирующих устройств:
1 – транспортер-распределитель;
2 – подвеска; *3* – стойка; *4* – заслонка;
5 – защелки; *6* – отводящий транспортер;
7 – лотки

Автоматический манипулятор забирает изделия из лоткового подающего устройства и подает его к шпинделю станка для закрепления на оправке или в патроне. Автоматические манипуляторы бывают двух типов:

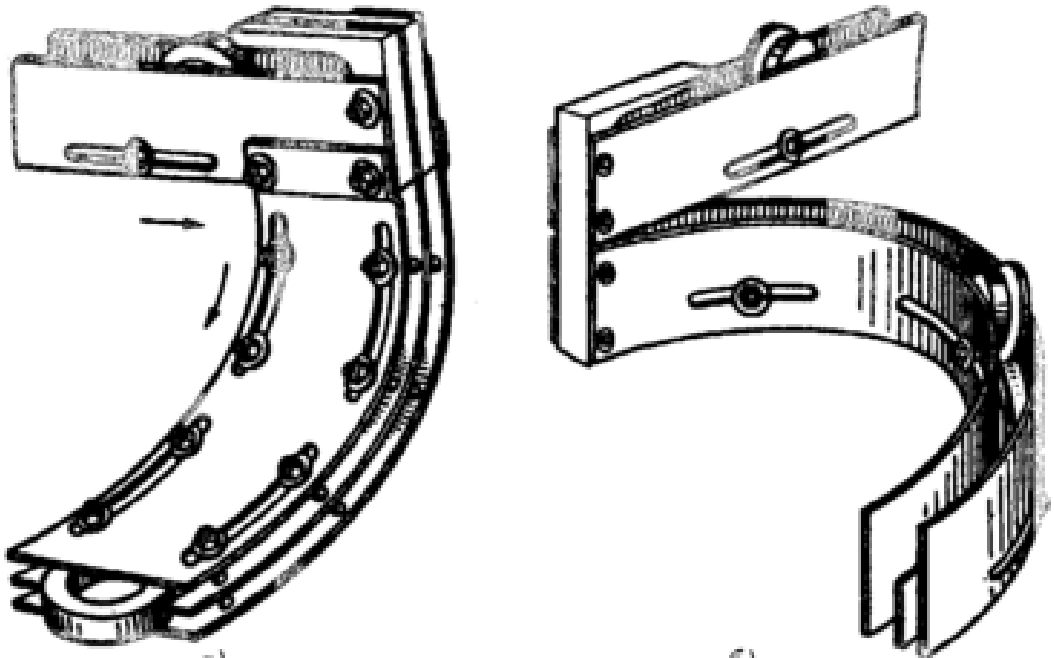


Рис. 6.18. Лотковое устройство для изменения ориентации изделий на 90 и 180° (соответственно *а* и *б*)

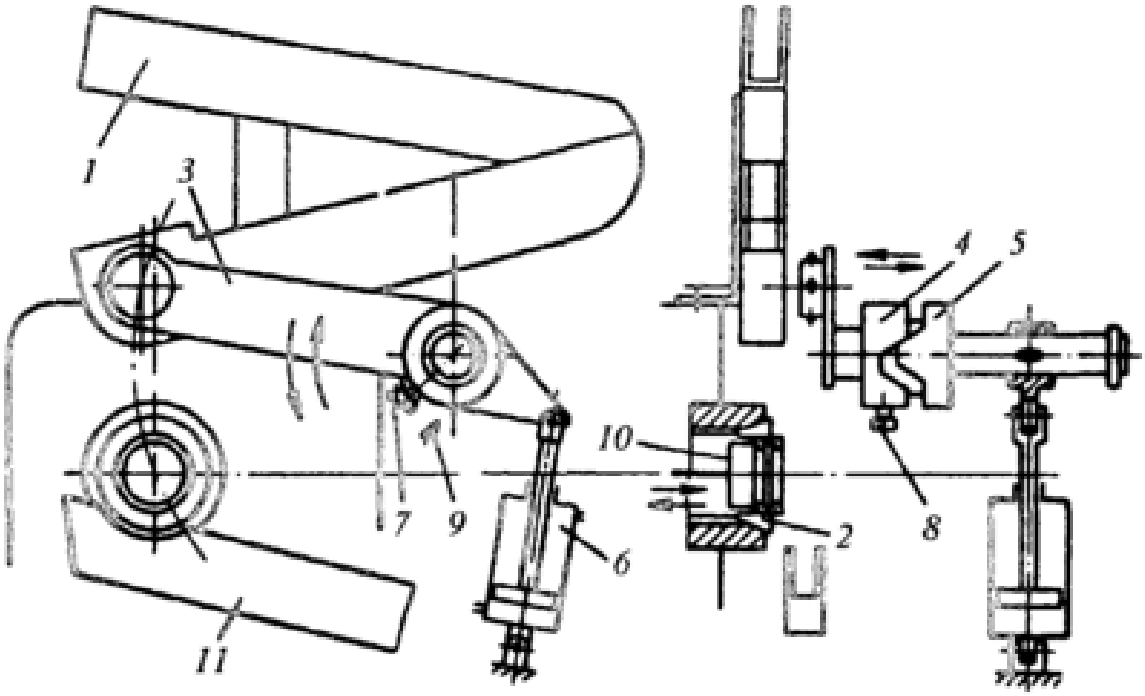
– встраиваемые, которые работают от общей системы управления станка и конструктивно являются его составной частью. Иногда их называют **автооператорами** (замена действий рабочего-оператора);

– конструктивно независимые от станка, с собственной системой управления; если эта система построена на микропроцессорной основе, а манипулятор имеет универсальную конструкцию, его принято называть **промышленным роботом** для вспомогательных операций. Ряд конструкций промышленных роботов предназначен для выполнения основных технологических операций (сварка, сборка, гальваника).

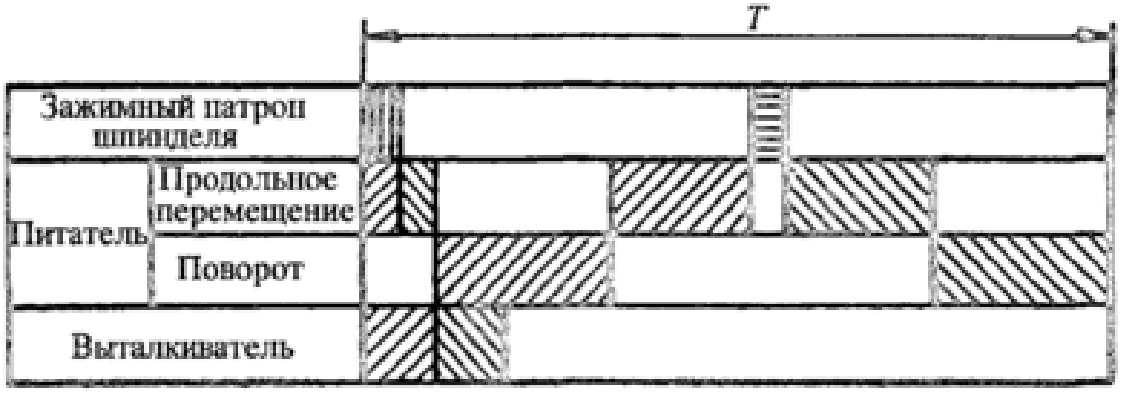
Конструктивная схема встроенного автоматического манипулятора показана на рис. 6.19, *а*. Изделия поступают из лотка *1*. Питатель *3* – качающегося типа. Необходимые перемещения он получает от пневматического цилиндра *6*. Зажимный патрон снабжен пневматическим приводом. Пневматическая система управляется золотниками, работающими от распределительного вала полуавтомата.

Циклограмма работы приведена на рис. 6.19, *б*.

После окончания обработки кольцо освобождается и выталкивается из зажимного патрона выталкивателем *10* (см. рис. 6.19, *а*) в отводящий лоток *11*. Питатель *3* из исходного положения (в верхнем положении соосно с заготовкой, находящейся в приемнике магазина) перемещается к приемнику магазина, заходит в отверстие заготовки и, захватив ее, отхо-



а)



б)

Рис. 6.19. Встроенный автоматический манипулятор токарного автомата:
а – конструктивная схема; *б* – циклограмма работы;
T – цикл работы манипулятора

дит назад, поворачивается вниз к шпинделю полуавтомата и, перемещаясь в его сторону, подает заготовку в патрон *2*, где она и зажимается. Питатель перемещается назад и поворачивается в верхнее исходное положение.

Цикл работы автооператора $T = 2...4$ с. Поступательное перемещение питателя вперед осуществляется поворотом полумуфты *5*, по скосу которой скользит скос полумуфты *4* при контакте ролика *8* с верхним *7* или нижним *9* упором. Обратный ход питателя осуществляется пружиной, расположенной в цилиндре питателя, подтягивающей полумуфту

назад (вправо). Полумуфта *5* поворачивается от пневматического цилиндра *6*. Поворот питателя совершается при соединенных полумуфтах *4* и *5*.

Для предупреждения поломок, связанных с нарушением цикла работы автооператора, в пневматической системе предусмотрен блокировочный механизм. Имеется два блокировочных клапана. Блокировочный клапан суппорта подает сжатый воздух в нижнюю полость цилиндра *6* питателя только тогда, когда суппорт отходит в крайнее правое положение и останавливается. Следовательно, питатель не опустится к патрону от магазина во время процесса резания вплоть до отхода суппорта от обрабатываемого кольца.

Как видно, достоинством данной конструкции является ее вписывание в габаритные размеры станка без дополнительной площади. Однако эта конструкция является специализированной: она разработана для станков такого типа и больше нигде не может применяться напрямую.

Промышленные роботы универсальны по конструкции, но более дороги и требуют дополнительной площади. При их использовании вне автоматических линий им должен сопутствовать весь комплекс транспортно-накопительных устройств, что составляет в совокупности так называемый робототехнический модуль (рис. 6.20).

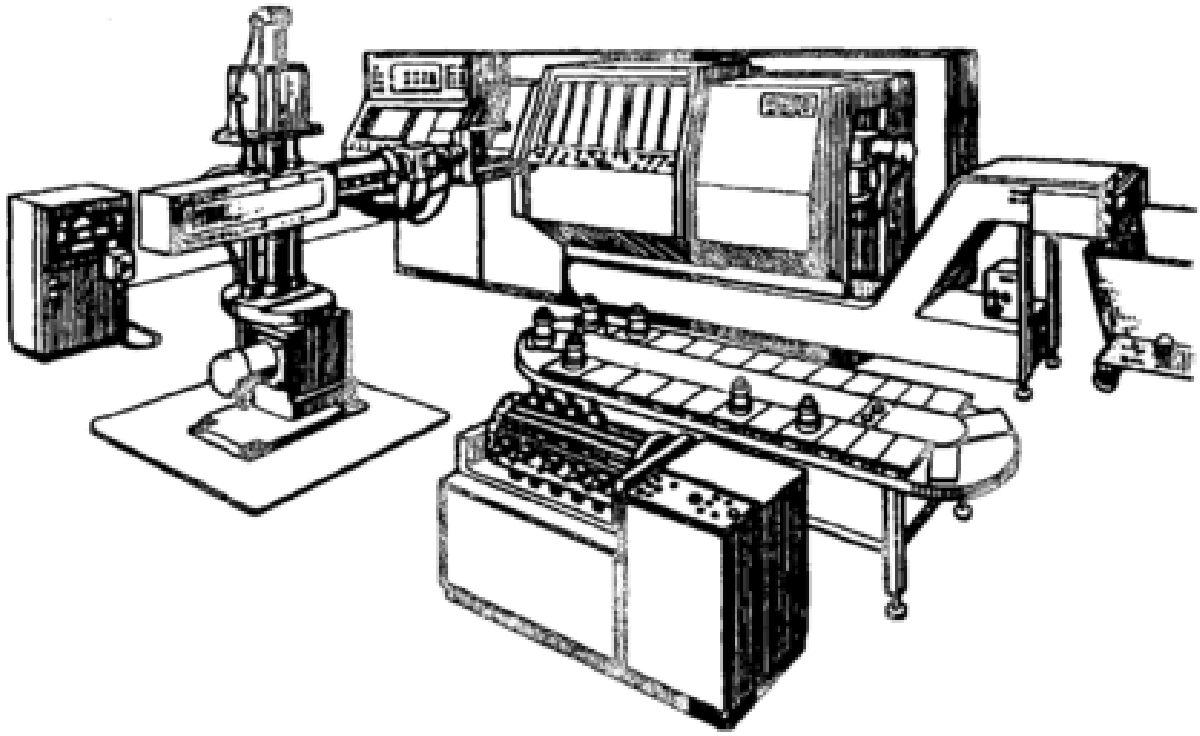


Рис. 6.20. Робототехнический модуль для обработки тел вращения

Реплика. В настоящее время, когда "роботомания" явно пошла на спад, возможно и разумно применить к промышленным роботам те же критерии оценки, как и к любым средствам автоматизации производства, по тем же критериям и источникам эффекта. Что дает роботизация станка (см. рис. 6.20) по сравнению с базовым вариантом – тем же станком с ручной загрузкой-съемом изделий?

На качество продукции данная роботизация не повлияла: ведь робот выполняет только вспомогательные действия. Производительность станка выше не будет, скорее, наоборот: человек с минимумом движений выполнит загрузку-съем быстрее, по надежности будет также проигрыш, так как не все действия человека робот в состоянии замещать.

Если, скажем, на оправку намотался виток стружки, человек сначала снимет его крючком и лишь затем закрепит на ней заготовку, а робот такое не сумеет. Остается единственный источник эффективности – сокращение затрат ручного труда и фонда заработной платы. Велик ли он?

В неавтоматизированном производстве человек берет изделие в руку дважды: сначала из тары и вставляет его в шпиндель, потом из шпинделя перекладывает в другую тару. В роботизированном комплексе (РТК) человек также ***берет каждое изделие дважды****: сначала заготовку из тары и помещает ее в гнездо магазина-накопителя, затем обработанную деталь из накопителя отправляет в другую тару. Где здесь экономия ручного труда?*

Правда, в РТК эти действия можно "спрессовать" по времени, устанавливая и снимая несколько изделий подряд, и освободившееся время использовать для обслуживания нескольких РТК. Но ведь и при работе на обычных полуавтоматах оператор не бездельничает в течение цикла обработки, а обслуживает два – четыре станка.

А если учесть, что РТК обслуживает целая бригада: программист, электроник, наладчик, оператор, – то общий баланс трудовых затрат будет, скорее, отрицательным.

Это не приговор промышленным роботам, а пример не самого лучшего их применения. Есть применения гораздо более эффективные, с многофакторным выигрышем.

При ручной точечной сварке человек физически и физиологически не способен в течение целой рабочей смены обеспечивать точные расстояния между соседними сварочными точками, выдерживать стабильное сжатие сварочных клещей, время подачи импульса и силу тока. А промышленный робот все это может без особых трудностей. Следовательно, роботизация позволяет получить в первую очередь стабильность качества. Именно поэтому на всех передовых автомобильных предприятиях кузов сваривают на роботизированных автоматических линиях.

Тот же эффект стабильности качества дает роботизация гальванических процессов. При ручном обслуживании у человека не хватает терпения, чтобы точно выдержать интервал времени пребывания барабана с изделиями в каждой ванне, а особенно – над ванной, чтобы успели стечь электролит, травильный или промывочные растворы. Простота перемещений в гальванических линиях

позволяет применять в них не сложные промышленные роботы, а встраиваемые автоматические манипуляторы.

Перечень примеров высоко- и малоэффективного применения автоматических манипуляторов, в том числе промышленных роботов, можно продолжить. Самое главное – научить студентов "смотреть в корень", а также отличать истинно промышленные роботы от всевозможных иных устройств, к которым "клеится" данное модное наименование для рекламы или гипертрофии значимости.

Компоновочная схема автоматической линии с гибкой межагрегатной связью и параллельно работающими станками приведена на рис. 6.21.

Транспортная система состоит из транспортера-подъемника *5*, транспортера-распределителя *8* с приводом *12*, отводящего транспортера *16* с приводом *14*, подводящих и отводящих лотков *4*.

Транспортер-распределитель *8* составлен из секций, посредством которых можно собирать транспортеры разной длины. Внутри секций расположен удлиненный кольцевой канал. Там же смонтированы натяжная и приводная звездочки, через которые переброшена втулочно-роликовая цепь *9* с прикрепленными к ней с определенным шагом поводками *7*, образующими ячейки.

Заготовки, поступая в приемный лоток *1*, поштучно выдаются отсекателями на подающий орган транспортера-подъемника *5* и по лотку выдачи поступают в механизм загрузки *6*, который перемещает их в свободные ячейки верхней ветви транспортера-распределителя. Поводками *7*

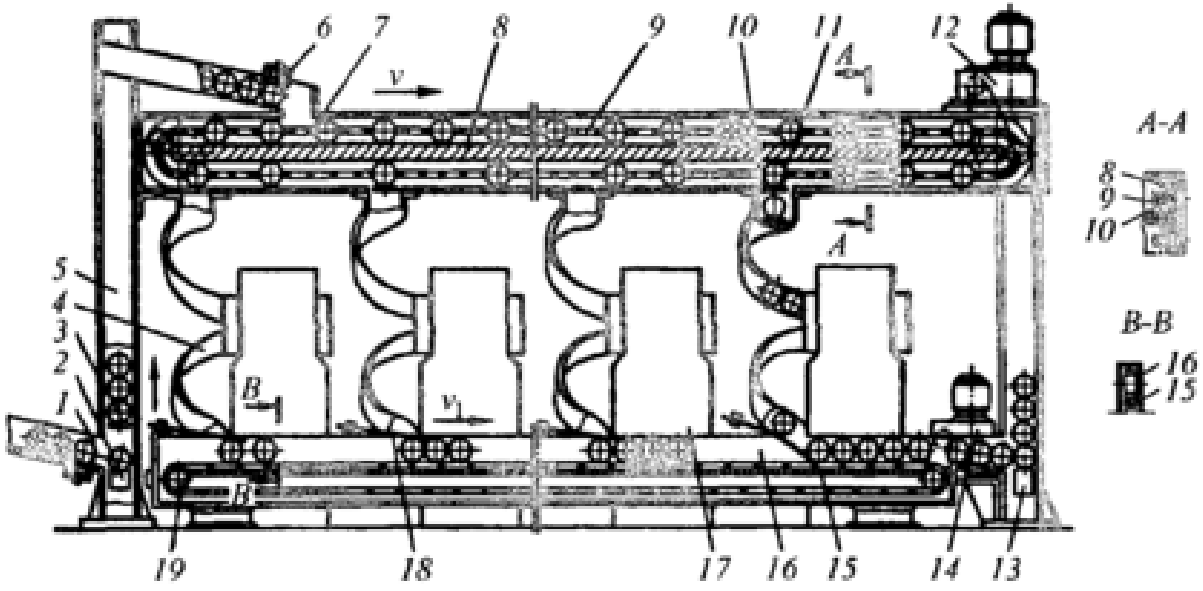


Рис. 6.21. Компоновочная схема автоматической линии с гибкой межагрегатной связью:

2, *13* – толкатели транспортеров-подъемников; *3* – отсекатель; *15*, *18* – устройства контроля наличия деталей на отводящем транспортере; *19* – приводной ролик отводного транспортера (остальные позиции пояснены в тексте)

цепи *9* заготовки отправляются на нижнюю ветвь транспортера, откуда механизмами *11* выгрузки заготовок подаются по подводящим лоткам *10* в станки *17*. В случае переполнения подводящих лотков механизмы *11* выгрузки заготовок пропускают их и они циркулируют в транспортере-распределителе.

Обработанные кольца по отводящим лоткам *4* поступают в отводящий транспортер *16*, который перемещает их к следующему участку обработки.

Циркулирующее движение деталей в транспортере-распределителе позволяет намного упростить систему управления и распределения деталей по станкам и создать условия независимой работы встроенных станков-автоматов.

Достоинством системы является относительная легкость наращивания ее по секциям, что позволяет компоновать линии с различным числом станков.

6.4. ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕНАЛАДКИ

Чем сложнее технологическое оборудование, тем труднее решаются вопросы его перевода на производство иной продукции, даже идентичной.

В автоматических системах это требует как минимум замены или корректировки комплекта инструмента и всей технологической оснастки, перепрограммирования рабочего цикла, а во многих случаях – перекомпоновки оборудования, изменения структурной схемы.

Особенностями большинства автоматических линий являются высокая степень дифференциации и концентрации операций, многопозиционная и многоинструментная обработка, наличие специального инструментального оснащения, специальных приспособлений и т.д., что в итоге решает задачу получения максимальной производительности.

Но подобные линии переналаживать на производство любой другой продукции попросту невозможно. Это приемлемо для производства изделий, которые длительное время серьезным изменениям не подвергаются (подшипники, метизы, профильные заготовки и т.п.) и при этом требуются в больших масштабах.

Поэтому непереналаживаемые линии со стабильным характером выпускаемой продукции эксплуатируются до физического износа, их долговечность определяется такими же факторами, как, например, для универсальных автоматов (см. разд. 4.2).

Длительное время проблема переналадки не возникала в автомобильной и тракторной промышленности, сельскохозяйственном и бытовом машиностроении, где выпуск конкретных моделей машин или приборов был сопоставим со сроками физического старения и амортизации технологического оборудования.

Что же касается маломасштабного производства с большой номенклатурой типоразмеров продукции и короткими периодами выпуска конкретных образцов (приборостроение, электроника и т.п.), то в них автоматические линии мало применялись, уровень автоматизации не превышал отдельных машин – автоматов и полуавтоматов.

Конец XX века дестабилизировал многолетние ситуации. Резкое ускорение научно-технического прогресса, обострение конкурентной борьбы на рынках сбыта обозначили возникновение остроконкурирующих тенденций:

– чрезвычайно большое сокращение длительности выпуска конкретных образцов продукции вынуждает отказываться от традиционных автоматических линий;

– непривлекательность монотонного и тяжелого ручного труда, а следовательно, необходимость более высокой степени автоматизации производства требует увеличения автоматических систем машин.

В настоящее время можно отметить несколько видов производств, для которых проблема создания автоматических систем машин, способных выдавать различную продукцию, является насущной:

1) **серийное производство**, в том числе работающее по индивидуальным заказам, которые могут не повторяться, здесь частота перехода на другую продукцию может быть весьма высокой; отсюда мобильность (быстрота) выполнения переналадок становится важнейшей характеристикой системы;

2) *массовое многономенклатурное производство* (например, выпуск одновременно нескольких моделей автомобиля, пылесоса, стиральной машины и т.д.), когда по масштабам ни один из типоразмеров изделий не может загрузить полностью автоматическую линию; необходима либо многономенклатурная обработка (одновременно нескольких изделий) с минимальными перенастройками, либо периодическая переналадка с многократным возвращением;

3) *массовое быстросменное производство*, высокое по масштабам выпуска конкретной продукции, но со сроками ее замены, существенно более низкими, чем сроки физической амортизации технологического оборудования (см. разд. 4.2).

Рассмотрим пути решения проблемы для данных видов производств применительно к изготовлению резанием крупногабаритных корпусных деталей.

Для серийного производства, в том числе работающего по разовым заказам, созданы и применяются автоматические системы машин на основе станков с микропроцессорным управлением – так называемых обрабатывающих центров (см. разд. 1.4).

Хотя по структуре и компоновке такие системы не отличаются от автоматических линий последовательного или параллельного действия, они получили особое наименование: гибкие производственные системы (ГПС). Есть и другие варианты названий, например гибкий технологический комплекс и т.д.

Типовая планировка ГПС для обработки корпусных деталей приведена на рис. 6.22. Система построена по принципу параллельного действия и включает в себя однопозиционные станки с прямым управлением от ЭВМ. Обрабатываются корпусные детали с серийным или даже индивидуальным характером запуска. Выполняемые операции: фрезерование плоскостей, рас-

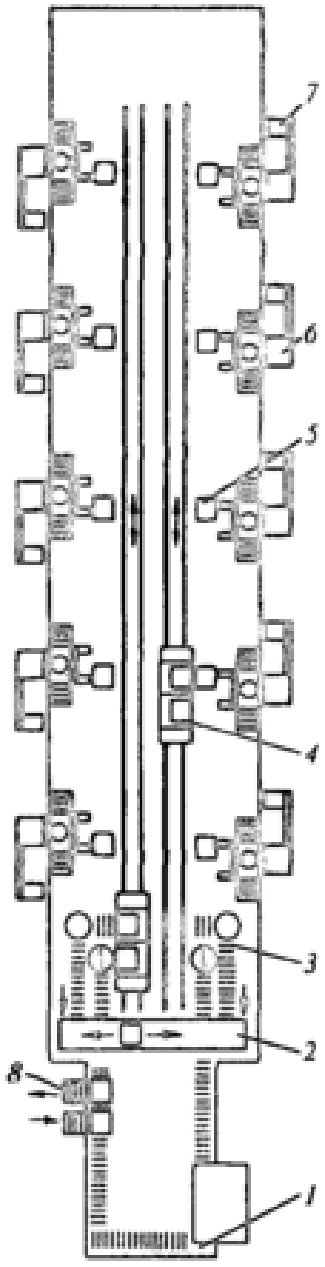


Рис. 6.22. Типовая планировка ГПС:
1 – автоматизированный склад;
2 – автоматизированный штабелер;
3 – позиция установки изделий на приспособления-спутники и их съема после обработки; *4* – транспортная тележка;
5 – вспомогательные позиции у станков;
6 – обрабатывающие центры; *7* – пульты программного управления станками;
8 – позиция приема и выдачи изделий на склад

точка, обточка, сверление, зенкерование, развертывание отверстий, снятие фасок, нарезание резьбы и т.п.

Каждый станок имеет координатный стол, на котором закрепляются приспособления-спутники (палеты) с обрабатываемыми деталями, шпиндельный узел, автоматический магазин инструментов, манипулятор для автоматической замены инструмента в шпинделе на любой из инструментов, имеющихся в инструментальном магазине.

Таким образом, с одного установа приспособления-спутника на координатном столе, с использованием горизонтальных двухкоординатных перемещений стола и его поворота, а также вертикальной подачи шпинделя с инструментами может быть выполнена полная механическая обработка любой детали, кроме базовых поверхностей.

Транспортно-накопительная подсистема ГПС обеспечивает хранение заготовок и обработанных деталей, распределение заготовок по параллельно работающим станкам, возврат обработанных деталей на склад.

Партии изделий находятся в ячейках автоматизированного многоярусного и многосекционного склада, откуда по вызову рабочего-оператора специальным автоматическим штабелером подаются на позиции загрузки. Единственная ручная операция в системе – это установка заготовок в палеты.

Далее палеты поступают на транспортные тележки, которые, перемещаясь по рельсовым путям, передают их на промежуточные позиции у станков, а при возврате захватывают обработанные детали. После съема деталей их укладывают вручную в транспортную тару и штабелером возвращают в соответствующую ячейку склада, откуда по мере необходимости выдают на последующие позиции обработки через станцию приема-выдачи.

Управляющая подсистема ГПС имеет двухступенчатый характер. Центральная управляющая ЭВМ непосредственно управляет: складом, включая хранение информации о местонахождении конкретных партий изделий в ячейках склада; транспортно-распределительной системой по сигналам станков об окончании обработки деталей на позициях; параллельно работающими станками путем засылки в пульты управления у станков необходимых управляющих программ.

Кроме того, она осуществляет организационно-экономические функции: распределение партий деталей по станкам, учет времени работы и простоев станков; диагностику состояния станков, транспортных устройств и т.д., учет заготовок и готовых деталей на складе по номенклатуре и количеству; расчет количества выпущенных деталей оперативно

и нарастающим итогом, расчет и анализ себестоимости обработки и других экономических показателей.

САУ у станков управляют циклом обработки соответствующих деталей, а также обменом спутников – с промежуточной позиции обработки на рабочую и обратно.

Переналадка на обработку другой продукции сводится к замене или перестройке палет, частичной или полной замене комплектов инструмента в инструментальных магазинах, что в данной ГПС выполняется также вручную; замене управляющих программ в оперативной памяти (см. разд. 1.6), что выполняется центральной ЭВМ автоматически.

ГПС находятся в состоянии поступательного развития главным образом благодаря достижениям управляющей электроники и информационных технологий. Современные системы автоматизированной подготовки производства (САПР) позволяют объединять в едином информационном процессе без бумажных носителей информации конструирование изделий, разработку маршрутной и операционной технологии их изготовления и программирования станков для этих целей.

Широко используется оптимальная дифференциация объема обработки на несколько станков, что позволяет сократить комплект инструмента на каждом из них, избежать выполнения черновых и чистовых операций в одной позиции. Стало возможным гибкое перепрограммирование при возникновении отказов станка в процессе обработки, когда спутник передается на соседний незанятый станок, где и завершается обработка.

Автоматизируются процессы замены комплекта инструмента при переналадках путем применения специальных инструментальных конвейеров или спутников. Экранное моделирование, имитация процесса обработки позволяют устранить или сократить затраты времени на пробные проходы инструмента при переналадках и т.д.

Все это не устраняет органического недостатка подобных систем: при любом совершенстве САУ, при любой вместимости инструментальных магазинов станки остаются одноинструментными, совмещение рабочих ходов отсутствует, в работе одновременно может находиться лишь один инструмент. Поэтому производительность ГПС не может быть существенно выше, чем у группы радиально-сверлильных или вертикально-расточных станков (см. разд. 1.4).

Как и в неавтоматизированном производстве, человек вручную (или со средствами механизации) ставит каждую заготовку в приспособление, а после обработки снимает ее. Правда, для этого ему не приходится многократно перемещаться по площади участка.

В массовом многономенклатурном производстве периодические переналадки в пределах долговременной номенклатуры возможны лишь с частичной перекомпоновкой станков – заменой шпиндельных коробок и приспособлений для закрепления изделий. Принципиально такие процедуры при соответствующей конструктивной доработке станков с позиций быстросменности узлов трудностей не представляют. Но где хранить резервную оснастку? Каждая позиция линии из агрегатных станков (см., например, разд. 1.4) превращается в весьма сложный, громоздкий и дорогой автоматизированный технологический комплекс. Пример приведен на рис. 6.23.

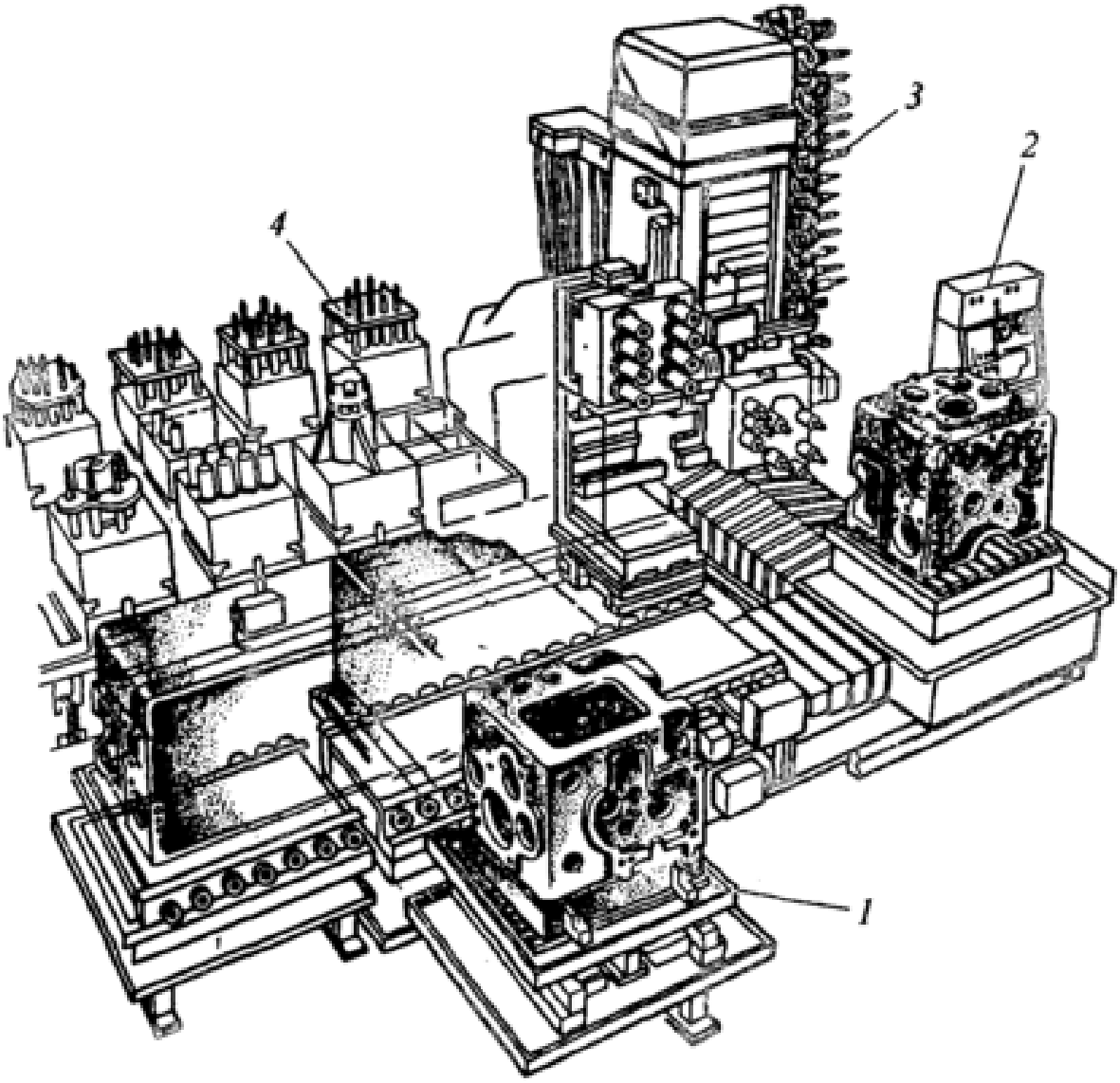


Рис. 6.23. Автоматизированный технологический комплекс многономенклатурной автоматической линии

Комплекс состоит из стола-спутника *1*, пульта управления *2*, агрегатного станка с инструментальным магазином *3* и сменной инструментальной головки *4*. Такой автоматический комплекс позволяет по определенной программе устанавливать заготовки в зону обработки, подавать нужный магазин с режущим инструментом и выполнять различные технологические операции. Высокая производительность достигается высокой стоимостью даже по сравнению с ГПС.

Одновременная обработка нескольких типоразмеров изделий достигается также резервированием шпиндельных коробок, приспособлений и т.д., но не "холодным" (резервные узлы не функционируют), а "горячим" (ничего не снимается и не монтируется вновь). Здесь существует немало конструктивно-компоновочных решений. На рис. 6.24 представлен один из вариантов [24].

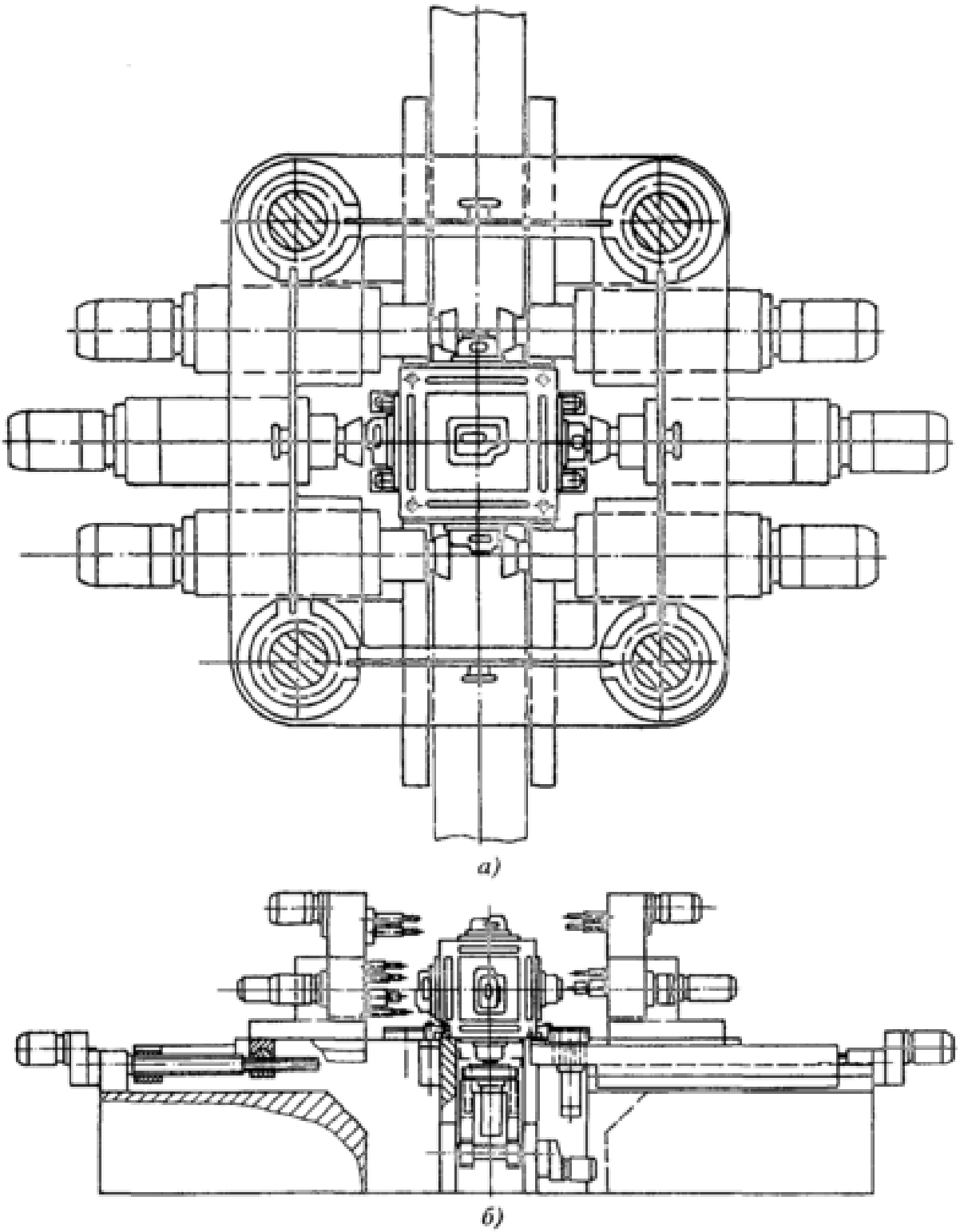
При компоновке по варианту рис. 6.24, *а* (вид сверху) приспособление-спутник представляет собой призму, обрабатываемые детали крепятся на всех вертикальных плоскостях. При ходе вперед силовых головок (возможен раздельный привод) происходит обработка (в данном случае фрезерование) одних деталей по верхним поверхностям, других по боковым.

При необходимости призма может кантоваться вокруг вертикальной оси на 90°.

Расширение возможностей достигается двухъярусным расположением силовых головок (см. рис. 6.24, *б*, вид сбоку). Здесь несущая призма имеет возможность подниматься по вертикали с двукратной обработкой поверхностей в той же позиции. Как вариант может быть применено двухъярусное расположение обрабатываемых изделий на призме.

Для массового быстросменяемого производства оборудование работает без переналадок в течение срока выпуска данной модели продукции, сохраняя при этом физическую пригодность. При переходе на новую продукцию (изготовление новых специальных узлов) линия перестраивается с сохранением общей структурной схемы, базовых и типовых узлов, последовательности срабатывания (т.е. принципиальной циклограммы).

Демонтаж и повторный монтаж – сложный и длительный процесс. Очень важно при проектировании линии применительно к первичной номенклатуре выпускаемых изделий предусмотреть перспективные требования при перестройке линии по мощности, величине и точности перемещений, резервированию дополнительных площадей и т.д.



а)

б)

Рис. 6.24. Позиция многономенклатурной автоматической линии с горячим резервированием:
а – вариант с одновременной обработкой деталей;
б – вариант с двухъярусной обработкой

Глава 7

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПОСТАВКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

7.1. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Любой проект есть мысленный образ, воплощаемый далее в целенаправленный результат деятельности человека. При проектировании любых технических объектов первичным результатом такой деятельности является комплект технической документации (конструкторской, технологической, паспортной и т.д.) на любых видах носителей информации, на завершающем этапе – объект в материальном воплощении.

Оптимальный проект – это проект, который обеспечивает создание объекта, наилучшего из реально возможных. Применительно к машинам-автоматам и их системам это означает создание оборудования, которое гарантирует выпуск продукции заданного качества в требуемом количестве с наилучшими экономическими показателями, востребованностью на рынке, при соблюдении экологических норм и удовлетворении требований технической эстетики.

Оптимальное проектирование – это такие организация, методы и последовательность процесса проектирования, которые позволяют получить в итоге высокоэффективную и востребованную на рынке новую технику.

Для этого необходимы:

– оптимальная последовательность этапов разработки и изготовления конструкций, их сборки и отработки;

– оптимальные методы действий и критерии принятия технических решений на каждом из этапов.

Оптимальная последовательность этапов действий при создании технических объектов:

1) создание предпосылок для проектирования путем предпроектных действий: отработки технологии и конструкции отдельных компонентов; анализа технической информации и опыта эксплуатации аналогичных объектов, что может выполняться путем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР);

2) формулировка целей проектирования, выбор основных характеристик (требований и условий), которые должны быть обеспечены в процессе эксплуатации (требования к качеству и количеству продукции, условиям обслуживания и экологии и т.д.);

3) разработка технологии функционирования машины: методов и маршрутов обработки, технологического базирования, дифференциации и концентрации операций, технологических режимов, методов и средств контроля и обеспечения качества продукции;

4) схемная проработка объекта, выбор принципиальной схемы, структурно-компоновочного варианта с дальнейшей проработкой на схемном уровне вопросов кинематики, пневмогидравлики, вакуумной и газовой систем, автоматического управлении и т.д.;

5) конструктивная проработка объекта, включая все механизмы и устройства, базовые узлы, общие виды;

6) оценка комплекса принятых технических решений сопоставлением требований к проекту и ожидаемых параметров работы объекта.

Если последовательность проектных действий в целом идентична, то "технология" их реализации весьма субъективна и неповторима применительно не только к различным творческим коллективам, но и к отдельным лицам.

Критерии и методы принятия технических решений при проектировании весьма разнообразны, они трудно поддаются систематизации и структурированию, находятся в процессе постоянного развития и совершенствования.

Можно назвать следующие источники принятия конкретных технических решений при создании новой техники, как впрочем и во всех остальных аспектах инженерной деятельности:

- специальные расчеты;
- результаты предпроектной проработки, включая НИОКР, анализ опыта применения аналогов;
- анализ научно-технической информации;
- индивидуальный опыт и интуицию.

Важнейшим источником принятия проектных решений при вузовской подготовке (чтении лекций для будущих разработчиков) принято считать инженерные расчеты (прочностные, кинематические, технологические, экономические и т.д.). Именно их фундаментальные основы и конкретные методы составляют значительную часть процесса инженерного обучения. Сформировалась даже чисто математическая теория оптимального проектирования с базированием на применении средств вычислительной техники и информационных технологий (пакеты прикладных программ).

Эта теория оперирует такими категориями, как: *целевая функция* проектного решения (качество, экономичность и т.д.); *управляющие пе-*

ременные, которые являются целью варьирования и выбора (структурные и конструктивные параметры); *управляемые переменные*, являющиеся частными функциями и выступающие обычно в качестве ограничивающих факторов (по массе, габаритным размерам, энергопотреблению, шуму и т.д.); *константы проектирования* (нормы амортизации, время срабатывания типовых механизмов и устройств и т.д.).

Реплика 1. *Задача оптимизационных расчетов – по заданному характеру целевой функции отыскать такое сочетание управляющих переменных, которое обеспечивало бы оптимальное или допустимое значение данной функции.*

Для аналитической реализации применяются математические методы: методы ветвей и границ, динамическое и линейное программирование (не путать с программированием ЭВМ и т.д.), а такие методы, предложенные многочисленными диссертантами, многие из которых заставляют своих студентов непременно изучать собственные новации.

Математически задачи оптимального проектирования предусматривают одно- и многокритериальную, одно- и многопараметрическую (когда в результате расчета выбирается один или комплекс взаимосвязанных параметров), одно- и многоэтапную оптимизацию.

Учить этому, несомненно, нужно: это развивает мышление будущих специалистов. Но чересчур забивать голову студентам вряд ли разумно. Хотя бы потому, что в дальнейшей деятельности далеко не все станут проектантами сложного оборудования; и еще потому, что в практике проектно-конструкторских организаций машиностроительного профиля высокая оптимизационная математика широкого применения пока не находит, так как самая строгая математизация никогда не в состоянии учесть многообразие и специфику реальных проектно-конструкторских задач.

Поэтому наиболее разумно учить студентов концептуальным и методическим началам выбора оптимальных технических решений, сопровождая это по возможности доступным для понимания математическим аппаратом.

Реплика 2. *Проведенный автором экспертный опрос ряда ведущих разработчиков новой техники дал результаты, представленные в табл. 7.1.*

При всей субъективности приведенных в табл. 7.1 цифр можно констатировать, что расчеты доминирующей роли в формировании проектных решений не играют, равно как и последующие действия по изготовлению спроектированного оборудования или покупке готового, его испытаниях, отладке, сдаче-приемке.

Сплошь и рядом опытный проектант в результате простых и недолгих вычислений, а также "конструктивных соображений" приходит к наилучшим проектным решениям, в том числе в сравнении с "машинной оптимизацией". Структура проектных задач для весьма широкого круга технических объектов при всем их разнообразии достаточно логична, и опытный проектант всегда оценит и учтет их особенности.

7.1. Доля технических решений, принимаемых в процессе проектирования

Номер по порядку	*Источники принятия решения*	*Решения на этапах проектирования, %*			
		Техническое предложение	*Эскизный проект*	*Технический проект*	*Рабочий проект*
1	*Расчеты*	*15*	*20*	*15*	*10*
2	*Результаты НИОКР, опыт эксплуатации аналогов*	*25*	*50*	*30*	
3	*Анализ научно-технической информации*	*35*	*10*	*5*	*–*
4	*Индивидуальный опыт и интуиция*	*25*	*20*	*50*	*60*

Поэтому важно в каждом конкретном случае сначала прочувствовать общие подходы к технологии решения поставленных задач и лишь затем обращаться к их математическим аспектам. Традиционные методы решения проектных задач: "быстрые и грубые", т.е. сочетающие простоту и приближенность расчетов с интуитивными подходами, подчас более плодотворны, нежели "сложные и точные" – с использованием ЭВМ. Владеть нужно и тем, и другим.

Одна из главнейших вузовских задач – максимально сократить срок "вызревания" квалификации проектанта, обучая его прежде всего принципам проектирования, общим методологическим подходам, где каждый конкретный пример есть частная реализация принципов и закономерностей.

Недопустимо противопоставление, например, классической инженерной и машинной графики. Инженерная графика – это грамотное понимание графического материала, развитое пространственное воображение, которое пробуждает эстетическую, художественную сторону мышления. Лишь теория технической (начертательной) геометрии учит пониманию пересечения линий в трехмерном пространстве, в том числе по криволинейным поверхностям.

Какое бы распространение ни получила машинная графика, избавляющая проектанта от рутинных действий, умение разрабатывать вручную содержательные эскизы на этапах подготовки проектирования, поиска и осознания новых идей, технологий и конструкций всегда будет востребовано.

Внедрение средств вычислительной техники и информационных технологий революционизировало процесс проектирования не только переводом с ручной графики на машинную. Несоизмеримо возросли возможности изучения всего комплекса научно-технической информации – через информационные глобальные и локальные сети. Ручные расчеты заменяются машинными с использованием пакетов прикладных про-

грамм. Справочники, которые ранее громоздились на столе каждого конструктора, зачастую заменяют теперь электронными базами данных и базами знаний. Но парадоксально: при переиздании "классических" справочников они раскупаются мгновенно.

В проектно-конструкторских организациях исчезли "калькирование" и соответствующие подразделения, коренным образом изменился процесс архивирования проектной документации. Эти процессы совпали во времени и во многом инициировали еще одну важнейшую тенденцию современности – резкое сокращение объемов "оригинального" проектирования на этапах эскизного, технического и рабочего проектов. Будут и далее изобретаться варианты принципиальных схем и компоновок машин и их систем, но конструктивная их "начинка", комплектация механизмами и устройствами выполняются теперь, как правило, на базе готовых, отработанных и функционально завершенных компонентов.

Процесс этот начался, по существу, несколько десятилетий назад. Уже очень давно конструктор не изобретает новые болты, гайки, подшипники, цилиндры, дроссели и т.д. и т.п., а использует унифицированные решения с централизованной их комплектацией. При создании агрегатных станков уже в 50 – 60-е годы XX века индивидуально проектировали лишь шпиндельные насадки и приспособления для закрепления обрабатываемых деталей. При разработке общего вида станка типовые узлы (силовые головки, силовые и поворотные столы, станины и стойки и др.) не вычерчивали, а на соответствующие места просто наклеивали готовые чертежи унифицированных узлов ("синьки").

Ныне этот процесс стал всеобщим, обогатившись возможностями получать готовые графические изображения из информационных сетей или памяти конкретных ЭВМ.

Таким образом, если обратиться к табл. 7, бóльшая часть источников принятия технических решений при проектировании (пп. 1 – 3) перестала реализовываться вручную, а базируется на современных средствах вычислительной техники и информационных технологиях.

Но, тем не менее, именно индивидуальный опыт, талант, интуиция проектанта по-прежнему играют определяющую роль, служат источником принятия большинства технических решений. *Если проектант не знает глубоко физику технологических процессов, которые ему надлежит "материализовать", не имеет в своем арсенале новых, самобытных идей и решений, не владеет принципами проектирования, никакая ЭВМ ему не поможет.* Период, когда всерьез почудилось, что учить надо не технологии проектирования, а только пользованию САПР, пройден как "детская болезнь левизны".

7.2. ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Этапы проектирования в организационно-методическом плане давно сложились как некая оптимальная последовательность действий, узаконенная соответствующими государственными стандартами.

1. *Техническое задание* (ТЗ) – итог всех предпроектных работ и одновременно исходный документ для всего процесса проектирования: в ТЗ устанавливается основная цель проектирования и оговариваются важнейшие требования и условия (номенклатура выпуска, производительность, эксплуатационные параметры и т.д.).

2. *Техническое предложение* определяет принципиальные проектные решения, какой именно структурно-компоновочный вариант объекта в целом будет положен в основу дальнейших конструктивных разработок.

3. *Эскизный проект* содержит схемные и частично конструктивные проработки подсистем объекта, его составных частей (кинематическая, вакуумная, газовая, гидропневмосхема, блок-схема САУ и т.д.); выбор типов и принципа действия функциональных механизмов и устройств.

4. *Технический проект* подразумевает полную конструктивную разработку механизмов и устройств, общих видов машины или системы машин, а также необходимую текстовую документацию, в том числе расчетную.

5. *Рабочий проект* содержит полную документацию, необходимую для изготовления машины: рабочие чертежи деталей (деталировки), перечень комплектующих деталей и узлов, а также сопроводительную текстовую паспортную документацию, например по программному обеспечению, инструкции по наладке, ремонту, обслуживанию и т.д.

ТЗ разрабатывает заказчик оборудования, однако к этому процессу, как правило, привлекаются и представители исполнителя (проектанта) для предварительного согласования, оценки возможностей, взаимоприемлемых компромиссов с учетом реальных возможностей.

На дальнейших этапах проектирования и изготовления определяющую роль играет разработчик, периодически согласовывая с заказчиком отдельные технические решения.

Критерии их выбора упомянуты ранее (см. гл. 1). Перечень и систематика решаемых задач во взаимосвязи с характером выполняемых расчетов по каждому этапу приведены в табл. 7.2.

Методы и аппарат некоторых расчетов, которые носят обобщенный характер (прочностные, кинематические, расчет гидропневмосистем, САУ и т.п.), рассматриваются в общеинженерных курсах и в данном пособии не затрагиваются.

7.2. Этапы проектирования и выполняемые расчеты

Этап	Выполняемая работа	Выполняемые расчеты
Заявка на проектирование	Анализ возможностей выполнения требований к качеству изделий и программе выпуска, экономической эффективности	Технологические прикидки. Ориентировочные расчеты возможных показателей производительности и эффективности
ТЗ и техническое предложение	Выбор технологических методов и разработка вариантов маршрутов обработки и сборки. Формирование совокупности структурно-компоновочных вариантов построения системы машин. Выбор оптимального варианта построения системы машин	Расчеты ожидаемых точности и длительности обработки по вариантам с учетом совмещения операций. Укрупненные расчеты ожидаемых показателей производительности и экономической эффективности по сравнительным вариантам. Расчет и выбор оптимального варианта
Эскизный проект	Разработка кинематических схем, пневмогидравлических схем и др. Выбор типа системы и разработка блок-схемы управления	Расчеты кинематических и пневмогидравлических схем. Расчет и выбор параметров системы управления
Технический проект	Разработка инструмента, приспособлений, механизмов и устройств привода, устройств управления, общих видов машин, транспортно-загрузочной системы, планировки	Силовые, кинематические, прочностные динамические, гидравлические, электротехнические расчеты
Рабочий проект	Деталировка сборочных единиц. Составление ведомости покупных изделий. Разработка маршрутной технологии. Разработка паспортной документации и оценка ожидаемых технико-экономических показателей	Расчеты размерных цепей. Расчет технологических сил и времени. Уточненные расчеты ожидаемой производительности, надежности в работе и ожидаемой экономической эффективности
Изготовление и сборка	Изготовление деталей. Узловая и общая сборка	Уточнение стоимости объекта
Сдача и приемка	Проверка узлов на геометрическую точность и жесткость. Приемосдаточные испытания машин у изготовителя по качеству изделий и надежности. Приемосдаточные испытания у заказчика по качеству изделий, надежности и производительности	Обработка результатов проверок, сравнение с требованиями. Обработка и обобщение результатов испытаний. Расчет фактических показателей качества изделий, производительности и надежности в работе, сравнение их с требуемыми

Спецификой расчетов при проектировании автоматизированного оборудования является оценка вариантов по критериям производительности, надежности, экономической эффективности. Теоретическому рассмотрению этих критериев были посвящены гл. 2 – 4; их приложению к познанию принципов построения машин-автоматов и их систем – гл. 5 и 6. Методы анализа и выбора технических решений на этапе технического предложения будут изложены в гл. 8 и 9.

Пример 1. ТЗ на проектирование производственного оборудования

Цель проекта – разработка, изготовление и поставка заказчику автоматизированной установки вакуумного нанесения многослойных тонкопленочных покрытий на полупроводниковые пластины (подложки).

Условия и требования:

А. *Изделия и технология*

1. Изделие – пластина кремния диаметром 150 мм.

2. Материалы покрытий – алюминий, титан, нитрид титана.

3. Толщина одного слоя покрытия 0,7…1,0 мкм; неравномерность толщины ± 5 %.

4. Рабочее расположение подложек вертикальное.

5. Выполняемые операции: предварительная очистка, нанесение покрытий, отжиг, охлаждение – в едином вакуумном цикле.

6. Температура нагрева пластин, °С: в модулях очистки и нанесения покрытий 100…400; в модулях отжига 300…700 с отклонением ± 5 %.

7. Допустимое количество частиц привнесенной дефектности размером более 0,2 мкм в газе на входе в рабочие камеры не более 3 частиц на литр объема.

Б. *Оборудование*

1. Состав: шлюзовая система загрузки-выгрузки, унифицированные рабочие камеры (модули), транспортная камера, системы подачи активного и инертного газов.

2. Вакуумная система с безмасляными средствами откачки всех камер на основе крионасосов с ловушками на выходе.

3. Предельное остаточное давление в транспортной и рабочих камерах не более $1{,}33 \cdot 10^{-5}$ Па.

4. Занимаемая площадь не более 5,0×3,5 м^2.

В. *Энергетика и управление*

1. Питание установки от трехфазной сети, потребляемая мощность не более 90 кВт.

2. Подача сжатого воздуха под давлением 4·10 Па (± 0,5 Па); холодной воды с температурой не выше 18 °С; горячей воды с температурой 70…80 °С; жидкого азота с расходом 60 л/смена.

3.Система автоматического управления – на основе промышленного компьютера.

4. Постоянное отображение на экране дисплея:

– порядковых номеров пластин во всех модулях;

– величины давления во всех камерах;
– мощности высокочастотной очистки магнетронов (при распылении);
– ресурса каждого магнетрона;
– мощности нагревателей в камерах распыления и на отжиге;
– длительности обработки на каждой операции.

5. Отображение на дисплее данных в случае сбоев: транспортной системы; системы очистки, распыления, откачки.

6. Накопление информации о работе установки в течение суток (в том числе по всем режимным характеристикам) с возможностью вывода информации в локальную вычислительную сеть.

Г. *Эксплуатационные характеристики*

1. Производительность не менее 15 шт./ч.

2. Коэффициент технического использования $\eta_{тех} \geq 0{,}90$.

3. Предельное время восстановления после отказа $\tau_в = 3$ ч.

4. Средняя наработка на отказ $m_{ср} = 720$ ч.

5. Срок службы $N \geq 5$ лет.

Д. *Безопасность эксплуатации* (по действующим государственным стандартам).

1. Условия работы персонала.

2. Требования по охране окружающей среды.

3.Требования к пожарной безопасности.

Е. *Стадии и сроки работ*

1. Разработка комплекта конструкторской документации и выдача изготовителю 3 мес.

2. Разработка и отладка программного обеспечения; монтаж установки 3 мес.

3. Приобретение комплектующих, изготовление деталей и узлов, их испытания 5 мес.

4. Отладка и доработка установки у изготовителя 2 мес.

5. Поставка, пусконаладка у заказчика 3 мес.

6. По окончании разработки заказчику должны быть предъявлены:
– образец установки в металле;
– программы и методики испытаний;
– протоколы предварительных испытаний у изготовителя;
– эксплуатационные документы (паспортная документация).

7. Приемка работ по проекту осуществляется подписанием двустороннего акта после окончания пусконаладочных работ.

В данном примере, взятом из реального ТЗ, отобраны те позиции, которые наиболее наглядно иллюстрируют последующие технические решения (реальное ТЗ более обширно).

Условия и требования, заложенные в ТЗ, выполняются принятием соответствующих технических решений постепенно и поэтапно таким

образом, чтобы каждая позиция ТЗ конкретно исполнялась ("закрывалась") конкретными действиями разработчиков и изготовителей. При этом некоторые условия выполняются "напрямую" – разработкой соответствующей документации (например, по приведенному выше ТЗ – единый вакуумный цикл, трехслойное покрытие, безмасляный вакуум и т.д.). Выполнение других условий требует подтверждения в процессе отладки и испытаний (степень вакуума, температура нагрева, безотказность, ремонтопригодность и т.д.).

Это можно проиллюстрировать схемой на рис. 7.1, раскрывающей выполнение приведенного выше примера ТЗ. В ТЗ было задано шесть групп условий и требований (А – Е). Их реализация начинается с этапа *технического предложения*, где разрабатывается технологический процесс и выбирается общая структурно-компоновочная схема.

Технологическим методом выбрано ионно-плазменное распыление материала с последующим осаждением его на подложке.

Конструктивная схема рабочей камеры показана на рис. 7.2. Наносимый материал (нитрид титана) первоначально представляет собой плоскую пластину *1* (мишень) толщиной в несколько миллиметров, на которую подается отрицательный потенциал, т.е. мишень является катодом. К держателю *3* изделий *2* подводится положительный потенциал. В вакуумную камеру *4* поступает инертный газ, ионизирующийся в электрическом поле. При возникновении разряда положительные ионы бомбардируют катод (мишень), выбивая из него частицы материала, которые распыляются в объеме камеры и попадают на анод – кремниевую пластину (подложку).

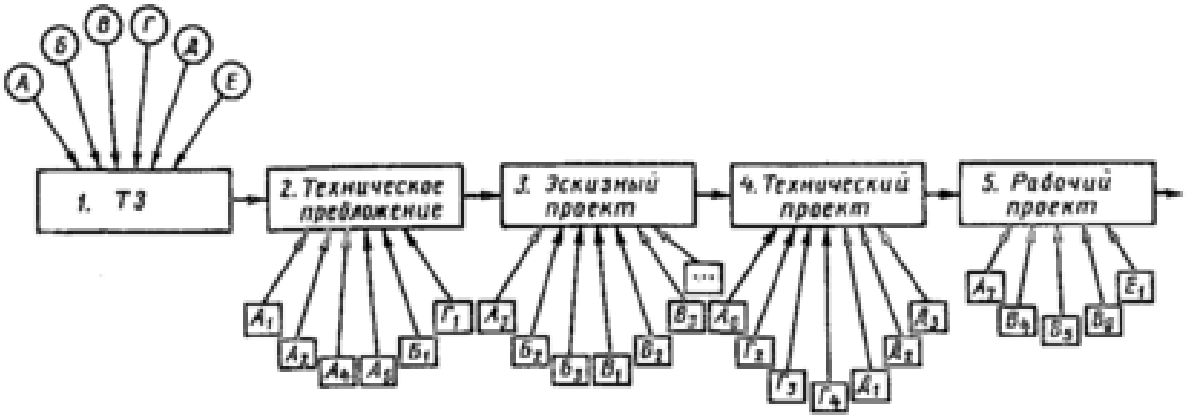


Рис. 7.1. Схема постановки требований к новой технике по ТЗ и их поэтапной реализации при проектировании

Через некоторое время на подложке появляется пленка материала катода, увеличивающаяся по толщине во времени до тех пор, пока продолжается процесс. Скорость роста пленки определяется такими конструктивными и режимными характеристиками, как вид плазмообразующего газа (азот, аргон и др.), интенсивность его подачи в камеру, рабочее напряжение, расстояние между подложками и мишенью и т.д.

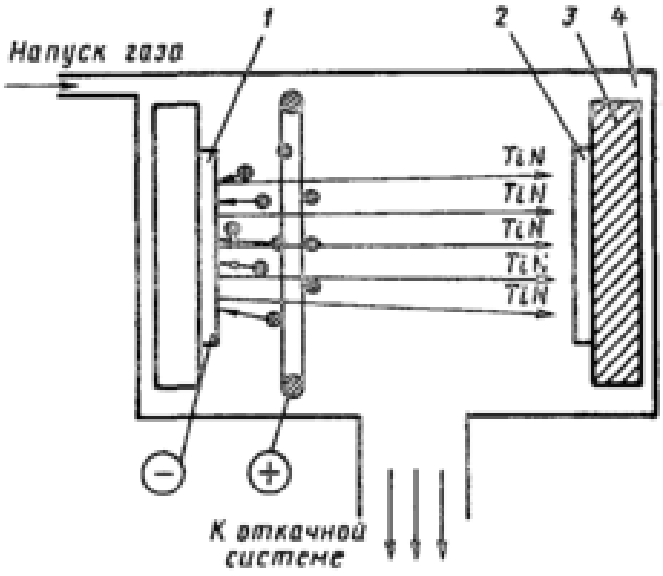


Рис. 7.2. Технологическая схема камеры-модуля ионно-плазменного нанесения тонкопленочных покрытий

В качестве структурно-компоновочного варианта на этапе технического предложения была принята линейная схема с двусторонним расположением технологических камер по отношению к транспортеру. Структурная схема установки с минимально возможным числом рабочих камер (четыре) приведена на рис. 7.3.

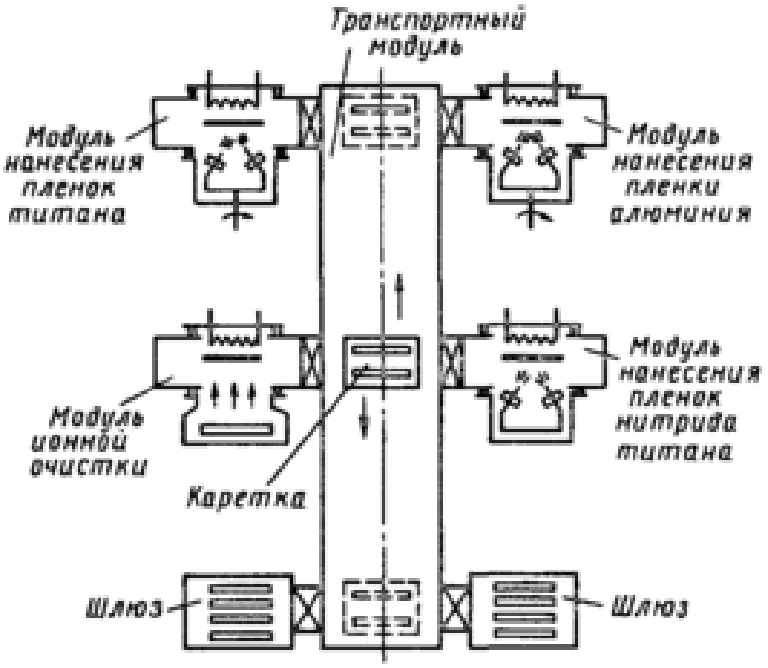


Рис. 7.3. Структурно-компоновочная схема многопозиционной установки нанесения тонкопленочных покрытий в вакууме

Таким образом, на этапе технического предложения выполнен ряд условий и требований ТЗ (см. рис. 7.2 и 7.3), а именно: нанесение конкретных материалов ($А_2$) на конкретные изделия ($А_1$), расположенные плоскостью вертикально ($А_4$); реализация всех технологических процессов. Транспортирование и накопление изделий осуществляются в вакууме, без промежуточной разгерметизации ($А_5$), что обеспечивается составом оборудования ($Б_1$) и призвано выдержать заданный уровень производительности ($Г_1$). Выполнение требований ТЗ отражено на рис. 7.1. Отметим, что удовлетворение всех данных условий, кроме $Г_1$, не требует дополнительного подтверждения.

Производительность же является пока расчетной величиной с учетом длительности всех рабочих (нанесения покрытий) и несовмещенных холостых ходов (межпозиционное транспортирование, замена подложек в камере), а также ожидаемой величины коэффициента использования. Время напыления – расчетная величина как функция требуемой толщины покрытий и ожидаемой интенсивности их роста при распылении материала мишени.

Расчетной величиной на данном этапе является также число рабочих камер; при высоких требованиях к производительности необходимы камеры-дублеры на операциях, лимитирующих по длительности.

Следующая группа требований и условий ТЗ реализуется техническими решениями, принимаемыми на этапе *эскизного проекта*. Разработка кинематики перемещения подложек, вакуумной и газовой схемы установки, ее электросхемы, блок-схемы САУ позволяет выполнить следующие требования и условия ТЗ (см. рис. 7.1): обеспечить необходимую толщину пленки ($А_3$), вакуум без паров масла ($Б_2$) с заданным предельным значением ($Б_3$), вид тока и потребляемую мощность ($В_1$), подачу воды и газа с соответствующими параметрами ($В_2$), САУ на микропроцессорной основе ($В_3$). Все количественные значения как результаты этих решений пока расчетные и требуют дальнейшего подтверждения.

Аналогично происходит последовательное выполнение требований и условий ТЗ на этапах *технического и рабочего проектов*, что также иллюстрирует рис. 7.1. Здесь выполняются прочностные расчеты деталей и передач; расчеты ожидаемых показателей надежности, размерных цепей, уровня микродефектности и т.п. Большинство полученных значений, воплощенных в конструктивные решения, требуют экспериментального подтверждения.

На этапе рабочего проекта появляется позиция ТЗ, по которой можно сравнить требуемое и реальное значение – это сроки разработки тех-

нической документации (E_1). В дальнейшем такие подтверждаемые факторы и параметры вынесены в верхнюю часть схемы (см. рис. 7.1).

7.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ПОСТАВКА

В сложнейших условиях рыночной экономики проектирование и изготовление новой техники выполняются зачастую различными организациями и даже в разных местах.

Это налагает самые серьезные требования на комплектность и отработанность передаваемой технической документации, установление необходимого взаимодействия всех заинтересованных сторон.

Технические документы рабочего проекта включают в себя текстовые и конструкторские документы.

Текстовые документы должны содержать:

– техническое описание, составленное на основе пояснительной записки к техническому проекту и откорректированное в соответствии с рабочим проектом;

– краткое описание конструкции, его техническую характеристику и принцип работы. В общем случае описание разбивается на разделы в такой последовательности: назначение, технические данные, состав конструкции, принцип работы, описание конструкции, размещение и монтаж;

– технические условия и нормы точности на изготовление, сборку, покраску, транспортирование, маркировку. Технические условия должны содержать все не указанные на чертежах технические требования к изготовлению, испытанию и поставке оборудования. Они разбиваются на разделы в следующем порядке: условия сборки, методы испытания, покраска, комплектность, правила приемки, маркировки, транспортирования;

– инструкцию по технике безопасности;

– уточненный расчет технико-экономической эффективности от внедрения оборудования в эксплуатацию;

– расчет размерных цепей и другие расчеты;

– инструкции по наладке, приемке и эксплуатации оборудования, которые должны содержать все правила и указания, необходимые для использования оборудования. Инструкция по эксплуатации разбивается на разделы: состав обслуживающего персонала, указания по технике безопасности, подготовка оборудования к работе, особенности эксплуатации, порядок работы оборудования, контрольно-измерительная аппаратура, контроль работы и настроек, объем и периодичность контрольно-

профилактических работ, характерные неисправности и методы их устранения, смазка, консервация и расконсервация;

– паспорт на создаваемое оборудование, который является документом, удостоверяющим гарантированные предприятием-изготовителем основные параметры и характеристики оборудования. В паспорт входят свидетельство о приемке, технические данные оборудования, комплект поставки, гарантийные обязательства, рекламации.

Конструкторские документы должны содержать следующие материалы:

– общий вид оборудования (комплекса) и сборочный чертеж (всей конструкции оборудования, группы, узла), включающие в себя изображения с необходимым и достаточным количеством видов, разрезов и сечений и дающие представление о расположении и взаимной связи составных частей;

– компоновочные и планировочные чертежи (при необходимости);

– общие виды групп и узлов;

– чертежи деталей групп и узлов;

– монтажный чертеж;

– кинематические, электрические, гидравлические, пневматические и комбинированные схемы;

– сводную спецификацию на конструкцию оборудования в целом;

– ведомость заимствованных групп, узлов, деталей;

– ведомость нормализованных групп, узлов, деталей;

– ведомость покупных изделий;

– ведомость комплектации;

– протоколы согласования с заводами-изготовителями покупных изделий, не включенных в прейскуранты.

Принципиальным новшеством нашего времени, как было сказано выше, явился перевод технической информации с бумажных на электронные (безбумажные) носители, что позволяет не только поэтапно реализовывать единую систему разработки и изготовления методами САПР (конструкторские чертежи механизмов и деталей, технологию изготовления и сборки, программы обработки деталей на станках с ЧПУ, организационную документацию планирования и контроля), но и передавать всю информацию по вычислительным сетям.

Процесс вторичной материализация проектных идей и замыслов во исполнение требований и условий ТЗ содержит следующие основные этапы, отраженные на рис. 7.4.

1. *Изготовление деталей*, приобретение комплектующих, узловая и общая сборка. На этом этапе взаимосвязь с требованиями и условиями ТЗ осуществляется прежде всего по срокам (см. с. 237).

2. *Отладка узлов, испытания* машины у изготовителя: на холостом ходу с прогонкой всех элементов рабочего цикла; под нагрузкой – путем обработки ограниченного числа изделий в отладочном режиме. На этом этапе проверяется значительная часть параметров, заложенных в ТЗ и номинально выполненных на этапах проектирования, например по рис. 7.4: толщина покрытий ($А_3$) предельный вакуум ($Б_3$), температура нагрева пластин ($А_6$), потребляемая мощность ($В_1$), а также сроки исполнения ($Е_4$) и др.

Так как испытания оборудования с их отладкой, технологической и конструктивной доработкой проводятся, как правило, в цехах по отдельным узлам и зачастую на холостом ходу, истинные значения выходных системных характеристик пока точной оценке не подлежат.

3. *Сдача-приемка у заказчика*, что производится совместно с представителями разработчика и изготовителя. Испытания выполняют в условиях, максимально приближенных к условиям дальнейшей производственной эксплуатации (подробнее см. гл. 10), с обеспечением всех необходимых требований. Проверяются прежде всего показатели качества продукции, например для установки нанесения тонких пленок (см. рис. 7.3): микродефектность готовых пластин ($А_7$) и толщина покрытий ($А_3$), а также работоспособность по коэффициенту технического использования ($Г_2$), длительности восстановления после отказов ($Г_3$), наработке на отказ ($Г_4$); выполнение всех требований по безопасности эксплуатации ($Д_1$ – $Д_3$), наконец полные сроки выполнения контракта и завершения работ ($Е_5$).

Если все требования ТЗ выполнены, можно проводить окончательные расчеты с разработчиками и изготовителями.

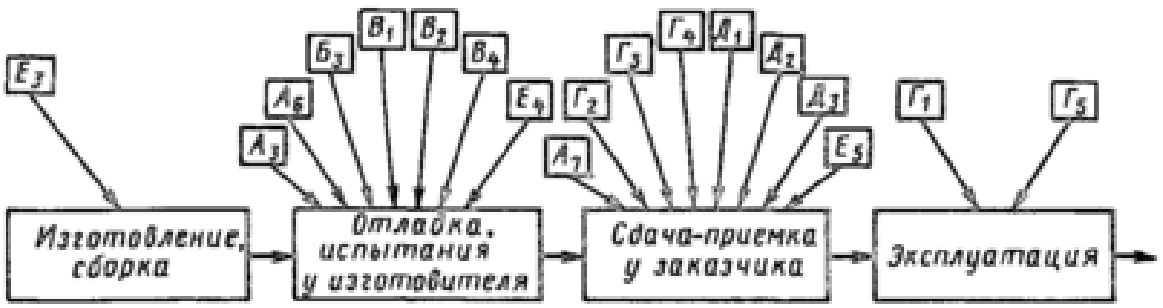


Рис. 7.4. Схема поэтапной реализации требований ТЗ в процессе изготовления и поставки

7.4. ВАРИАНТНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Формирование и выбор вариантов на различных этапах процесса создания новой техники имеет ряд особенностей.

На этапе технического предложения, когда выбирается принципиальное проектное решение по объекту в целом, формально разработчик имеет максимальную свободу действий: он может создавать машину одно- или многопозиционную, последовательного или параллельного агрегатирования, с непрерывным или дискретным технологическим процессом, вертикальной или горизонтальной компоновки и т.д. Именно выбор общего структурно-компоновочного решения в наибольшей степени определяют успех и судьбу проекта, ибо ошибки, допущенные в принципиальном выборе варианта, невозможно компенсировать самой грамотной конструктивной проработкой.

Казалось бы, задача может решаться чисто аналитически: сопоставлением ожидаемых выходных параметров, определяющих в конечном итоге рыночную оценку машины или системы машин. К ним относятся: стоимость и эксплуатационные затраты, производительность, качество выпускаемой продукции и т.д. (см. гл. 2 – 4). Это поддается количественным расчетам, которые будут рассмотрены в гл. 8 и 9. К этому следует добавить экологичность, возможные сроки поставки и т.д. Однако и этого недостаточно; необходимо учитывать многие субъективные факторы.

Реплика. *В конце 70-х годов XX века руководством СССР было принято очередное постановление об увеличении выпуска сельскохозяйственной техники, которое предусматривало строительство и расширение предприятий сельхозмашиностроения, оснащение их новым, современным оборудованием. Одному из проектно-конструкторских институтов было поручено создание автоматических линий сборки комбайновых цепей.*

Так как данная организация до тех пор занималась в основном линиями из агрегатных станков, то и для сборки цепей заложили аналогичную схему: линию последовательного дискретного действия с шаговым транспортером и стационарными сборочными позициями (см. гл. 6). Минимальная длительность сборочных переходов на каждой из позиций по сравнению с временем перемещений объекта из позиции в позицию, закрепления и открепления, подводов и отводов инструментов и т.д. предопределила в рабочем цикле до 80...90 % времени холостых ходов, а следовательно, невысокую производительность даже при высокой степени дифференциации самого процесса сборки. Линия была разработана, поставлена в срок и достаточно успешно эксплуатировалась.

Через несколько лет потребность в комбайновых цепях еще более возросла. Разработчикам было предложено вернуться к данной задаче и создать новую

или модернизированную конструкцию сборочной линии. И они создали ее, реализовав принципиально иное решение – роторную автоматическую линию, где все процессы комплектации цепи, вставления и закрепления конструктивных элементов, соединения звеньев и т.д. осуществлялись на ходу, без холостых ходов и инерционных сил.

При тех же технологическом маршруте и методах номинальная производительность по новому варианту была выше почти в 10 раз! На вопрос: "А почему же сразу не применили роторный вариант?" – автор получил искренний ответ: "В голову не пришло! Делали, как привыкли." Хотя ко времени первого проектирования уже были известны аналогичные роторные сборочные линии, созданные в Конструкторском бюро автоматических линий (КБАЛ, г. Подольск) под руководством выдающегося конструктора – акад. Л.Н. Кошкина [*14, 15*].

Истории этой, к сожалению, не выпал счастливый конец. Через несколько лет автору довелось побывать на заводе, где в короткие сроки был построен целый цех, оснащенный роторными сборочными линиями. Цех, однако, практически не работал, его просто не удавалось запустить из-за низкой надежности оригинальных и недостаточно отработанных конструктивных решений. Линии были спроектированы с жесткой межагрегатной связью, когда любой отказ, любой перекос при монтаже одного из элементов останавливал всю систему. Так и осталось вопросом, на что правильнее было опираться в данной конкретной ситуации: на собственный опыт конструирования или на прогрессивные, но малознакомые схемы?

Приведенный пример позволяет сделать вывод, справедливость и значимость которого выходит далеко за рамки проектирования новой техники: *чем выше сложность и значимость намеченного проекта, тем обширнее и серьезнее должна быть предпроектная проработка общей стратегии действий, выработка принципиальных проектных решений.*

Прежде всего, ни один реально возможный и разумный вариант нельзя не принять во внимание, оставить вне многостороннего анализа. А сравнительный анализ и выбор варианта должны быть выполнены не только по количественным (через технико-экономические и коммерческие расчеты), но и по качественным критериям.

Выбор принципиальной схемы проектируемых машин-автоматов, тем более их систем должен содержать три стадии.

I. *Формирование совокупности* разумных с инженерной точки зрения и технически возможных *вариантов* с учетом всех отличительных признаков, значимых для конкретного объекта.

II. *Сравнительный поэтапный анализ* вариантов по качественным и количественным критериям с постепенным сужением круга рассматриваемых решений.

III. *Выбор единственного варианта* в качестве оптимального с выдачей исходных данных для последующих этапов проектирования.

С учетом важности данной задачи именно выбору принципиальной схемы на этапе технического предложения посвящены последующие разделы книги, которые содержат методические подходы и примеры как для отдельных машин-автоматов (гл. 8), так и для автоматических линий (гл. 9).

Предшествующий опыт позволяет во многих случаях сразу уменьшить число рассматриваемых вариантов производственного проектирования, доводя их порой до минимальной выборки. А принципиально новые решения следует сначала отрабатывать на макетах, опытных образцах, не забывая отслеживать действия конкурентов и мировой опыт.

Обращаясь к приведенному примеру, можно говорить о трех вариантах принципиальной схемы многопозиционной установки вакуумного нанесения тонких пленок:

1) установке с линейным транспортером и двусторонним расположением рабочих и шлюзовых камер (см. рис. 7.3);

2) установке с линейным транспортером и односторонним размещением камер (рис. 7.5, *а*);

3) установке с центральной транспортной камерой и расположением рабочих и шлюзовых камер по окружности (рис. 7.5, *б*).

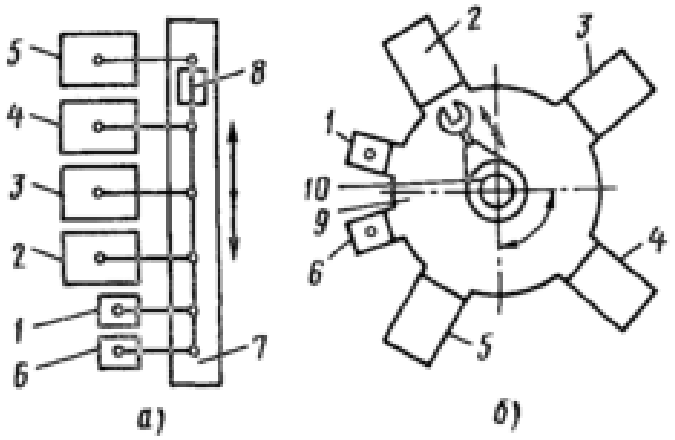


Рис. 7.5. Варианты принципиальной схемы многопозиционной установки нанесения тонкопленочных покрытий:
а – с линейным расположением позиций;
б – с расположением позиций по окружности;
1 и *6* – шлюзовые камеры соответственно для заготовок и для готовых изделий;
2 – 5 – технологические камеры; *7* – линейный транспортер; *8* – спутник с изделиями;
9 – центральная вакуумная камера; *10* – поворотный манипулятор

Во всех трех вариантах технология нанесения, а также конструктивное исполнение функциональных модулей рабочих и шлюзовых камер (см. рис. 7.2) идентичны, а следовательно, показатели общей стоимости и производительности не могут отличаться существенно; критериями выбора являются в первую очередь занимаемая площадь и удобство обслуживания установки, а также предшествующий опыт разработчиков как некая гарантия надежности установки в работе.

Второй вариант (см. рис. 7.5, *а*) привлекателен по доступу ко всем механизмам при наладке и устранении отказов, но он предполагает существенную разницу в линейных габаритных размерах по длине и ширине, а заказчиком заданы площади с сопоставимыми размерами длины и ширины.

Что касается схемы, выполненной по варианту, показанному на рис. 7.5, *б*, то она привлекательна тем, что единый поворотный манипулятор может выполнять функции и передачи изделий из позиции в позицию, и ввода-вывода из камеры; в схемах по первому и второму вариантам для этого необходимо иметь два вида механизмов с их дублированием по позициям. Такая схема популярна и применяется, однако у конкретного разработчика достаточного опыта по данным компоновкам не было. Кроме того, общие габаритные размеры оказываются большими и в требования ТЗ укладываются с трудом. Поэтому и был выбран первый вариант (см. рис. 7.3).

Вариантность на этапе эскизного проекта сводится прежде всего к выбору вариантов реализации кинематики, пневмогидравлической, вакуумной, газовой схем, а также их состава и комплектации.

Здесь несколько иной состав критериев сравнительного анализа и расчета выбора (см. табл. 7.2). Количественные критерии соседствуют с качественными, проектные решения более субъективны, чем для машины в целом, так как важнейшим фактором (пока в неясном виде) становится фактор надежности механизмов и устройств в работе, что определяется и схемными, и конструктивными решениями.

Полезной в данном случае может оказаться некоторая формализация процесса качественного анализа, например табличным методом. Для этого прорабатывается, с одной стороны, перечень альтернативных вариантов, что следует делать в эскизной форме, желательно с численными характеристиками, с другой – перечень критериев сравнения (количественных и качественных).

Вся эта информация сводится в единую таблицу, где для каждого варианта фиксируются относительные достоинства и недостатки по каждому из критериев в системе "плюс-минус", т.е. в качественном виде даже там, где критерии носят количественный характер, например быстродействие, стоимость, габаритные размеры и т.п. (примеры см. далее, табл. 7.3 и др.).

Если критериальные оценки "единодушны", т.е. один из вариантов имеет одни "плюсы", то выбор бесспорен. Однако именно для таких ситуаций и не нужно делать никаких дополнительных анализов, ибо таковые решения уже являются типовыми, принятыми, внеконкурентными.

Интерес представляют противоречивые ситуации, когда достоинства и недостатки по различным критериям не совпадают. В этих случаях необходимо выделить наиболее значимые критерии для данной, конкретной ситуации и провести по ним повторное сравнение.

В конечном итоге, выбор определяется личностью разработчика, его талантом и опытом, характером мышления, симпатиями и антипатиями. Любые количественные и качественные факторы, виды формализации и т.д. способны лишь придать этому мышлению более упорядоченный характер.

Пример 2. Выбор вида звеньев настройки технологических режимов токарного оборудования. Варианты звеньев настройки:

А) коробка скоростей с передвижными блоками шестерен (рис. 7.6, *а*);

Б) гитара сменных шестерен (рис. 7.6, *б*);

В) механический вариатор с бесступенчатым регулированием;

Г) сменные шкивы (рис. 7.6, *в*);

Д) электродвигатель постоянного тока;

Е) электродвигатель переменного тока с регулируемой частотой.

Критерии сравнительной оценки приведены в табл. 7.2.

Отметим, что перечни и вариантов, и критериев сравнительной оценки можно составлять в любой последовательности – в том порядке, который приходит на ум. Примерный перечень критериев для данной ситуации приведен в табл. 7.3. Критерий "дополнительные габаритные размеры" включает в себя расширение как самого привода, так и площади для хранения сменных шестерен, шкивов и т.д. Критерий "ступенчатость регулирования" имеет двоичную оценку: бесступенчатое регулирование – плюс, ступенчатое – минус.

Перечень критериев в любых ситуациях может быть расширен, однако он не должен содержать параметров, которые необходимо непременно обеспечить, например по прочности.

Имея перечень вариантов и критериев их сравнения, составляем таблицу – матрицу 7.3, плюсами отмечаем сравнительные достоинства, минусами – недостатки, также в сопоставлении.

Прокомментируем кратко некоторые варианты.

Применение коробок скоростей и подач (см. рис. 7.6, *а*) приводит к увеличению габаритных размеров и массы шпиндельной бабки станка, так как независимо от конкретного маршрута потока мощности все шестерни остаются в составе привода, хотя дополнительные стоимость и масса привода в целом меняются мало. Переключение режимов проводится почти мгновенно, вручную, достаточно удобно (автоматические коробки передач в примере не рассматриваются, хотя при желании это можно сделать дополнительно по той же методике). Передаваемая мощность и диапазон регулирования могут быть без труда обеспечены соответствующими прочностными и кинематическими расчетами.

Применение гитар сменных шестерен – самый дешевый вариант; габаритные размеры привода минимальны, но сменные шестерни нужно где-то хранить. Замена шестерен занимает немалое время и выполняется вручную, хотя и без каких-либо неудобств.

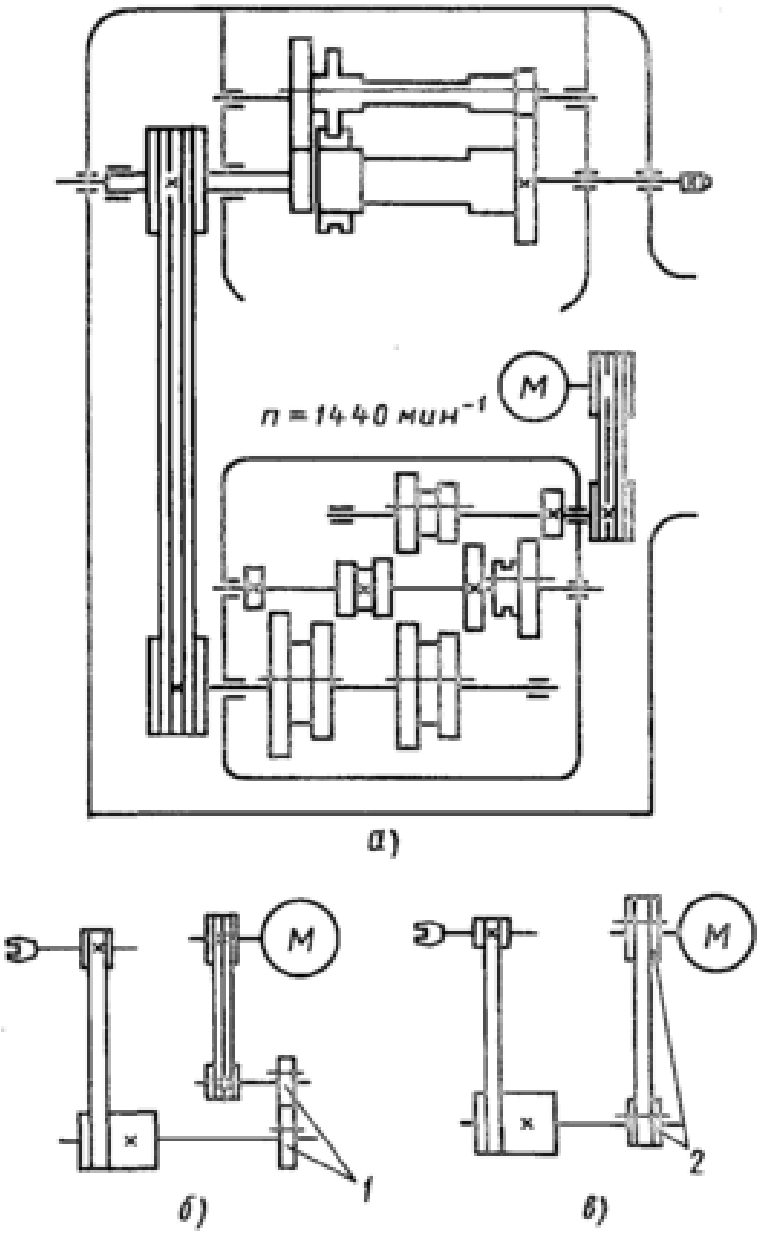


Рис. 7.6. Варианты кинематики станков с различными звеньями настройки:
а – с коробкой скоростей; *б* – с гитарой сменных шестерен;
в – со сменными шкивами; М – мотор; *1* и *2* – сменные шестерни и шкивы соответственно

Достоинства вариаторов – бесступенчатое регулирование и минимальные сроки настройки, недостатки – ограниченность передаваемой мощности и неудовлетворительная надежность, что предопределяет их применение в несиловых передачах.

Так какие же звенья настройки следует применять в токарном оборудовании? Отпадают варианты В – из-за ограниченности передаваемой мощности и Г (сменные шкивы) – из-за недостаточности диапазона регулирования (хранить где-то большое количество шкивов – неразумное решение).

7.3. Сравнительные характеристики звеньев настройки технологических режимов

Критерии сравнительной оценки	Варианты					
	А	Б	В	Г	Д	Е
Конструктивная простота, стоимость, масса	–	⊕	–	–	–	–
Дополнительные габаритные размеры	+	–	–	–	–	–
Ступенчатость регулирования		–	+	–	+	+
Автоматизация настройки	–	–	+	–	⊕	⊕
Передача мощности	+	+	–	+	+	+
Надежность в работе	+	+	–	+	–	+
Мобильность настройки	⊕	–	+	–	+	+
Удобство настройки	⊕	+	+	–	+	+
Диапазон регулирования	+	+	–	–	+	+
⋮						

Остальные звенья настройки применяются широко – в зависимости от вида токарного оборудования, его особенностей и требований.

В *универсальных токарных станках* наиболее важны малая стоимость (сам станок дешевый) и быстрота переключения, что приходится делать весьма часто. Ручной характер переключения не проблема, ибо в целом токарь выполняет огромное количество ручных приемов (зажим и разжим заготовок, подвод и отвод суппортов, замена и настройка инструментов на размер, включение и выключение двигателя и т.д.), переключение рукоятками блоков шестерен мало изменяет общую интенсивность обслуживания – было бы удобно.

В *токарном оборудовании с ЧПУ* режимы необходимо переключать столь же часто, как на универсальных станках, но других операций ручного обслуживания в пределах рабочего цикла нет, поэтому и переключения надо выполнять только автоматически.

Многошпиндельные токарные автоматы работают в условиях массового и крупносерийного производства, их переналадка проводится редко. Время кинематической перенастройки не главный фактор, как и ступенчатость регулирования.

Итак, для универсальных токарных станков важнейшие критерии выбора звеньев кинематической настройки – минимальное время и удобство (отмечены кружком в табл. 7.3), поэтому повсеместно применяются коробки скоростей и подач, в частности автоматизированные коробки скоростей (АКС), что ускоряет и облегчает переключение блоков шестерен, но увеличивает массу, габаритные размеры, стоимость. Приходится выбирать, что важнее.

В многошпиндельных токарных автоматах мобильность переключения серьезной роли не играет, основное стремление – к конструктивной простоте, отсюда – применение гитар сменных шестерен.

В токарных станках с ЧПУ главное – автоматизация перенастройки, для чего идут на увеличение массы и стоимости, связанные с применением АКС или регулируемых электродвигателей постоянного или переменного тока.

А в настольных токарных станочках сплошь и рядом применяются ступенчатые шкивы, что также можно обосновать табл. 7.3.

Реплика. Все это – типовые решения, и проблем выбора вариантов в большинстве конкретных ситуаций не возникает. Но будущему специалисту необходимо понимать, почему именно так.

Аналогичные примеры альтернативности на уровне выбираемых видов механизмов и устройств могут быть рассмотрены, например:

– для зажима круглого материала – цанговые, кулачковые, гидропластовые и другие устройства;

– для периодического поворота многопозиционных столов, шпиндельных блоков и т.п. – мальтийские (плоские или сферические), кулачково-цевочные, зубчато-реечные и другие механизмы;

– для обработки корпусных деталей – силовые головки самодействующие или несамодействующие, с гидравлическим, электромеханическим, кулачковым приводами.

Каждое из альтернативных решений обладает неповторимым сочетанием достоинств и недостатков, в каждой конкретной ситуации значимость отдельных достоинств и недостатков различна. И далеко не всегда в конкретных ситуациях просматриваются безапелляционные решения.

На этапе технического проекта, как было доказано в разд. 7.2, проводятся полная конструктивная проработка всех функциональных компонентов машины; состыковка механизмов, устройств, базовых узлов и т.д. с разработкой общих видов.

Так как основные структурно-компоновочные решения уже приняты на этапах технического предложения и эскизного проекта, вариантность технических решений проявляется на уровне выбора комплектующих, конструктивной реализации деталей и соединений (микросборок).

Выбор технических решений на данном этапе (за исключением связанных с прочностью) еще более субъективен, чем на предыдущих этапах, поскольку при разработке, например, винтовых соединений, подшипниковых опор и т.п. критерии стоимости, производительности, мобильности, универсальности и т.п. практически не работают, расчеты носят чисто технический характер (выбор геометрических размеров по прочности, расчет размерных цепей, табличная оценка долговечности и т.п.).

На первый план, как никогда ранее, выходят личность разработчика (см. табл. 7.1), его талант и опыт, приверженность к тем или иным методам работы и решениям. Здесь, как и далее, на этапе рабочего проекта, становится справедливым известное мнение: *дайте разработчику максимум исходной информации, помогите уяснить все возможные варианты, а лучший он выберет сам и без всяких расчетов.*

По выбору типажа комплектующих (от номера подшипника до электродвигателя или вакуумного агрегата в целом) существует обширная справочная литература, а также широчайшие возможности информационных сетей (Internet и т.п.), однако с небогатыми возможностями прямого сопоставления.

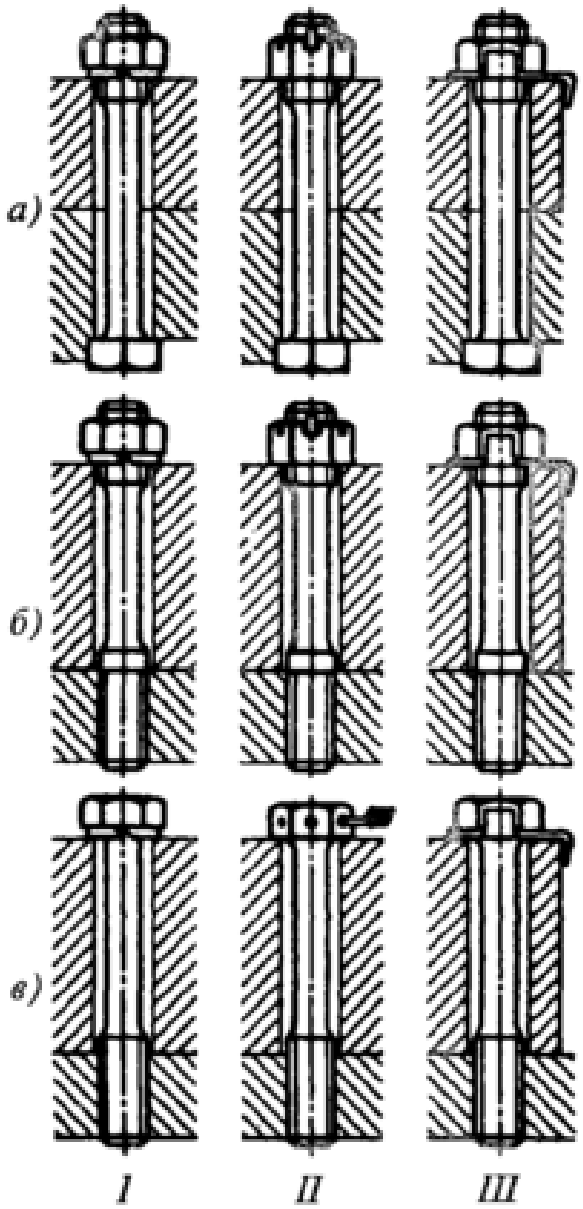


Рис. 7.7. Способы стопорения разборных крепежных соединений

Что касается вариантности технических решений на уровне отдельных микросборок, соединений деталей и т.д., то здесь систематизированной информации недостаточно. Примером для подражания будущим авторам может служить уникальная книга [18], написанная несколько десятилетий назад, дважды переизданная и все же малоизвестная. В ней рассмотрены, например, несколько сотен (!) конкретных примеров стопорения крепежных деталей с использованием стопорящих элементов ("позитивное"), фрикционных сил, сил упругости и т.д.

В качестве примера на рис. 7.7 приведены варианты способов стопорения крепежных соединений, потенциально подвергаемых последующим разборкам и сборкам. Основные требования – долговечность затяжки и возможности быстрой разборки. Так, для соединения деталей посредством обычных болтов и гаек (рис. 7.7, *а*)

возможны фрикционное стопорение (I) пружиной и шайбой, применение специальных гаек и шплинтов (II), шайб с отгибом (III). Аналогичные способы можно проследить в соединениях деталей ввертными болтами и гайками (см. рис. 7.7, *б*) или просто ввертными болтами (см. рис. 7.7, *в*).

На рис. 7.8 приведены способы стопорения глухих резьбовых соединений, которые разборке не подлежат или это выполняется в аварийных ситуациях. Стопорение может быть обеспечено полной или частичной сваркой или пайкой (поз. I и II), закерниванием или расклепкой участка резьбы (поз. III и IV), развальцовкой конца болта (поз. V и VI), обжатием удлиненной части специальной гайки (поз. VII), расклиниванием конца болта (поз. VIII), применением шплинта или штифта (поз. IX).

Каждый способ имеет немало вариантов конструктивной реализации, например фрикционное стопорение контргайками, наружными и внутренними, с подпружиниванием и без него и т.д. Весьма разнообразно конструктивное исполнение стопорящих отгибных шайб (рис. 7.9). Стопорение пластинками с их отгибом применяется не только для локальных, но и для парных резьбовых соединений (рис. 7.10).

Реплика. *"Материальную часть" конструктивных элементов машин студенты инженерных вузов, как правило, неплохо знают из курса "Детали машин". Но многовариантности решений, критериальному подходу (помимо прочности и иногда долговечности) там учат мало.*

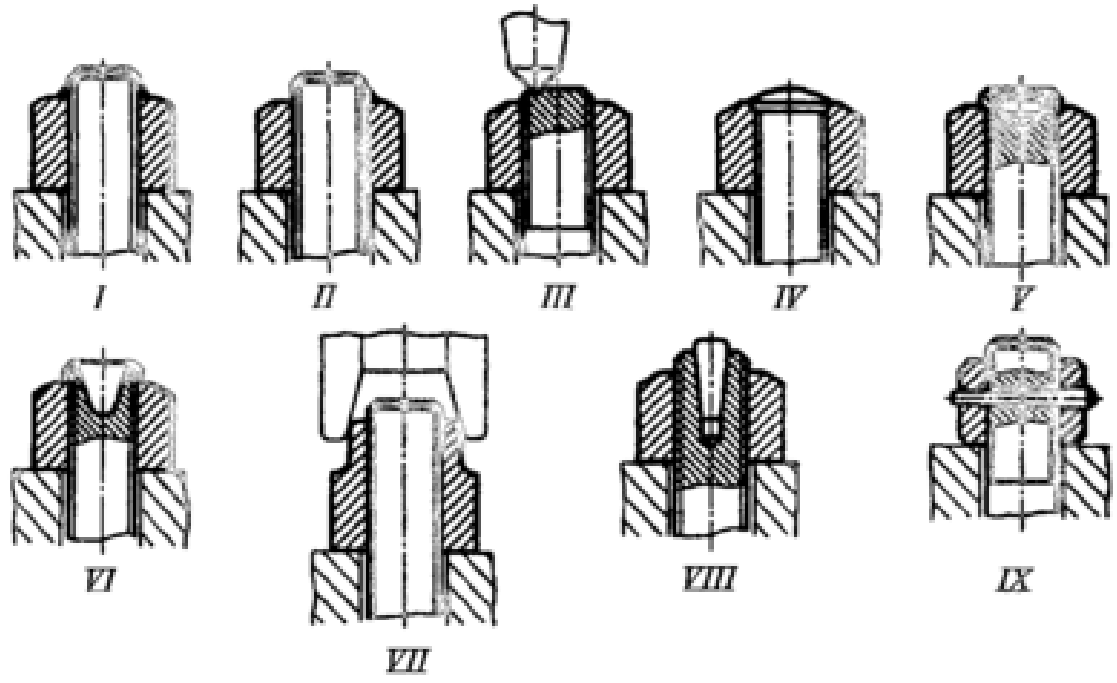


Рис. 7.8. Способы стопорения глухих крепежных соединений

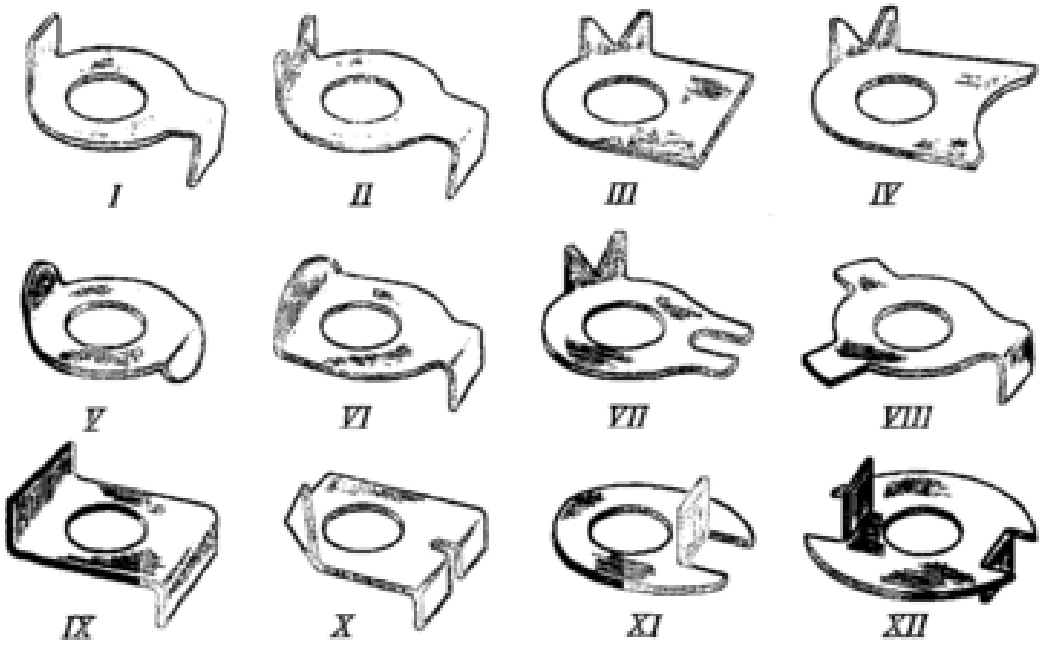
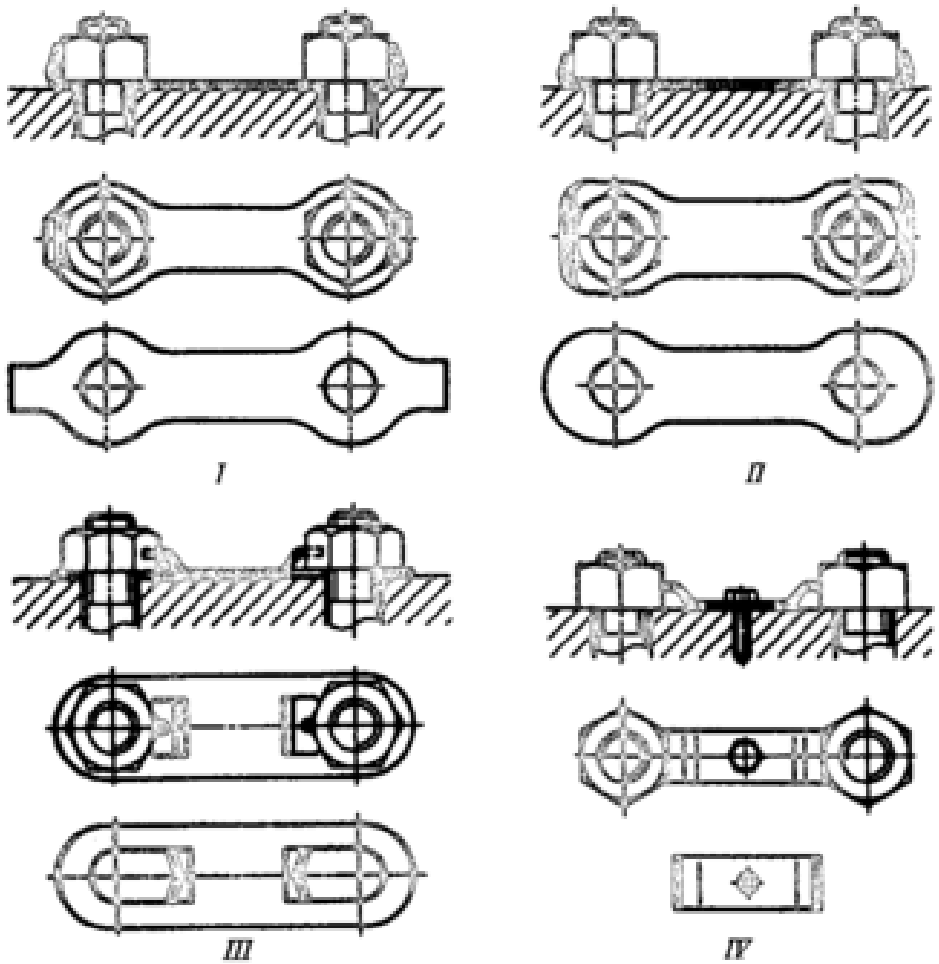


Рис. 7.9. Варианты конструктивного исполнения отгибных шайб



7.10. Варианты стопорения парных резьбовых соединений пластинками с отгибом

7.5. ОРГАНИЗАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ СОЗДАНИЯ И ПОСТАВКИ

Условиями высокой эффективности внедрения новой техники, особенно на уровне производственных систем (автоматические линии, гибкие производственные системы, участки и цехи), являются, в частности, четкая организация и координация работы всех подразделений, задействованных в проектировании, изготовлении и поставке оборудования. Подробно эти вопросы рассмотрены в разд. Д5.

Тенденция сокращения объема оригинального конструирования при создании новой техники объективна. Даже при новых условиях и требованиях к поставляемому оборудованию стремятся либо использовать известные и апробированные образцы, либо реализовать новые структурно-компоновочные решения объектов в целом путем комплектации из распространенных компонентов – от деталей до функциональных узлов. Поэтому создание даже относительно несложного локального оборудования требует установления многих деловых связей: не только с заказчиком и изготовителем, но и с поставщиками комплектующих. Это под силу даже относительно небольшим коллективам, например в рамках малых предприятий при наличии в их составе опытных разработчиков и менеджеров.

При решении комплексных задач расширения и модернизации действующих производств, тем более создания новых, требуются поставки значительного количества разнообразного оборудования (основного технологического, транспортно-накопительного, обслуживающего, наконец, развитых САУ с выполнением технических и организационных функций).

При этом необходимы состыковка, интеграция вновь спроектированного и закупаемого оборудования – даже в пределах конкретных *технологических линий.*

Общая организация и координация работ здесь неизмеримо сложнее по существу и по срокам: кто-то должен брать на себя основную ответственность, быть головной организацией в данном проекте на всем его протяжении – от начальных этапов до ввода в эксплуатацию.

Возможны следующие варианты:

1) Если потребитель представляет собой достаточно мощное, сложившееся производство, он может взять на себя всю организацию работ. Тем самым будут обеспечены более экономное расходование средств, затрачиваемых на проект; постоянное отслеживание хода выполнения проекта и т.д. Однако это неизбежно отвлекает руководство от основной

задачи – обеспечения работы действующих производств, выпуска продукции и ее сбыта.

2) Потребитель объявляет тендер, т.е. открытый конкурс и торги среди возможных претендентов на выполнение проекта, оставляя за собой функции заказчика: формулирование исходных задач и требований и дальнейшее участие лишь в согласованиях по ходу выполнения проекта и проведении приемосдаточных испытаний.

Это избавляет руководство потребителя от множества повседневных забот и огорчений, однако увеличивает риск получения не того, что ожидалось.

При тендерном варианте заказчик с целью выбора основного исполнителя выдает неопределенному кругу претендентов (за тендерный залог!) исходные материалы в виде ТЗ на проект.

Каждый из претендентов в условиях секретности представляет заказчику бизнес-план, который содержит техническое предложение как вариант технической реализации проекта и коммерческое предложение по цене, форме платежей, срокам выполнения проекта в целом и по этапам. Участниками тендера могут быть:

– *крупные организации – разработчики и изготовители оборудования*, особенно в тех ситуациях, когда требуется значительный объем новых, оригинальных проработок по технологии, конструированию, организации производства и т.д., иными словами, когда основная часть разработок может быть выполнена своими силами и, тем самым, "заработана" большая часть средств по проекту;

– *инжиниринговые организации*, которые собственными силами выполняют в основном организационно-координирующие функции, однако несут полную ответственность, в том числе материальную, перед заказчиком за весь проект, привлекая для выполнения отдельных этапов работ соисполнителей также на конкурсной основе ("вторичные тендеры").

После получения всех заявок заказчик закрытым путем выбирает основного исполнителя проекта – по критериям минимально запрошенной цены, приемлемых сроков поставки, авторитета организации и т.д. Если проект требует серьезных проектно-конструкторских работ, больше шансов у организаций-разработчиков; если проект можно осуществить комплектацией известного оборудования, велики шансы у инжиниринговых организаций.

С выбранным исполнителем заключается контракт на поставку научно-технической продукции, с указанием вида оборудования и всех требований, цены, сроков поставки, форм платежей, форс-мажора и т.д. Иногда контракт разбивается на две части: предварительный и основной.

Первичные тендерные условия заказчика и предложения претендента, выигравшего в итоге крупный тендер, зачастую требуют дополнительной, более глубокой проработки и согласования по различным позициям. Поэтому на создание сложных систем, основанных на новых технических идеях, заключается отдельный договор на углубленную проработку ТЗ и технического предложения. Среди задействованных структурных подразделений – большинство своих. Организация работ по созданию и поставке сложных производственных систем на примере комплексной автоматической линии кратко рассмотрена в разд. Д5.

При инжиниринговой организации выполнения проекта предусматривают обычно не оригинальные новые разработки, а комплектацию производственной системы из известных компонентов, которые необходимо заказать на предприятиях-изготовителях. После заключения контракта выполняются: технический проект системы в целом (дизайн-проект) со взаимной состыковкой функциональных блоков; изготовление оборудования; транспортирование оборудования и его монтаж у заказчика; общий монтаж производственной системы, шеф-монтаж; пусконаладочные работы; сдача-приемка объекта у заказчика.

Одним из условий процветания инжиниринговой фирмы является разумное распределение функций между самой фирмой и исполнителем. Тактика заключается в том, чтобы сначала получить в свое распоряжение все средства по проекту путем единоличного участия в тендере, а далее так распределить обязанности, чтобы держать в собственных руках только ключевые функции и иметь в штате только высококлассных специалистов.

Иллюстрацией этого служит рис. 7.11, где в верхней части приведена типовая структура инжиниринговой фирмы [23], а внизу – основные этапы реализации проекта *1 – 9* с распределением функций по выполнению (стрелка вверх – себе, стрелка вниз – соисполнителям).

Безусловно, фирма стремится оставлять в своих руках все работы по тендеру, что диктуется не только чисто экономическими соображениями (получить в распоряжение все средства по проекту), но и коммерческими секретами. Научно-исследовательские и конструкторские работы целесообразно частично отдавать на сторону, привлекая специализированные подразделения отраслевых НИИ.

Необходимо самостоятельно выполнять технический проект как важнейший этап всего процесса создания новой техники. И наоборот, к наиболее "рисковым" этапам: изготовлению оборудования и его монтажу – подключать соисполнителей через тот же механизм тендерных торгов, но уже в качестве их организатора.

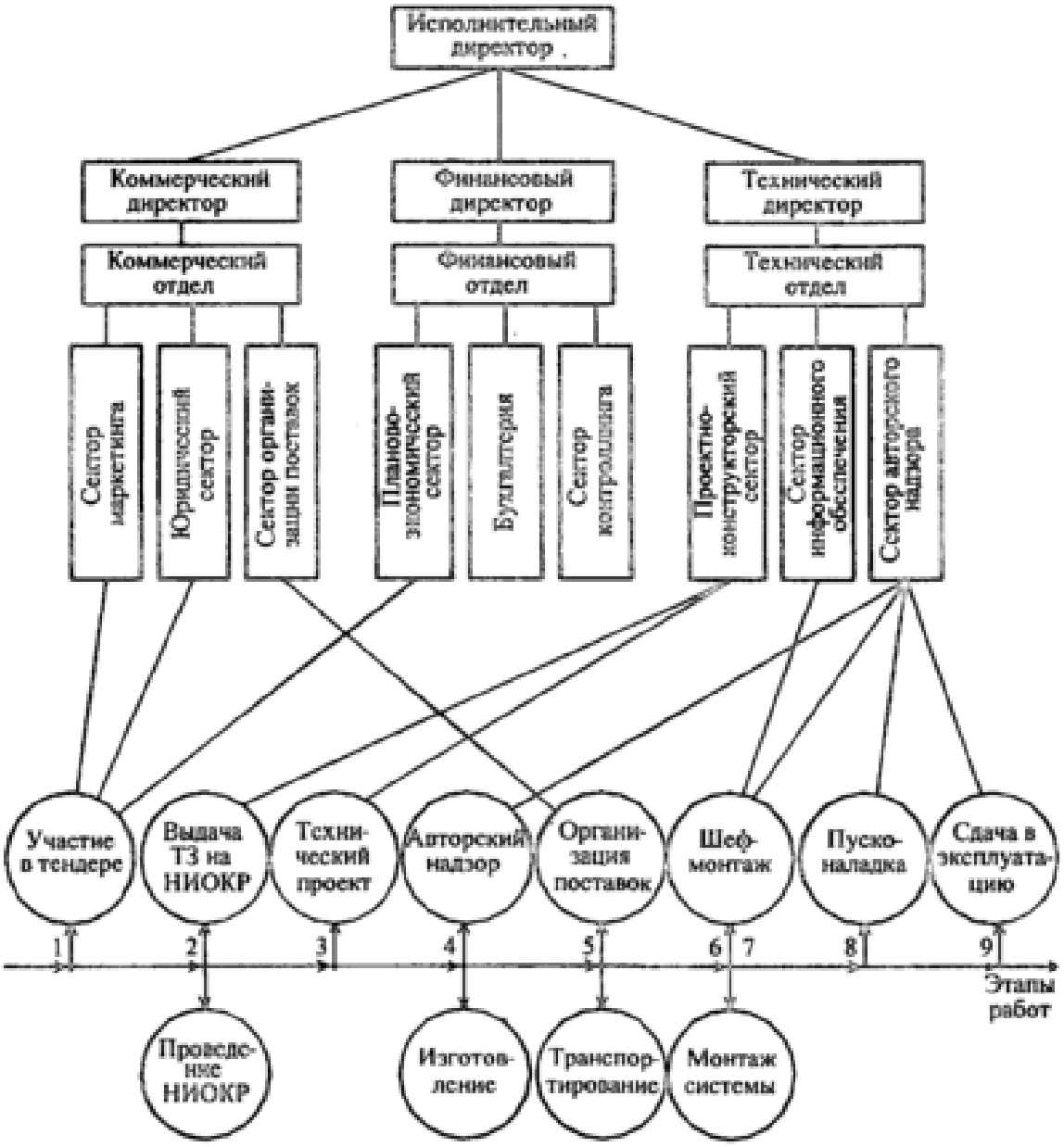


Рис. 7.11. Организационная структура инжиниринговой фирмы

Наконец, завершающие этапы, связанные с пусконаладкой и вводом в эксплуатацию, также не следует выпускать из рук, имея в виду и контроль за работой соисполнителей, и ответственность перед заказчиком.

Тем самым, инжиниринговая фирма как головной исполнитель складывается и функционирует как компактный коллектив высокопрофессиональных специалистов, связанный выгодными экономическими отношениями с достаточно широким кругом соисполнителей работ.

Ключевые функции определяют организационную структуру управления инжиниринговой фирмы. Необходимо иметь три ведущих отдела

(см. рис. 7.11): *коммерческий, финансовый и технический*, в составе которых целесообразно сформировать специализированные подразделения (сектора и группы):

– *в коммерческом отделе* – маркетинговый сектор с группами по территориальному и отраслевому разделению; юридический сектор с группами договоров, административного обеспечения; сектор организации поставок с группами по закупкам, перевозкам, таможенному оформлению;

– *в финансовом отделе* – планово-экономический сектор; бухгалтерию;

– *в техническом отделе* – проектно-конструкторский сектор; сектор авторского надзора, шеф-монтажа и пусконаладки; сектор формирования базы данных.

Следует использовать линейно-функциональный принцип построения структуры, когда реализацию одной функции одновременно обеспечивает несколько секторов из разных отделов. Например, участие в тендере и выдачу технико-коммерческих предложений обеспечивают маркетинговый, юридический, планово-экономический, проектно-конструкторский сектора; функцию организации поставок – юридический, организации поставок, бухгалтерия.

Для обеспечения мобильности управления инжиниринговой фирме необходимо использовать принцип минимизации числа управляемых звеньев, оптимально не более трех ("триадный принцип"). Например, в подчинении исполнительного директора находятся коммерческий директор, финансовый директор, технический директор. В свою очередь, каждому из них должны быть подчинены руководители трех соответствующих секторов, имеющие в подчинении по нескольку исполнителей. При такой структуре общая численность работающих на фирме может составить не более 40…50 чел.

Глава 8

ВЫБОР ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРОЕКТИРУЕМЫХ МАШИН-АВТОМАТОВ

8.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Принципиальная схема машины – это *ее схемное решение, комплексно определяющее технологические и структурно-компоновочные параметры.*

Изображение принципиальной схемы машины в технической документации содержит, как правило, проработки не только технологии, но и кинематики, пневмогидравлической и вакуумной схем, блок-схемы управления и т.д.

Выбор принципиальной схемы машины – основа проектных решений в сфере материального производства, его необходимо сделать на ранних этапах выполнения проекта.

Проект – это *мысленный образ, воплощаемый далее в результаты человеческого труда* (см. разд. 7.1). Термин "проект" сейчас весьма популярен и употребляется применительно ко множеству видов человеческой деятельности (финансовый проект, телевизионный проект, шоу-проект и т.п.). Начало идет *от мысли, от идеи и завершается проектными решениями.* В сфере материального производства проектные решения как результаты проекта материализуются сначала в комплекте технической документации, а затем в самих технических средствах, "в металле" (см. разд. 7.2, 7.3). При этом непринципиально, создается новое оборудование или приобретается известное.

Оптимальное проектирование – это процесс достижения оптимальных проектных решений, сочетающий в себе оптимальную последовательность этапов работы над проектом с оптимальными решениями на каждом этапе. Не следует смешивать *оптимальное* и *машинное* (компьютерное) проектирование, что зачастую вольно или невольно делается. Термин "оптимальное проектирование" ставит во главу угла результаты, "машинное проектирование" – средства их достижения.

Опыт и талант проектантов зачастую обеспечивают оптимальные проектные решения без всякой компьютеризации. Значимость машинного проектирования – в передаче многих рутинных проектных процедур "на плечи ЭВМ", в ускорении и удешевлении проектирования, в возможностях более широкого перебора различных вариантов решений.

Каждый вариант – это неповторимое сочетание признаков объекта, которые в дальнейшем будем называть отличительными; каждый из них имеет диапазон качественных отличий или количественных значений (частные варианты). Например, у отличительного признака "число позиций" – это значения от максимального до минимального (см. гл. 5); признак "компоновка позиции" имеет такие отличия: в линию, по окружности, по сложной траектории.

На с. 245 было отмечено, что выбор структурно-компоновочного варианта проектируемого оборудования на этапе технического предложения объективно содержит три этапа:

– формирование общей совокупности вариантов;
– их сравнительный анализ и отбор;
– выбор единственного варианта как основы всего дальнейшего проектирования.

У каждого типа технических систем есть свой специфический набор отличительных признаков, который тем шире, чем сложнее данная машина или система машин (см. гл. 6). В процессе оптимального проектирования возможна многопараметрическая оптимизация, когда анализируются совместно несколько признаков и находятся взаимосвязанные параметры, и однопараметрическая оптимизация, когда тот или иной признак-параметр можно рассматривать отдельно от остальных.

Метод полного перебора заключается в том, что для всех возможных вариантов определяются значения целевой функции, например производительности, себестоимости, приведенных затрат, после чего оптимальный вариант выбирается по экстремальным или граничным значениям этой функции. Здесь наибольшая вероятность выхода на наилучшие технические и организационные решения, однако высока сложность расчетов и обоснований, что может увести от разумных результатов. Поэтому *метод полного перебора целесообразно применять при небольшом числе вариантов*, в частности после уменьшения их количества любыми иными методами.

В последнее время весьма популярными становятся *методы неполного перебора*, где специальными математическими и логическими приемами можно выходить на оптимальные решения, не рассматривая глобально все имеющиеся варианты. Развитие таких методов послужило толчком к становлению особого направления в прикладной математике – теории исследования операций, В его рамках сформированы такие математические методы, как динамическое программирование, линейное программирование, метод ветвей и границ и др.

Меньше внимания уделяется оптимизации проектных решений там, где вариантам невозможно или затруднительно дать исчерпывающую количественную оценку, например при выборе геометрической оси машины (горизонтальной, вертикальной, наклонной).

Общая тенденция научно-технического прогресса – совершенствование и усложнение технических средств – расширяет вариантность, поэтому будущим инженерам необходимо знать и проблему многовариантности, и подходы к ее решению.

Реплика. Хочется, чтобы преподаватели, имеющие подобные разделы в своих лекционных курсах, трезво оценивали реальность. Математически привлекательная многопараметрическая оптимизация явилась "манной небесной" для множества вузовских диссертантов, которые после успешной защиты горят желанием поскорее поведать миру о своих методах и результатах, выбирая первыми невольными слушателями собственных аспирантов и студентов.

Вместе с тем, автору пока не приходилось видеть в практике проектно-конструкторских организаций заметного применения таких методов; и к этому следует подойти с пониманием. Носителями и проводниками таких методов могут быть молодые выпускники вузов, но им далеко не сразу будет дано право на принципиальные технические решения. А опытные инженеры теорией исследования операций не владеют (не учили ее или успели забыть), но накопили богатый опыт, обладают профессиональной интуицией, что помогает избегать серьезных ошибок. Можно в этой связи еще раз напомнить известную истину: кто из проектантов не рассчитывает конструкции на прочность? Те, кто совсем не знает сопромата или знает его в совершенстве.

Главная слабость многих опытных проектантов – в неумении или нежелании отыскивать все возможные варианты технических решений; в зависимости от привычных стереотипов, а вовсе не в отсутствии умения отобрать лучшие из тех, что попали в поле зрения. Те, доведенные до конечных результатов, примеры математизированной оптимизации, которые автору довелось видеть, редко содержали радикальные отличия от решений, принимаемых на основе опыта, интуиции и традиционных инженерных расчетов.

Поэтому при изучении в вузах вопросов оптимального проектирования не надо излишне "зацикливаться" на математическом аппарате, каким бы строгим и исчерпывающим он ни представлялся. Важнее другое – научить будущих специалистов соответствующему образу мышления, пониманию сущности процесса оптимизации, концептуальным его основам.

8.2. ФОРМИРОВАНИЕ СОВОКУПНОСТИ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ

Каждый вариант по машине в целом – это конкретное сочетание частных вариантов по всем отличительных признакам.

Важнейший принцип подхода – ***ни один разумный с инженерной точки зрения и технически возможный вариант не должен пройти мимо проектанта!*** Процедуру формирования вариантов целесообразно выполнять в такой последовательности.

1. *Составление перечня отличительных признаков*, характеризующих данный объект. В перечень должны включаться только такие признаки и их конкурентные реализации, по которым неопределенность не может быть разрешена простейшими инженерными доводами или расчетами. Например, неразумно для сложных корпусных деталей включать вариантом обработку их на роторных машинах: из-за трудностей перегрузки и больших габаритных размеров технологических роторов.

2. *Оценка возможных численных значений или отличий* по каждому из признаков качественно и количественно; не имеет смысла во всех случаях пытаться давать признакам количественную оценку. Так, при выборе общей компоновки машины (горизонтальная или вертикальная геометрическая ось) можно каждому доводу "за" или "против" дать количественную меру: по цене занимаемой площади, но уровню заработной платы рабочих с учетом комфортности обслуживания и т.д. Однако и качественные доводы могут быть (самостоятельно или в дополнение к количественным) достаточно убедительными.

3. *Оценка совместимости частных решений* по отдельным отличительным признакам, например математически выбранное число позиций машины может оказаться неразумным с позиции кинематики привода.

На рис. 8.1 показана конструктивная схема одного из вариантов технологической камеры установки вакуумного нанесения (УВН) тонкопленочных покрытий на стеклянные линзы. Наносимый материал нагревается и испаряется: пары распространяются по объему камеры и, попадая на поверхность объекта, конденсируются на ней.

Поэтому основной технологический узел, который формирует поток материала, в УВН обычно называют испарителем. В рассматриваемой установке (см. рис. 8.1) испаритель включает в себя электронную пушку *1*, где катодный блок выполнен в виде охлаждаемого водой цилиндрического штока, магнитную фокусирующую линзу *2*, системы поворота электронного потока *3*, систему сканирования пучка по поверхности *4*, тигель поворотного типа с испаряемым материалом *5*, который также охлаждается водой.

Вакуумная технологическая камера *6* имеет дверцу *8*, через которую после завершения технологического цикла заменяется комплект подложкодержателей *9* с обрабатываемыми линзами. Процесс нанесения пленки по толщине контролируется с использованием контрольного образца *10*

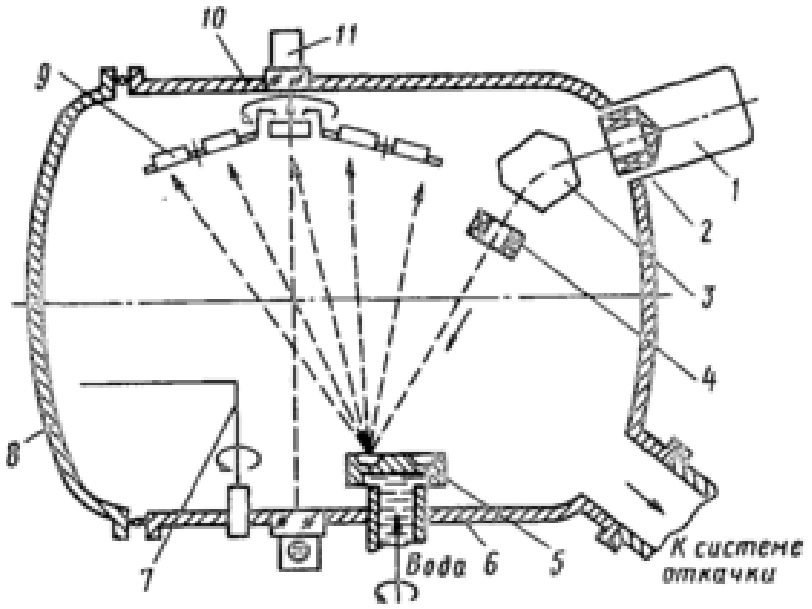


Рис. 8.1. Конструктивная схема технологической камеры УВН тонкопленочных покрытий

("свидетеля") и специальной оптической системы *11*. Траектория испаряемого материала может перекрываться поворотной заслонкой *7*.

Приведенный на рис. 8.1 вариант – один из многих возможных (и разумных!).

Различные варианты УВН тонких пленок могут отличаться следующими отличительными признаками: 1) схемами вакуумных камер; 2) видом внутрикамерных устройств; 3) типами испарителей: 4) числом одновременно загружаемых и единовременно обрабатываемых подложек; 5) общей компоновкой – "масляными" или "безмасляными" средствами откачки; 6) типом системы управления – от релейно-контакторных до микропроцессорных и т.д.

По некоторым из этих частных вариантов (компоновка, тип испарителей) имеется по два-три значения, по другим число технически возможных и разумных с инженерной точки зрения вариантов значительно больше. Рассмотрим некоторые из них для простейшего случая, когда в камере обрабатывается единовременно лишь одна подложка.

На рис. 8.2 показаны варианты схем вакуумных камер, в которых выполняются операции вакуумно-технологического цикла нанесения (осаждения) тонких пленок на подложку. Схема на рис. 8.2, *а* простейшая, камера непосредственно герметизируется дверцей (см. рис. 8.1, поз. *8*). Достоинства такой схемы – конструктивная простота, относительно высокая надежность; недостаток – низкая производительность, так как процессы герметизации и нанесения пленок по времени не совмещаются.

Совмещение по времени достигается при создании и использовании многокамерных конструкций. По варианту рис. 8.2, *б* установка имеет технологическую и шлюзовую камеру.

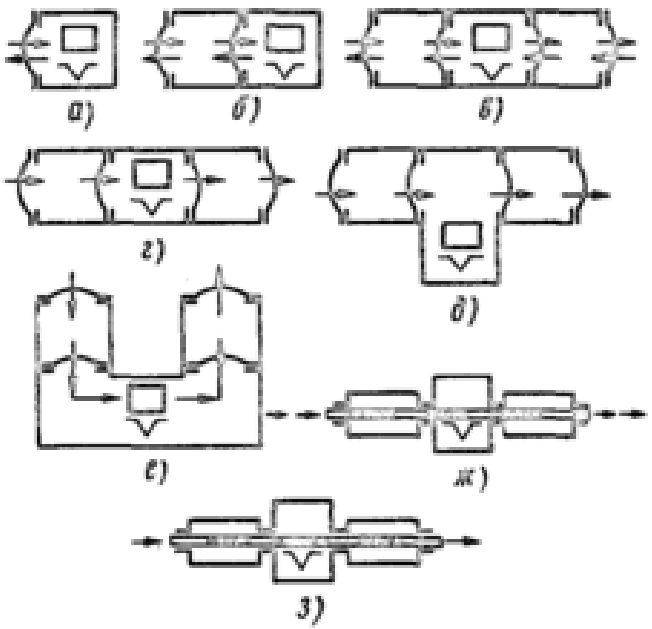


Рис. 8.2. Структурные схемы вариантов вакуумных камер

В то время как в технологической камере осуществляются операции очистки подложки, нанесения пленки и остывания, в шлюзовой выполняются замена подложки и откачка камеры до уровня вакуума основной камеры. По завершении этих операций открывается заслонка шлюза и подложки автоматически меняются местами: обработанные и охлажденные возвращаются в шлюзовую камеру, а очередные из шлюзовой камеры поступают на очистку и обработку.

Развитием этой идеи является создание установок с двумя шлюзовыми камерами, расположенными по обе стороны от технологической (см. рис. 8.2, *в*). Подложки поступают в технологическую камеру поочередно, с двух сторон, лимитирующими по циклу будут процессы, выполняемые в технологической камере.

Следующая схема (см. рис. 8.2, *г*) отличается от предыдущей "проходным" характером транспортирования, когда каждая подложка загружается в левую шлюзовую камеру, а выдается в правой. Создание многокамерного оборудования нанесения пленок неизбежно сопровождается появлением довольно сложных транспортирующих устройств, работающих в вакууме, что снижает в целом безотказность в работе.

Одна из причин этого: в процессе нанесения пленок, несмотря на специальные защитные экраны, пленка осаждается не только на подложках, но и на поверхностях элементов транспортных систем, заслонок и т.д. Стремление к повышению надежности приводит к созданию технологических камер "тупикового" типа, с меньшим воздействием испаряемого материала на элементы транспортных систем (см. рис. 8.2, *д*).

Требования компактности обусловили создание установок, схема которых показана на рис. 8.2, *е*. Они имеют ту же производительность,

что и обычные трехкамерные, но занимаемая ими площадь значительно меньше, обслуживание упрощается.

Варианты на рис. 8.2, *ж*, *з* характеризуют идеи создания многокамерных установок с упрощенными механизмами транспортирования, без шлюзовых заслонок. Необходимый перепад давлений достигается тем, что изделия с элементами транспортных систем проходят сквозь узкие щели, которые интенсивно откачиваются мощными насосами. Установка по схеме на рис. 8.2, *ж* – дискретного действия, с периодической передачей подложек из камеры в камеру. В первой камере осуществляется первоначальная откачка, во второй – очистка подложки и нанесение пленки, в третьей – остывание. Время транспортирования из камеры в камеру сведено к минимуму, загрузка и съем подложек совмещены во времени операциями.

Самый высокий вакуум в центральной, технологической камере; при высоких требованиях по вакууму по сторонам от нее располагают две или три камеры предварительного вакуума, что повышает производительность и качество изделий.

Разновидностью такой схемы является схема с непрерывным транспортированием изделий сквозь все камеры (см. рис. 8.2, *з*), которая нашла широкое применение при нанесении пленок на непрерывный материал (лента, проволока и др).

Все рассмотренные варианты построения УВН пленок по признаку вариации схемы камеры используются в производстве. Однако при любой схеме вакуумной камеры по рис. 8.2 производительность оборудования для нанесения пленок с поштучной обработкой низкая, так как за рабочий цикл выдается лишь одна единица продукции. Ведь такие элементы вакуумно-технологического цикла, как откачка камеры, остывание, необходимо выполнять в полной мере, с полной длительностью. Поэтому большинство современных УВН пленок рассчитаны на загрузку в камеру не одной, а комплекта подложек, которые в течение рабочего цикла совершают дискретные или непрерывные перемещения внутри вакуумированного объема. Эти перемещения реализуются специальными внутрикамерными устройствами.

Разумеется, для каждого вида технологического оборудования состав отличительных признаков будет особым, неповторимым. В гл. 9 это подробно иллюстрировано на примере оборудования для обработки ступенчатых валов.

8.3. ОТБОР ПО КАЧЕСТВЕННЫМ И КОЛИЧЕСТВЕННЫМ КРИТЕРИЯМ

Многообразие технологических и структурно-компоновочных вариантов построения машин автоматов и их систем формируется вовсе не для того, чтобы поскорее начать их глобально обсчитывать. Идея неполного перебора состоит в том, чтобы *рассматривать отличительные признаки по возможности раздельно, в определенной последовательности, сопоставляя варианты первично по быстродействию, производительности или по качественным критериям; технико-экономические расчеты применять только после радикального сужения круга рассматриваемых вариантов, а окончательный выбор, как это ни парадоксально, делать на основе опыта и интуиции.*

Отличительные признаки для любой машины всегда разнородны. Это дает возможность рассматривать некоторые из них обособленно от остальных, расчленяя общую задачу многопараметрической оптимизации на ряд "шагов".

Сначала анализируются те признаки, которые определяют качество изделий.

Например, при выборе принципиальной схемы УВН покрытий вначале выбираются метод нанесения и вид испарителей по критериям необходимого качества покрытий (равномерность по толщине, плотность, допустимый уровень дефектности), так как без этого все остальные поиски вариантов теряют смысл. Далее анализируются признаки, от которых зависит уровень производительности. Последовательность их рассмотрения представлена схемой на рис. 8.3 (номера признаков сохранены, см. с. 265). Общая задача выбора принципиальной схемы распадается на четыре однопараметрических и лишь одну многопараметрическую задачи.

Аналогично для обработки ступенчатых валов (см. гл. 8) совместно надо решать вопросы выбора числа позиций, участков-секций, станков-дублеров, параллельно работающих независимых линий, так как они имеют единое целевое назначение – обеспечить более высокую производительность по сравнению с простейшим вариантом: однопоточной линией с минимальным числом позиций и жесткой межагрегатной связью.

Производительность по вариантам должна рассчитываться либо по общей формуле

$$Q = \frac{P}{t_p + t_x}\eta_{ис},$$

либо по формулам для различных видов машин (см. гл. 5).

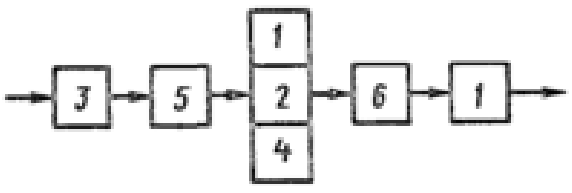


Рис. 8.3. Схема последовательности выбора параметров УВН

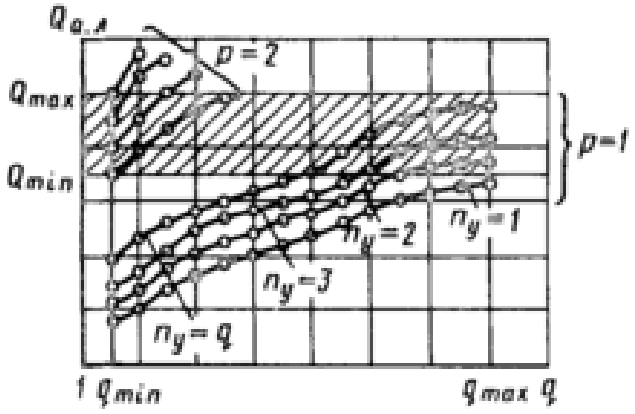


Рис. 8.4. Производительность вариантов автоматической линии при различном числе позиций q, участков n_y и независимых потоков p

Любая машина проектируется на определенный диапазон выпуска продукции, т.е. требуемый уровень производительности. Расчеты проводятся с целью сопоставления этих требований с ожидаемой производительностью по вариантам.

В качестве примера на рис. 8.4 приведена типовая диаграмма производительности вариантов автоматической линии при различных степенях дифференциации и концентрации операций технологического процесса (числа позиций q), числа участков – секций n_y, на которое расчленяется линия, и числа независимых линий p. Здесь же показаны требования в виде зоны $Q_{min} \cdots Q_{max}$.

Каждый вариант с конкретными характеристиками q, n_y и p имеет точечное значение Q_i. Очевидно, что конкурентны только варианты с $Q_{min} \le Q_i \le Q_{max}$. Более высокая ожидаемая производительность $Q_i > Q_{max}$ означает, что линия более сложная и дорогая, но с тем же выпуском – максимально Q_{max}, следовательно, она неконкурентна.

Таким образом, не прибегая к прямым экономическим подсчетам, можно из общей совокупности выделить выборку вариантов с приоритетными экономическими показателями.

Отбор вариантов по качественным критериям (см. гл. 7) должен быть основан на их противоречивости, что показано далее на примере выбора геометрической оси токарных многошпиндельных автоматов, т.е. вертикальной или горизонтальной их компоновки.

Пример. Укрупненные компоновочные схемы токарных автоматов с горизонтальной и вертикальной осями (подробно см. в гл. 1) приведены на рис. 8.5, *а*, *б*, что всегда полезно прорабатывать для наглядности и уяснения доводов.

Критерии сравнительной оценки обоих вариантов сводим в табл. 8.1. Плюсы и минусы соответственно означают: в пользу или не в пользу данного варианта (см. разд. 7.2).

По занимаемой площади вертикальный вариант выгоднее в 2,0…2,5 раза, что очень весомо (два "плюса"), но уже по второму критерию – наоборот, так как шпиндели на вертикальном автомате висячие и наладчику приходится работать с поднятыми руками, по которым от кистей к плечам и далее стекают масло и эмульсия.

Заправка обрабатываемых труб также удобнее при горизонтальной компоновке, так как при вертикальной необходимо пользоваться лестницей или антресолями. Удаление стружки удобнее также в горизонтальной конструкции, где стружка проваливается внутрь станины, а отводной транспортер вписывается в общие габаритные размеры. Критерий унификации пока оставим в стороне.

Таким образом, формально счет 3:1 в пользу горизонтального варианта, но качественные критерии неравнозначны, конструирование – не игра в футбол. Если аргументы расходятся, необходимо выделить среди них наиболее значимые, отмеченные двумя знаками "плюс", и снова провести сравнение, но и тут счет 1:1. Возникает дилемма: отдать предпочтение экономическому фактору (меньшая стоимость занимаемой площади) или социальному (условия труда, комфортность работы).

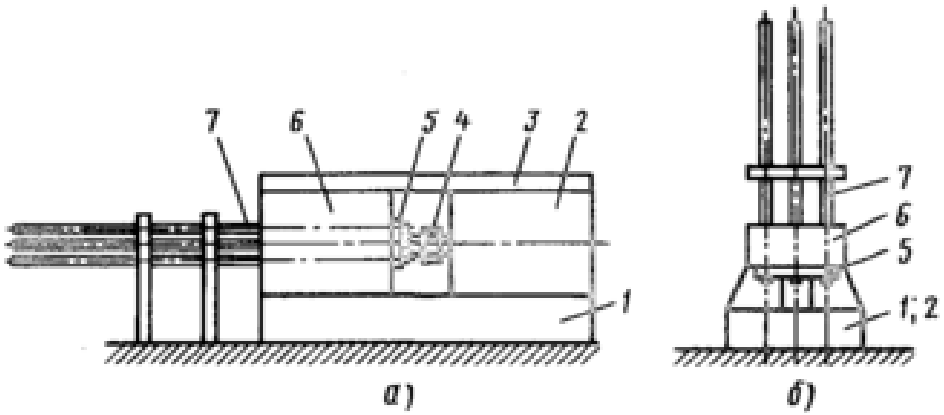


Рис. 8.5. Вариантность компоновки токарных многошпиндельных полуавтоматов:

1 – станина; *2* – коробка привода; *3* – траверса; *4* – продольный суппорт на центральной трубе (поперечные суппорты не показаны); *5* – торец шпиндельного блока; *6* – коробка опор шпиндельного блока с механизмом его поворота; *7* – прутковая головка с направляющими трубами для свободных концов прутков

8.1. Критерии сравнительной оценки автоматов и полуавтоматов

Критерий сравнительной оценки	Варианты			
	Автомат		Полуавтомат	
	горизонтальный	вертикальный	горизонтальный	вертикальный
Занимаемая площадь	– –	+ +	–	+
Удобство наладки	+ +	– –	–	+
Удобство заправки материала	+	–	–	+

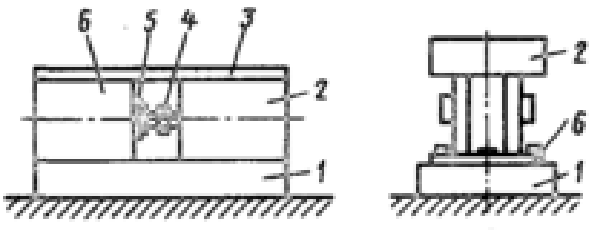
Окончание табл. 8.1

Критерий сравнительной оценки	Варианты			
	Автомат		Полуавтомат	
	горизонтальный	вертикальный	горизонтальный	вертикальный
Удаление отходов	+	–	+	–
Возможность унификации	Признак не рассматривается		+	–
Прочность, сохраняемость изделий	+	+	+	+
Итоговая оценка	+	–	+	+

Теперь можно раскрыть перед студентами правильный ответ: еще в 40 – 50-е годы XX века выпускались и горизонтальные, и вертикальные многошпиндельные автоматы. С тех пор значимость социальных факторов настолько возросла, что вертикальные конструкции исчезли.

А если оценивать не автоматы, а полуавтоматы, где вместо прутков – штучные заготовки, загружаемые рабочим в патрон вручную? Методы, маршруты, режимы обработки, инструментальная оснастка идентичны; и компоновка горизонтального станка почти та же самая (рис. 8.6, *а*). Но сравнительная оценка по значимости признаков меняется радикальным образом (см. табл. 8.1). Отсутствие прутков позволяет скомпоновать шпиндельный блок с нижними опорами (см. рис. 8.6, *б*). Теперь загрузка заготовок в вертикальном полуавтомате сверху вниз удобнее, чем по горизонтали, как и наладка.

Среди достоинств горизонтальной конструкции – удобство удаления отходов, но этот довод не из важнейших. Правда, появился дополнительный аргумент – горизонтальные полуавтоматы можно унифицировать с автоматами, а вертикальные не с чем.



а) *б)*

Рис. 8.6. Вариантность компоновки токарных многошпиндельных полуавтоматов (номера позиций см. на рис. 8.5)

Снова критерии разошлись: 3:2 по общему счету и 1:1 по важнейшим критериям. Что делать? Задайте студентам этот вопрос и дайте "наводку": прутки на токарных автоматах применяются диаметром не более 60...80 мм, при длине до 6 м большей тяжести рабочему просто не поднять.

Итак, признак унификации значим только для моделей полуав-

томатов с диаметром обработки менее 100 мм. В то же время различие в удобстве загрузки заготовок в шпиндель, горизонтальный или вертикальный, значимо при их больших диаметрах (свыше 100 мм), а особенно в диапазоне 200...500 мм. Отсюда ответ: полуавтоматы малых типоразмеров строятся только горизонтальными, больших типоразмеров – только вертикальными.

Реплика. Приведенный пример рассмотрен столь подробно лишь по одной причине: еще раз подчеркнуть, что вузовское обучение должно быть сконцентрировано не на рецептурном обогащении будущих специалистов, а на развитии мышления, умении анализировать и сопоставлять, проникая глубоко в сущность предметов и явлений.

Студенту не надо преподносить истины и закономерности в готовом виде, он должен стать как бы соучастником их выявления; только так он сможет в дальнейшем раскрывать и познавать их самостоятельно.

8.4. РАСЧЕТ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА

Рассмотрим методику на примере выбора принципиальной схемы автомата изготовления тарелочек осветительных приборов. В гл. 1 была описана работа автомата, а также рассмотрена вариантность дифференциации и концентрации операций данного технологического процесса (см. гл. 3, табл. 3.2), что можно расценивать как подготовительные действия к анализу и выбору оптимальных решений.

Итак, техническое задание (ТЗ) на проектирование помимо требований к качеству изделий содержит следующие исходные данные: длительность отдельных операций (табл. 8.2), а также требуемую производительность $Q_{тр}$ = 5500 шт./смена = 11,5 шт./мин. В ходе проработки ТЗ к ним добавляются следующие данные по ожидаемым техническим и экономическим показателям:

1) стоимость (в у.е.) автомата $К = 5000 + 200q$, где q – число позиций автомата;

2) годовая заработная плата одного наладчика $З_{нал}$ = 2800 у.е. и одного оператора $З_{оп}$ = 2000 у.е.;

3) коэффициенты использования и нормы обслуживания наладчика и оператора в зависимости от числа позиций автомата (табл. 8.3).

Здесь условные единицы (у.е.) не относятся к конкретной валюте, а служат лишь мерой затрат.

Все эти сведения обычно берутся по опыту эксплуатации аналогичных конструкций, лучше всего – по результатам специально проведенных исследований работоспособности действующего оборудования (см. гл. 10).

8.2. Длительность операций

Наименование операции	Время, с
Нагрев конца трубки	19,0
Развальцовка конуса	4,0
Нагрев под отрезку	10,0
Отрезка	3,5

8.3. Коэффициенты использования и нормы обслуживания

Коэффициент	Число позиций q			
	1…5	6…10	11…15	>15
$\eta_{ис}$	0,85	0,82	0,80	0,75
$z_{нал}$	6	5		4
$z_{оп}$	4	3	2	2

Принципиальную схему выбираем в следующем порядке.

I этап. Составляем перечень отличительных признаков с оценкой числа частных вариантов по каждому признаку:

1) принцип действия автомата: последовательный или параллельный; дискретный или непрерывный, $S_1 = 4$ варианта;

2) компоновка автомата: с горизонтальной или вертикальной осью, $S_2 = 2$ варианта;

3) число рабочих и холостых позиций; с использованием соответствующих расчетов (см. гл. 5, табл. 5.2); имеем $S_3 = 11$ вариантов;

4) расположение позиций автомата: по окружности, в линию, по сложной замкнутой траектории, $S_4 = 3$ варианта.

Итак, по четырем структурно-компоновочным признакам имеем формально около 300 вариантов: $S = S_1S_2S_3S_4$.

II этап. Анализируем возможные варианты, постепенно сужая их число. Сначала целесообразную последовательность анализа признаков и выбора вариантов по каждому из признаков. Общий подход – использовать по возможности качественные критерии, к количественным расчетам прибегать лишь по необходимости.

Разумеется, прежде всего должен быть выбран принцип действия автомата.

Технологический комплект позиционных механизмов и инструментов включает в себя: упор, горелки "мягкого" пламени, вальцовочный

конус, горелки сфокусированного пламени, малый и большой нож. Эти механизмы и устройства нельзя скомпоновать в одной позиции; выше была доказана необходимость иметь не менее трех позиций. Следовательно, применение автоматов параллельного действия с однопозиционной обработкой невозможно. Остается последовательное действие с дифференциацией процесса по позициям ($q > 1$, $q_{min} \le q \le q_{max}$). Две операции – развальцовка конуса и отрезка – требуют весьма точной взаимной фиксации по оси изделия и инструментов, их невозможно выполнить при непрерывном перемещении изделий относительно инструментов.

Итак, автомат развертки тарелочек целесообразно проектировать как ***автомат последовательного дискретного действия***.

Выбор направленности геометрической оси также практически однозначен: при горизонтальном расположении шпинделей и направляющих труб (см. примеры на рис. 8.5 и 8.6) стеклянные трубки могли бы повреждаться.

Следовательно, автомат должен быть с вертикальной осью.

Выбор компоновки позиций может быть сделан окончательно только после выбора их числа, но зная, что $q_{max} = 13$, можно выбрать расположение позиций по окружности, что предпочтительно при малом числе позиций и малогабаритных изделиях, как конструктивно наиболее простой вариант.

Таким образом, единственным отличительным признаком, который требует количественного обоснования, является число позиций автомата. Итак, осталось $S = 11$ вариантов.

Идея дальнейших процедур – в уменьшении числа оставшихся вариантов предельно простыми и понятными методами.

Проводим первичный отбор вариантов по кинематическим критериям. Поскольку мы выбрали автомат последовательного дискретного действия с расположением позиций по окружности, одним из важнейших будет механизм периодического поворота стола. Здесь два основных варианта: мальтийский или кулачково-цевочный поворотные механизмы, оба требуют точного деления по окружности, что гарантируется лишь при делении на целое число градусов. Имея варианты $q = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13$ позиций, нетрудно видеть, что поворот стола на 1/7, 1/11, 1/13 части неразумен кинематически. А так как варианты с числом позиций, различающихся на единицу, не могут иметь радикально отличающихся технико-экономических показателей, варианты $q = 7, 11, 13$ можно из дальнейшего рассмотрения исключить: осталось 8 вариантов.

Осуществляем расчет, и отбор по критерию ожидаемой производительности проводим по формуле (5.5):

$$Q_i = \frac{1 \cdot 60}{t_p(q) + t_x}\eta_{ис} = \frac{1}{T}\eta_{ис}; \quad m_i = \frac{Q_{тр}}{Q_i} = \frac{11{,}5}{Q_i},$$

где m_i – число параллельно работающих автоматов, необходимых для заданного выпуска ($Q_{тр}$ = 11,5 шт./мин).

Расчет иллюстрируется табл. 8.4, куда предварительно вносим из табл. 5.2 данные по длительности обработки $t_p(q)$ на лимитирующих позициях для каждого оставшегося варианта (q = 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12).

С учетом t_x = 1,5 с по всем вариантам получаем длительности T рабочего цикла. Далее из табл. 8.3 исходных данных заносим в табл. 8.4 ожидаемые значения $\eta_{ис}$ и рассчитываем ожидаемую производительность Q_i и число машин-автоматов, необходимых для выполнения заданного масштаба выпуска ($Q_{тр}$ = 11,5 шт./мин). Результаты также приведены в табл. 8.4, где m_i везде округлены в бóльшую сторону. Они служат наглядным примером того, что экономичные варианты можно порой вычленять из общей совокупности, не прибегая к прямым экономическим подсчетам.

В самом деле, из вариантов с q = 8, 9, 10, 12 самый экономичный – первый (q = 8), так как во всех случаях необходимо иметь по m = 2 автомата, а восьмипозиционные автоматы самые простые и дешевые, с наименьшими затратами на обслуживание. Реально выпуск у всех будет тот, который задан: Q = 11,5 шт./мин, в более сложных и потенциально производительных вариантах будет недоиспользование по производительности (для q = 12 оно составит более 40 %!).

8.4. Технические характеристики вариантов

Характеристика	Число позиций q							
	3	4	5	6	8	9	10	12
$t_p(q)$	21,5	19,0	14,0	10,0	6,3	5,0	4,8	3,8
T	23,0	21,5	15,5	11,5	7,8	6,5	6,3	5,3
$\eta_{ис}$	0,85			0,82				0,80
Q_i	2,25	2,3	3,3	4,3	6,3	7,8	8,1	9,8
m_i	5		4	3	2			

По аналогичным соображениям (см. табл. 8.4) оставляем среди конкурирующих вариантов лишь четыре (с q = 3, 5, 6, 8). На рис. 8.7 приведены графики производительности автоматов с различным числом позиций, горизонтальными линиями показаны границы зон, где требуется m = 2, 3, 4 автомата.

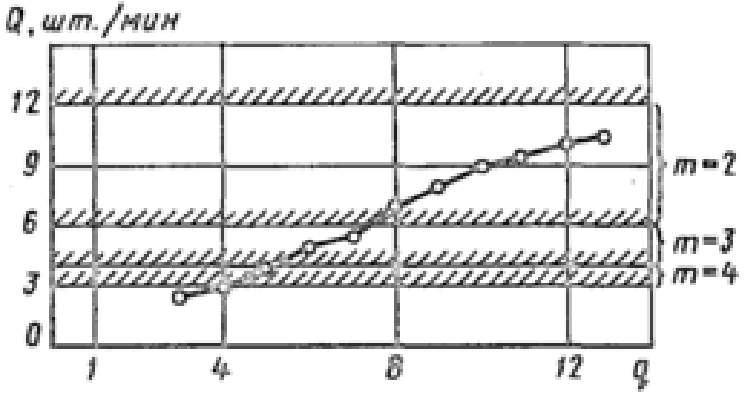


Рис. 8.7. Производительность автоматов изготовления тарелочек в зависимости от числа позиций

III этап. Проводим расчет и окончательный выбор по экономическим критериям.

Согласно исходным данным из ТЗ, сначала рассчитываем по каждому из вариантов стоимость К и годовой фонд заработной платы Зпл:

$$К = 5000 + 200q;$$

$$Зпл = \frac{2800}{z_{нал}} + \frac{2000}{z_{оп}},$$

где нормы обслуживания $z_{нал}$ и $z_{оп}$ также берутся из исходных данных (см. табл. 8.3).

Результаты заносим в табл. 8.5. Приведенные затраты $З_{пi}$ находим по формуле

$$З_{пi} = (0{,}35К_i + Зпл)m_i.$$

Здесь коэффициент 0,35 есть сумма нормативного коэффициента эффективности ($E_н$ = 0,12), коэффициента амортизационных затрат (α_1 = 0,13) и коэффициента годовых ремонтных затрат (α_2 = 0,10) (см. гл. 2). Расходы на энергию не учитываем: по вариантам они идентичны.

Результаты также см. в табл. 8.5.

По критерию экономической эффективности оптимальным вариантом реализации требований ТЗ являются два восьмипозиционных автомата (q = 8, m = 2).

На рис. 8.8 показана диаграмма значений приведенных затрат для всех вариантов $4 \le q \le 13$. Избранный вариант (q = 8 позиций) действительно экономически оптимален; применение метода полного перебора, когда значения Q, К, Зпл и др. просчитывались бы для всех возможных вариантов, не могло дать иного результата. Однако главное в том, что соседние варианты (q = 7, 9, 10) весьма близки по своим показателям к тому, который признан оптимальным и должен быть положен в основу всего дальнейшего процесса проектирования.

8.5. Экономические характеристики вариантов

Характеристика	Число позиций q			
	3	5	6	8
m_i	5	4	3	2
K_i	5600	6000	6200	6600
Зпл	1950		2450	
$З_{пi}$	18 250	16 150	12 900	8740

При расчете сложных и дорогих технических систем разумно сформировать некоторую выборку рациональных вариантов с несущественными экономическими различиями, после чего выбрать искомый вариант на основе опыта и интуиции по качественным соображениям (см. гл. 9).

Далее подробно прорабатываем вариант, признанный оптимальным.

На рис. 8.9 приведена технологическая схема восьмипозиционного автомата развертки тарелочек осветительных приборов.

Каждый автомат последовательного действия имеет полный комплект технологических механизмов и инструментов, рассредоточенных по рабочим и холостым позициям. Для изготовления тарелочек комплект должен включать в себя: упор подачи материала *1*; горелки "мягкого" пламени *2*; устройство для развальцовки конуса *3*; горелки "острого" пламени *4*; круглые ножи механизма отрезки *5* и *6*.

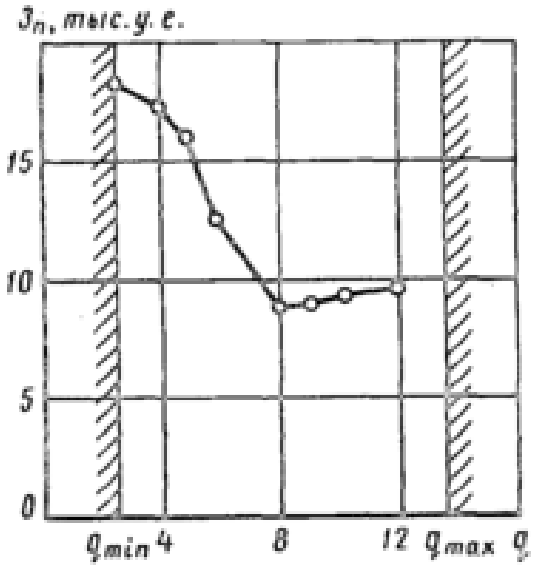


Рис. 8.8. Приведенные затраты для вариантов автомата изготовления тарелочек

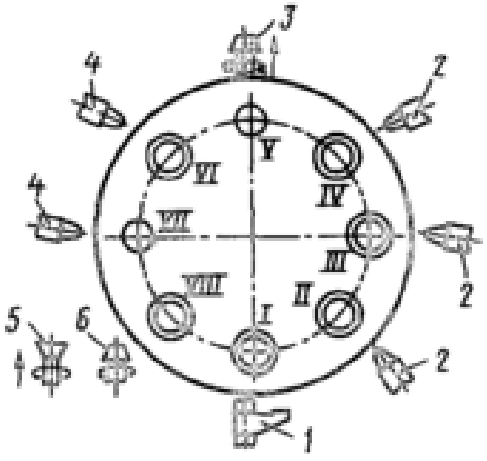


Рис. 8.9. Технологическая схема восьмипозиционного автомата изготовления тарелочек:
I – VIII – позиции обработки

Выбранная принципиальная схема является основным документом для последующего проектирования, начиная с проработки кинематики и номенклатуры остальных механизмов и устройств при решении задач на этапе эскизного проекта. Рассмотрим в качестве примера соображения по поводу механизмов поворота.

Для периодического поворота на 1/8 окружности обычно применяются мальтийские механизмы, хотя возможны кулачково-цевочные, храповые, зубчатые и др. Однако и для мальтийских механизмов имеется вариантность:

– по числу пазов мальтийского креста (обычно их 4, 6, 8);

– по характеру вращения поводка: непрерывному или с периодическим включением-выключением при каждом рабочем цикле;

– по положению осей креста и поводка: параллельному (плоские мальтийские механизмы) или скрещенному (сферические мальтийские механизмы).

Безусловно, простейший вариант – это восьмипазовый плоский мальтийский крест, который можно непосредственно крепить на ось поворотного стола, с непрерывным вращением поводка, что упрощает всю кинематику. При равномерном вращении поводка соотношение между длительностью стоянки и поворота жестко задано числом пазов креста (табл. 8.6).

Заданное ранее время поворота стола t_x = 1,5 с, в сущности, ни к чему не обязывает, это минимально возможная величина по динамическим характеристикам; величина $t_x > 1{,}5$ с означает уменьшение динамических нагрузок, но одновременно и увеличение длительности рабочего цикла: при шестипазовом мальтийском кресте на 1,6 с: при восьмипазовом – на 2,3 с, т.е. почти в 2,3 раза.

По-видимому, рациональным будет применение четырехпазового мальтийского креста, который должен передавать движение на ось поворотного стола через зубчатую пару с передаточным отношением 1:2.

8.6. Характеристики вариантов мальтийских механизмов

Характеристика	Число пазов мальтийского креста			
	3	4	6	8
Соотношение времени поворот/стоянка	1/5	1/3	1/2	1/1,66
Время поворота, с, при стоянке 6,3 с	1,25	2,1	3,1	3,8

Глава 9

ВЫБОР ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРОЕКТИРУЕМЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

9.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Принципиальная схема любой автоматической системы машин, автоматической линии, гибкой производственной системы и др. выбирается на этапе технического предложения (см. гл. 7). Но если многие виды машин-автоматов имеют устоявшиеся, типовые решения и универсальные конструкции, то каждая сложная система машин неповторима. Здесь больше отличительных признаков и вариантов технических решений. Несопоставима и стоимость, а следовательно, и цена ошибок разработчиков.

Тем не менее, и для автоматических линий процесс разработки не начинается с чистого листа. Прежде всего, существует опыт проектантов [9], а также анализ эксплуатации систем машин аналогичного назначения (см. гл. 10). Кроме того, для наиболее массовых и характерных объектов в машино- и приборостроении (ступенчатые валы, втулки, шестерни, корпусные изделия, интегральные микросхемы, электровакуумные приборы, бытовая техника и т.д.) существуют типовые (а иногда и "директивные") технологические процессы: методы, маршруты, режимы обработки.

Недостаточно апробированные технические решения при создании автоматических систем машин следует применять крайне осторожно ввиду риска получить низкую эксплуатационную надежность. Этот риск снижается предварительным выполнением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), макетированием механизмов и устройств и т.д.

Согласно общей теории оптимального проектирования сложных систем машин, *оптимальным вариантом считается такой, который удовлетворяет всем граничным условиям и при этом обладает экстремальным (минимальным или максимальным) значением целевой функции.* Применительно к проектированию автоматов и автоматических линий такими граничными условиями являются требования к качеству обрабатываемых деталей и производительности, а целевой функцией – ожидаемые показатели экономической эффективности автоматизации.

К основным стадиям процесса оптимизации в соответствии с уже рассмотренным в гл. 7 общим подходом относятся:

1) формирование общей совокупности возможных, технически реализуемых вариантов;

2) сравнительный анализ и отбор вариантов вплоть до выбора оптимального, который обеспечивал бы заданную точность обрабатываемых деталей, производственную программу выпуска и при этом обладал бы максимальными показателями экономической эффективности.

Обе эти стадии равнозначны, ибо сам по себе процесс формирования совокупности возможных технических решений уже дает проектанту основу оптимального проектирования, позволяет избегать грубых ошибок, когда наиболее перспективные варианты могут оказаться вообще вне поля зрения.

Что касается дальнейшего анализа и отбора, то его можно проводить как по качественным критериям – на основе опыта и интуиции (методами экспертных оценок), так и различными количественными, специально разработанными методами.

На первой стадии оптимизации из множества формально возможных решений выделяют лишь те, которые, с одной стороны, технически возможны, реализуемы, с другой – разумны с инженерной точки зрения, т.е. подтверждаются опытом и интуицией конструктора. Поэтому реально общая совокупность вариантов всегда меньше теоретической.

Основными задачами формирования общей совокупности технически возможных вариантов построения автоматизированных и автоматических систем машин, как и для отдельных машин-автоматов (см. гл. 8), являются:

– выделение отличительных признаков;

– определение границ варьирования по каждому из признаков и числа частных вариантов;

– сочетание частных вариантов по различным признакам, оценка общего числа вариантов.

Рассмотрим в качестве сквозного примера данной методики выбор принципиальной схемы технологической системы машин для токарной обработки ступенчатого вала. Эти процессы выполняются по типовому маршруту: 1) обработка плоскости торцов и их зацентровка; 2) черновая токарная обработка шеек; 3) чистовая токарная обработка шеек; 4) прорезка канавок; 5) снятие фасок (см. табл. 5.1).

По такому маршруту вал может быть полностью обработан на одном универсальном токарном станке (см. разд. 5.1), а также с дифференциацией процесса на несколько позиций, с применением различного оборудования. Следовательно, уже на ранних стадиях проработки [при составлении технического задания (ТЗ) на проектирование] должны рас-

сматриваться варианты технологической системы машин с различным уровнем автоматизации отдельных видов технологического оборудования и системы в целом.

Определяющими являются факторы необходимых производительности и номенклатуры (числа типоразмеров) объектов производства при соблюдении требований к качеству обработанных поверхностей и размеров под дальнейшее шлифование. Последнее обеспечивается технологическими методами маршрутом, упомянутыми выше.

Если программа выпуска может быть "закрыта" одним или несколькими простейшими токарными станками (универсальными, полуавтоматами и т.д.), то более сложные варианты отпадают сами собой, без особых выкладок и оптимизационных построений.

Поэтому ТЗ уже содержит, как правило, прямое указание на тип системы машин – поточная или автоматическая линия – и требуемый уровень (или диапазон) производительности. Одновременно в рамках ТЗ решается вопрос выбора типа заготовки. При малых масштабах выпуска и небольшом диаметре валы целесообразно изготовлять из пруткового материала, в иных случаях – применять более сложные и дорогие заготовки, полученные ковкой, штамповкой, прокаткой.

9.2. ФОРМИРОВАНИЕ СОВОКУПНОСТИ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ

Рассмотрим применительно к задачам этапа технического предложения вариантность построения автоматической или автоматизированной системы токарной обработки ступенчатых валов из поковок. Чертеж типового представителя (вала-шестерни) был приведен ранее (см. рис. 5.3).

Отличительными признаками технически возможных и разумных с инженерной точки зрения вариантов построения системы машин для токарной обработки ступенчатых валов можно считать следующие.

1. **Методы обработки.** Здесь вариантность невелика: конкурентны лишь обычная продольная обточка и обточка вращающимися резцовыми головками с их продольной подачей (два варианта).

2. **Маршрут обработки.** При выбранных методах он может быть реализован по двум основным вариантам: 1) сначала черновая, затем чистовая обработка всех шеек; 2) сначала черновая и чистовая обработка шеек *а*, *б*, *в* (см. рис. 5.3), затем шеек *г*, *д*, *е*.

3. **Режимы обработки.** Анализ показывает, что на действующих автоматах и линиях скорости резания варьируются в пределах (v = 50… 110 м/мин), в которых можно обеспечить заданную точность. Выбор v является **экстремальной задачей** (см. гл. 3).

Указанный диапазон режимов можно разделить, например, на три интервала, м/мин: $v_1 = 50...70$; $v_2 = 70...90$; $v_3 = 90...110$, протяженность которых чувствительна к показателям производительности и экономической эффективности. Следовательно, в зависимости от изменения v имеем три варианта технических решений.

4. **Тип технологического оборудования.** В условиях автоматизированного производства валы можно обрабатывать на:

– одношпиндельных многорезцовых полуавтоматах;

– одношпиндельных токарных гидрокопировальных полуавтоматах;

– вертикальных многошпиндельных полуавтоматах и автоматах последовательного действия;

– горизонтальных многошпиндельных полуавтоматах и автоматах последовательного действия;

– вертикальных многошпиндельных полуавтоматах и автоматах параллельного непрерывного действия.

Итого пять вариантов.

5. **Степень автоматизации системы.** В зависимости от степени автоматизации вспомогательных процессов загрузки и транспортирования деталей система машин для обработки ступенчатых валов может быть построена по следующим вариантам:

– поточная линия из полуавтоматов;

– поточная линия из автоматов;

– автоматическая линия.

Всего три варианта.

6. **Степень дифференциации технологического процесса.** Это число рабочих позиций q, на которое распределяется общий объем обработки. Согласно расчетам, приведенным в гл. 5 (см. табл. 5.1), минимальное число позиций, на которое можно дифференцировать процесс обработки вала, равно 4, максимальное 14. Следовательно, по числу рабочих позиций возможны 11 вариантов построения системы машин ($4 \le q \le 14$).

7. **Число параллельных потоков обработки** p. Оно зависит от требуемого уровня производительности. Для большинства машиностроительных предприятий достаточно иметь один-два потока обработки (или независимых линий).

Итого два варианта.

8. **Число станков-дублеров.** Как было сказано в гл.5, реальные процессы не поддаются равномерной дифференциации, поэтому при классическом однопоточном варианте линии, где число станков равно числу рабочих позиций q, станки будут всегда иметь различную длитель-

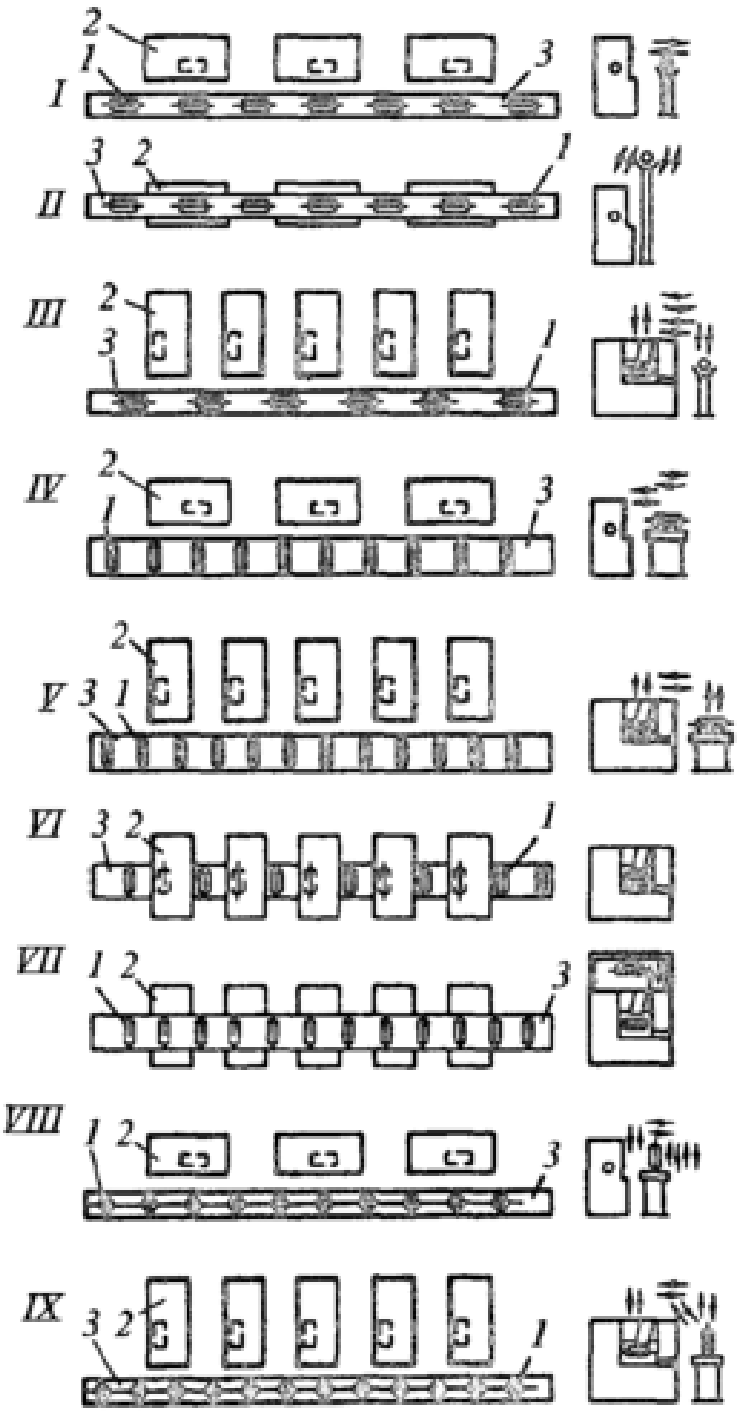


Рис. 9.1. Компоновочные варианты автоматической линии с различными видами системы межстаночного транспортирования:
1 – изделия; *2* – станки; *3* – транспортеры

ность цикла. Вместо того чтобы дифференцировать обработку на лимитирующих операциях, можно использовать на них станки-дублеры числом m (при $m = 2$ получается двухпоточная линия). Здесь также существует широкая вариантность. По каждому варианту линии можно считать целесообразным использование шести-восьми станков-дублеров.

Примем возможными шесть вариантов.

9. **Тип транспортной системы.** Этот отличительный признак определяется взаимным расположением технологического и вспомогательного оборудования, траекторией перемещения обрабатываемых деталей в пределах линии. Известно девять основных вариантов (I – IX на рис. 9.1), в том числе системы сквозного транспортирования, системы I бокового транспортирования с расположением оборудования вдоль основного конвейера, системы бокового транспортирования с расположением оборудования поперек основного конвейера и т.д. Все эти девять вариан-

тов конкурентны, так как отличаются показателями стоимости, несовмещенных холостых ходов и т.д.

10. **Число участков-секций.** Каждый вариант системы машин, различающийся числом позиций, типом транспортной системы и т.д., может быть построен по различным структурным вариантам – от линии с жесткой межагрегатной связью ($n_y = 1$) до линии с гибкой связью ($n_y = q$).

Так, линия из шести станков ($q = 6$) может быть разделена по четырем вариантам: $n_y = 1, 2, 3, 6$ (рис. 9.2).

11. **Тип межоперационных накопителей.** Для линий обработки валов применяются магазины-накопители двух видов: сквозные, через которые проходит весь поток обрабатываемых деталей (рис. 9.3, *а*); тупиковые, работающие только в случае отказа одного из участков (рис. 9.3, *б*). Последние более надежны в работе, однако конструктивно сложнее и занимают дополнительную площадь.

12. **Число наладчиков при обслуживании машин.** Этот отличительный признак также носит ярко выраженный экстремальный характер. В предельном случае, когда один наладчик обслуживает всю линию, норма обслуживания равна числу станков ($z_н = q$), фонд заработной платы минимален, однако велики простои станков из-за ожидания очереди на обслуживание. В другом предельном случае, когда наладчик обслуживает лишь один встроенный в линию станок ($z_н = 1$), производительность линии максимальна, но велик и фонд заработной платы. Оптимальные варианты обслуживания не самоочевидны. Возможны четыре–пять вариантов.

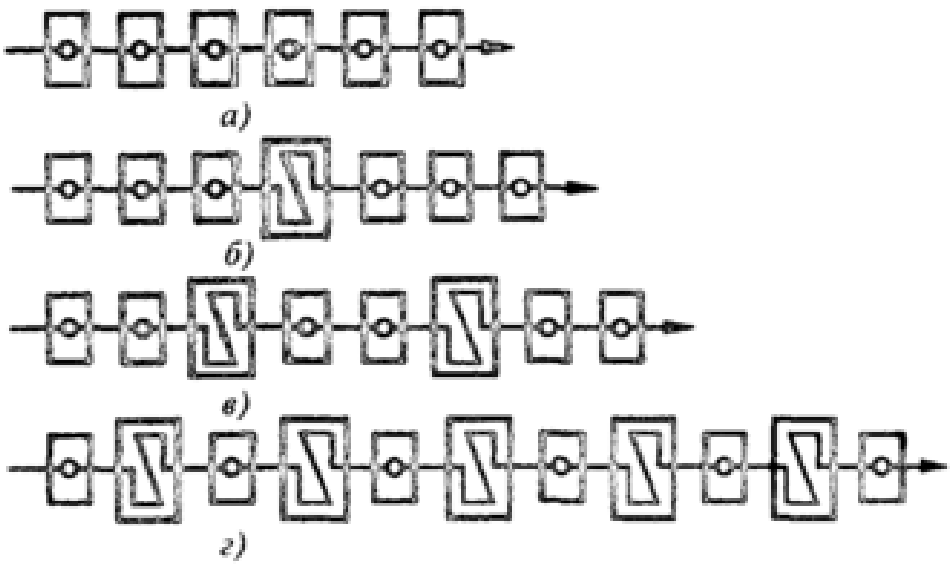


Рис. 9.2. Структурные схемы вариантов линии из шести станков с различным числом накопителей межоперационных заделов:
а, *г* – соответственно с жесткой и гибкой агрегатной связью;
б и *в* – с разделением на участки

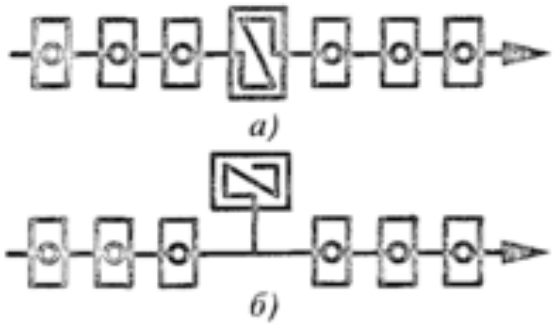


Рис. 9.3. Структурная схема однопоточной линии с накопителями заделов сквозного (*а*) и тупикового (*б*) типов

Если обобщить рассмотренные отличительные признаки и число вариантов по каждому из них, то при условии полной совместимости вариантов их полное число составит (для обработки вала по рис.5.3) многие тысячи.

Даже если учесть, что многие варианты несовместимы, общее число структурно-компоновочных вариантов, вполне конкурентных на ранних стадиях проектирования автоматических систем машин, очень велико.

Следует отметить, что в линиях для обработки подшипниковых колец основным вариационным показателем служит число параллельно работающих станков, в линиях для обработки корпусных изделий – *число участков-секций и т.д.*

9.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОТБОР ВАРИАНТОВ

Перечень отличительных признаков систем машин для обработки ступенчатых валов, рассмотренный в разд. 9.2, наиболее общий, теоретический (он может быть и продолжен). Однако в конкретном случае его необходимо составлять и анализировать, имея в виду деление всех характеризующих систему машин параметров (технологических, структурных, компоновочных, конструктивных, эксплуатационных и т.д.) на три категории:

– **параметры, которые в данном случае не являются вариационными**, так как их значения заданы по ТЗ или могут быть однозначно выбраны на основе накопленного опыта проектирования и эксплуатации;

– **основные вариационные параметры**, по которым решения должны быть приняты однозначно еще на ранних стадиях проектирования и дальнейшей корректировке не подлежат; именно их сочетание определяет впоследствии принятый в качестве оптимального вариант линии – ее технологическую и структурную схему, планировку (число станков, участков, потоков обработки и т.д.);

– **вспомогательные вариационные параметры**, в меньшей степени влияющие на технико-экономические результаты внедрения линии; первоначально принятые по этим параметрам решения могут в дальней-

шем, в том числе при эксплуатации, корректироваться. Такие параметры определяют обычно форму реализации принятой принципиальной схемы системы машин (режимы обработки, число наладчиков, система замены инструмента, организация ремонта и обслуживания и др.).

Конкретный анализ и отбор возможных структурно-компоновочных вариантов определяется требованиями ТЗ.

Иллюстрируем данное положение, рассматривая в дальнейшем задачу построения системы машин для другой конструкции ступенчатого вала – по рис. 9.4, а не по рис. 5.3. Несмотря на единство подходов, конкретные действия будут несколько отличаться.

Пример. Согласно полученному ТЗ разработать на этапе технического предложения структурно-компоновочную схему автоматической линии токарной обработки вала-фланца, чертеж которого со всеми техническими требованиями приведен на рис. 9.4.

Производительность линии Q_{min} = 420 шт./смена с возможным превышением на 15 % (т.е. $420 \le Q_{тр} \le 485$ шт./смена). Задан директивно маршрут обработки (рис. 9.5).

Допускается дробление длины обработки на всех черновых и чистовых операциях, кроме поверхностей *1* и *3* (см. рис. 9.4), которые являются посадочными. Основной вид оборудования – токарные гидрокопировальные полуавтоматы, пригодные для встраивания в автоматическую линию. Заготовка – поковка.

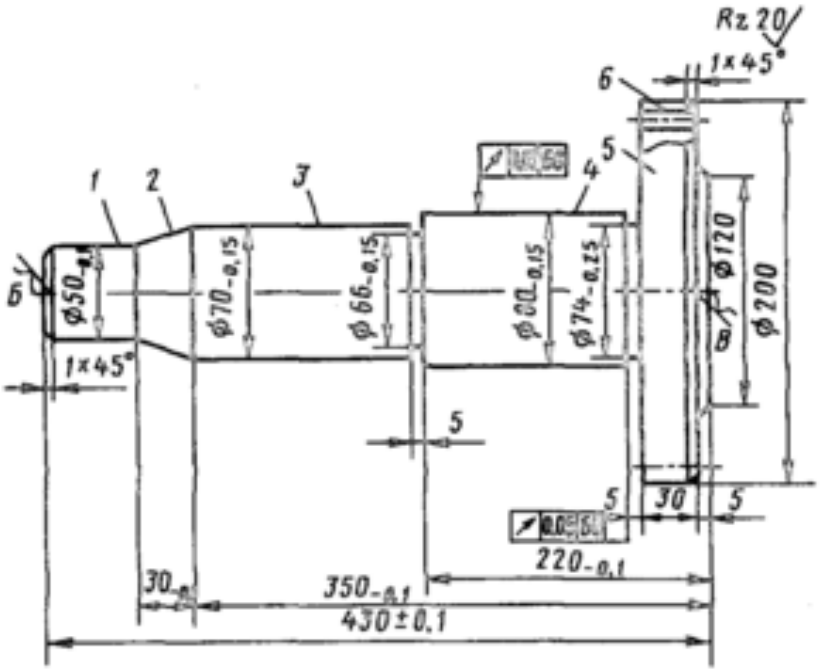


Рис. 9.4. Типовая деталь – вал-фланец:
1 – 6 – обрабатываемые поверхности

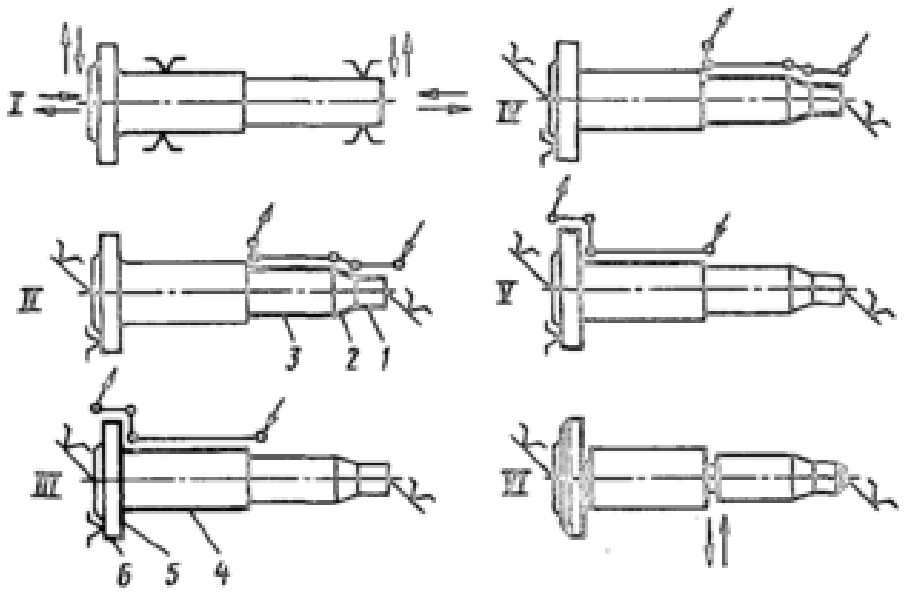


Рис. 9.5. Технологические эскизы обработки вала-фланца:
I – VI – позиции обработки; *1 – 6* – обрабатываемые поверхности

Таким образом, на стадии разработки технического предложения постоянными – заданными по величине параметров следует считать основные характеристики технологического процесса (методы, маршрут, режимы обработки). Это позволяет рассчитать в качестве исходных данных длительность t_p технологических переходов – обработки элементарных поверхностей. Для вала, приведенного на рис. 9.4, t_p имеют следующие значения, мин.

Фрезерование торцов	0,30
Зацентровка торцов	0,10
Черновое обтачивание поверхностей *1 – 6* соответственно	0,15; 0,10; 0,30; 0,35; 0,20; 0,15
Чистовое обтачивание поверхностей *1 – 6* соответственно	0,25; 0,15; 0,35; 0,45; 0,30; 0,20
Прорезание канавок	0,30
Снятие фасок	0,15

Исходные данные для расчета ожидаемого уровня надежности станков и инструмента на ранних стадиях проектирования (до конструктивной разработки) можно назначить лишь ориентировочно – на основе исследования аналогичных систем (см. гл. 10). Принимаем, что ожидаемые внецикловые потери по инструменту для токарной обработки вала на линии $\sum C_i = 0{,}12$ мин/шт., внецикловые потери одной позиции $t_{об_1} = 0{,}02$ мин/шт., итоговые ожидаемые (расчетные) собственные потери для линии с жесткой межагрегатной связью $\sum t_c = 0{,}12 + 0{,}02q$.

В качестве варьируемых параметров как отличительных признаков различных вариантов линии принимаем:

– число рабочих позиций обработки q; в данном случае – однопозиционных станков, выполняющих полный объем обработки;

– число параллельных потоков обработки p (независимых или зависимых) либо станков-дублеров на лимитирующих позициях m_i;

– компоновочный вариант линии, характеризуемый взаимным пространственным расположением станков и элементов транспортной системы;

– число участков секций n_y, на которые разделена линия как численная характеристика межагрегатной связи ($1 \le n_y \le q$);

– вместимость накопителей;

– число наладчиков.

Эти вариационные параметры следует разделить на две существенно различные категории:

1) основные структурно-компоновочные параметры, варьирование которыми означает разные планировочные варианты линии (число станков в потоке и потоков обработки, компоновочный вариант, число участков-секций); технические решения по этим параметрам принимают только в процессе проектирования, при эксплуатации оборудования они не могут быть изменены;

2) вспомогательные параметры, варьирование которыми не отражается на планировке (число наладчиков, вместимость межоперационных накопителей). Эти параметры могут варьироваться не только в процессе проектирования, но и при эксплуатации; интервалы вариации здесь, как правило, минимальны.

Поэтому целесообразно считать основными следующие вариационные параметры:

– число рабочих позиций обработки q;

– компоновочный вариант линии;

– число участков-секций n_y;

– число параллельных потоков обработки p, в данном случае – независимых автоматических линий или станков-дублеров m.

Остальные параметры – вместимость накопителей E (мин) и число станков, обслуживаемых одним наладчиком $z_н$, – принимаем на данном этапе как неварьируемые, заданные по величине. Так, вместимость накопителей целесообразно выбирать в пределах $E = 30…40$ мин, что обеспечивает межучастковое наложение потерь не более 5…8 %; число станков, обслуживаемых одним наладчиком, принимаем $z_н = 6$.

Таким образом, инженерный анализ на основе предшествующего опыта и научных обобщений позволяет уже на этапах разработки технического задания и начальной работы над техническим предложением разрешить вариантность по многим отличительным признакам (см. разд. 9.2), не прибегая к оптимизационным моделям и сложным расчетам.

Далее используем возможность поэтапного выбора (см. разд. 8.3), т.е. рассмотрения некоторых параметров независимо от остальных. Сюда относится выбор типа транспортной системы и компоновки линии в целом, где имеется девять вариантов (см. рис. 9.1), которые отличаются:

– расположением геометрических осей станков по отношению к продольной оси линии (перпендикулярно или соосно);

– положением магистрального транспортера по отношению к рабочим зонам станков (боковое, верхнее, сквозное);

– положением осей заготовок и полуфабрикатов при межстаночном транспортировании (горизонтально или вертикально).

Все эти компоновочные варианты – реальные, реализованные в известных конструкциях различных фирм-разработчиков. Данные варианты различаются стоимостью, общей площадью, несовмещенными холостыми ходами, надежностью в работе, удобством обслуживания транспортера и станков и т.д., т.е. неповторимым сочетанием достоинств и недостатков.

Реплика. *Предоставьте самим студентам возможность дать оценку достоинствам и недостаткам каждого варианта хотя бы по приведенным выше критериям, лучше – с использованием таблиц по типу приведенных в гл. 7 и 8. Прекрасный повод еще раз напомнить истину: если какой-то вариант обладает только достоинствами в сравнении, остальные неизбежно будут забыты.*

Выбор варианта транспортной системы и компоновки линии в целом (I – IX на рис. 9.1) во многом субъективен, поскольку достоинства и недостатки каждого из вариантов не всегда могут быть формализованы. Возможно применение только количественных критериев, с противопоставлением характеристик стоимости и быстродействия $t_к$.

Однако зачастую вопрос решается приверженностью разработчиков к привычным вариантам, что неявно служит и экономическим критерием (сокращение длительности разработки, наличие готовых технологических процессов изготовления и сборки, налаженных связей со смежниками и т.д.).

В итоге принимаем вариант с боковым транспортированием изделий в горизонтальном положении и расположением станков параллельно трассе магистрального транспортера (см. рис. 9.1, вариант I).

Его стоимостные характеристики

$$К_{тр} = 35\,000q + 800n_у,$$

где q – число станков в линии; $n_у$ – число участков, на которое разделена линия.

Несовмещенное время холостых ходов $t_к = 0{,}25$ мин.

Остальные параметры: число последовательно работающих станков q, участков-секций $n_у$, станков-дублеров m в одной линии, а также нескольких независимо работающих линий p взаимосвязаны, ибо все они реализуют целевую функцию достижения заданного в ТЗ уровня производительности ($420 \le Q_{тр} \le 485$ шт./смена) различными методами структурного усложнения (при росте стоимости линии).

Ведущим параметром является число позиций q, на которое дифференцируется процесс обработки, этот параметр дает наибольшее число вариантов. Как указано в ТЗ, обработка вала должна складываться из следующих операций: фрезерования торцов, зацентровки торцов, чернового обтачивания поверхностей, их чистового обтачивания, прорезания канавок, снятия фасок.

Первые два перехода выполняются на фрезерно-центровальных станках, остальные – на гидрокопировальных. Поэтому минимальное число рабочих позиций обработки вала можно принять $q = 4$ (см. гл. 5).

Распределение переходов по позициям и их длительность в соответствии с приведенными данными будут (см. табл. 5.1):

поз. I – фрезерование и зацентровка торцов, $t_I = 0{,}25\ldots0{,}10 = 0{,}40$ мин;

поз. II – черновое и чистовое обтачивание поверхностей *1*, *2* и *3*; $t_{II} = 0{,}15 + 0{,}10 + 0{,}30 + 0{,}25 + 0{,}15 + 0{,}35 = 1{,}30$ мин;

поз. III – черновое и чистовое обтачивание поверхностей *4*, *5* и *6*, $t_{III} = 0{,}35 + 0{,}20 + 0{,}15 + 0{,}45 + 0{,}30 + 0{,}20 = 1{,}65$ мин;

поз. IV – прорезание канавок и снятие фасок (совмещены во времени), $t_{IV} = 0{,}30$ мин.

На станках поз. II и III необходимо иметь поворотные копиры.

Считая временем рабочего хода время обработки на лимитирующей позиции (в данном случае поз. III), получаем для четырехпозиционного варианта построения линии $t_p(4) = 1{,}65$ мин.

Укрупненный расчет ожидаемой производительности в простейшем варианте (см. гл. 3) при $t_x = 0{,}25$ мин и $\eta_{ис} = 0{,}75$ показывает, что при $q = q_{min} = 4$ линии заданный уровень производительности ($Q_{min} = 420$ шт./смена) заведомо не обеспечивается

$$Q = \frac{480}{t_p + t_x}\eta_{ис} = \frac{480}{1{,}65 + 0{,}25}0{,}75 = 190 \text{ шт./смена.}$$

Более высокая производительность может быть обеспечена дальнейшей дифференциацией процесса обработки ($q > q_{min}$) с увеличением числа станков в однопоточной линии. Для этого обработка на лимитирующей позиции (в данном случае поз. III) разделяется на две части путем уменьшения числа обрабатываемых на одной позиции поверхностей. Целесообразно разделить выполнение черновой и чистовой обработки. Тогда при $q = 5$ распределение технологического процесса по позициям будет следующим:

поз. I – фрезерование и зацентровка торцов, $t_I = 0{,}4$ мин;

поз. II – черновое и чистовое обтачивание поверхностей *1*, *2* и *3*, $t_{II} = 1{,}3$ мин;

поз. III – черновое обтачивание поверхностей *4*, *5* и *6*, $t_{III} = 0{,}35 + 0{,}20 + 0{,}15 = 0{,}70$ мин;

поз. IV – чистовое обтачивание поверхностей *4*, *5* и *6*, $t_{IV} = 0{,}45 + 0{,}30 + 0{,}20 = 0{,}95$ мин;

поз. V – прорезание канавок и снятие фасок, $t_V = 0{,}30$ мин. Время рабочего хода как время обработки на лимитирующей поз. II $t_p(5) = 1{,}30$ мин.

При дроблении технологического процесса на $q = 6$ позиций на каждой позиции проводится лишь однократная обработка вала с одной стороны (см. рис. 9.5). Так как время рабочих ходов цикла линии при каждом из вариантов $t_p(q)$ равно времени наиболее лимитирующего перехода, то с увеличением числа станков в линии $t_p(q)$ монотонно сокращается, все данные заносим в табл. 9.1. Как видно, чем больше станков в линии, тем меньше длительность рабочего цикла.

9.1. Время рабочих ходов при различной степени дифференциации

Число рабочих позиций q	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Время рабочих ходов цикла $t_p(q)$, мин	1,65	1,30	0,95	0,75	0,70	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35

Графически эта зависимость приведена па рис. 9.6. При $q = 12$ длина чистовой обработки поверхности вала *4* должна делиться на две позиции, что техническими условиями допускается. Однако дальнейшая дифференциация технологического процесса $q > 13$ невозможна, так как остальные поверхности вала более критичны к точности и наличие ступеней (неизбежных при дроблении длины чистовой токарной обработки) не допускается.

Следовательно, $q_{max} = 13$; $t_p(13) = 0,35$ мин. Таким образом, по степени дифференциации технологического процесса проектируемая линия может иметь 10 вариантов ($4 \le q \le 13$).

Ожидаемая производительность однопоточной автоматической линии с максимальным числом позиций ($q_{max} = 13$) и жесткой межагрегатной связью ($n_y = 1$) в соответствии с принятыми исходными данными и предполагаемым уровнем загрузки $\eta_{загр} = 0,85$:

$$Q = \frac{480\eta_{загр}}{t_p + t_x + \sum t_c} = \frac{480 \cdot 0,85}{0,35 + 0,25 + 0,12 + 0,02 \cdot 13} = 416 \text{ шт./смена.}$$

Предыдущий расчет производительности для линии с минимальным числом позиций ($q = 4$) был заведомо ориентировочным. Данный расчет показывает, что обойтись без дальнейшего структурного усложнения: деления линий на участки-секции, введения станков-дублеров на лимитирующих операциях – не удается.

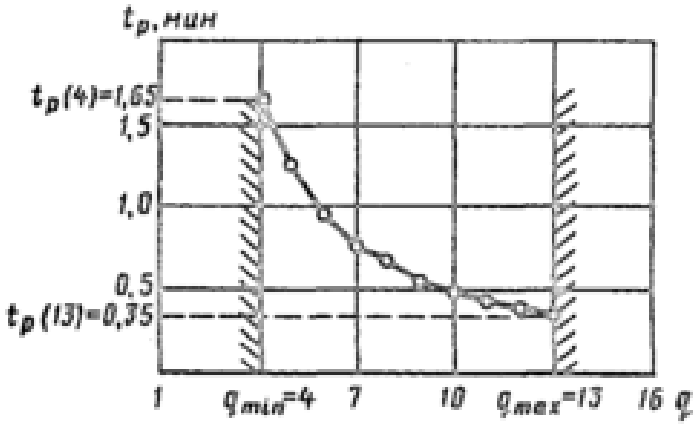


Рис. 9.6. Зависимость времени рабочих ходов в линии от числа позиций

Реплика. Следует вспомнить результаты оптимизационных расчетов, приведенных в гл. 8: оборудование с максимальным или минимальным числом позиций обычно не оказывается оптимальным, как и заниженные и завышенные режимы обработки; принцип золотой середины работает всегда (см. результаты последующих расчетов).

Деление на участки-секции с установкой накопителей заделов является универсальным приемом при создании автоматических линий (см. гл. 6). Предельными структурными вариантами являются: одноучастковая линия с гибкой и жесткой межагрегатной связью ($1 \le n_y \le q$). Число вариантов зависит от числа станков в линии, т.е. от степени дифференциации технологического процесса. Рассмотрим кратко формирование этих вариантов.

Единая линия из четырех станков ($q = 4$) может быть структурно построена по трем вариантам: $n_y = 1; 2; 4$. То же число вариантов будет и для линий из пяти станков (технически возможно и применяется деление линии на участки с неравным числом станков, например при $n_y = 2$ в секциях будет сблокировано два и три станка). Линия из $q = 6$ станков может быть построена по четырем вариантам:

– с жесткой связью ($n_y = 1$);

– из двух участков ($n_y = 2$) по три станка;

– из трех участков ($n_y = 3$) по два станка;

– с гибкой межагрегатной связью [($n_y = 6$), см. рис. 9.2].

Аналогично формируются структурные варианты и для линий с большим числом позиций. Варианты с $n_y > q/2$ исключены из рассмотрения как малоперспективные (например, деление линии из четырех станков на три участка, линии из шести станков – на четыре и пять участков и т.д.).

Для повышения пропускной способности лимитирующих операций кроме дифференциации обработки применяют дублирование станков, т.е. установку на лимитирующих позициях обработки двух и более параллельно работающих станков. Такие линии получили наименование "линии с ветвящимися потоками". Число их вариантов может быть весьма велико и ограничивается лишь требуемым уровнем производительности.

Сравнение $Q_4 = 190$ шт./мин и $Q_{тр} = 420...480$ шт./мин показывает, что целесообразно рассматривать лишь те варианты, где число параллельно работающих станков лимитирующих операций не выше трех ($m = 3$), а при достаточной степени дифференциации технологического процесса ($q > 6$) – не более двух ($m = 2$).

В качестве примера на рис. 9.7 приведены возможные структурные варианты построения линии с жесткой связью и с ветвящимися потоками при шести рабочих позициях ($q = 6$). Технологический маршрут с распределением обработки по позициям был приведен на рис. 9.5. Время обработки по позициям (мин): I – 0,40; II – 0,70; III – 0,55; IV – 0,75; V – 0,95; VI – 0,30.

Вариант на рис. 9.7, *а* – обычная однопоточная линия с явно неравномерной дифференциацией технологического процесса. По варианту на рис. 9.7, *б* на лимитирующей позиции V вместо того, чтобы дифференцировать обработку и получить таким образом линию с $q = 7$ рабочими позициями, можно установить два параллельно работающих станка. Тогда, как и в семипозиционной линии, лимитирующей по времени будет операция чистового обтачивания поверхностей вала *1 – 3* [на рис. 9.5 поз. IV, $t_p(7) = 0,75$ мин]. Чтобы не дробить и эту операцию, создавая восьмипозиционную линию, в линии можно установить еще один станок-дублер и, таким образом, наряду с основным, однопоточным вариантом линия с шестью рабочими позициями может иметь еще четыре варианта построения с ветвящимися потоками (см. рис. 9.7, *б – д*).

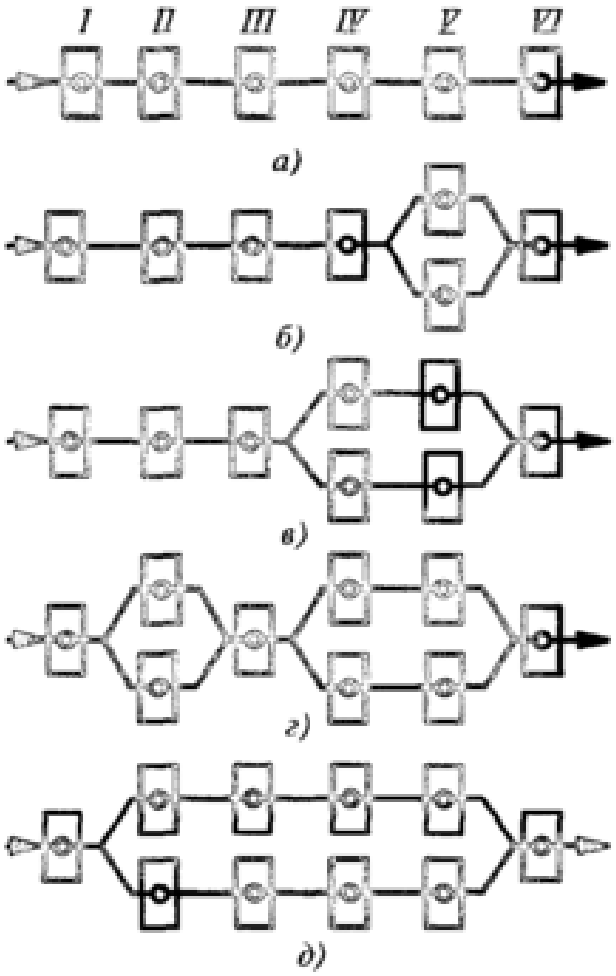


Рис. 9.7. Структурные варианты линии с ветвящимися потоками обработки:
I – VI – позиции обработки

Число возможных вариантов линий с ветвящимися потоками при различной степени дифференциации технологического процесса ($q = 4…7$) приведено ниже.

Число рабочих позиций линии q	4	5	6	7
Максимальное число потоков на операциях p	3		2	
Число вариантов линий с ветвящимися потоками	4	5	4	3
Общее число вариантов (включая однопоточный)	5	6	5	

Как видно, линии с числом рабочих позиций $q = 4…7$ дают в общей сложности 16 реализаций с ветвящимися потоками. Таким образом, число вариантов при использовании принципа построения линий с ветвлением потоков возрастает в несколько раз.

Если проанализировать общее числе вариантов линии при варьировании только тремя структурными параметрами: числом рабочих позиций ($4 \le q \le 13$); участков-секций ($1 \le n_y \le q$); станков-дублеров ($m = 0, 1, 2,..., q - 1$), становится очевидно, что предшествующие качественный анализ и отбор оставляют для рассмотрения еще несколько сотен вариантов, оптимальный может быть выбран только количественными методами.

9.4. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА

Количественные расчеты с целью сужения числа вариантов и выбора оптимального варианта следует проводить в четыре этапа:

1) выделение общей выборки вариантов по критерию обеспечения заданного диапазона производительности ($Q_{min} \le Q \le Q_{max}$);

2) выделение вариантов с оптимальными структурными параметрами;

3) выделение минимальной выборки рациональных вариантов по критерию экономической оптимальности ($Э_{max}$) с весьма близкими показателями;

4) выбор единственного варианта сочетанием количественных некачественных подходов.

Ожидаемую производительность вариантов линии Q_i рассчитываем по формуле (см. гл. 6) по лимитирующей позиции:

$$Q_i = \frac{480 m \eta_{загр}}{t_p(q) + t_x + \frac{\sum C_i + q t_{c1}}{n_y} w}, \qquad (9.1)$$

где m – число станков-дублеров, $m = 0, 1, 2, 3,...$; q – число рабочих позиций (станков) в линии, $4 \le q \le 13$; $t_p(q)$ – время рабочих ходов цикла как функция принятых режимов обработки и числа позиций, $0{,}35 \le t_p(q) \le 1{,}65$ (см. данные на с. 290); t_x – время холостых ходов цикла как функция выбранного варианта компоновки, $t_x = 0{,}25$ мин; $\sum C_i$ – ожидаемые внецикловые потери комплекта инструмента как характеристика надежности, $\sum C_i = 0{,}12$ мин/шт., $t_{c\,1}$ – ожидаемые внецикловые потери механизмов одного станка как характеристика надежности, $t_{c\,1} = 0{,}02$ мин/шт.; n_y – число участков, на которое делится линия, $1 \le n_y \le q$; w – коэффициент возрастания простоев лимитирующего участка из-за неполной компенсации потерь накопителями (см. гл. 6); $\eta_{загр}$ – коэффициент загрузки линии как характеристика условий ее эксплуатации.

Оценивается ожидаемая производительность линии с учетом неизбежных организационных простоев (передача смены, отсутствие рабочих и др.), что учитывается коэффициентом $\eta_{загр}$, представляющим собой долю времени в пределах планового фонда, когда линия обеспечивается всем необходимым для работы. Согласно результатам эксплуатационных исследований $\eta_{загр}$ можно принимать в пределах 0,88...0,93. В данном случае будем считать, что $\eta_{загр} = 0{,}9$.

Значение коэффициента w также определяется путем обобщения результатов эксплуатационных исследований. При вместимости накопите-

лей E = 30...50 мин и более w как функция числа участков может быть охарактеризована следующими величинами, полученными по результатам эксплуатационных исследований (см. гл. 10).

Число участков в линии	1	2	3	4	5	6
Возрастание потерь выпускного участка w	–	1,1	1,15	1,18	1,20	1,25

Расчеты по формуле (9.1) для однопоточных линий без станков-дублеров (m = 0) даны ниже.

q	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$t_p(q)$, мин	1,65	1,30	0,95	0,75	0,70	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
Q, шт./смена, при n_y, равном:										
1	200	237	300	345	352	393	402	416	428	442
2	205	250	325	376	395	450	465	484	496	535
3	–	–	335	390	408	472	485	512	548	575
4	–	–	–	–	420	482	508	528	578	602
5	–	–	–	–	–	–	524	540	590	620
6	–	–	–	–	–	–	–	–	600	635
q	210	262	347	400	435	515	545	580	625	675

Для однопоточных линий (p = 1, m = 0) эти результаты приведены в виде диаграммы на рис. 9.8. Каждая точка на диаграмме означает прогнозируемую величину Q_i одного из конкурирующих вариантов (общим числом 50). Простейшая однопоточная линия с жесткой межагрегатной связью (p = 1, q = 4, n_y = 1) имеет реальную производительность намного ниже требуемой (Q = 200 шт./мин).

Как видно из рис. 9.8, только девять конкурирующих вариантов однопоточных линий (отмечены черными кружками) удовлетворяют требуемому диапазону производительности (420 ≤ Q ≤ 485, заштрихованная зона). Они имеют следующие показатели:

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
q	8	12	8	13	9	10	9	9	10
n_y	4	1	8	1	2	2	3	4	3
Q_i	420	428	435	442	450	465	472	482	485

К ним необходимо добавить конкурирующие варианты линий с ветвящимися потоками. Их ожидаемую производительность можно рассчи-

тывать по той же формуле (9.1) при учете специфических особенностей таких линий, рассмотренных выше.

Итак, дублирование станков на тех или иных позициях обработки сокращает время рабочих ходов линии по сравнению с их продолжительностью при однопоточном варианте, поскольку данная позиция перестает быть лимитирующей и менее производительной будет обработка на последующей по длительности позиции. При двух дублирующих станках лимитирующей оказывается, как правило, третья по продолжительности рабочая позиция. На величину внецикловых потерь дублирование позиций (ветвление рабочих потоков) не влияет.

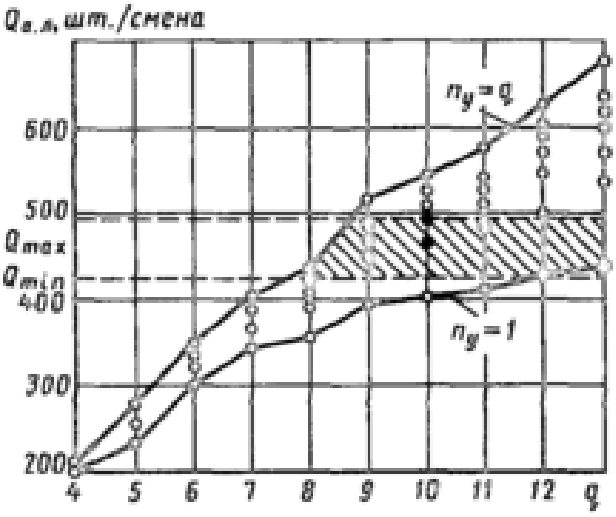


Рис. 9.8. Ожидаемая производительность вариантов линии с различным числом позиций и участков-секций

Обозначим число станков-дублеров в линии через m. Из сравнения Q_i с Q_{min} видно, что при простейшем структурном варианте (однопоточная линия с жесткой связью из четырех станков) даже две параллельные линии с независимой работой не обеспечат требуемого уровня производительности. Поэтому формирование конкурирующих вариантов и расчет ожидаемой производительности начинаем с линии из пяти станков ($q = 5$). Диаграмма длительности цикла обработки по рабочим позициям $I - V$ приведена на рис. 9.9, *а*.

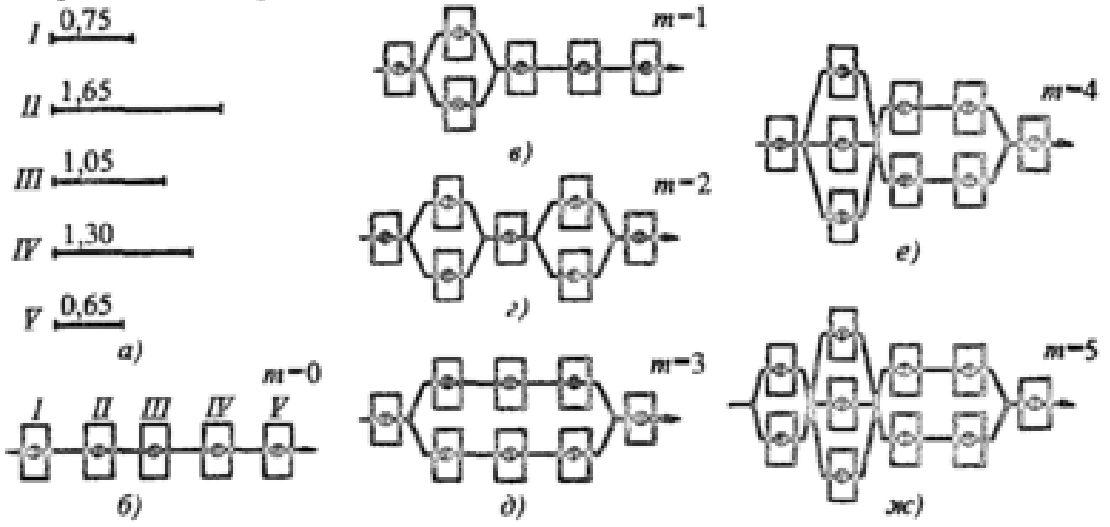


Рис. 9.9. Диаграмма к расчету ожидаемой производительности вариантов линии с ветвящимися потоками

Однопоточный вариант – линия из пяти последовательно работающих станков (см. рис. 9.9, *б*) – имеет ожидаемую производительность Q_i = 237 шт./смена. При этом длительность рабочего цикла линии $T = t_р + t_х$ = 1,30 + 0,35 + 1,65 мин. При добавлении в линию каждого очередного дублера условно можно считать, что длительность цикла на данной позиции сокращается в 2 раза.

При жесткой межагрегатной связи ($n_у$ = 1, w = 1,0) и добавлении в линию одного станка-дублера на поз. I (m = 1, см. рис. 9.9, *в*) длительность рабочего цикла по лимитирующей позиции $T = t_р + t_х$ = 0,95 + + 0,35 = 1,30 мин.

Суммарные собственные внецикловые потери $\sum t_с = \sum C_i + t_{с1}q$ = = 0,12 + 5·0,02 = 0,22. Производительность

$$Q_i = \frac{480\eta_{загр}}{t_р + t_х + \dfrac{\sum t_с}{n_у} w} = \frac{480 \cdot 0{,}9}{1{,}30 + 0{,}22} = 285 \text{ шт./смена.}$$

При добавлении двух станков-дублеров (m = 2, см. рис. 9.9, *г*) длительность цикла T = 0,70 + 0,35 = 1,05 мин. Производительность

$$Q_i = \frac{480 \cdot 0{,}9}{1{,}05 + 0{,}22} = 340 \text{ шт./смена.}$$

Добавление очередного станка-дублера (m = 3, см. рис. 9.9, *д*) приводит к тому, что лимитирующей снова оказывается поз. II. Производительность

$$Q_i = \frac{432}{0{,}82 + 0{,}22} = 415 \text{ шт./смена.}$$

Четвертый станок-дублер (m = 4, см. рис. 9.9, *е*) должен встраиваться на поз. II, где теперь будут три параллельно работающих станка. Длительность цикла определится обработкой на поз. I: T = 0,40 + 0,35 = 0,75 мин. Производительность

$$Q_i = \frac{432}{0{,}75 + 0{,}22} = 445 \text{ шт./смена.}$$

Возможен и такой структурный вариант, когда станки-дублеры будут на всех позициях, кроме последней (см. рис. 9.9, *ж*).

Как видно, параллельная обработка значительно увеличивает число возможных вариантов, в том числе удовлетворяющих требованиям к производительности $420 \le Q_{тр} \le 485$ шт./смена.

Отметим, что данная выборка уже удовлетворяет некоторым условиям экономической оптимальности. Варианты с $Q_i < Q_{min}$ неоптимальны, так как для обеспечения требуемого выпуска нужно иметь две такие линии с их недогрузкой. Варианты с $Q_i > Q_{max}$ неоптимальны, поскольку они дороже, а выпуск будет не более Q_{max}, т.е. опять недогрузка.

По результатам всех расчетов заданному диапазону производительности отвечают 9 вариантов однопоточных линий (см. рис. 9.9) и 22 варианта линий с ветвящимися потоками, а также два варианта двух независимо работающих линий.

Итого: по итогам расчетов производительности из многих сотен вариантов осталось 33. Их можно сопоставлять по экономическим критериям методом полного перебора.

Однако в гл. 6 было показано наличие для каждого типа линий оптимальных структурных параметров (числа участков в линии), которые заведомо более экономичны, чем варианты с неоптимальной структурой.

Оптимальное число участков в линии из q позиций согласно формуле (6.19)

$$n_{y.опт} = \sqrt{\frac{Bq}{\alpha}\frac{0{,}35К_1 + Зпл}{0{,}35К_1}},$$

где Bq – суммарные внецикловые потери времени в линии при жесткой межагрегатной связи (n_y); $К_1$ – капитальные затраты по тому же варианту; α – относительная стоимость одного накопителя по сравнению со стоимостью одной позиции линии; Зпл – годовой фонд заработной платы.

Поскольку B есть простои на единицу отработанного времени, а не на единицу продукции, необходим пересчет:

$$Bq = \frac{\sum C_i + t_{c1}q}{t_p(q) + t_x},$$

где $\sum C_i$ и t_{c1} – потери на единицу продукции.

Рассчитаем в качестве примера оптимальные структурные параметры автоматической линии из восьми позиций.

Ожидаемая стоимость линии при жесткой межагрегатной связи $К_1$ = 150 тыс.у.е., фонд заработной платы Зпл = 11,2 тыс.у.е., стоимость одного накопителя 8 тыс.у.е.:

$$Bq = \frac{0{,}12 + 8 \cdot 0{,}02}{0{,}70 + 0{,}23} = 0{,}30; \quad \alpha = \frac{8000 \cdot 8}{150\,000} = 0{,}43;$$

$$n_y = \sqrt{\frac{0{,}30}{0{,}43}\,\frac{0{,}35\cdot 150+11{,}2}{0{,}35\cdot 150}} = 2{,}5\,.$$

Таким образом, автоматическую линию из восьми позиций экономически оптимально расчленять на $n_y = 2\ldots3$ участка, линию из 12 станков – на четыре участка и т.д.

В итоге оптимальные структурные характеристики имеют только 13 вариантов из оставшихся 33, т.е. конкурентность сократилась в 2,5 раза.

Сопоставление оставшихся вариантов по любым критериям экономической эффективности, например по минимуму приведенных затрат (см. гл. 2), формально позволяет найти оптимальный вариант, отвечающий условию $C_{пi} \to \min$.

Графически пять вариантов с наилучшими ожидаемыми экономическими показателями (обеспечение требуемой производительности при минимуме приведенных затрат) представлены на рис. 9.10. Эти варианты можно назвать рациональными.

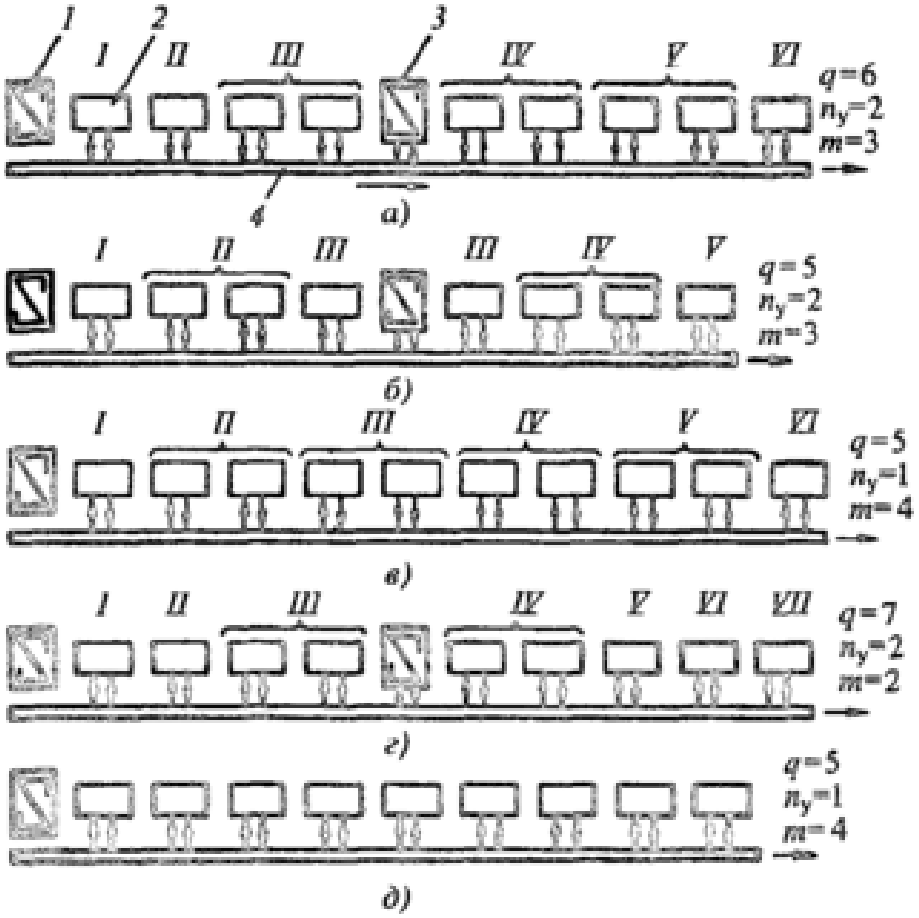


Рис. 9.10. Рациональные варианты автоматической линии обработки валов:
1 – исходный накопитель; *2* – станки; *3* – межоперационные накопители;
I – VIII – позиции обработки

Казалось бы, оптимальным должен быть признан вариант с показателями (см. рис. 9.10, *а*) $q = 6$, $n_y = 2$, $m = 3$, однако показатели остальных четырех вариантов экономически отличаются не более чем на 5 %!

Эти расчеты проводятся на этапе технического предложения, все исходные данные по стоимости, эксплуатационным затратам, надежности и т.д. недостаточно достоверны и могут в реальной линии отличаться на 20...30 % и более.

Поэтому следует говорить о группе рациональных вариантов с наиболее высокими ожидаемыми показателями. Иными словами, – *как это ни парадоксально – выбор варианта, принимаемого за основу при дальнейшем проектировании, не может быть сделан строго по экономическим критериям.*

Надо выделять выборку вариантов с наилучшими экономическими показателями, *а окончательный выбор нужно проводить по неформальным критериям, учитывающим характер и условия данного производства*, и пр. Такими критериями могут быть: конструктивная сложность системы, занимаемая площадь, доступность в наладке и обслуживании, удобство выполнения ремонта и др.

Наиболее очевиден критерий конструктивной сложности. По укрупненной оценке, наиболее простым является вариант по рис. 9.10, *б*. Общее число станков восемь, в то время как в остальных вариантах девять и десять; стоимость такого варианта наименьшая. Поэтому есть основание принять его за основной для дальнейшего проектирования линии.

Таким образом, в результате шагового отбора из нескольких сотен возможных структурно-компоновочных вариантов построения линии обработки вала по рис. 9.4 в качестве оптимального *следует принять однопоточную автоматическую линию из пяти рабочих позиций (технологический процесс дифференцирован на пять частей), разделенную на два участка-секции, с тремя станками-дублерами.* Ожидаемые характеристики линии: стоимость К = 130 тыс. у.е. Длительность рабочего цикла по лимитирующему станку T = 1,65 мин, производительность Q = 450 шт./смена.

Глава 10

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

10.1. ЦЕЛИ И СОДЕРЖАНИЕ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

История техники знает мало примеров, когда вновь созданные технологии и конструкции сразу оказывались совершенными или хотя бы высоконадежными. Чем серьезнее и перспективнее выглядят технические новшества в замыслах разработчиков, тем труднее и мучительнее идет процесс их отработки и доводки, в первую очередь – по надежности функционирования (более подробно о процессе становления новшеств см. в заключении)

Поэтому образцы любого вновь приобретаемого, а не только спроектированного автоматизированного оборудования должны проходить приемосдаточные испытания. Чем лучше такие испытания организованы, тем реальнее, что данное оборудование даст высокую техническую и экономическую эффективность. Задачи испытаний кратко были изложены в разд. 7.3.

Испытания у изготовителя включают в себя:

1) подготовку к испытаниям, в том числе внешний осмотр с устранением возможных утечек жидкостей и газов; проверку наличия и правильности ограждений и других защитных элементов конструкций; проверку геометрической точности перемещений механизмов; опробование механизмов и устройств на включение-выключение, взаимодействие при перемещениях; проверку на пробой электроизоляции, укомплектованности оборудования, соответствия требованиям техники безопасности и т.д.;

2) испытания на холостом ходу: осуществляются прогоны без обработки в течение нескольких смен с подключением всех механизмов и устройств при возможной загруженности всех механизмов транспортирования заготовками. При этом проверяют: давление масла в гидросистемах, температуру в нагреваемых объемах, вакуум внутри вакуумных камер и т.д., фиксируют все возникающие отказы;

3) испытания в работе сначала отдельных устройств, затем комплекта оборудования в целом с последовательным выполнением всех технологических операций в течение нескольких часов. Необходимые заготовки и инструментальное оснащение поставляет в этом случае заказчик. При этом проверяют: настройку и работоспособность контрольных приборов, характер схода стружки и удаления смазочно-охлаждающей жид-

кости, фактическую длительность рабочего цикла и всех его элементов по циклограмме. По завершении обработки партии изделий оценивают точность обработки (суммарные погрешности) и другие выходные параметры качества, а также безотказность (длительность устранения отказов непоказательна).

Результаты испытаний по пп. *1 – 3* сообщают заказчику (покупателю), и после урегулирования возможных разногласий (в том числе устранения отказов, дефектов, отклонений и т.д.) оборудование демонтируют и транспортируют заказчику, *у которого совместно проводят более обширные испытания уже в реальных условиях производства.*

Испытаниям снова предшествует подготовка оборудования к работе: от внешнего осмотра и проверки утечек до обеспечения комплекта инструмента, оснастки, необходимого числа заготовок, обучения производственного персонала.

В ходе приемосдаточных испытаний с обслуживающим персоналом заказчика оборудование должно проработать установленное число рабочих смен (до 10...12) и при этом удовлетворить все требования, предусмотренные совместно согласованными документами, в том числе ТЗ.

В процессе и по итогам приемосдаточных испытаний оценивают и сопоставляют с требованиями ТЗ (см. разд. 7.2; 7.3):

– качество изготовленной продукции по точности размеров, геометрической форме, шероховатости и микротвердости поверхности и т.д.;

– техническую производительность, долю простоев всех видов, в том числе по переналадкам;

– надежность функционирования (интенсивность отказов и длительность их устранения, в том числе стойкость инструментов и время их замены);

– трудоемкость обслуживания оборудования по различным категориям работающих, условия труда;

– воздействие работы оборудования на окружающую среду через выбросы и сбросы, эффективность нейтрализации отходов производства.

В целом приемосдаточные испытания должны дать для заказчика ответ на единственный вопрос: принимать оборудование сразу или добиваться от поставщиков его доработки.

Вместе с тем, обе стороны обычно заинтересованы в проведении таких испытаний в минимальные сроки: поставщики, чтобы скорее завершить работу и получить полную оплату; заказчики, чтобы быстрее внедрить оборудование в производство и начать получать отдачу. Поэтому при выполнении приемосдаточных испытаний распространены

экспресс-методы, позволяющие давать оценки при минимальном объеме количественной информации по качеству продукции (см. разд. 10.2), безопасности в работе (см. разд. 10.4) и т.д.

Производственные исследования работоспособности, по существу, охватывают тот же перечень анализируемых факторов, что и при сдаче-приемке. Они выполняются в процессе стабильной эксплуатации и решают иной круг задач, среди которых:

– реализация для поставщиков обратной связи – от опыта применения к последующим разработкам или продажам аналогичного оборудования, накопление банка данных по стоимости, быстродействию, надежности и т.д. для типовых технических решений;

– количественная оценка для эксплуатационников реальной величины возможного повышения производительности и надежности, сокращения обслуживающего персонала, изменения системы обслуживания и т.д. данного оборудования в конкретных условиях;

– качественная и количественная оценка целесообразности конкретных мероприятий по модернизации данного оборудования, например повышения степени его автоматизации;

– научное обобщение опыта проектирования и эксплуатации автоматизированного оборудования с использованием результатов для перспективных разработок, в учебном процессе, в научно-технической литературе.

Производственные исследования требуют значительно более высоких затрат сил и времени, чем приемосдаточные испытания.

Методы приемосдаточных испытаний у заказчика и производственных исследований во многом идентичны, обработка информации и ее интерпретация проводятся с применением аналогичного математического аппарата.

Следует отметить существенное отличие стендовых (лабораторных) и производственных исследований технологических процессов (ТП) и конструкций.

Лабораторные исследования проводятся в условиях активного эксперимента, когда определяющие факторы можно изменять в широких пределах, в том числе выходя за рамки очевидного.

Производственные исследования, за редким исключением, выполняются в условиях пассивного эксперимента (наблюдения и обработки информации), когда исследователям не позволено что-либо менять в технологии и конструкции. "Активизации" экспериментов можно достичь, применяя методы имитационного (физического и математического) мо-

делирования процессов функционирования машин и их систем по исходным данным, полученным при производственных наблюдениях. Можно назвать и другие методы активизации исследований, например метод "искусственных партий" [1], методы теории технологической наследственности [11] и т.д.

10.2. КАЧЕСТВО ВЫПУСКАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

Подавляющее число машин-автоматов и их систем, действующих в системе материального производства в таких отраслях, как машино- и приборостроение, электронная и радиотехническая промышленность, производство бытовой техники и т.п., предназначено для обработки конструкционных материалов. Продукцией являются отдельные детали и простейшие сборки.

Под качеством продукции подразумевается совокупность свойств, обусловливающих способность продукции удовлетворять своему назначению. Под показателями качества продукции понимаются количественные характеристики одного или нескольких свойств продукции, составляющих ее качество. При этом разделяют единичные показатели качества продукции, характеризующие одно из ее свойств, и комплексные, свидетельствующие о нескольких свойствах [13].

Номенклатура показателей качества в каждом конкретном случае зависит от назначения продукции. С позиций качества оценка продукции по любым показателям сводится, прежде всего, к делению продукции на две категории: годную продукцию, удовлетворяющую всем установленным требованиям, и брак – продукцию, передача которой потребителям не допускается из-за наличия дефектов.

Оценка качества продукции по количественным показателям основывается на сопоставлении фактически замеренных значений с допустимыми.

Продукция будет соответствовать своему целевому назначению, если фактические числовые значения показателей качества будут находиться между двумя допустимыми предельными значениями (наибольшим и наименьшим), образующими допуск. Часто за одно предельное значение принимается номинальное, соответствующее высшему уровню качества, за другое – значение, при котором качество продукции обеспечивается на пределе.

Качество продукции характеризуется широкой номенклатурой свойств: физико-химическими свойствами материалов изделий; точностью их размеров, формы и взаимного расположения элементов; свойствами поверхностного слоя изделий.

Каждое из этих свойств может характеризоваться одним или несколькими показателями. Например, качество взаимного расположения поверхностей может оцениваться отклонениями от: прямолинейности в плоскости, прямолинейности линий в пространстве, плоскостности, круглости, цилиндричности, параллельности плоскостей, параллельности осей в плоскости, перпендикулярности и т.д.

Конкретный перечень показателей качества зависит от вида продукции, ее назначения и характера ТП.

Требования ставятся с учетом того, что конкретные показатели качества каждой единицы продукции являются случайными величинами, с некоторым номиналом и диапазоном рассеяния.

При выполнении приемосдаточных испытаний обрабатываются ограниченные партии изделий, оценку стремятся проводить экспресс-методами, используя заранее заготовленные формы, например по рис. 10.1. Поле допуска (по $A = \pm 0{,}06$) делится на 10...12 интервалов, измеренный размер каждого изготовленного изделия отмечается в соответствующем интервале крестиком. Практика показывает, что уже при партии в 20... 30 шт. можно достаточно объективно оценить, соответствует ли уровень настройки номиналу и насколько велико поле рассеяния анализируемого показателя качества.

В ходе производственных исследований работоспособности предметом анализа являются не только "мгновенные" характеристики качества в пределах анализируемой партии изделий, но и стабильность ТП во времени (смещение уровня настройки, изменение диапазона рассеяния и т.д.).

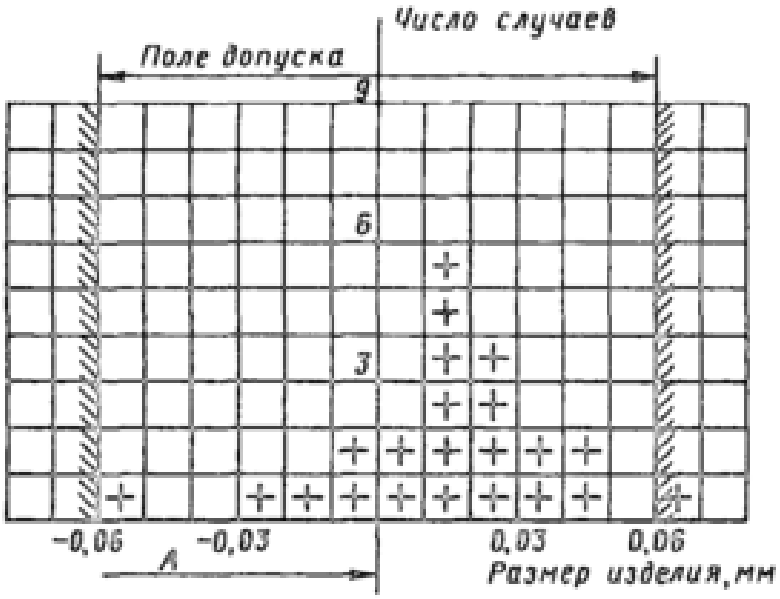


Рис. 10.1. Форма для экспресс-анализа партии изделий и ее заполнение

Анализ качества выпускаемой продукции включает в себя следующие этапы:

1) выбор контролируемых показателей качества и измерительных средств, определение величины статистической выборки;

2) необходимые измерения контролируемых параметров с заполнением соответствующих таблиц;

3) расчет эмпирических значений математического ожидания и среднего квадратического отклонения (СКО);

4) проверку достоверности полученных результатов, в том числе оценку выборки на случайность, на смещение математического ожидания в процессе измерений;

5) подбор теоретического закона распределения контролируемого параметра с оценкой соответствия статистических и вероятностных характеристик;

6) определение теоретического поля рассеяния контролируемого параметра;

7) сопоставление поля рассеяния с допустимыми пределами, оценку показателя качества.

В итоге качество выпускаемой продукции оценивается следующими выходными документами:

– "точечной" диаграммой результатов измерений контролируемого показателя у последовательно обрабатываемых изделий;

– диаграммой рассеяния значений контролируемого показателя в масштабах представительной партии изделий в сопоставлении с допустимыми границами;

– диаграммой или таблицей, характеризующей стабильность выполнения ТП, т.е. динамику изменения уровня настройки и диапазона рассеяния значений показателя качества;

– корреляционной диаграммой взаимосвязи данного показателя качества с некоторыми определяющими параметрами (например, припуск на обработку – размер после обработки).

Методы отбора информации и ее математической обработки подробно рассматриваются в курсах по прикладной математике, технологии машиностроения и др. Поэтому далее приводятся лишь некоторые примеры, отражающие специфику анализа автоматизированного производства.

Пример 1. Расчет показателей качества обработки отверстий подшипниковых колец на токарном автомате. Обрабатываемый диаметр по номиналу 54,75 мм; допустимые отклонения ± 0,1 мм.

Фактический объем выборки составил 103 кольца; фактический диаметр измерялся по всем сечениям с фиксацией максимальных и минимальных значе-

ний на специальной измерительной позиции посредством индикаторов с ценой деления шкалы 5 мкм, что обеспечивает точность измерения до 2,5 мкм.

Измерения проводились в порядке обработки колец партии. По их данным непосредственно была построена точечная диаграмма (рис. 10.2), на которой размеры каждого кольца изображены в виде черточки: верхний конец означает максимальный диаметр, нижний – минимальный, длина черточки – разность диаметров в одном сечении, т.е. отклонение от круглости – овал.

Для построения диаграммы рассеяния размеров результаты измерения отклонений диаметра колец в партии (независимо от последовательности их обработки) были сведены в табл. 10.1 после предварительного распределения этих значений по интервалам.

Число интервалов при объеме выборки более 100 рекомендуется выбирать от 9 до 15. Задавшись числом интервалов 9, определим интервалы с учетом максимального отклонения $[60 - (-30)]/9 = 10$ мкм.

Помня, что в измерениях использовали прибор с ценой деления измерительной шкалы 5 мкм, окончательно выбираем $\Delta = 10$ мкм. В каждый интервал входят размеры, находящиеся в диапазоне от наименьшего размера в интервале (включая его) до наибольшего (исключая его).

Для удобства вычислений параметров распределения заполняем табл. 10.1. Заносим в нее границы интервалов, их средние значения, а также измеренные значения диаметра.

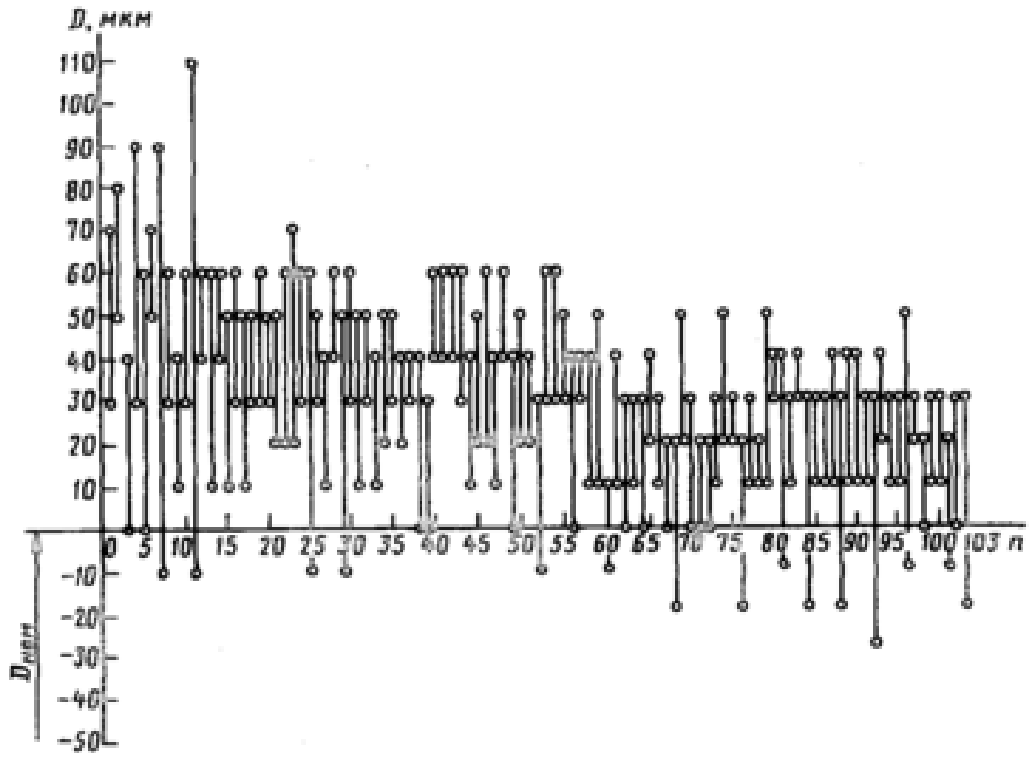


Рис. 10.2. Точечная диаграмма значений внутреннего диаметра колец подшипников при обработке на токарном автомате

10.1. Таблица отклонений размеров изделий

Интервал	Среднее значение интервала x_i	Частота попадания в интервал m_i	$b_i = (x_i - x_0)\Delta$	$m_i b_i$	$m_i b_i^2$
1…2	3	4	5	6	7
–30…–20	–25	1	–4	–4	16
–20…–10	–15	5	–3	–15	45
–10…0	–5	9	–2	–18	36
0…10	5	14	–1	–14	14
10…20	15	29	0	0	0
20…30	25	15	1	15	15
30…40	35	21	2	42	84
40…50	45	7	3	21	63
50…60	55	2	4	6	32
Сумма	–	103	–	35	305

Диаграмма рассеяния показана на рис. 10.3.

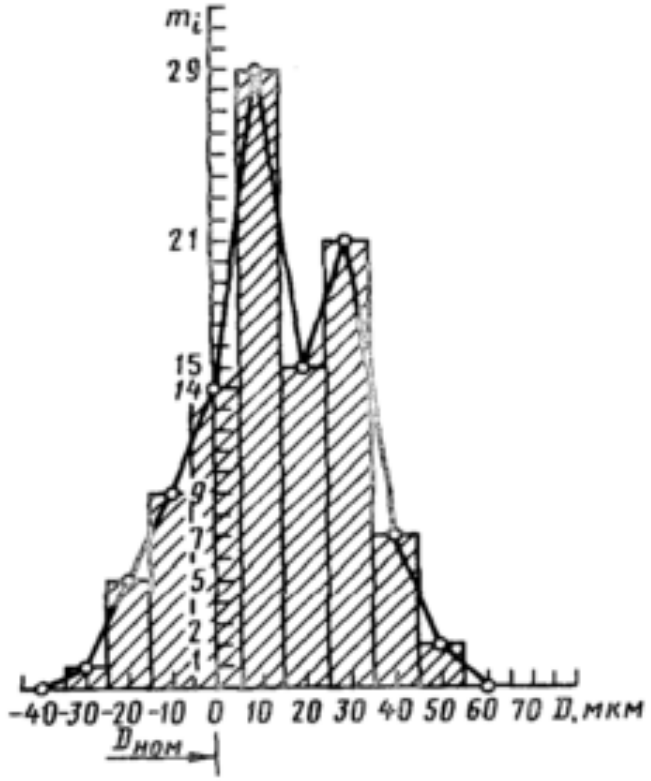


Рис. 10.3. Статистическая диаграмма рассеяния максимального диаметра колец

Вводим вспомогательный параметр:

$$b_i = (x_i - x_0)/\Delta ,$$

где x_0 – новое начало отсчета, за которое принимается середина интервала, имеющего наибольшую частоту; x_i – среднее значение i-го интервала; Δ – величина интервала.

Рассчитываем среднее значение X и СКО S:

$$X = x_0 + \Delta\left(\sum b_i m_i\right)\Big/\sum m_i ;$$

$$S = \Delta\sqrt{\frac{\sum b_i m_i}{\sum m_i} - \left(\frac{\sum b_i m_i}{\sum m_i}\right)^2} .$$

Используя для расчетов данные табл. 10.1, получаем

$$X = 15 + 10 \cdot 35/103 = 18{,}4 \text{ мкм}; \quad S = 10\sqrt{\frac{305}{103} - \left(\frac{35}{103}\right)^2} = 16{,}9 \text{ мкм}.$$

Таким образом, центр группирования размеров колец по максимальному диаметру не совпадает с номиналом, а смещен от него в бóльшую сторону на 16,9 мкм, что означает увеличение припуска на последующие шлифовальные операции. Качественно такую оценку можно сделать и по рис. 10.2. При этом все кольца находятся в поле допуска ($D_{ном}$ ± 100 мкм), т.е. автомат в пределах измеренной партии выдавал только годную продукцию. Расчет и построение теоретической диаграммы мгновенного поля рассеяния размера диаметра как случайной величины по статистической выборке в предположении нормального закона распределения, т.е. стабильности процесса, ведется стандартными методами теории вероятности и математической статистики.

Оценку стабильности ТП, т.е. тенденций смещения уровня настройки из-за износа резцов, изменения температуры, жесткости системы и т.д., можно проводить простейшим методом – путем попарного сопоставления размеров соседних по очередности обработки колец, сводя результаты в табл. 10.2 (приведены лишь фрагменты).

Для удобства размеры даны не в абсолютных величинах, а в отклонениях (мкм) от номинала, как и в диаграмме на рис. 10.1. Из табл. 10.2 видно, что

$$D_2 = +\,80 \text{ мкм}, \; D_3 = +\,40 \text{ мкм}; \; a_i = 40 - 80 = -\,40 \text{ мкм}.$$

Если суммировать все данные по парным отклонениям в пределах партии $2 \le i \le 103$, то можно получить $\sum a = -5{,}2$ мкм.

Процесс достаточно стабилен, однако настройка имеет тенденцию "уходить" в сторону уменьшения, по-видимому, из-за износа резцов.

Аналогичные расчеты могут быть выполнены в отношении других показателей качества.

10.2. Таблица разностей диаметров последовательно обработанных изделий

Номер изделия i	Диаметр изделия D_i	Разность $a_i = D_i - D_{i-1}$
2	80	–
3	40	–40
4	90	+50
5	60	–30
⋮	⋮	⋮
102	30	15
103	30	0

Рассмотренный в примере расчет часто используется для оценки ожидаемых показателей качества при проектировании оборудования аналогичного технологического назначения.

Более сложной задачей является оценка качества выполнения ТП, связанных с многократной обработкой одних и тех же поверхностей, с чередованием формообразующих и уточняющих операций.

Как правило, проектируемый ТП отличается от действующего видом заготовок, методами и режимами обработки, жесткостью технологической системы и т.д. Поэтому при исследовании показателей качества важно не только проследить динамику их изменения по ходу ТП, но и определить, как отразились бы изменения технологии на промежуточных операциях, на показателях качества конечной продукции. Для этого может быть использован *метод искусственных партий изделий*, сущность которого заключается в следующем.

Из общего потока обрабатываемых изделий на исследуемой операции формируется несколько партий, отличающихся диапазоном рассеяния размеров изделий, составляющих данную партию. Рекомендуется комплектовать партии со следующими отношениями между полем рассеяния ω, и допуском δ на данный показатель качества: 1) $\omega = 0$ (вся партия комплектуется из изделий, имеющих одинаковые размеры); 2) $\omega = 0{,}50\delta$; 3) $\omega = 1{,}0\delta$; 4) $\omega = 1{,}5\delta$; 5) $\omega = 2{,}0\delta$ (рассеяние размеров вдвое больше допуска). Объем каждой партии должен составлять 100…120 шт. Отдельные изделия в партии должны иметь размеры, распределенные по закону, характерному для данного показателя качества (линейные размеры по нормальному закону; эксцентриситет, разностенность – по закону Максвелла).

Поле рассеяния в каждой партии делится на интервалы; для каждого из них должно быть подобрано из потока изделий определенное число изделий. В табл. 10.3 приведены данные по числу изделий в каждом интервале для нормального закона распределения при объеме выборки 100 шт.

Если, например, комплектуется партия изделий с номинальным размером 54 мм и рассеянием $\omega = 0{,}24$ мм, удобно принять число интервалов, равное 12. Тогда величина интервала будет составлять 0,02 мм. Следовательно, при комплектовании в партию должно быть включено одно изделие, размеры которого (мм) находятся в интервале 53,88… 53,90; два изделия – в интервале 53,90…53,92; четыре изделия – в интервале 53,92…53,94 и т.д. При комплектовании всех партий изделий необходимо пользоваться одними измерительными устройствами, что исключает субъективные ошибки. Для ускорения все партии можно комплектовать одновременно.

10.3. Число изделий в интервале при подборе партии

Номер интервала	Число изделий в партии при числе интервалов	
	12	9
1	1	2
2	2	5
3	4	12
4	9	18
5	15	26
6	19	18
7	19	12
8	15	5
9	9	2
10	4	–
11	2	–
12	1	–
Всего:	100	100

Скомплектованные партии пропускаются далее по всему технологическому маршруту с обязательными измерениями и определением поля рассеяния после каждой операции – вплоть до получения конечной продукции.

По результатам составляются две выходные диаграммы: 1) поэтапного изменения показателя качества ω_i по ходу ТП; 2) зависимости показателя качества конечной продукции от показателей качества на анализируемой операции.

Пример 2. На рис. 10.4 представлена диаграмма рассеяния размера диаметра подшипниковых колец после операций токарной обработки (1), термообработки (2), чернового (3) и чистового (4) шлифования. Были скомплектованы три партии колец с рассеянием размеров ω после токарной обработки, равным 80, 130 и 180 мкм при допуске $\delta_{ток} = 150$ мкм и допуске на готовое изделие $\delta_{гот} = 16$ мкм.

Вследствие термической обработки не сократилось, а увеличилось поле рассеяния, при этом размеры "лучшей" партии возросли в 2 раза, а "худшей" – только в 1,2 раза, т.е. произошло явное "выравнивание" погрешностей. В результате чернового шлифования происходит резкое уменьшение погрешностей с дальнейшим их "выравниванием". Если после токарной обработки у трех партий они изменились в 2,25 раза, в ходе термической в 1,4 раза, то после чернового шлифования только в 1,3 раза.

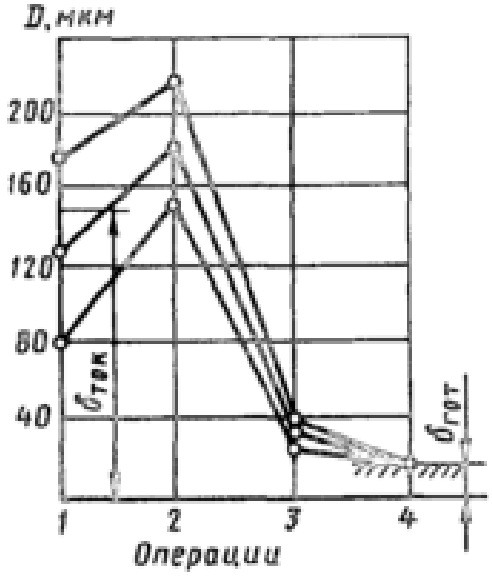


Рис. 10.4. Диаграмма поэтапного изменения поля рассеяния размеров для различных выборок изделий (метод искусственных партий)

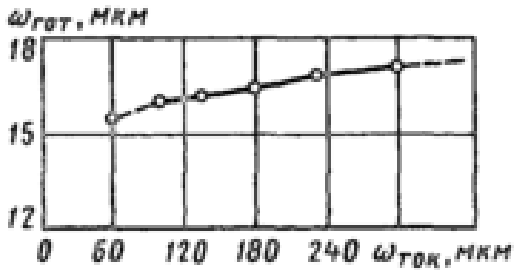


Рис. 10.5. Статистическая взаимосвязь рассеяния диаметров колец после токарной обработки и чистового шлифования

Чистовое шлифование дает несущественное различие в погрешностях, допуск на готовые изделия $\delta_{гот}$ во всех трех партиях выдерживается практически одинаковым.

На рис. 10.5 показана диаграмма зависимости погрешности диаметра готовых колец $\omega_{гот}$ от погрешностей токарной обработки $\omega_{ток}$, построенная с помощью пяти искусственных партий изделий с рассеянием размеров ω после токарной обработки, равным 80, 130, 180, 225, 300 мкм. Увеличение исходной погрешности в 3,2 раза привело к росту погрешности готовых колец лишь на 6 %. В данном случае конечные показатели качества незначительно (на 5...6 %) зависят от точности токарной обработки и предшествующих ей операций, а в основном на них влияют характеристики последней операции – чистового шлифования.

Метод искусственных партий может быть применен к любым показателям качества.

Он несет в себе черты активного эксперимента, позволяя прогнозировать результаты возможных организационно-технических мероприятий, направленных на повышение качества. Так, в рассмотренной выше реальной производственной ситуации обработку проводили на достаточно изношенных токарных многошпиндельных автоматах, выход размеров за пределы поля допуска для токарной обработки носил массовый характер, иначе не удалось бы скомплектовать партию с рассеянием ω = 180 мкм !

В цехе был намечен широкий круг мероприятий по совершенствованию токарного участка:

– приобретение нового оборудования;

– применение мерного инструмента с предварительной настройкой на размер;

– ужесточение контроля и отбраковки и т.д.

Однако проведенный анализ методом искусственных партий показал, что нужно начинать не с токарной, а с термообработки! Даже если в результате ре-

конструкции токарного участка уменьшить партионное рассеяние с $\omega_{max} = 240$ до 120 мкм (так предполагалось), на точности готовых колец это почти не отразится, т.е. силы и средства будут затрачены, по существу, впустую. И еще один вывод: указанный в технологической документации допуск $\delta = D_{max} = 150$ мкм носил субъективный характер и вряд ли стоило вести по этому допуску строгую отбраковку колец.

Если корреляционную взаимосвязь, графически показанную на рис. 10.5, рассчитать аналитически, то можно получить

$$\omega_{гот} = 15{,}7 + 0{,}0042\omega_{ток}.$$

Подставляя сюда $\delta_{гот} = \omega_{гот\ max} = 17{,}0$ мкм, легко видеть, что допуск на рассеяние размеров после токарной обработки мог быть в принципе расширен до 300 мкм.

Достоинство метода "искусственных партий" в том, что выполняется анализ характеристик не отдельных деталей, а целых партий.

10.3. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

Анализ производительности машин-автоматов и автоматических линий в условиях эксплуатации решает задачи:

– выявления резервов повышения производительности данного оборудования, в чем заинтересованы эксплуатационники;

– оценки реальной эффективности технологических и конструкторских решений, перспективном их применении в новых разработках. Тем самым, реализуется обратная связь – от производственного использования к последующим разработкам.

Поэтому анализ производительности проводится, как правило, организацией-разработчиком оборудования с более или менее активным участием тех, кто его эксплуатирует.

Анализ включает в себя следующие этапы:

1) фактические наблюдения и измерения, прежде всего, длительности рабочего цикла и его элементов; длительности работы и простоев по техническим и организационным причинам в течение не менее 10... 12 рабочих смен непрерывно;

2) первичную обработку результатов, составление фактической циклограммы и расчет баланса затрат планового фонда времени работы оборудования;

3) оценку достоверности полученной информации о работоспособности оборудования (достаточность объема, типичность выбранного периода наблюдений и т.д.);

4) расчет показателей производительности и возможных резервов ее повышения.

Комплекс работ рекомендуется начинать с определения длительности рабочего цикла машины или линии, что служит исходной информацией для расчета реальных показателей производительности. Итогом расчета являются фактические циклограммы работы линии, ее отдельных участков и встроенного оборудования.

Для снятия фактической циклограммы необходимо:

– знать порядок взаимодействия механизмов в течение цикла и совмещение ходов;

– условно разделить изучаемый объект на механизмы рабочих и холостых ходов, а также механизм управления;

– провести не менее 10 раз измерения длительности работы механизмов и построить циклограмму.

После составления циклограммы следует перейти к длительным наблюдениям за использованием линии и ее элементов во времени путем хронометража простоев. Надо фиксировать затраты фонда времени линии: производительные (работу) и непроизводительные (простои по причинам как технического, так и организационного характера; их продолжительность, методы устранения неполадок); число изделий, выпущенных в каждую смену; длительность цикла. Наблюдение должно быть непрерывным в течение достаточно большого периода времени.

Получать данные о качестве выпускаемой продукции, величине выхода годных и бракованных деталей необходимо одновременно с хронометражем работы линии, что позволяет увязать информацию о браке и простоях, связанных с наладкой линии.

При стабильном характере работы линии продолжительность наблюдения за ее функционированием должна составлять не менее 10... 12 смен, что обеспечивает достоверность полученных результатов, которую проверяют специальными методами.

Фактические наблюдения за работой автоматической линии дают значительный объем информации, обработка которой позволяет делать выводы о работоспособности линии, системе ее эксплуатации, резервах повышения производительности и точности. Первичная обработка этой информации сводится к получению некоторых основных параметров работы прежде всего баланса затрат времени работы, который дает представление о работоспособности.

Для получения баланса затрат фонда времени все простои по каждой смене наблюдения группируются по функциональным признакам и данные из всех протоколов наблюдения сводятся воедино. При составлении таблицы простои следует подразделять согласно их классификации (см. гл. 3) по оборудованию, инструменту и т.д.

Простои целесообразно делить на группы. Для инструмента последние определяются характером простоев: по причине планово-предупредительной замены инструмента, его текущей замены (по фактическому затуплению), аварийной замены его при поломках и т.д. Простои, связанные с ремонтом и регулированием, лучше всего классифицировать по основным целевым механизмам.

В классификации организационно-технических простоев необходимо выделять простои, вызванные отсутствием заготовок на линии, а также обрабатываемых изделий на данном участке из-за отказов и простоев предшествующих участков, несвоевременным приходом и уходом рабочих, отсутствием электроэнергии или инструмента.

В простоях по переналадке нужно выделять простои для замены приспособлений, инструмента, кинематической перенастройки, обработки пробных изделий с корректировкой положения механизмов и инструментов, переналадки систем управления и т.д.

При фиксации брака помимо деления его на исправимый и неисправимый следует отмечать брак предыдущих операций, обнаруженный при данной обработке, брак данной операции, брак от наладки и т.д.

При расчете баланса затрат планового фонда времени суммарный плановый фонд за период наблюдения принимается за 100 %, а длительность отдельных компонентов затрат выражается в процентах по отношению к нему. Рассмотрим методику расчета и анализа показателей производительности на конкретных примерах (см. примеры 3 и 4).

Пример 3. *Анализ производительности линии из агрегатных станков. Баланс затрат, планового фонда времени участка автоматической линии из девяти агрегатных станков.*

Баланс затрат планового фонда времени работы любого оборудования удобно выражать в графической форме (рис. 10.6).

Степень достоверности полученных числовых значений определяется тремя основными факторами:

– достаточностью накопленного объема информации, который зависит от длительности наблюдений;

– типичностью выбранного периода наблюдений;

– точностью хронометража.

Достаточность накопленного объема информации о тех или иных параметрах работы автоматической линии можно оценить сравнением статистических характеристик с вероятностными. Определение достаточности накопленного объема информации о случайных величинах может быть сведено к проверке достоверности параметров случайных величин, вычисленных на основе обработки статистических данных с помощью критериев согласия.

10.4. Баланс затрат планового фонда времени выпускного участка автоматической линии

Виды затрат планового фонда времени	Затраты времени, %	
	к простоям	к фонду времени
Простои по инструменту $\Theta_{ин}$	22,9	8,0
В том числе:		
при текущей замене	12,0	4,2
при аварийной замене	5,1	1,8
при регулировании	5,8	2,0
Простои по оборудованию $\Theta_{об}$	21,7	7,6
В том числе:		
силовых головок	6,0	2,1
приспособлений	3,1	1,1
транспортера	0,8	0,3
поворотного стола	4,0	1,3
системы управления	7,8	2,8
Простои по техническому обслуживанию $\Theta_{т.о}$	8,0	2,8
В том числе:		
подготовке к работе	3,2	1,2
уборке и очистке	4,0	1,3
прочие	0,8	0,3
Простои по организационно-техническим причинам $\sum\Theta_{о.т}$	47,4	16,5
В том числе:		
из-за отсутствия заготовок на линии	25,2	8,8
из-за предыдущих участков	9,1	3,2
вследствие ожидания ремонтников, электриков и т.д.	6,0	2,1
из-за отсутствия инструмента	0,5	0,2
прочие	6,6	2,2
Общее время простоев $\sum\Theta_{п}$	100	34,9
Фонд времени Θ	–	100
Время работы $\Theta_{р}$	–	65,1

Однако даже значительный объем информации еще не дает гарантии, что совокупность полученных эксплуатационных параметров объективно оценивает работоспособность действующей автоматической линии.

Для суждения о типичности выбранного периода наблюдения необходимо при помощи статистических методов проанализировать выпуск деталей на линии за длительный промежуток времени. Так, по итогам двух лет эксплуатации среднесменный выпуск деталей составил $Q_{ср} = 250$ шт./смена.

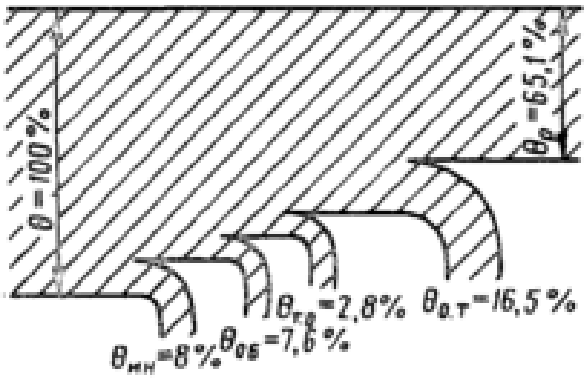


Рис. 10.6. Баланс затрат планового фонда времени:
$\Theta_{ин}$, $\Theta_{об}$, $\Theta_{т.о}$, $\Theta_{от}$ – простои по инструменту, оборудованию, техническому обслуживанию, организационно-техническим причинам соответственно; $\Theta_р$ – работа

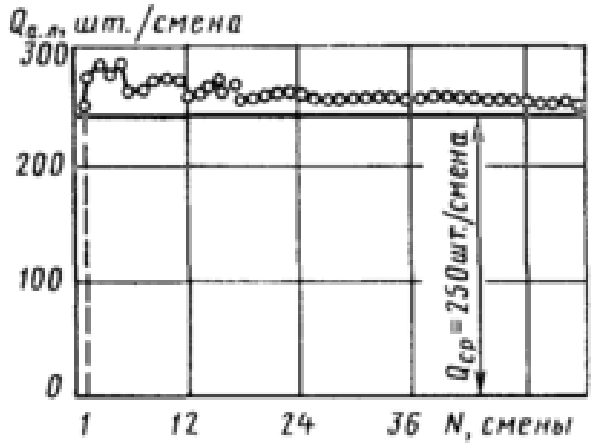


Рис. 10.7. Диаграмма для оценки типичности периода наблюдений и их длительности

На рис. 10.7 показан график среднесменного выпуска изделий нарастающим итогом за время наблюдения в течение 54 смен. График построен следующим образом.

За первую смену наблюдения на линии было выпущено 255 изделий; эту цифру вносим в график под номером смены 1 ($N = 1$). За вторую смену наблюдения изготовлено 310 шт., следовательно, среднесменный выпуск за две смены составил (255 +310)/2 = 283. За третью смену было произведено также 310 изделий. Среднесменный выпуск за три смены составил (255 + 310 + 310)/3 = 292.

Аналогично рассчитываем среднесменный выпуск по итогам четырех, пяти и т.д. смен (вплоть до конца наблюдения); все результаты вносим последовательно в график под номерами смен $N = 2$, $N = 3$ и т.д. Полученные значения, соединенные прямыми линиями, и образуют график среднесменного выпуска блоков нарастающим итогом.

Если бы период наблюдения был достаточно велик, а условия эксплуатации стабильны, то ломаная линия графика неизбежно слилась бы с прямой, характеризующей среднее значение $Q_{ср}$.

Диаграмма наглядно показывает, что в исследуемый период линия работала несколько лучше среднего уровня, поэтому эксплуатационные характеристики линии будут немного завышенными, но достаточно достоверными.

Диаграмма сама по себе уже способна давать первое представление о целесообразной продолжительности наблюдений. Если продолжительность наблюдений будет в пределах двух – пяти рабочих смен, то, как видно из диаграммы (см. рис. 10.6), все характеристики получились бы значительно завышенными и не отражали действительную работоспособность линии. И наоборот, после некоторого периода времени (12...15 смен) дальнейшее увеличение продолжительности наблюдений уже практически не влияет на окончательные результаты.

Погрешность хронометража можно определить из сравнения фактических простоев $\sum \Theta'_{\text{п}}$ измеренными суммарными простоями $\sum \Theta_{\text{п}}$:

$$\sum \Theta'_{\text{п}} = \Theta - zT_{\text{ц}},$$

где Θ – фонд времени (работы и простоев); z – число изготовленных деталей; $T_{\text{ц}}$ – средняя продолжительность цикла работы автоматической линии за время наблюдения.

Сравнение должно быть проведено для каждой смены наблюдения, и те смены, где относительная ошибка превысит 10…15 %, должны быть отброшены, а их результаты в общем итоге не учтены.

Расчет показателей производительности осуществляется по данным фактической циклограммы и баланса затрат планового фонда времени с использованием формулы из гл. 3. В этом случае в формулы вместо абсолютных величин работы и простоев подставляются относительные, взятые из баланса затрат фонда времени.

Коэффициент использования определяется как доля времени работы в балансе затрат фонда времени. Согласно табл. 10.3 $\eta_{\text{исп}} = \Theta_{\text{р}}/\Theta = 65{,}1/100 = 0{,}65$.

Коэффициент технического использования рассчитывают с учетом данных табл. 10.4:

$$\eta_{\text{тех}} = \frac{1}{1+\dfrac{\Theta_{\text{с}}}{\Theta_{\text{р}}}} = \frac{1}{1+\dfrac{8{,}0+7{,}6+2{,}8}{65{,}1}} = 0{,}78\,.$$

Это означает, что в периоды, когда линия обеспечена всем необходимым, она работает 78 % времени; остальные 22 % составляют собственные простои для замены и регулирования инструмента, ремонта и регулирования механизмов и устройств, обслуживания.

Коэффициент загрузки $\eta_{\text{загр}} = \eta_{\text{исп}}/\eta_{\text{тех}} = 0{,}65/0{,}78 = 0{,}83$.

Собственные внецикловые потери в этом случае с учетом данных табл. 10.4

$$\sum B_{\text{с}} = \sum \Theta_{\text{с}}/\Theta_{\text{р}} = 18{,}4/65{,}1 = 0{,}282;$$

$$\sum t_{\text{с}} = \left(\sum \Theta_{\text{с}}/\Theta_{\text{р}}\right)T_{\text{ц}} = 0{,}282 \cdot 1{,}48 = 0{,}417 \text{ мин/шт.}$$

Это означает, что на каждые 10 мин бесперебойной работы линии приходится в среднем 2,8 мин простоя по техническим причинам, на каждую единицу выпущенной продукций – 0,417 мин простоя (в среднем).

Внецикловые потери для использования в дальнейшем проектировании рассчитывают для отдельных позиций, конструктивных элементов и т.д. Так, если рассматриваемая линия имеет девять последовательно соединенных жестко сблокированных рабочих позиций ($q = 9$), средние собственные потери одной позиции

$$B = \sum B_c / q = 0{,}282/9 = 0{,}03.$$

Собственные потери шагового транспортера

$$B_{тр} = \Theta_{тр}/\Theta_р = 0{,}3/65{,}1 = 0{,}0046 = 46 \cdot 10^{-3}.$$

Аналогично рассчитывают и другие виды потерь.

Суммарные внецикловые потери на единицу времени работы или единицу изделия

$$\sum B = \sum \Theta_п / \Theta_р = 34{,}9/65{,}1 = 0{,}54;$$

$$\sum t_п = \left(\sum \Theta_п / \Theta_р\right) T_ц = 0{,}54 \cdot 1{,}48 = 0{,}80 \text{ шт./мин.}$$

Цикловая производительность линии определяется только длительностью несовмещенных рабочих и холостых ходов цикла $T_ц$. При $T_ц$ = 1,48 мин

$$Q_ц = 1/\left(t_р + t_х\right) = 1/T_ц = 1/1{,}48 = 0{,}675 \text{ шт./мин} = 324 \text{ шт./смена.}$$

Техническая производительность

$$Q_т = 1/\left(T_ц + \sum t_с\right) = 1/\left(1{,}48 + 0{,}417\right) = 0{,}52 \text{ шт./мин} = 252 \text{ шт./смена.}$$

Фактическая производительность

$$Q = \left(1/T_ц\right)\eta_{ис} = 0{,}675 \cdot 0{,}65 = 0{,}44 \text{ шт./мин} = 211 \text{ шт./смена.}$$

Пример 4. *Анализ производительности полуавтомата сборки электронной оптики кинескопа.* Конструктивная схема полуавтомата и основные причины отказов в работе были рассмотрены ранее (см. рис. 4.2). Эту информацию можно трактовать как первый этап эксплуатационного анализа на качественном уровне. Далее следуют количественные измерения и подводятся результаты наблюдений.

Стоянка стола, согласно измерениям, длится 17 с, поворот 3 с. Во время стоянки стола длительность накалывания минимальна ($t_р$ = 0,5 с), остальное время составляют нагрев (16 с) и подача призмы вперед (0,5 с). Итого рабочий цикл

$$T = t_р + t_х = 0{,}5 + 16 + 0{,}5 + 3 = 20 \text{ с.}$$

Цикловая производительность

$$Q_ц = 1/T = 60/20 = 3 \text{ шт./мин} = 1440 \text{ шт./смена.}$$

Как видно, в рабочем цикле доля времени рабочих ходов η = 0,5/20 весьма мала (2,5 %), остальное – несовмещенные холостые ходы, среди которых наибольшую длительность имеет нагрев штабика на призме. Следовательно, выбранное принципиальное конструктивное решение полуавтомата несовершенно.

Введение предварительного нагрева штабиков на промежуточных позициях могло бы позволить сократить длительность рабочего цикла до 6...8 с и повысить цикловую производительность.

Баланс затрат планового фонда времени полуавтомата сборки электронной оптики, рассчитанный по итогам эксплуатационных наблюдений, приведен в табл. 10.5.

Общее время наблюдения принято за 100 % ($\Theta_р$ = 100 %).

За этот период полуавтомат функционировал и выпускал продукцию $\Theta_р$ 81,4 % времени. Остальное составили собственные ($\sum\Theta_с$ = 1,6 %) и организационно-технические ($\sum\Theta_{о.т}$ = 17,0 %) простои, среди которых на первом месте – простои из-за отсутствия оправок под сборку элементов оптики, так как две работницы, которые обслуживают данный полуавтомат, за 20 с не успевают одну оправку разобрать, а другую собрать. Простоев по переналадке нет ($\sum\Theta_{пер} = 0$).

Коэффициент использования, согласно данным баланса затрат фонда времени (без учета брака), $\eta_{ис} = 81{,}4/100 = 0{,}81$.

Коэффициент выхода годных $\eta_г = (81{,}4 - 20{,}6)/81{,}4 = 0{,}74$.

10.5. Баланс затрат фонда времени полуавтомата сборки

Затраты времени	Время затрат, % к фонду времени
Простои по инструменту	–
Простои по оборудованию	1,6
Простои по организационным причинам	17,0
В том числе:	
из-за отсутствия собранных оправок	10,7
из-за несвоевременного прихода и ухода рабочих	5,0
из-за прочих причин	1,3
Простои по браку ЭОС, всего	22,6
В том числе:	
треск штабика	3,0
непровар стекла	1,8
гнутый модулятор	8,6
перекос электродов	2,2
нарушение расстояния между анодами	1,4
Прочих причин	3,6
Простои по переналадке	–
Суммарное время простоев	18,6
Время функционирования	81,4
Фонд времени наблюдения	100

Фактическая производительность

$$Q = (1/T)\eta_г \eta_{нс} = Q_ц \eta_г \eta_{нс} = 1440 \cdot 0{,}81 \cdot 0{,}74 = 863 \text{ шт./смена.}$$

Таким образом, с учетом всех факторов реальный выпуск продукции составляет около 60 % от номинального.

Механизмы и устройства полуавтомата работают весьма надежно. Согласно данным табл. 10.5

$$\eta_{тех} = \frac{1}{1 + \dfrac{\sum \Theta_c}{\Theta_р}} = \frac{1}{1 + \dfrac{1{,}6}{81{,}4}} = 0{,}98 .$$

Деление продукции на годную и бракованную выполняли здесь же, поэтому имелась возможность фиксировать время, в течение которого производилась бракованная продукция, с разделением по видам брака.

Велики организационные простои (17,0 %). И в процессе функционирования (81,4 %) полуавтомата 22, 6 % общего времени идет на бракованную продукцию, т.е. доля брака составила 27 % от выпуска.

В рамках данных исследований были дополнительно проанализированы факторы возникновения брака с позиций всего комплекса факторов появления отказов: систематических, случайных, монотонно действующих. Некоторые результаты были приведены в гл. 4.

Заключение по результатам проведенных исследований:

– в данном конкретном производстве **можно устранить полностью простои из-за отсутствия** собранных оправок (согласно табл. 10.4, это 10,7 % фонда времени), если добавить к полуавтомату третью работницу; возможный рост производительности

$$\varphi = \frac{81{,}4 + 10{,}7}{81{,}4} = 1{,}14 ;$$

– принципиальная схема полуавтомата несовершенна. Введение предварительного нагрева штабиков на промежуточной позиции позволило бы сократить длительность рабочего цикла на 6…8 с и повысить цикловую производительность на 30…40 %. С позиций качества более перспективна схема, при которой проводится одновременное накалывание всех трех штабиков в одной позиции. Но это будут совсем другая машина, другой комплекс конструктивно-компоновочных решений – начиная с вертикального положения оправки в момент накалывания.

10.4. БЕЗОТКАЗНОСТЬ В РАБОТЕ

Среди показателей надежности (безотказность, ремонтопригодность, долговечность) наиболее актуальна оценка безотказности в работе, что достаточно удобно совмещается с анализом производительности: по

существу, в те же сроки и последовательные этапы (фактические наблюдения и измерения, математическая обработка результатов, оценка достоверности, расчет параметров). При выполнении приемосдаточных испытаний обычно пользуются методами экспресс-анализа.

На рис. 10.8 приведена диаграмма для экспресс-анализа безотказности работы участка автоматической линии при минимальной длительности испытаний. По горизонтали откладывается число отработанных рабочих циклов, по вертикали – число отказов, оба показателя – нарастающим итогом. Две наклонные параллельные линии отделяют зоны приемки и браковки оборудования, между ними – зона неопределенности, т.е. продолжения испытаний.

Диаграмма рассчитана из требования $m_{ср} \geq 100$ циклов с вероятностью оценки 0,90. Динамика возникновения отказов иллюстрируется ступенчатой линией. Условием приемки или неприемки является пересечение ломаной линией одной из границ. Так, если машина, согласно рис. 10.8, отработала безотказно более 330 циклов, она принимается сразу.

То же самое происходит, если, например, при суммарной наработке 750 циклов случится не более двух отказов (вариант I). Продукция не принимается, если, например, в течение 650 циклов будет более пяти отказов (вариант II).

Возможна ситуация, когда к установленному максимальному сроку испытаний (m_{max}) ломаная линия ни одной из границ не пересечет. Тогда решение будет зависеть от конечного положения ломаной линии: выше или ниже связной линии контрольной зоны.

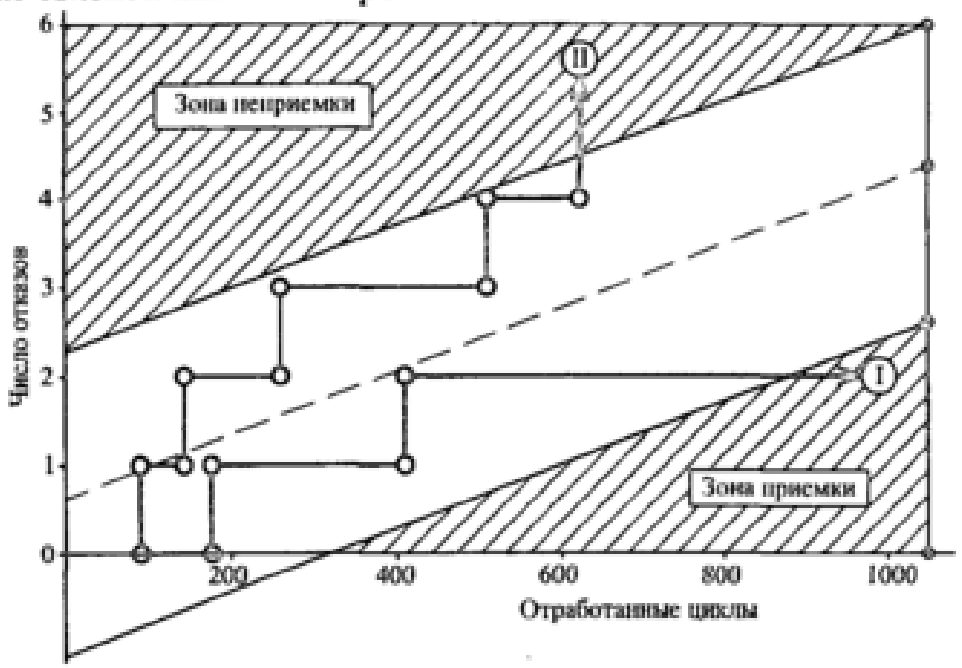


Рис. 10.8. Диаграмма для экспресс-анализа безотказности работы участка автоматической линии

Если ломаная линия как характеристика безотказности пересекает вертикаль, соответствующую предельной длительности испытаний [максимально выбранное число циклов работы линии m_{max} (см. рис. 10.8)], выше средней линии, разделяющей наклонную зону, автоматическая линия бракуется, и наоборот.

Производственные исследования безотказности в условиях эксплуатации ставят, как правило, задачу оценки работоспособности типовых механизмов, многократно применяемых в конструкторской практике.

Пример 5. *Анализ безотказности автоматического манипулятора к автомату токарной обработки изделий типа стаканчика.*

Конструктивная схема манипулятора приведена на рис. 10.9, *а*.

Цилиндрическая часть штока питателя *1* входит в отверстие заготовки до контакта с дном последней и зажимается между торцами питателя и выталкивателя *6*; это позволяет при переносе заготовки из магазина *8* в патрон шпинделя обойтись без зажимного механизма. Циклограмма работы манипулятора показана на рис. 10.9, *б*.

После окончания обработки питатель *1* (см. рис. 10.9), получая перемещение от системы рычагов *10* и *11*, подходит к обработанной детали и головкой входит во внутреннюю полость последней. Кулачки патрона *4* шпинделя разжимаются. Одновременно выталкиватель *6* подходит к детали, выталкивает ее до соприкосновения с торцом захвата патрона и, далее, вместе с последним перемещается вправо, перенося деталь к отводному лотку *5*.

Затем выталкиватель *6* останавливается, а питатель *1* продолжает двигаться вправо. Деталь упирается во флажок *7* и снимается с захвата питателя. Одновременно толкатель *2* сбрасывает деталь в лоток *5*. Толкатель *2* получает движение

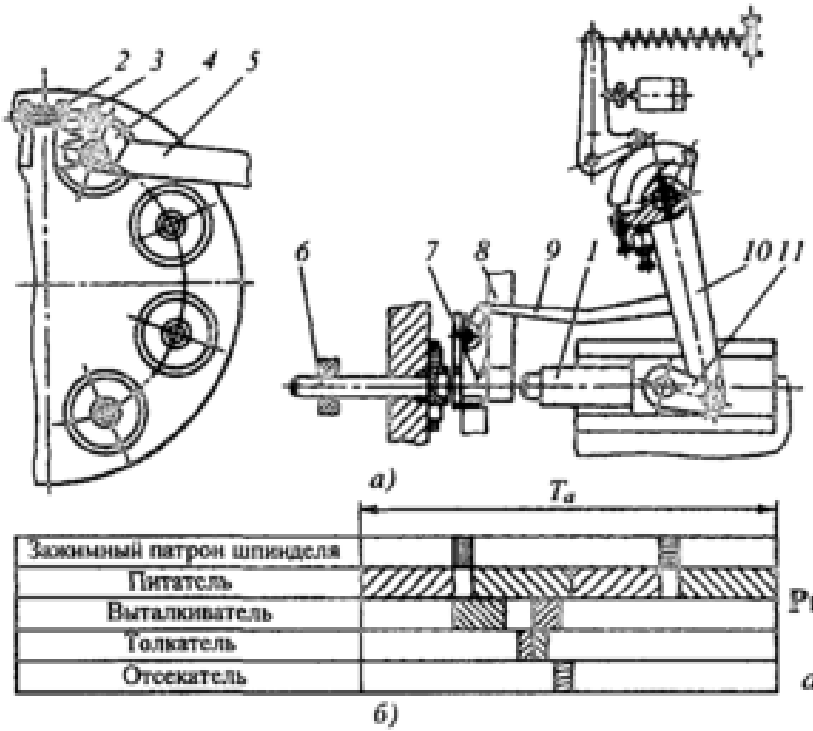


Рис. 10.9. Автоматический манипулятор:
а – конструктивная схема;
б – циклограмма работы

от рычага *10* через системы рычагов *9*, которые поворачивают кулачки *3*, связанные с толкателем *2*. При отходе питателя *1* в крайнее правое положение из магазина *8* поступает новая заготовка. Питатель *1*, перемещаясь влево, захватывает заготовку и передает ее в патрон шпинделя автомата. Теперь питатель отходит в исходное положение, и обработка, съем, загрузка повторяются в описанной последовательности.

Опросом наладчиков и дальнейшими наблюдениями были выявлены следующие основные виды отказов при работе манипулятора:

– перекос заготовки в подающем лотке при загрузке;

– недогрузка заготовок в шпиндель (заготовка не дошла до упора, в том числе из-за несоосности с зажимной цангой);

– заклинивание изделий при выгрузке из шпинделя, в том числе из-за попадания стружки.

Во всех случаях срабатывала предусмотренная в конструкции манипулятора блокировка, и поломок не наблюдалось. Отмечены были случаи, когда наладчики, не дожидаясь отказов, регулировали положение и величину хода питателя и выталкивателя, извлекали стружку из лотков и т.д. Первопричина большинства отказов – забивание рабочей зоны стружкой при плохих условиях отвода, так как зона перенасыщена механизмами и инструментами.

10.6. Распределение периодов безотказной работы по интервалам

Номер интервала	Граница интервала	Число случаев ΔN
1	0…180	47
2	180…360	6
3	360…540	11
4	540…720	9
5	720…900	9
6	900…1080	2
7	1080…1260	4
8	1260…1440	1
9	1440…1620	2
10	1620…1800	1
11	1800…1980	–
12	1980…2160	1
13	2160…2340	1
14	2340…2520	–
15	2520…2700	1
16	2700…2880	–
17	2880…3060	1
18	3060…3240	–
19	3240…3420	–
20	3420…3600	–

На следующем этапе рассчитываются среднее число рабочих циклов между двумя отказами $m_{ср}$ и параметр потока отказов ω.

$$m_{ср} = \sum_{1}^{n} \Delta N_i t_i / N_0 ,$$

где n – число интервалов; ΔN_i – число случаев, попавших в данный i-й интервал; t_i – середина i-го интервала; N_0 – общее число зафиксированных отказов.

Все данные берутся из табл. 10.6: $N_0 = 96$; $n = 20$; $\Delta N_i = 47, 6, 11$ и т.д.; $t_i = 90, 270, 450$ и т.д. Проведя необходимые расчеты, получим $m_{ср} = 486$ циклов.

Поток отказов в рабочих циклах $\omega = 1/m_{ср} = 0{,}00203 = 2{,}03 \cdot 10^{-3}$.

Для оценки достоверности полученных результатов и выявления закона распределения рассчитывают статистическую и вероятностную функции надежности. Статистическая функция надежности также определяется с учетом данных табл. 10.6 по формуле

$$P^*(t) = 1 - \frac{\sum_{1}^{i} \Delta N_i}{N_0},$$

где i – номер интервала (по табл. 10.6 $i = 1...20$); ΔN_i – число случаев, попавших в i-й интервал ($\Delta N_1 = 47$; $\Delta N_2 = 6$; $\Delta N_3 = 11$); $N_0 = 96$ – общее число случаев.

Тогда $P(0) = 1{,}0$; $P^*(180) = 1 - 47/96 = 0{,}51$; $P^*(360) = 1 - (47 + 6)/96 = 0{,}45$ и т.д.

Вероятностную функцию надежности рассчитывают в предположении об экспоненциальном законе ее распределения по формуле $P(t) = e^{-\omega t}$ с использованием данных таблицы показателей функции e^{-x}. Для манипулятора с $\omega = 2{,}03 \cdot 10^{-3}$ получим: при $t_1 = 0$ $\omega t_1 = 2{,}03 \cdot 10^{-3} \cdot 0 = 0$, $P(0) = 1{,}0$; при $t_2 = 180$ $\omega t_2 = 2{,}03 \cdot 10^{-3} \cdot 180 = 0{,}47$, $P(180) = 0{,}58$; при $t_3 = 360$ $\omega t_3 = 2{,}03 \cdot 10^{-3} \cdot 360 = 0{,}94$, $P(360) = 0{,}38$.

Значения статистической и вероятностной функций надежности манипулятора приведены на рис. 10.10.

Проверка достоверности полученных значений необходима потому, что объем наблюдений, который достаточен для оценки производительности и надежности системы в целом, может оказаться недостаточным для достоверного определения числовых значений показателей надежности отдельных конструктивных элементов, в том числе манипуляторов.

Степень несовпадения статистической и вероятностной функций надежности характеризует достоверность полученных значений, в первую очередь достаточность накопленного объема информации.

Сопоставление статистической и вероятностной функций надежности проводится методами теории вероятностей [10] – путем сопоставления частот по каждому из интервалов.

Высокая степень совпадения свидетельствует об экспоненциальном характере распределения, т.е. стабильности условий работы за период наблюдения. Однако пока неясно, насколько достоверна численная характеристика безотказности манипулятора $m_{ср}$ = 486 циклов. Типовые требования $m_{ср\,min}$ = = 900...1000 циклов.

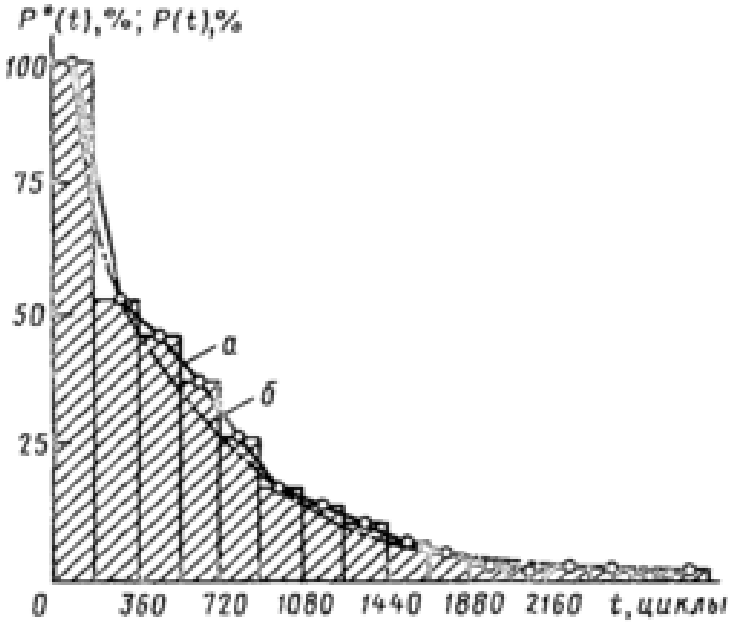


Рис. 10.10. Статистическая (*а*) и вероятностная (*б*) функции безотказности манипулятора

Для такой оценки воспользуемся методом последовательных испытаний с расчетом доверительных интервалов, в которых находится анализируемая случайная величина.

Идея метода состоит в следующем. Любое измеренное значение случайной величины X_i случайно по своей природе и свидетельствует лишь о том, что искомое истинное значение X находится в некотором "доверительном" интервале:

$$X_{min} \le X \le X_{max},$$

где X_{min} и X_{max} – границы доверительного интервала нахождения случайной величины, которые зависят от объема информации о случайной величине и объема накопленной информации:

$$X_{min} = X_i r_2; \quad X_{max} = X_i r_1.$$

Значения коэффициентов границ доверительных интервалов r_1 и r_2 как функции объема информации (числа реализаций случайной величины i) и доверительной вероятности α приводятся в многочисленных источниках по теории вероятностей и математической статистике [10].

Если, например, имеется i = 60 реализаций случайной величины при доверительной вероятности α = 0,99 коэффициенты r_1 = 1,38, r_2 = 0,75.

При математическом ожидании накопленным итогом X_{60} = 500 нижняя граница доверительного интервала

$$X_{min} = 500 \cdot 0{,}75 = 375;$$

верхняя

$$X_{max} = 500 \cdot 1{,}38 = 690.$$

Следовательно, после 60 измерений можно с вероятностью 0,99 утверждать, что истинное значение случайной величины X находится в интервале $375 \le X \le 690$, который и обозначается как "доверительный". И не более того.

Само измеренное и рассчитанное значение (в данном случае $X_i = 500$) никакой истинностью не обладает и служит лишь вспомогательной величиной. Естественно, что чем больше накопленный объем информации (величина i), тем меньше ширина интервала. При $i \to \infty$ он превращается в точку, единственное значение принимается как истинное. Однако вести наблюдения и измерения бесконечной длительности невозможно. Реально задача состоит в оценке того, насколько велики границы доверительного интервала в итоге измерений и укладывается ли этот интервал в некоторые границы.

Вернемся к рассматриваемому примеру оценки безотказности автоматического манипулятора. Приведем некоторые примеры расчета, исходя из таблицы реализации интервалов безотказности работы:

– после 10 зафиксированных отказов ($i = 10$) $\sum m_i = 4056$; $m_{ср} = 405$; по таблицам [10] находим $r_1 = 9{,}42$; $r_2 = 0{,}50$; $X_{max} = 405 \cdot 2{,}42 = 980$; $X_{min} = 405 \cdot 0{,}5 = 202$;

– после 15 зафиксированных отказов ($i = 15$) $\sum m_i = 7512$; $m_{ср} = 501$; $r_1 = 2{,}01$; $r_2 = 0{,}56$; $X_{max} = 501 \cdot 2{,}01 = 1007$; $X_{min} = 501 \cdot 0{,}56 = 281$.

Таким образом, уже после 20 зафиксированных отказов с вероятностью 0,99 можно сказать, что средняя наработка на отказ автооператора будет меньше, чем 1000 циклов. Однако так как допускаемое значение $m_{min} = 900$ циклов, исследования необходимо продолжить, обрабатывая результаты вышеуказанным методом и рассчитывая границу доверительного интервала ($x_i r$) последовательно для значений $i = 25, 30, 35$ и т.д.

Общая диаграмма изменения величины и зон доверительных интервалов оценки безотказности автоматического манипулятора приведены на рис. 10.11.

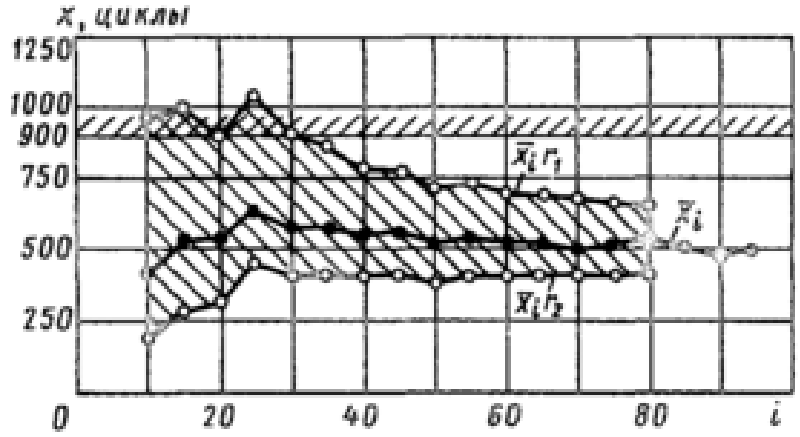


Рис. 10.11. Доверительные интервалы показателя безотказности автоматического манипулятора

На диаграмме нанесена условная граница допустимого показателя безотказности $m_{cp\,min}$ = 900 циклов. Как видно, уже после первых 30 зафиксированных отказов манипулятор таким уровнем безотказности не обладает, продолжение наблюдений лишь это подтверждает.

После итога (i = 96 зафиксированных отказов) можно констатировать с высокой доверительной вероятностью, что

$$390 \le m_{cp} \le 650.$$

Результат таких исследований – не только констатация факта и использование данных численных значений при расчетах ожидаемой надежности проектируемого оборудования, но и направленность конкретных мероприятий.

Одним из наиболее распространенных видов отказов является недогрузка колец в зажимный патрон из-за возникающей несоосности между осями шпинделя и питателя автооператора. После того как на предшествующей операции обработки (выдавливание стаканчика) была введена операция образования наружной фаски, частота отказов существенно уменьшилась. Средняя наработка на отказ повысилась до m_{cp} = 750 циклов, т.е. на 25 %.

10.5. ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Особая задача исследований работоспособности оборудования в условиях действующего производства – это оценка целесообразности работ по дальнейшей его автоматизации. В условиях действующих предприятий редко встречается радикальное обновление средств производства, чаще выполняется "доавтоматизация" создание автоматов и полуавтоматов на базе неавтоматизированного оборудования, а также автоматических линий из типовых полуавтоматов и автоматов, которые эксплуатируются "россыпью".

Автоматизация действующего оборудования не изменяет коренным образом качество выпускаемой продукции и производительность, а направлена, прежде всего, на сокращение малоквалифицированного, монотонного и тяжелого ручного труда на операциях загрузки и съема изделий, их транспортирования и складирования, а также функций управления технологическими машинами или целыми производственными подразделениями.

Несмотря на наличие к настоящему времени немалого арсенала средств автоматизации загрузки, транспортирования, управления, в первую очередь автоматических манипуляторов и персональных компьютеров, проведению таких мероприятий должен каждый раз предшествовать серьезный технико-экономический анализ в реальных условиях данного производства, иными словами – техническая диагностика работоспособности.

В соответствии с общими принципами диагностики производство может быть рассмотрено как система, для которой должен быть поставлен "диагноз состояния" и намечен оптимальный план воздействия. Это выполняется путем последовательных проб, каждая из которых либо опровергает, либо подтверждает и уточняет выводы предыдущих этапов исследования о целесообразности изменения ТП, условий труда, уровня механизации, внедрения новых автоматов и автоматических линий и т.п.

Основная задача технической диагностики может быть сведена к тому, чтобы при углубленном анализе данного производства (проб) методом последовательного приближения получать все более достоверные количественные значения ожидаемого роста выпуска продукции необходимого качества и сокращения численности рабочих благодаря внедрению намечаемых мероприятий в конкретных условиях производства. Оценивая согласно полученным данным допустимые затраты на автоматизацию и механизацию и сравнивая их с ожидаемыми, можно оценивать целесообразность проведения данных мероприятий.

Технико-экономический анализ целесообразности автоматизации складывается из нескольких этапов.

1. **Сбор и систематизация имеющихся сведений** по данному производству (этап внешнего осмотра). Систематизируются данные:

– по стоимости действующего оборудования;
– числу обслуживающих рабочих;
– фонду заработной платы;
– затратам на ремонт;
– выпуску продукции;
– перспективам увеличения производственной программы и т.д.

В результате определяются годовые затраты на выпуск продукции и себестоимость выпускаемых деталей по основным статьям. Имея эти данные, а также технические предложения по механизации и автоматизации, можно дать предварительное заключение об их целесообразности.

2. **Анализ качества выпускаемой продукции.** Его назначение – определить пригодность существующих ТП, где применяется ручной труд, для условий автоматизированного производства. Если намечаемые мероприятия могут привести к снижению качества продукции, они признаются ненужными, а дальнейшие исследования не проводятся.

3. **Анализ производительности действующего оборудования** для определения ожидаемого изменения производительности в данных конкретных условиях. Рассматриваются возможные резервы ее повышения и без механизации и автоматизации, например путем увеличения загрузки станков. Если выясняется, что намечаемые мероприятия могут снизить производительность, механизация и автоматизация считаются нецелесообразными.

4. **Анализ затрат ручного труда при обслуживании действующего оборудования** и расчет реальных резервов их сокращения. Если выясняется, что частота операций, не замещаемых автоматизацией, велика, реальная экономия фонда заработной платы минимальна из-за трудности использования высвобождаемого времени или других причин, то механизация или автоматизация также отпадает.

5. **Количественный анализ по всем трем характеристикам** (качеству, производительности, трудовым затратам). Целесообразность намечаемых мероприятий часто становится очевидной и без специальных экономических расчетов, особенно при отрицательных результатах ($\varphi \approx 1$, $\varepsilon \approx 1$).

Если механизация и автоматизация позволяют повысить производительность и сократить фонд заработной платы, то допустимые затраты σ_{max} можно вычислить по формуле (2.11). При этом характеристики К и Зпл определяются на первом этапе, φ и ε – по результатам последующего инженерного анализа (этапы 2…4), остальные величины берутся из соответствующих нормативов.

Сравнение допустимых затрат с ожидаемыми позволяет окончательно определить целесообразность намеченных мероприятий, выбрать наиболее эффективные из них.

Пример 6. *Оценка целесообразности создания автоматической линии из шлифовальных станков при обработке гладких втулок.*

Токарную обработку втулок диаметром 105 мм, высотой 54 мм, толщиной стенки 2,5 мм (материал – высоколегированный чугун) проводят на токарных многошпиндельных автоматах. После этого выполняют пятикратное последовательное наружное шлифование на бесцентровых станках с ручной подачей заготовок под круг; каждый станок обслуживает оператор (рис. 10.12, *а*).

С чисто технических позиций целесообразность создания автоматической линии для шлифования (см. рис. 10.12, *б*) сомнений не вызывает: станки работают напроход и пригодны для встраивания в линию; существуют надежные и дешевые валковые загрузочные устройства, так что технический риск практически отсутствует.

В проекте создания автоматической линии шлифования втулок на бесцентрово-шлифовальных станках предусматривалось автоматическое выполнение функций подачи втулок под круг и их отвод, т.е. сквозной пропуск сплошного потока втулок через зоны всех станков, без каких-либо контрольных, блокировочных, подналадочных устройств (иначе затраты на создание автоматической линии были бы значительно выше).

При сопоставлении ожидаемых затрат с номинальной экономией заработной платы при сокращении четырех рабочих-операторов в смену (минус возрастание эксплуатационных расходов) окупаемость капиталовложений не превысит полутора лет. Однако при подобных расчетах исходят из представления, что качество продукции и производительность оборудования не изменятся. Это и подлежало проверке в ходе выполненных исследований.

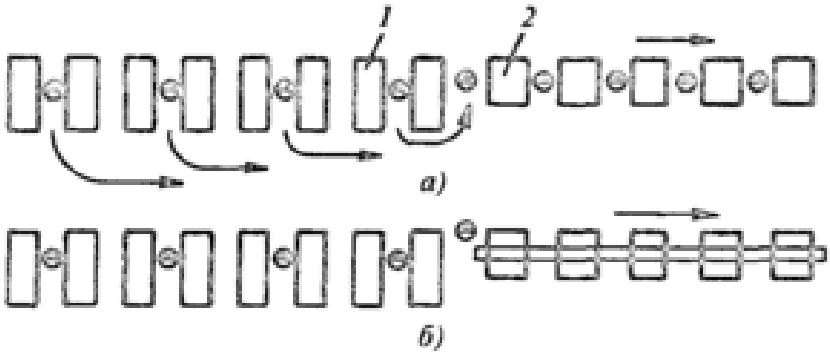


Рис. 10.12. Планировка технологических систем обработки втулок:
1 – токарные полуавтоматы; *2* – шлифовальные станки

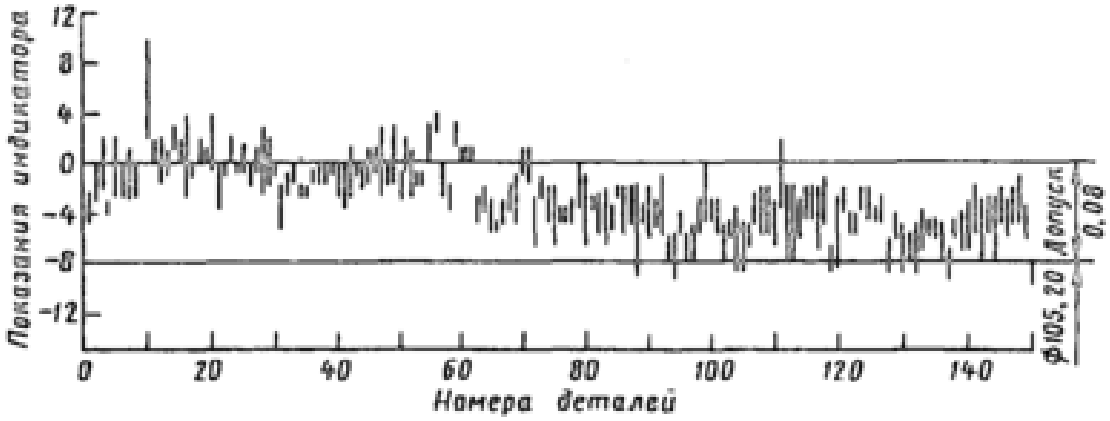


Рис. 10.13. Точечная диаграмма рассеяния диаметров втулок после бесцентрового шлифования

Через все станки была пропущена партия втулок (150 шт.) таким образом, что операторы выполняли только те функции, которые должны осуществлять механизмы, т.е. подачу втулок под круг и их отвод после выхода из зоны шлифования. Точечная диаграмма размеров всех втулок в партии приведена на рис. 10.13.

Для каждой детали верхняя точка соответствует максимальному диаметру, а нижняя – минимальному; длина черточки характеризует овальность; 30 % втулок оказались бракованными. Исключение таких функций, как контроль размеров всех деталей с их отбраковкой и возвратом для шлифования (до 20...25 % всех втулок), частые подналадки шлифовального круга и т.д., которые входили как составная часть в неавтоматизированный процесс, привели бы при автоматизации к массовому браку.

Следовательно, несомненная целесообразность создания автоматической линии согласно формальному экономическому расчету была опровергнута на первом же этапе, потому что данный ТП, сложившийся в условиях неавтоматизированного производства, не мог быть положен в основу создания автоматической линии.

Как показали дальнейшие исследования, первопричиной разброса размеров при шлифовании явилось несовершенство процессов токарной обработки втулок перед шлифованием. Зажатие тонкостенных втулок в трехкулачковом патроне

при выполнении первой операции (растачивании) на полуавтоматах (см. рис. 10.14, *а*) приводит к образованию значительной овальности, которая достигает у некоторых деталей 0,5...0,6 мм. Вторая операция – наружное обтачивание при закреплении детали на оправке – уменьшает овальность, однако не настолько, чтобы процесс шлифования проходил в нормальных условиях.

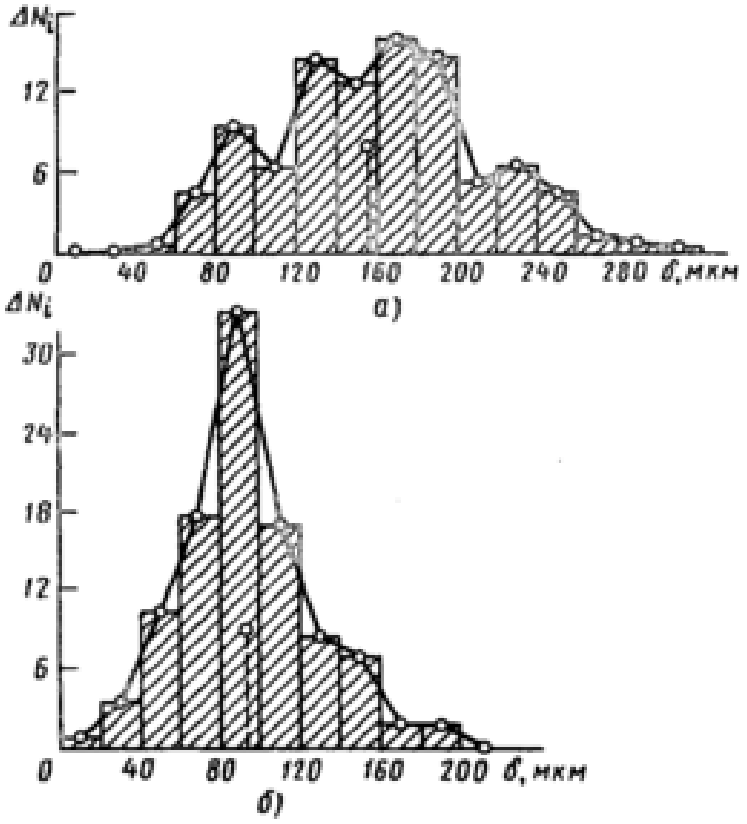
Оказалось, что, по существу, весь процесс пятикратного шлифования служит для локализации погрешностей в результате одной неудачно поставленной предварительной операции ТП.

Последовательное шлифование плохо устраняет указанную погрешность геометрической формы (рис. 10.14). Так, после токарной обработки перед первым шлифованием максимальная овальность составляла 320 мкм, а после пятого шлифования (рис. 10.14, *б*) максимальная и средняя овальности уменьшились только в 1,5 раза.

Более того, анализ показал, что наряду с основным процессом – снятием припуска с уменьшением некруглости втулок, шел побочный – деформация втулок с увеличением некруглости, что наглядно видно из корреляционной диаграммы (рис. 10.15).

Несмотря на многократное шлифование, только у 66 % деталей овальность уменьшилась; у 19 % деталей она сохранилась, а у 15 % даже увеличилась (см. рис. 10.15). Таким образом, анализ качества показал, что создание автоматической линии должно начинаться с пересмотра ТП.

Изменение ТП – растачивание в патроне заменяется растачиванием на агрегатных станках при зажиме детали по торцу – позволяет резко снизить некруглость, которая уже перед первым шлифованием значительно ниже, чем при существующем ТП после пятого шлифования. При этом варианте ТП пятикратное шлифование становится ненужным, а экономия на стоимости освобождаемых станков в 3 раза выше, чем затраты на автоматизацию оставшихся.



10.14. Диаграмма рассеяния некруглости втулок:
а – перед первым шлифованием; *б* – после пятого шлифования; ΔN_i – процент случаев, попавших в данный интервал

Проведенный на следующем этапе анализ производительности позволил составить баланс производительности поточной линии по пятому, конечному станку (рис. 10.16). Как видно, только 24,75 % планового фонда времени работы станка составляет работа, и этого достаточно для выполнения производственной программы. Наибольшая доля приходится на простои по организационным причинам (58,42 % фонда времени), среди которых значительное место занимают простои из-за предыдущих станков – 11,1 % фонда времени (отказы, возврат деталей на повторное шлифование и т.д.).

Таким образом, коэффициент использования станков поточной линии шлифования втулок составил $\eta_{ис} = 0{,}24$; $\eta_{тех} = 0{,}61$ при интервале выдачи одной втулки при бесперебойной работе $T = 2{,}1$ с.

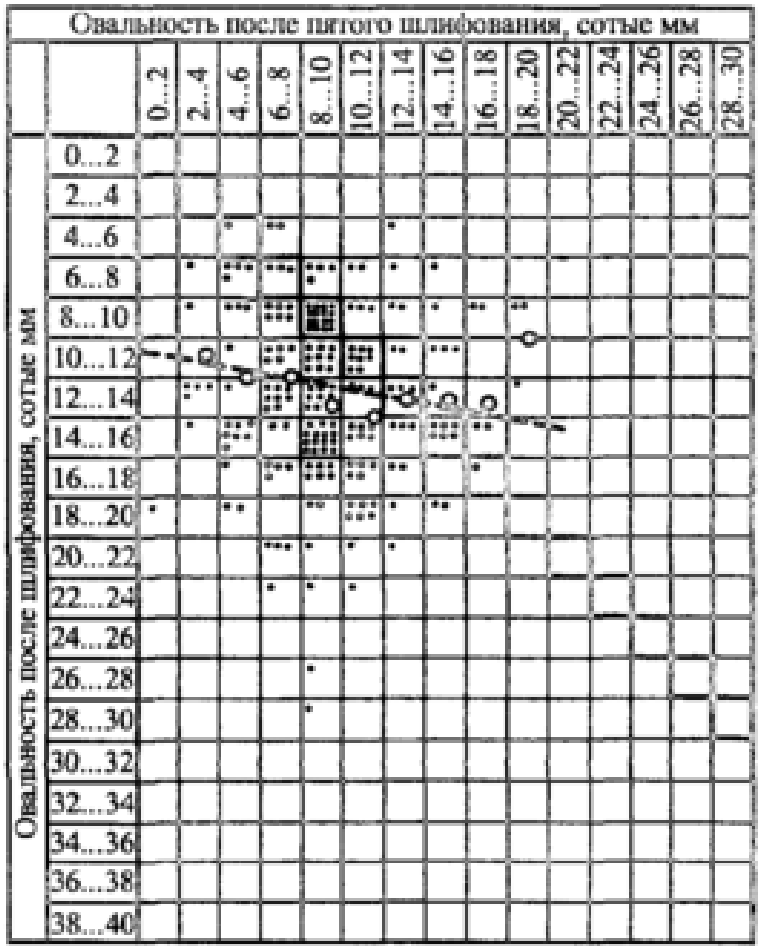


Рис. 10.15. Корреляционная диаграмма некруглости втулок после первого и пятого шлифования

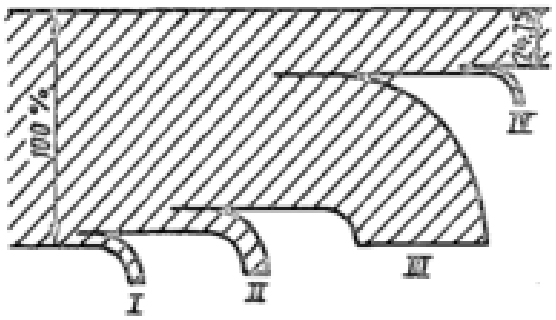


Рис. 10.16. Баланс затрат фонда времени пятого шлифовального станка: *I* – простои для замены, правки и подналадки круга (5,47 %); *II* – простои по оборудованию (10,36 %); *III* – простои по организационным причинам (58,42 %); *IV* – простои из-за учтенного брака (1,0 %)

Сопоставление среднесменного выпуска продукции за время наблюдений с данными за последний год показало, что период наблюдения был типичным и полученные данные объективны.

Таким образом, данная поточная линия явно недогружена по производительности по сравнению с токарным участком, а именно: при бесперебойной загрузке выпуск благодаря сокращению организационных простоев может быть повышен в 1,93 раза. Это безусловный резерв повышения эффективности. Однако главное – это изменение технологии токарной обработки.

Приведенный пример и другие исследования показывают, что важнейшей причиной неудачи многих работ по автоматизации действующего оборудования является неполное замещение функций, выполняемых человеком при ручном обслуживании.

Пример 7. На основе действующего участка из токарных полуавтоматов, работающих независимо, предполагается создать групповую автоматическую линию, автоматизировав загрузку и съем изделий, их межстаночное транспортирование и накопление заделов. Заготовки – кольца из поковок, предварительно обработанные по внутреннему диаметру, зажим – на оправке, обработка по наружной поверхности и торцам.

Каждый станок намечено оснастить автоматическим манипулятором с функциями:

– загрузки изделий из подающего лотка в шпиндель – на оправку;

– снятия обработанного изделия с оправки, перенос его и сброс в отводной лоток.

Однако проведенный хронометраж действий рабочего-оператора показал, что он выполняет не только указанные действия, но и другие операции обслуживания. Средняя производительность станка $Q = 620$ шт./смена. Итого в среднем за смену оператор проводит:

– ручную загрузку и съем 620 раз;

– межстаночную передачу заготовок и деталей 140 раз;

– укладку деталей в тару 145 раз.

Эти функции замещаются механизмами и устройствами автоматизации. Однако заготовки имеют значительный разброс размеров, а также геометрические погрешности типа заусенцев, наплывов и т.д. Поэтому оператор вынужден визуально осматривать все заготовки (620 раз в смену), измерять практически каждую четвертую заготовку (150 раз в смену) с частой отбраковкой или снятием заусенцев (107 раз в смену).

Устройства стружкодробления работают нестабильно, поэтому оператор должен крючком до 200 раз в смену удалять стружку из рабочей зоны, чтобы она не наматывалась на оправку и не мешала загрузке и съему. Каждая пятая заготовка либо туго садится, либо с трудом снимается, оператор вынужден 120 раз в смену выполнять дополнительные движения покачивания, подстукивания и т.д.

Итого за смену набирается (помимо визуальных осмотров) до 700 единичных ручных действий, которые механизмами автоматизации не замещаются. Нетрудно видеть, что, если мероприятиям по автоматизации не будет предшествовать совершенствование ТП: повышение качества поковок, решение проблемы стружкодробления и т.п. – она не будет эффективна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По-видимому, не найдется ни одного ученого, который, выступая на лекциях и конференциях, встречаясь с коллегами, не жаловался бы на трудности внедрения своих прогрессивных разработок, слабую заинтересованность, равнодушие или косность работников производства. И очень непросто дается понимание того, что подобная ситуация объективна.

Все, что действует сегодня в машино- и приборостроении, материализовано апробированными методами и средствами. Поэтому любые новые технологии и конструкции становятся альтернативными по отношению к уже известным техническим решениям. Успех нового в конкурентности с традиционным приходит не быстро и не всегда. Принятый технический арсенал, как правило, более отработан и привычен. А любые серьезные технические новшества – технологии и конструкции – проходят длительный процесс становления и отработки по параметрам быстродействие, надежность, стоимость.

Характерные этапы этого процесса:

1) идея, в которую верят пока только разработчики;

2) макетные конструкции, лишь открывающие перспективы;

3) экспериментальные конструкции, способные функционировать, но, как правило, дорогие и малонадежные;

4) опытно-промышленные конструкции, которые очерчивают возможную сферу применения;

5) промышленные конструкции, способные наконец, конкурировать с ранее известными.

Согласно некоторым исследованиям, не более 10…15 % новых разработок находят применение на производстве, остальные не доводятся до необходимого уровня отработки или оказываются малоконкурентными.

Общественное отношение к крупным техническим новшествам редко корреспондируется с процессами их созревания, отставая от реальности или опережая ее. Характерные этапы:

1) **скептицизм и неверие**, что преодолевается результатами, порой саморекламой;

2) **восторги и эйфория**, что наконец-то найдена панацея от всех бед и трудностей производства;

3) **разочарование и опошление**, когда первые итоги применения оказываются не столь радужными, а трудности и недостатки встают во весь рост;

4) **трезвое осознание** достоинств и недостатков, понимание реальных возможностей и перспектив;

5) **постепенное "потепление"** по мере нарастания положительного опыта применения.

Несинхронные процессы созревания технических новшеств и общественного отношения к ним можно проследить на примерах как целых отраслей (ядерная энергетика, гражданская космонавтика), так и отдельных направлений (электрофизические методы обработки, станки с ЧПУ, АСУП).

Наиболее яркий пример – промышленные роботы. Автоматические манипуляторы (автооператоры) были известны в машиностроении с 50-х годов XX века, однако долго особого внимания не привлекали. И вдруг в 80-х годах, словно массовый психоз, замутил разум множества ученых и руководителей производства, государственных деятелей во многих промышленно развитых странах мира.

Всерьез почудилось, что, если не жалеть денег и поскорее наплодить множество роботов, человечество сможет переложить на их плечи весь непривлекательный ручной труд, оставив себе лишь удовольствия и деторождение.

И это происходило во времена, когда автоматические манипуляторы с программным управлением находились еще на стадии опытных образцов, громоздких и дорогих, тихоходных и малонадежных. Поэтому неизбежным оказалось последующее разочарование.

Прошли годы и промышленные роботы нашли свою "экологическую нишу" на производстве, но не совсем там, где думалось поначалу, и не с тем эффектом, который обещали. Сфера их применения растет, но неглобально.

Сегодня в качестве панацеи, которая призвана сделать человечество счастливым, выступают персональные компьютеры и информационные технологии. Им достаются приоритетные внимание и средства. Спрашивать об их экономической эффективности и окупаемости затрат столь же кощунственно, как в 80-х годах прошлого века по отношению к промышленным роботам. Продвинутость того или иного производства мы оцениваем не по совершенству производственных технологий и оборудования, а более по количеству закупленных персональных компьютеров.

Возьмем, однако, на себя смелость утверждать, что уже в недалеком будущем наше отношение к производственной значимости вычислительной техники и информационных технологий сильно изменится: придет если не разочарование, то, по меньшей мере, отрезвление. Преодолев гипноз, мы вспомним, что основой прогресса материального производства ("больше – лучше – дешевле") были и остаются производственные технологии.

Любые информационные потоки, независимо от методов и сред, всегда вторичны, вспомогательны. Даже при конструкторской и технологической подготовке производства, где офисная компьютеризация стала неотъемлемым атрибутом деятельности, важнейшими факторами успеха по-прежнему остаются талант, терпение, деньги. И сегодняшние звонкие лозунги типа: "XXI век – век информатики!" или "Кто владеет информацией, тот владеет миром!" – это лишь громкие рекламные находки.

Успехи научно-технических новшеств в конкурентной борьбе не означают полных и безоговорочных побед. Ни одна новейшая технология по своим возможностям и достоинствам не "закрывает" полностью ранее известные. Поэтому появление новых технологий, вплоть до самых прогрессивных и перспективных, не приводит к радикальному вытеснению сложившегося арсенала методов и средств.

Здесь можно проследить несколько тенденций развития:

1) занятие "экологических ниш" производства – решение задач, которые ранее просто не могли быть решены;

2) интеграция со сложившимися технологиями при взаимном обогащении и умножении достоинств;

3) альтернативное соревнование и частичное оттеснение традиционных технологий.

Хрестоматийная иллюстрация **первой тенденции** – развитие микроэлектроники. Современные интегральные схемы с размерами элементов в микрометровом и субмикрометровом диапазонах не могли быть изготовлены классическими методами обработки конструкционных материалов резанием и давлением. Понадобились воздействия на молекулярном уровне, которые смогли обеспечить лишь электронные, ионные, молекулярные пучки в вакууме (вновь созданные электронные технологии).

Вторую тенденцию можно иллюстрировать "уходом в вакуум" таких технологий, как плавка металлов, микросварка, сушка органических и неорганических материалов, упаковка и хранение продуктов. Здесь соединяют достоинства традиционных процессов с возможностями вакуумной технологической среды (отсутствие окислителей и микроорганизмов, низкая температура кипения и испарения влаги и т.д.).

Третью тенденцию можно проследить на примере нанесения защитных покрытий, которые при толщине от долей микрометра до нескольких десятков микрометров могут выполнять антикоррозионные, антифрикционные, теплозащитные функции, служить в качестве твердосмазочных, износостойких, токопроводящих, отражающих, декоративных и других покрытий.

В течение многих десятилетий в технологиях нанесения защитных покрытий господствующее положение занимали электрохимические (гальванические) методы, которые сопровождались токсичными стоками и выбросами, губительными как для окружающей среды, так и для обслуживающего персонала.

В последние годы бурное развитие получили альтернативные процессы нанесения защитных покрытий, "пришедшие" из электроники. К ним относятся в первую очередь вакуумные процессы осаждения тонких пленок и ионной имплантации.

Важнейшие достоинства вакуумных процессов – их высокая экологичность и безотходность. Возможно осаждение тонких пленок на любые

материалы: металлы и их сплавы, полупроводники, керамику, стекло, полимеры – вплоть до пленочных материалов и бумаги.

Плюс к этому огромный ассортимент наносимых материалов: это практически все элементы периодической системы Д.И. Менделеева и их соединения.

Казалось бы, что такой набор достоинств вакуумных процессов в сравнении с очевидными недостатками гальванических и иных технохимических должен был обеспечить триумфальное шествие первых и широкомасштабное вытеснение вторых. Однако этого не происходит.

Во-первых, конкуренция и обострение экологических факторов заставили инженеров и ученых совершенствовать гальваническое производство и в итоге создать безотходную, энерго- и материалосберегающую гальванику, с замкнутыми циклами рабочих растворов и промывочных жидкостей, т.е. минимизировать их вредные воздействия на окружающую среду и обслуживающий персонал.

Во-вторых, массовое внедрение не могло не обнаружить слабые места процессов вакуумного осаждения. Прежде всего, направленные потоки атомов, молекул или ионов позволяют без затруднений осаждать пленки только на относительно простые наружные поверхности (плоскости или цилиндры). Для нанесения покрытий на изделия с развитой поверхностью, например корпусные, чтобы избежать "теневых" зон, необходимы сложные перемещения изделий.

В итоге вакуумные технологии нанесения покрытий прочно заняли позиции там, куда гальваника и не посягала: в производстве изделий электронной техники (полупроводниковые и электровакуумные приборы, интегральные микросхемы), где материалом подложек служат кремний, стекло, керамика. Вне конкуренции данные технологии и для нанесения теплозащитных и декоративных покрытий на архитектурные и автомобильные стекла и т.п.

Гальванические процессы сохраняют свои позиции при нанесении защитных покрытий на металлы благодаря более высокой скорости роста пленки.

Альтернативность технических решений в любых научно-технических аспектах – весьма сложная категория. *Противостояние нового и номинально перспективного, но недостаточно отработанного и рискованного с тем, что досконально известно и привычно, не может протекать бесконфликтно, без ломки психологических стереотипов, без взаимопонимания и компромиссов.*

Учить правильному пониманию процессов зарождения, развития, становления нового необходимо уже на студенческой скамье. Это непременно пригодится в последующей деятельности, в каких бы сферах она ни протекала!

Д1. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТРУДА И ПРОГРЕССИВНОСТЬ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Известные методы расчета технико-экономической эффективности новой техники (см. гл. 2 – 4) позволяют конкретно выбирать варианты технических решений (см. гл. 8, 9) и оценивать результаты их воплощения на производстве, т.е. решать задачи микроэкономики. Необходимо, однако, решать и другую задачу: выявлять и объяснять закономерности научно-технического прогресса (НТП), критерием которого в любых масштабах является рост производительности общественного труда.

Попытка разработки теории производительности труда и прогрессивности новой техники как инструмента познания закономерностей НТП была предпринята Г.А. Шаумяном в 60 – 70-е гг. XX века. Автор поставил своей целью увязать между собой общие экономические теории общественного развития с техническими науками: технологией машиностроения, теорией машин-автоматов и их систем.

Ниже кратко излагаются важнейшие положения теории производительности труда в трактовке и обозначениях автора [25, 26].

Основные положения (постулаты) данной теории

1. Каждая работа для выполнения требует затрат времени и труда.

2. Производительно затраченным считается только то время, которое расходуется на основные технологические процессы (формообразование, контроль, сборку). Все остальное время, включая время на вспомогательные (холостые) ходы рабочего цикла и внецикловые простои, является непроизводительно затраченным – потерями.

3. Для производства любых изделий необходимы единовременные затраты прошлого (овеществленного) труда на создание средств производства, текущие затраты на поддержание их работоспособности и живого труда на непосредственное обслуживание технологического оборудования.

4. Закономерность развития техники заключается в том, что удельный вес затрат овеществленного (прошлого) труда непрерывно повышается, а затраты живого труда снижаются при общем уменьшении трудовых затрат, приходящихся на единицу продукции.

5. Критерием эффективности и прогрессивности новой техники является рост производительности общественного труда с учетом как единовременных, так и текущих, распределенных во времени трудовых затрат.

6. При оценке прогрессивности новой техники должен учитываться фактор времени с сопоставлением фактических и общественно необходимых темпов роста производительности общественного труда.

7. Любая самая современная техника сегодняшнего дня, если сроки ее проектирования и освоения чрезмерно затягиваются, оказывается морально устаревшей еще до ввода в эксплуатацию.

8. Любая техника не может оставаться прогрессивной вечно и рано или поздно морально устаревает даже при сохранении своих технических параметров.

9. Прогрессивность новой техники должна оцениваться сопоставлением уровня производительности труда, достигаемого посредством различных технических решений.

Нетрудно видеть, что пп. 1 и 2 отражают положения теории производительности машин; пп. 3 – 5 – общие каноны экономики; пп. 6 – 9 – общепринятые качественные представления, которые ранее не имели аналитического выражения.

Важнейшим фактором производительности труда являются его затраты на создание, обслуживание и эксплуатацию рабочей машины. Эти затраты можно представить состоящими из трех компонентов:

1) единовременных затрат прошлого труда $T_п$, необходимых для создания машин, оборудования, зданий, сооружений и т.п.;

2) текущих затрат прошлого труда T_v, которые включают в себя часть овеществленного труда, затрачиваемую на основные и вспомогательные материалы, запасные части, электроэнергию, инструменты, топливо, смазку и т.п., необходимые для производства изделий;

3) текущих затрат живого труда $T_ж$ обслуживающих рабочих, которые, используя средства, создают новые материальные ценности.

В то время как суммарные текущие затраты прошлого и живого труда непрерывно растут пропорционально времени (годам) и объему выпущенной продукции, единовременные затраты прошлого труда являются разовыми, рассчитанными на весь срок службы машины N лет, т.е. носят постоянный характер.

Таким образом, производственный процесс обеспечивается единством рабочей силы и средств производства – совместными годовыми затратами живого труда $T_ж$, единовременными затратами средств труда $T_п$, рассчитанными на N лет, и годовыми затратами предметов труда T_v. Суммарные затраты за весь срок действия средств труда

$$T = T_п + N(T_ж + T_v). \qquad (Д1\text{-}1)$$

Производительность общественного труда оценивается сопоставлением результатов трудового процесса – количества выпущенной продук-

ции – с суммарными трудовыми затратами, необходимыми для ее выпуска за некоторый интервал времени – срок службы машины N лет:

$$A_т = W/T, \qquad (Д1\text{-}2)$$

где $A_т$ – производительность труда; W – выпущенная годная продукция; Т – суммарные трудовые затраты, необходимые для выпуска продукции.

Так как единовременные трудовые затраты на оборудование, здания и сооружения реализуются постепенно в течение срока службы, производительность труда определяется с учетом сроков службы.

Размерность производительности труда $A_т$ в обобщенном виде – продукция/труд.

При практических оценках размерность производительности труда зависит от того, в каких единицах исчисляются выпущенная продукция и трудовые затраты.

Выпущенная годная продукция измеряется либо в физических величинах (штуки, единицы длины, массы, объема и др.), либо в стоимостном выражении (рубли). Суммарные трудовые затраты исчисляются или в единицах абстрактного труда (человеко-часы, человеко-дни и др.), или в денежном выражении.

Количество выпущенной продукции зависит от того, сколько лет работает оборудование.

При постоянной производительности оборудования

$$W = Q_г / N ,$$

где $Q_г$ – годовой фактический выпуск продукции.

Подставляя W и Т в формулу (Д1-2), получаем

$$A_т = \frac{Q_г N}{T_п + N(T_э + T_ж)}. \qquad (Д1\text{-}3)$$

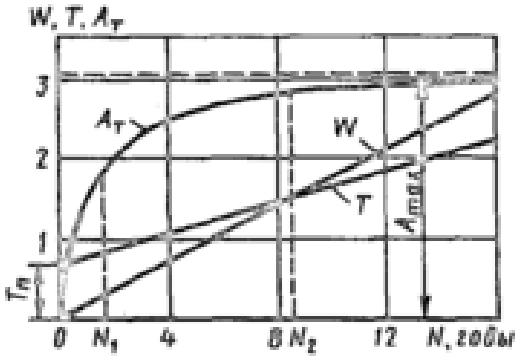


Рис. Д1.1. Зависимость выпущенной продукции, трудовых затрат и производительности труда от сроков службы оборудования

Проанализируем полученную зависимость графически, выразив W, Т и $A_т$ в функции от сроков службы N (рис. Д1.1). Здесь N – не текущее время эксплуатации машины, а возможные сроки службы как переменная величина, неизвестная в процессе проектирования.

Анализ производительности труда в функции от сроков службы показывает ее переменный характер даже при неизменных тех-

нико-экономических характеристиках (производительность машин, их надежность, степень автоматизации и эксплуатационные затраты).

Уровень производительности труда при малых сроках службы относительно невысок, поскольку на сравнительно малый объем выпущенной за это время продукции требуются значительные затраты на средства производства. С ростом сроков службы производительность труда увеличивается, так как единовременные затраты овеществленного труда $T_п$ раскладываются в этом случае на больший объем выпущенной продукции.

Представленный на рис. Д1.1 характер изменения производительности труда в зависимости от сроков службы показывает, что при малых сроках службы рост производительности труда довольно интенсивен, затем замедляется и при больших сроках практически прекращается, приближаясь к своему пределу:

$$A_{т\,max} = \lim_{N\to\infty} \frac{Q_г N}{T_п + N(T_v + T_ж)} = \frac{Q_г}{T_v + T_ж}. \qquad (Д1\text{-}4)$$

Если сроки службы машин находятся за пределами $N > N_2$ (см. рис. Д1.1), то рост производительности труда мало зависит от сроков службы, т.е. практически прекращается, что может войти в противоречие с общественно необходимым ростом производительности общественного труда.

Отсюда можно сделать вывод, что производительность труда при данном уровне техники имеет свои пределы; чтобы выйти за них, надо непрерывно совершенствовать технологию и технику.

Другой вывод: сроки службы машин определяются не только их физическим износом, но и характером зависимости производительности труда от сроков службы и запланированным темпом роста производительности труда, т.е. сроками морального износа оборудования.

Так, если при сроках службы от 0 до N_2 увеличение сроков службы на год позволяет значительно повысить производительность труда, то дальнейшее увеличение их (больше N_2) не дает заметного роста производительности труда. Таким образом, возникает вопрос о целесообразности сроков службы машин, лежащих за пределами N_2.

Преобразуем формулу (Д1-3) производительности труда. Принимая живой труд за меру (масштаб) оценки прошлого труда, эти затраты можно выразить в единицах живого труда, вводя коэффициенты k и m:

$$k = T_п/T_ж, \qquad m = T_v/T_ж,$$

где k – коэффициент технической вооруженности живого труда, характеризующий отношение единовременных затрат овеществленного труда на создание средств производства $T_п$ к годовым затратам живого труда; m – коэффициент энергоматериалоемкости живого труда, показывающий

отношение годовых текущих затрат T_v (овеществленного труда на инструмент, электроэнергию, вспомогательные материалы и ремонт) к годовым затратам живого труда.

Так, если один рабочий обслуживает машину или систему машин ($T_ж = 1$), в действительности он работает не один. Чтобы выпускать продукцию в течение года $Q_г$, используется концентрированный труд k чел., из которого затрачивается в год k/N чел. (прошлого труда). При этом еще m человек обеспечивают этого одного рабочего всем необходимым (материалами, инструментами, электроэнергией и пр.), без чего производство невозможно.

Число условно работающих за год составляет $k/N + m + 1$ чел., а за весь срок службы объекта $k + N(m + 1)$ чел.

Следовательно,

$$T = T_ж[k + N(m + 1)]. \qquad (Д1\text{-}5)$$

Таким образом, суммарные затраты общественного труда в $k + N(m + 1)$ больше затрат живого труда.

Подставляя значение T из формулы (Д1-5) в зависимость (Д1-3), получаем

$$A_т = \frac{NQ_г}{[K + N(m+1)]T_ж} = \frac{Q_г}{T_ж}\frac{N}{K + N(m+1)}. \qquad (Д1\text{-}6)$$

Здесь $Q_г / T_ж = A_ж$ есть производительность живого труда, т.е. количество продукции, выдаваемое человеком, занятым непосредственно выпуском данной продукции, т.е. зримый результат деятельности. Все остальные участники трудового процесса присутствуют незримо, создав для данного работника необходимые условия, обеспечив его всем необходимым, т.е. вложив свой труд в овеществленном виде.

Чем выше степень технической оснащенности (выше k и m), степень автоматизации производства, тем меньше рабочих занято непосредственно у машин и тем больше их находится "за ширмой", незримо. В этом заключается историческая тенденция развития техники в любой отрасли производства.

Прогрессивность новой техники следует оценивать, сопоставляя достигаемый уровень производительности труда при различных вариантах решения конкретных производственных задач.

Предпочтение следует отдать варианту, который обеспечивает наибольшее повышение производительности труда и гарантирует выполнение необходимых темпов ее роста на весь срок службы машины:

$$\lambda = A_{т2} / A_{т1}, \qquad (Д1\text{-}7)$$

где λ – коэффициент роста производительности труда при сравнении двух технических вариантов; $A_{т1}$ – производительность труда, которую обеспечивает исходный вариант техники; $A_{т2}$ – производительность труда второго, сравниваемого с исходным, варианта техники.

Производительность труда исходного варианта

$$A_{т1} = NQ_1/[K + N(m+1)]T_{ж1}.$$

Если оба сравниваемых варианта вводятся в действие одновременно, то производительность труда второго варианта

$$A_{т2} = NQ_2/[K_2 + N(m_2+1)]T_{ж2}.$$

Рост производительности труда

$$\lambda = \frac{NQ_2[K + N(m+1)]T_{ж1}}{NQ_1[K_2 + N(m_2+1)]T_{ж2}} = \frac{Q_2}{Q_1}\frac{T_{ж1}}{T_{ж2}}\frac{K + N(m+1)}{K_2 + N(m_2+1)}. \qquad (Д1\text{-}8)$$

Введем безразмерные коэффициенты, характеризующие сравнительные технико-экономические показатели обоих вариантов производства:

$\varphi = Q_2/Q_1$ – коэффициент роста производительности средств производства, показывающий, во сколько раз повышается производительность при втором варианте по сравнению с исходным;

$\varepsilon = T_{ж2}/T_{ж1}$ – коэффициент сокращения живого труда, говорящий о том, во сколько раз сокращается живой труд при втором варианте по сравнению с исходным;

$\sigma = T_{п2}/T_{п1}$ – коэффициент изменения стоимости средств производства;

δ – коэффициент изменения текущих эксплуатационных затрат на единицу изделия.

Определим величины K_2 и m_2 через безразмерные коэффициенты:

$$K_2 = \frac{T_{п2}}{T_{ж2}} = K\sigma\varepsilon; \qquad m_2 = \frac{T_{v2}}{T_{ж2}} = m\delta\varphi\varepsilon. \qquad (Д1\text{-}9)$$

Подставляя значения k_2 и m_2, а также φ и ε в формулу (Д1-8), получаем формулу, в которой рост производительности труда выражен непосредственно через сравнительные технико-экономические показатели обоих вариантов производства:

$$\lambda = \varphi\varepsilon\frac{K + N(m+1)}{K\sigma\varepsilon + N(m\delta\varphi\varepsilon + 1)}. \qquad (Д1\text{-}10)$$

Проанализируем полученную зависимость графически.

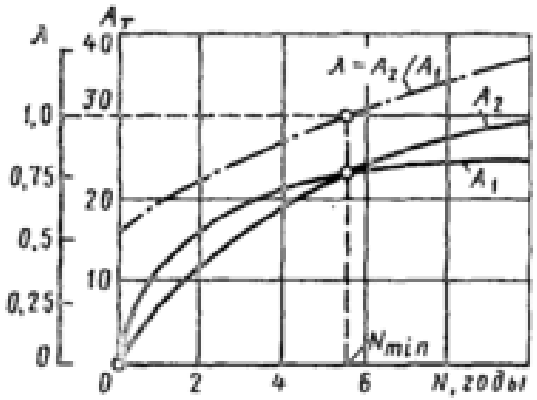


Рис. Д1.2. Рост производительности труда во времени при сравнении вариантов при одинаковых сроках ввода в эксплуатацию

На рис. Д1.2 приведены графики производительности труда во времени для двух проектируемых вариантов новой техники, например поточной и автоматической линии, при условии, что оба варианта новой техники вводятся в действие одновременно и имеют одинаковые сроки службы.

Так как автоматическая линия более дорогая, чем поточная ($\sigma > 1$), то при малых сроках службы производительность общественного труда на поточной линии A_{T1} выше, чем на автоматической A_{T2}, поэтому и коэффициент роста производительности труда меньше единицы. Однако автоматическая линия благодаря высокой производительности ($\varphi > 1$) и малому числу обслуживающих рабочих ($\varepsilon > 1$) характеризуется более низкими эксплуатационными затратами при выпуске продукции, поэтому при длительных сроках службы уровень производительности труда на автоматической линии выше ($\lambda > 1$).

Следовательно, если срок службы автоматической линии меньше некоторой минимальной величины ($N < N_{min}$), целесообразнее строить поточную линию как более дешевую, несмотря на бóльшие эксплуатационные расходы. И наоборот, автоматическая линия выгоднее, если предполагаемые сроки службы достаточно велики ($N > N_{min}$).

Нетрудно видеть, что в формуле (Д1-10) произведение $\varphi\varepsilon$ представляет собой рост производительности живого труда:

$$\lambda_{ж} = \varphi\varepsilon .$$

Здесь φ характеризует увеличение производительности труда рабочего, достигаемое благодаря повышению производительности средств производства, а ε – рост производительности труда рабочего за счет увеличения числа станков, обслуживаемых одним рабочим. Поэтому формула (Д1-10) получает вид

$$\lambda = \lambda_{ж} \frac{K + N(m+1)}{K\sigma\varepsilon + N(m\delta\varphi\varepsilon + 1)}. \qquad (Д1\text{-}11)$$

Следовательно, рост производительности труда равен произведению роста производительности живого труда, т.е. зримого достигнутого ре-

зультата, на коэффициент, показывающий, какими затратами прошлого труда достигнуто это увеличение. Разделив числитель и знаменатель на ε, получим

$$\lambda = \varphi \frac{K + N(m+1)}{K\sigma + N(m\delta\varphi + 1/\varepsilon)}. \qquad (Д1\text{-}12)$$

Характерными для современного этапа развития техники, в первую очередь для автоматизации производственных процессов, являются рост производительности средств производства ($\varphi > 1$), увеличение их стоимости ($\sigma > 1$) и сокращение числа людей, непосредственно занятых обслуживанием машин ($\varepsilon > 1$). Изменение текущих затрат прошлого труда на единицу изделия (δ) зависит от характера производственного процесса и может находиться в широких пределах.

Для того чтобы определить прогрессивность и перспективность любого варианта новой техники, необходимо сравнить его по уровню производительности труда не только с другими технически возможными вариантами новой техники, но и с существующим производством, с той техникой, которая должна быть заменена, а также с перспективными требованиями.

Машина, которая внедрена и уже работает на протяжении R лет, к моменту времени $N = 0$ обеспечила уровень производительности труда $A_{т0}$:

$$A_{т0} = \frac{Q_г}{Т_ж} \frac{R}{K + R(m+1)} = \frac{A_{т.ж}}{K/R + m + 1}. \qquad (Д1\text{-}13)$$

Если данная машина характерна для отрасли, то она определяет средний уровень производительности общественного труда, достигнутый к настоящему времени.

На рис. Д1.3 показана диаграмма зависимости производительности труда при эксплуатации машины от сроков службы при условии, что она внедрена R лет назад ($R = 15$). К моменту, принятому за начало отсчета календарного времени ($N = 0$), она обеспечила уровень производительности труда $A_{т0}$. Если машина и дальше будет эксплуатировать-

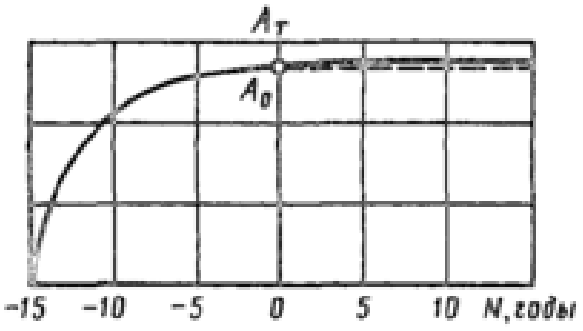


Рис. Д1.3. Производительность труда при эксплуатации техники, внедренной R лет назад

ся в течение времени $N + R$, то производительность труда $A_т$ несколько повысится, но уже незначительно.

При анализе прогрессивности новой техники надо исходить из следующих положений:

1) любая существующая производственная задача уже решалась с использованием арсенала методов и средств технологии и техники, которые обеспечили некоторый базовый уровень производительности труда (A_0);

2) если воспроизводить сегодня известные технические решения, то уровень производительности труда существенно не повысится (см. рис. Д1.3) и, следовательно, в сравнительной оценке его можно принимать за базовый, исходный ($\lambda = 1$);

3) объективно существуют необходимые темпы роста производительности общественного труда ($\lambda > 1$), которые следует сопоставлять с ожидаемыми или фактическими, достигаемыми внедрением новой технологии и техники (λ_t), при условии $\lambda_t > \lambda_{пл}$;

4) необходимый рост производительности общественного труда характеризуется темпами ежегодного прироста α. При их неизменности в анализируемый интервал времени $\lambda_{пл} = 1 + \alpha N$. Величина α должна корреспондироваться с ежегодными планируемыми темпами роста национального валового продукта, которые интегрально отражают годовой рост производительности общественного труда по стране в целом. Сегодня эта оценка составляет 4…6 %, хотя требуется значительно выше, поэтому для определяющих отраслей при концептуальных расчетах следует принимать $\alpha = 0{,}08…0{,}10$ и даже более;

5) при анализе прогрессивности технических решений в любой производственной ситуации надо сопоставлять следующие варианты:

– воспроизведение известных технических решений, в том числе с их модернизацией, доработкой и т.д., в итоге $\lambda_0 > 1$;

– внедрение уже сейчас ($N = 0$) различных вариантов новой техники с прогрессивными характеристиками (φ, ε), позволяющими повысить производительность общественного труда;

– внедрение новой техники, даже с более высокими характеристиками, однако не сегодня, а через L лет.

Расчетные формулы роста производительности труда по вариантам:

1) для типового действующего оборудования, которое определяет достигнутый на сегодня уровень производительности труда в сопоставлении с самим собой ($\varphi = 1$, $\varepsilon = 1$, $\delta = 1$), при эксплуатации в течение еще N лет:

$$\lambda_0 = \frac{K + (R+N)(m+1)}{K + R(m+1)}; \qquad (Д1\text{-}14)$$

2) для лучшего действующего оборудования, введенного также R лет назад, при эксплуатации еще в течение N лет:

$$\lambda_I = \frac{\varphi[K + (R+N)(m+1)]}{K\sigma + (R+N)(m\delta\varphi + 1/\varepsilon)}; \qquad (Д1\text{-}15)$$

3) для нового, вводимого сегодня оборудования в сопоставлении с типовым действующим при параллельной их эксплуатации в течение N лет согласно формуле (Д1-12):

$$\lambda_{II} = \frac{\varphi[K + N(m+1)]}{K\sigma + N(m\delta\varphi + 1/\varepsilon)};$$

4) для новейшего оборудования, вводимого через L лет, в сравнении с типовым действующим:

$$\lambda_{III} = \varphi\frac{N-L}{N}\,\frac{K + N(m+1)}{K\sigma + (N-L)(m\delta\varphi + 1/\varepsilon)}. \qquad (Д1\text{-}16)$$

На рис. Д1.4 показана диаграмма роста производительности труда во времени для различных вариантов производства при условии, что все взаимозаменяемые варианты, как новые, так и действующие, имеют сроки службы еще N лет.

Кривая λ_I характеризует повышение производительности труда, достигаемое посредством лучшей существующей техники по сравнению со средним уровнем производства в настоящее время. Как видно, лучшая существующая техника обеспечивает более высокий уровень производительности труда, однако с удлинением сроков службы темпы роста постепенно замедляются. Не остается неизменной и производительность труда того варианта техники, который характеризует средний уровень производства $A_{т0}$, если это оборудование эксплуатируется еще N лет в дополнение к R годам (кривая λ_0).

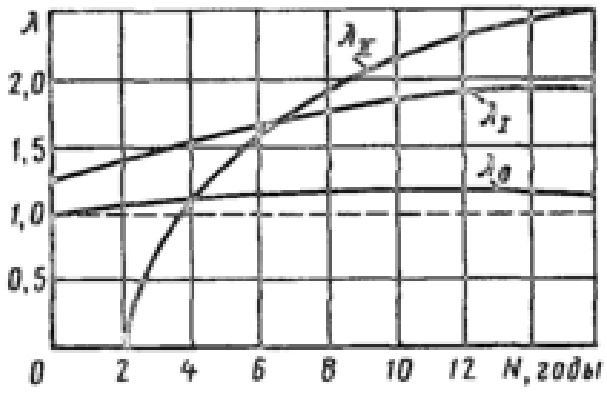


Рис. Д1.4. Рост производительности труда при сравнении действующего производства и новой техники

Кривя λ_{II} (см. рис. Д1.4) показывает рост производительности труда благодаря внедрению новой техники, которая будет внедрена через $L = 2$ года. При малых сроках службы эта производительность труда ниже, чем у лучшей существующей техники и даже техники среднего уровня в данный период. Однако при достаточно длительных сроках службы новая техника реализует свои возможности и обеспечивает значительные темпы роста производительности труда.

Как видно, при увеличении сроков службы производительность труда любого варианта производства, постепенно повышаясь, стремится к определенному пределу λ_{max}. Величина λ_{max} определяется технико-экономическими показателями новой техники: ростом производительности, сокращением числа обслуживающих рабочих, экономичностью машин в эксплуатации. Если новая техника имеет низкий потенциал роста производительности труда, она не может быть прогрессивной.

Прогрессивность новой техники должна оцениваться сопоставлением достигаемой величины роста производительности труда не с базовым уровнем, а с общественно необходимыми, плановыми темпами.

Это наглядно иллюстрировано графически на рис. Д1.5. Новая техника с высокими технико-экономическими характеристиками при вводе в эксплуатацию сегодня обеспечивает высокий рост производительности труда по сравнению с достигнутым уровнем [кривая λ_{II}, формула (Д1-12)], однако ее прогрессивность неабсолютна.

При коротких сроках эксплуатации ($N < N_1$), что характерно для специального непереналаживаемого оборудования, она не будет прогрессивной, так как не успеет реализовать свой потенциал. При слишком длительных сроках эксплуатации ($N < N_2$) она перестанет быть прогрессивной, поскольку потенциал будет исчерпан, а требования растут непрерывно ($\lambda_{II} < \lambda_{пл}$).

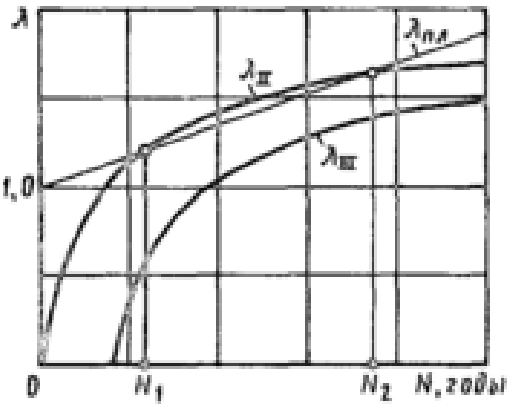


Рис. Д1.5. Производительность труда и прогрессивность новой техники

Но если новая техника с теми же высокими характеристиками будет введена в действие не сейчас, а с запаздыванием на L лет, она уже не будет прогрессивной при любых сроках эксплуатации [кривая λ_{III}, формула (Д1-16)], т.е. $\lambda_{III} < \lambda_{пл}$ при любых N, хотя ранее достигнутый уровень производительности труда ($\lambda = 1$) и будет превышен.

Таким образом, известное качественное представление о моральном старении новой техники при запаздывании ввода в эксплуатацию, получает аналитическое и графическое выражение.

Д2. СТАНОВЛЕНИЕ И ЗАДАЧИ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И ИХ СИСТЕМ

Как и всякое развитое научное направление, теория надежности машин-автоматов и автоматических линий включает в себя научно-методические основы, фундаментальное и прикладное направление.

Научно-методические основы теории надежности объединяют исходные положения, важнейшие понятия и определения, количественные показатели и их взаимосвязь, методы их количественного определения.

Фундаментальное направление теории надежности машин-автоматов и автоматических линий призвано исследовать процессы функционирования конструктивных элементов, машин и их систем в реальных условиях с учетом всевозможных внешних воздействий, а также нестабильности собственных параметров. Тем самым раскрывается физическая сущность явлений надежности, устанавливаются и количественно описываются причинные связи и закономерности. Одной из важнейших задач здесь является разработка математических моделей взаимосвязи показателей надежности механизмов и устройств, машин и автоматических систем машин с показателями их производительности и экономической эффективности.

Прикладное направление теории надежности призвано разрабатывать методы расчета и проектирования с позиций надежности, с доведением их в перспективе до такого же уровня, как, например, кинематические и прочностные расчеты.

Начальный этап становления теории надежности связан с развитием научно-методических основ, главная задача которых сводится к разработке статистических методов учета и описания отказов вне связи с физической сущностью явлений надежности конкретных технических систем [10, 27]. Такая постановка была правильной на ранних стадиях развития теории надежности, ибо нельзя решать задачи расчета, проектирования и эксплуатации машин, не научившись количественно оценивать надежность, получать достоверную количественную информацию при ограниченном числе реализаций случайных величин.

Поэтому основным содержанием статистической теории надежности явились установление количественных показателей надежности, их взаимосвязи, подбор аппроксимирующих кривых для обеспечения достоверности полученных численных значений показателей надежности и т.д. Отсюда теоретическими основами теории надежности на первом этапе стали теория вероятностей и математическая статистика, а также сопутствующие им разделы (теории массового обслуживания, корреляции, случайных функций и т.д.).

Математический аппарат теории надежности сводился ранее в основном к математическим моделям отказов и восстановления работоспособности, т.е. к стохастическим интерпретациям показателей надежности в функции от времени вне связи с целевой функцией технических систем, их технико-экономическими показателями – ТЭП (для рабочих машин [27] – производительностью и экономической эффективностью) [26].

Множество выполненных работ привело к тому, что задачи учета и описания отказов потеряли актуальность, а новые были не сразу сформулированы. Знание достоверных значений показателей надежности, их математической аппроксимации и т.д. позволяет решить лишь ограниченное число практических задач, главным образом анализа, но не синтеза технических систем. Фундамент, заложенный на первом этапе теории надежности (показатели надежности, методы их определения, математические модели отказов и т.д.), дает возможность перейти к более сложным задачам теории производительности и надежности, которая должна стать основой решения практических задач расчета, конструирования и эксплуатации машин, т.е. обеспечить создание высокопроизводительных и высокоэффективных технических систем.

Это требует принципиально нового методологического подхода к научным поискам в области надежности, иного математического аппарата, иных критериев оценки научной и практической ценности выполняемых работ.

Другим источником и составной частью теории надежности машин и неотъемлемым компонентом ее фундаментального направления стала теория износа и долговечности машин. Развивая общие положения науки о трении и износе – одного из хрестоматийных направлений науки о механике машин – исследования по износу машин специалисты направили на раскрытие физики процессов возникновения отказов. Это послужило началом физической теории надежности машин. В наибольшей степени данные исследования были связаны с исследованиями процессов изнашивания направляющих скольжения, старения конструкционных материалов и потери устойчивости шпиндельных узлов металлорежущих станков [17, 21].

Однако сосредоточение сферы исследований только на монотонно протекающих процессах малой скорости без анализа случайных факторов нестабильности и других причин возникновения отказов не позволяло связать исследуемые процессы изнашивания с выходными характеристиками машин по производительности и экономической эффективности.

Еще одним источником и составной частью современной теории надежности стала теория производительности, разработанная первоначально применительно к отдельным машинам-автоматам, а затем к автоматическим линиям. Одно из основных положений теории – производительность – определяется не только быстродействием, но и простоями по техническим причинам, что явилось ключевым во взаимосвязи надежности и выходными параметрами производственного оборудования; однако работы по теории производительности практически не затрагивали физической сущности возникновения отказов [25, 26].

Таким образом, до настоящего времени все три источника формирования теории надежности машин и их систем развиваются как бы параллельно. Общую теорию надежности машин еще предстоит создать, исходя из главного критерия – экономической эффективности новой техники.

В любых конструкциях и технологических процессах (ТП) рабочих машин или систем заложены определенные потенциальные возможности производительности, качества продукции, экономической эффективности, которые реализуются при эксплуатации в конкретных условиях производства. Надежность рабочих машин должна рассматриваться не как самоцель, а как степень реализации возможностей выпуска продукции, заложенных в ТП и конструкциях машин, как мера потерь производительности машин и производительности труда.

Высокая надежность – это проблема оптимального проектирования и высокоэффективного использования машин-автоматов и автоматических линий. Повышение надежности следует решать во взаимосвязи с другими путями увеличения производительности, например дифференциацией и концентрацией операций ТП, интенсификацией режимов обработки, улучшением организации обслуживания, повышением квалификации обслуживающего персонала и т.д.

Поэтому необходимо на основе анализа сущности явлений функционирования и их математического описания способствовать созданию высокопроизводительных и высокоэффективных рабочих машин, улучшая методы их расчета, проектирования и эксплуатации. Есть два пути реализации этого:

1) анализ причинных связей и зависимостей, формулировка принципиальных выводов и закономерностей, их математическое описание, т.е. определение физической сущности явлений, связанных с надежностью, что позволяет формировать научное и инженерное мировоззрение и создавать предпосылки для разработки машин с более высокими ТЭП;

2) разработка инженерных методов, которые дают возможность непосредственно решать на более высоком уровне конкретные задачи расчета, проектирования и эксплуатации рабочих машин с обеспечением высокой надежности, производительности, эффективности.

Первая задача решается, прежде всего, в рамках теории функционирования, конечной целью которой является разработка математических зависимостей показателей надежности от технологических, конструктивных, структурных и эксплуатационных показателей машин, а также внешних воздействий. Разработка таких зависимостей ввиду сложности и многофакторности явлений надежности представляет значительные трудности, поэтому в настоящее время количественные показатели надежности оцениваются статистическим путем, с обобщением в виде математических моделей отказов и восстановлений.

Таким образом, важнейшая задача фундаментальной теории производительности и надежности состоит в разработке математических моделей взаимосвязи показателей надежности, с одной стороны, – с определяющими параметрами работы машин, с другой – с их целевой функцией (производительностью, качеством изделий, экономической эффективностью).

Прикладные задачи теории надежности связаны с выбором таких конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров машин, которые обеспечили бы высокие ТЭП машин с учетом надежности в работе.

Подобная постановка задач справедлива для любых рабочих машин: станков, автоматов, автоматических линий, однако их актуальность для различных видов оборудования весьма разная.

Проблему надежности справедливо называют "проблемой номер один" именно автоматизированного производства, так как для автоматов и автоматических линий требования к показателям надежности особенно высоки, а фактические значения зачастую низкие. Проблему надежности универсальных станков часто сводят к проблеме износа и долговечности механизмов и сопряжений: направляющих, шпиндельного узла, зубчатых передач и др.

Для автоматов и автоматических линий все эти вопросы еще более актуальны, учитывая более высокую интенсивность работы, конструктивную сложность и т.д. Однако здесь на первый план выступают задачи расчета и проектирования машин и систем машин в целом, потому что без обеспечения первоначально высокого уровня надежности (что для универсальных станков подразумевается) изучение процессов дальнейшей потери работоспособности теряет научный и инженерный смысл.

Одна из важнейших прикладных задач теории надежности автоматов и автоматических линий – выбор принципиальных и конструктивных схем механизмов, устройств и аппаратуры управления. Сравнивая между собой характеристики надежности различных вариантов, можно выбрать наиболее надежный из них; сопоставляя фактическую надежность лучшего из известных вариантов с требуемым уровнем, удается оценить его степень пригодности для данной автоматической линии и перспективность для последующих проектных решений.

Аналогичным образом можно оценивать надежность принципиально новых механизмов и устройств по результатам их лабораторных и производственных испытаний. К этой задаче относится прогнозирование уровня надежности проектируемых автоматических линий при принятых технологических, конструктивных, компоновочных и структурных решениях.

Важнейшей задачей проектирования автоматических линий является выбор их оптимальной структуры. Любая технологическая система машин последовательного или последовательно-параллельного действия с выбранным маршрутом и режимами обработки, числом рабочих позиций и т.д. может быть скомпонована по различным структурным вариантам – от поточной несинхронной линии до автоматической линии с жесткой связью (см. гл. 6). Чем хуже надежность конструктивных элементов, из которых комплектуется система машин, тем на большее число участков или самостоятельных автоматических линий необходимо ее расчленять.

Теория надежности автоматических линий позволяет решать такие задачи эксплуатации автоматических линий, как выбор наивыгоднейшего числа наладчиков для обслуживания автоматических линий, рациональной системы смены инструмента (планово-предупредительной или текущей), расчет резервов повышения производительности действующих автоматических линий и т.д.

Методы теории надежности, накопленный опыт решения частных задач выбора тех или иных параметров машин по критериям высокой надежности дают возможность перейти к решению задач комплексного оптимального проектирования систем машин.

Д3. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ. СОСТАВЛЕНИЕ ЦИКЛОГРАММ

Технологический процесс (ТП) разрабатывают на этапе технического предложения. Итогом является определение степени дифференциации и концентрации операций, числа рабочих позиций q_i и его варьирования ($q_{\min} \le q_i \le q_{\max}$) длительности рабочих ходов на каждой из рабочих позиций. Это позволяет перейти к выбору структурно-компоновочного решения линии и программированию ее работы.

Циклограмма как итог программирования служит исходным документом для разработки системы автоматического управления, кинематической, пневмогидравлической схем и т.д., что выполняется на этапе эскизного проекта.

Рассмотрим некоторые особенности технологии обработки деталей на автоматических линиях [9].

1. **Требования к материалам.** К заготовкам, подлежащим обработке на автоматических линиях, предъявляются повышенные требования в отношении стабильности размеров и качества материала. Для обработки с высокой степенью точности колебания твердости заготовок должны быть уменьшены по сравнению с действующими стандартами. Также необходимо ограничить колебания величины припуска на поверхностях, подлежащих обработке. При больших колебаниях снижается точность обработки и уменьшается стойкость режущих инструментов.

Для улучшения условий транспортирования нельзя допускать значительных колебаний габаритных размеров заготовок, так как они могут заклиниваться или перекашиваться на транспортере.

Наличие на поверхностях отливок, подлежащих обработке, местных повышений твердости, раковин и т.д. может привести к поломкам режущих инструментов.

Особое внимание следует обращать на качество стальных литых заготовок, так как уровень литейной технологии их получения иногда недостаточно высок.

2. **Базирование деталей.** Детали на линии могут транспортироваться непосредственно или с использованием приспособлений-спутников. Выбор метода транспортирования зависит от формы, размеров и точности положения поверхностей заготовки.

Непосредственное транспортирование возможно при наличии у деталей поверхностей, обеспечивающих ее устойчивое положение при транспортировании. Кроме того, необходимо, чтобы погрешность бази-

рования детали на каждой позиции не выходила за пределы, обеспечивающие заданную точность обработки.

При транспортировании с помощью шаговых транспортеров (см. рис. 6.7) обязательно наличие опорной поверхности, боковых плоскостей и поверхностей, в которые должны упираться собачки. Все эти поверхности следует точно связывать с базовыми поверхностями. Иногда для обеспечения возможности непосредственного транспортирования на заготовках создают вспомогательные базы.

Указанные требования значительно изменяются, если для транспортирования используются транспортеры-перекладчики. В этом случае иногда отпадает необходимость в наличии боковых и торцовых поверхностей, точно связанных с базовыми поверхностями.

В качестве баз в корпусных деталях удобно использовать плоскость и два отверстия в ней. Часто применяется базирование по двум взаимноперпендикулярным плоскостям и одному отверстию.

У заготовок, не имеющих обработанных базовых поверхностей, в качестве баз для выполнения первых операций могут служить наиболее ответственные поверхности, которые в дальнейшем будут обрабатываться.

Следует иметь в виду, что в ряде случаев нельзя обрабатывать детали на всех станках автоматической линии, используя одни и те же базы. В этом случае нужна смена баз, которая необходима вследствие невозможности или неудобства обработки каких-либо поверхностей на первоначальных базах из-за интенсивного износа в результате многократного использования. Выбор того или иного приема смены баз определяется исходя из конкретных условий и требуемой точности обработки.

К приспособлениям-спутникам прибегают в тех случаях, когда детали не имеют поверхностей, которые могли бы обеспечить устойчивое положение детали при транспортировании. Использование приспособлений-спутников способствует уменьшению погрешности базирования и износа благодаря применению базовых планок и втулок из закаленной легированной стали.

Иногда встречаются недостаточно жесткие детали. Обработка таких деталей не может идти без подводимых опор. В этом случае также используются приспособления-спутники.

Существует несколько способов базирование деталей в приспособлениях-спутниках:

– по плоскости и двум отверстиям;

– по плоскости, центральному отверстию или цилиндрической наружной поверхности и выступу, отверстию или выемке для ориентации в

угловом положении с использованием самоцентрирующих механизмов или без них;

– по плоскости и контуру бобышек также с применением самоцентрирующих механизмов или без них.

Выбор маршрута обработки. При разработке ТП обработки следует соблюдать следующие правила:

1) максимально использовать принцип возможных совмещений операций путем совмещения работы отдельных рабочих органов (суппортов, агрегатных головок, силовых столов и т.д.);

2) в первую очередь осуществляют наиболее тяжелые обдирочные операции. Чистовую обработку поверхностей, к которым предъявляются повышенные требования в отношении точности, выполнять возможно ближе к концу автоматической линии, что обеспечивает охлаждение детали после черновых переходов, предотвращает возможную деформацию точной поверхности и позволяет устранять следы механических повреждений на плоскостях, по которым деталь перемещается в процессе транспортирования;

3) по схеме ТП обработки следует проверять перемещение рабочих агрегатов линии, чтобы они не мешали взаимному движению в процессе обработки. Имея схему обработки и рабочий чертеж детали, можно перейти к определению продолжительности как рабочих, так и холостых ходов и времени подачи команд на включение-выключение охлаждения, срабатывание магазина и т.д.

Разработка ТП включает в себя выбор методов и маршрута обработки, технологических режимов и комплекта инструмента, с заполнением технологических карт.

Выбор методов обработки. При составлении ТП для обеспечения требуемых точности и шероховатости поверхностей необходимо знать технологические возможности используемых методов обработки. Например, точность, получаемая при обработке поверхностей на автоматических линиях, в значительной степени зависит от компоновки фрезерных станков. Точность расположения координат отверстий при сверлении, зенкеровании и развертывании во многом определяется диаметром обрабатываемого отверстия.

Составление маршрутной технологии ведут последовательно в три этапа:

1) для каждой поверхности выбирают методы обработки и в зависимости от требуемых точности и шероховатости поверхности устанавливают нужное число переходов. Кроме того, для обработки каждой поверхности назначают базовые поверхности. На этом же этапе предварительно выбирают максимально допустимые режимы резания (подача и скорость резания), определяют основное технологическое время и намечают контрольные операции, подлежащие включению в линию;

2) определяют последовательность выполнения всех переходов. При составлении этой последовательности необходимо стремиться детали под черновую обработку плоскостей и крупных отверстий располагать в начале автоматической линии, а чистовую обработку по возможности осуществлять в конце линии. Иногда даже целесообразно выносить некоторые черновые переходы на отдельную автоматическую линию. Между черновой и чистовой обработками наиболее точных поверхностей нужно обрабатывать поверхности, к которым не предъявляется повышенных требований по точности. Нарезание резьбы лучше выносить на отдельный участок. Это объясняется применением специфических смазочно-охлаждающих жидкостей, загрязняющих деталь.

Кроме основных технологических переходов необходимо предусматривать вспомогательные переходы для очистки деталей от стружки и соответствующие контрольные переходы;

3) группируют переходы по станкам и шпиндельным коробкам. Кроме того, уточняют режимы резания. При группировании переходов необходимо стремиться к тому, чтобы число станков было минимальным, причем надо учитывать, что совмещать черновую и чистовую операции на одном станке нежелательно.

При уточнении режимов резания следует иметь в виду, что их окончательный выбор может быть проведен только после составления циклограммы линии и расчета коэффициента технического использования.

Пример. *Разработать ТП обработки корпусной детали, показанной на рис. ДЗ.1.*

При обработке детали необходимо выполнить следующие переходы: сверление нескольких крепежных отверстий с последующим нарезанием в них резьбы, обработку точных отверстий и растачивание отверстия диаметром 90 A_4.

На первом этапе заполняют технологическую карту (частично приведена в табл. ДЗ-1). В нее заносят эскизы обрабатываемых поверхностей детали с обозначением номеров отверстий, которые предстоит обработать (рис. ДЗ.1). После этого для каждой плоскости в зависимости от требований точности назначают методы обработки, число переходов, межоперационные припуски и допуски.

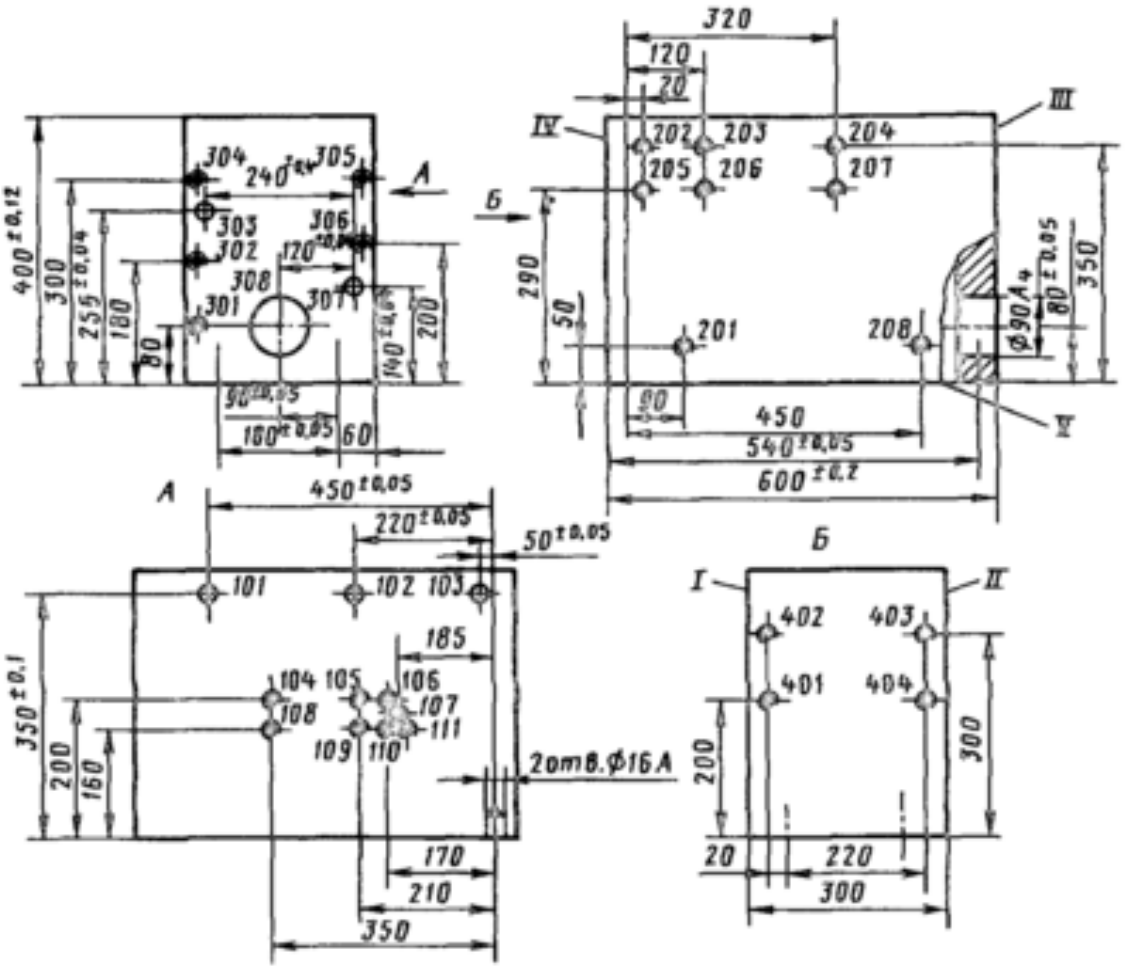


Рис. Д3.1. Схемы обработки плоскостей детали на автоматической линии:
I – IV – плоскости, на которых проводится обработка

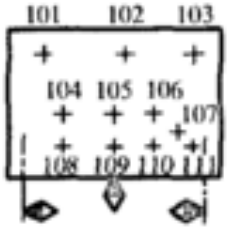
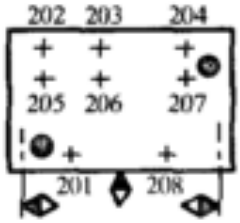
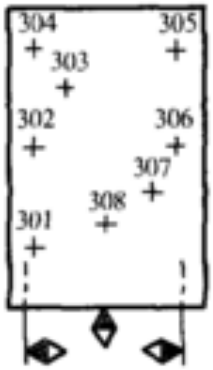
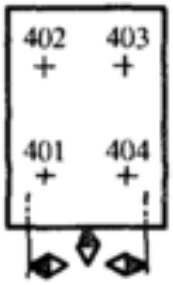
При определении перемещений инструментов необходимо учитывать геометрические параметры инструмента, расстояния от плоскостей со стороны входа и выхода инструмента до базы и величину гарантированного зазора, которые влияют на величину врезания и выхода инструмента. Гарантированный зазор для гидравлических силовых головок следует принимать равным 2…4 мм, для электромеханических 3…5 мм.

В карту также заносят предварительно назначенные максимальные режимы резания: скорость резания, подачу и скорость вращения шпинделя – и определяют для каждого перехода основное технологическое время.

После того как технологическая карта целиком заполнена, все переходы необходимо сгруппировать по станкам.

Для обработки детали со стороны плоскости *I* можно все переходы выполнить на трех рабочих позициях, но отверстие *107* нельзя сверлить совместно с отверстиями *106* и *111*, так как расстояние между ними мало (30 мм).

ДЗ-1. Технологическая карта

Номер плоскости (см. рис. ДЗ.1)	Эскиз (вид на плоскость с номерами отверстий)	Отверстие		Переход	Диаметр, мм	Допуски на координаты от баз, мм
		Номер	Число			
I		*103...104*	3	Сверление	$12^{+0,1}$	±0,15
				Зенкерование	$12,7^{+0,07}$	±0,08
		104...111	8	Сверление	8,5	±0,2
				Снятие фасок	10,5	
				Нарезание резьбы	M10 (2-й кл. точности)	
II		*201...208*	2	Сверление	10,5	±0,25
				Нарезание резьбы	M12 (3-й кл. точности)	
		202...207	6	Сверление	8,5	±0,2
				Снятие фасок	10,5	–
				Нарезание резьбы	M10 (2-й кл. точности)	
III		*301, 302, 304...306*	5	Сверление	10,5	±0,2
				Снятие фасок	12,5	
				Нарезание резьбы	M12 (2-й кл. точности)	–
		303, 307	2	Сверление	$12^{+0,1}$	±0,15
				Зенкерование	$12,7^{+0,07}$	±0,08
				Снятие фасок	14	–
				Развертывание	$13^{+0,018}$	±0,05
		308	1	Растачивание:		
				черновое	88	±0,15
				чистовое	$90^{+0,230}$	0,8
IV		*401...404*	4	Сверление	8,5	±0,2
				Снятие фасок	10,5	–
				Нарезание резьбы	M10 (2-й кл. точности)	

Окончательно можно остановиться на таком варианте: отверстие *107* обработать в два перехода. Сверление и снятие фаски комбинированным инструментом провести на второй рабочей позиции, а нарезание резьбы совместно с другими отверстиями – на третьей рабочей позиции.

Деталь со стороны плоскости *II* можно обрабатывать по следующему маршруту (см. рис. Д3.1):

1) сверлить два отверстия (*201* и *208*) диаметром 10,5 мм и шесть отверстий (*202...207*) диаметром 8,5 мм;

2) нарезать резьбу М12 в двух отверстиях (*201* и *208*), снять фаску в шести отверстиях (*202...207*) диаметром 10,5 мм;

3) нарезать резьбу М10 в шести отверстиях (*202...207*).

При составлении маршрутной технологии обработки необходимо по возможности все резьбонарезные операции сосредоточить в одном участке линии, желательно на одном станке.

Учитывая анализ переходов, нужных для обработки отверстий со стороны плоскости *III*, можно составить следующий маршрут:

1) сверлить пять отверстий (*301*, *302*, *304...306*) диаметром 10,5 мм и два отверстия (*303* и *307*) диаметром 11 мм; расточить предварительно отверстие *308* диаметром 88 мм;

2) снять фаску в пяти отверстиях (*301*, *302*, *304...306*) диаметром 12,5 мм; зенкеровать два отверстия (*303* и *307*) диаметром 12,7 мм;

3) нарезать резьбу М12 в пяти отверстиях (*301*, *302*, *304...306*) и снять в них фаски; снять фаски в двух отверстиях (*303*, *307*) диаметром 14 мм;

4) развернуть отверстия *303* и *307* диаметром $13^{+0,018}$; расточить окончательно отверстие *308* диаметром 90 A_4.

Обработку детали со стороны плоскости *IV* можно выполнять по следующему маршруту:

1) сверлить отверстия *401...404* диаметром 8,5 мм;

2) снять фаски в четырех отверстиях диаметром 10,5 мм; нарезать резьбу М10 в четырех отверстиях.

После составления технологической схемы автоматической линии необходимо откорректировать режимы резания в соответствии с заданной производительностью и группированием по шпиндельным коробкам.

Необходимое время для обработки по лимитирующей операции в составе рабочего цикла можно определить по формуле

$$t_р = (Ф/N)\eta_{ис} - t_х = (3950 \cdot 60)/(150000)0,8 - 0,25 = 1 \text{ мин},$$

где Ф – годовой фонд рабочего времени автоматической линии при двухсменной работе (Ф = 3950 ч); N – годовая программа; $\eta_{ис}$ – коэффициент использования; $t_х$ – время холостых ходов.

При сравнении необходимого рабочего времени с рабочим временем наиболее продолжительного перехода (см. табл. Д3-1) можно сделать вывод, что предварительно выбранные режимы обработки могут быть снижены, а детали можно обрабатывать в один поток.

Проработка маршрутной технологии с определением числа позиций и выполняемыми операциями позволяет перейти к выбору структурно-компоновочного варианта линии. Приведенную на рис. Д3.1 деталь целесообразно обрабатывать на сблокированной линии из агрегатных станков. Вариант планировки приведен на рис. Д3.2.

Детали *12* шаговым транспортером *13* перемещаются по мере обработки через рабочие *позиции*. *В обработке участвуют* следующие станки:

– двусторонний горизонтальный 18-шпиндельный сверлильный с силовыми головками *1* и *11*;

– двусторонний горизонтальный 17-шпиндельный сверлильный с головками *2* и *10*;

– двусторонний двухпозиционный горизонтальный 23-шпиндельный сверлильно-расточный с головками *3* и *9*;

– односторонний горизонтальный разверточно-расточный с силовой головкой *8*;

– двусторонний горизонтальный девятишпиндельный резьбонарезной с головками *4* и *7*;

– двусторонний горизонтальный 16-шпиндельный резьбонарезной с головками *5* и *6*.

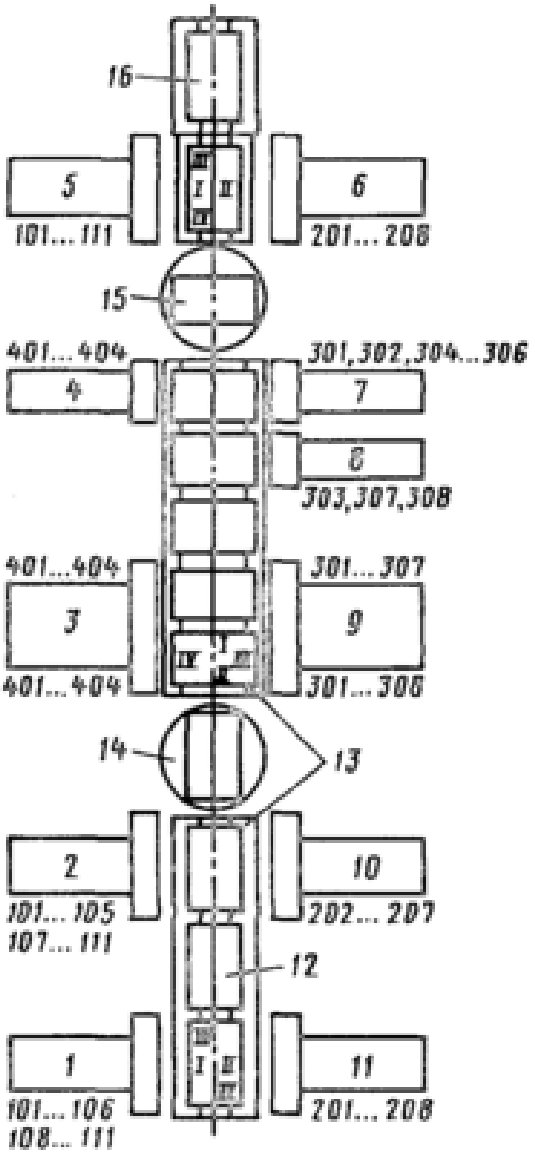


Рис. Д3.2. Вариант планировки проектируемой автоматической линии: *I – IV* – номера обрабатываемых плоскостей по рис. Д3.1; *101 ... 108* – номера обрабатываемых отверстий; *1 ... 11* – номера силовых головок; *12* – обрабатываемые детали на транспортере; *13* – шаговый транспортер с основанием (центральные станины); *14* и *15* – поворотные столы; *16* – позиция выдачи обработанных деталей

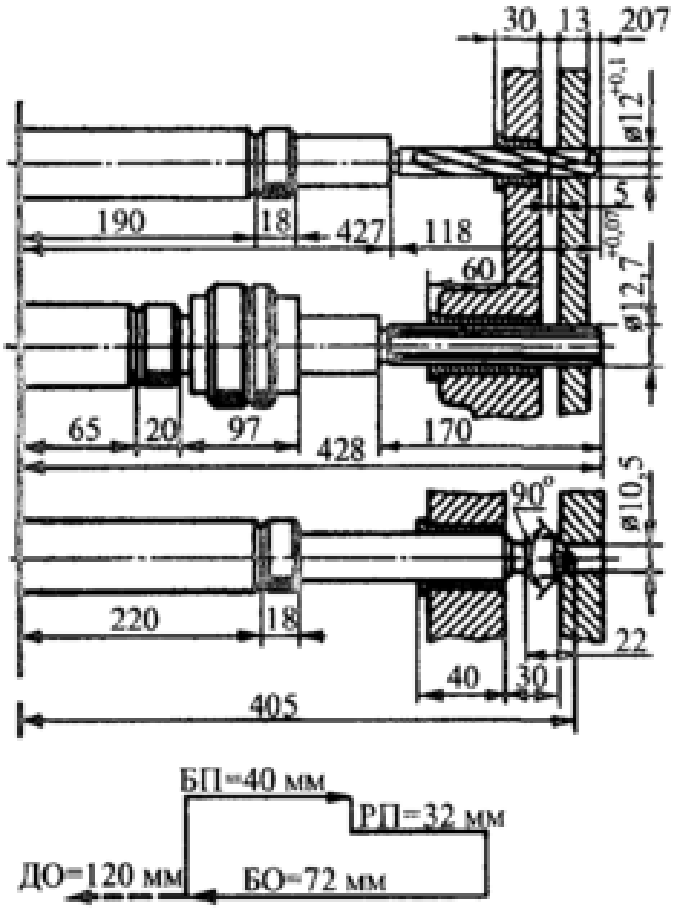


Рис. Д3.3. Схема к расчету перемещений инструментов при обработке силовой головкой

Деталь в процессе обработки при прохождении по рабочим позициям линии дважды поворачивается на 180° поворотными столами *14* и *15* и выдается на позицию *16*. После составления общей планировки автоматической линии необходимо составить на каждый станок линии схему обработки. При ее составлении нужно учитывать особенности составления технологии обработки, а также руководствоваться технологической схемой линии.

На рис. Д3.3 приведена схема обработки детали левой агрегатной головкой (см. рис. Д3.2) двустороннего горизонтального 18-шпиндельного сверлильного станка. На схеме показаны все переходы, которые выполняются на станке. Инструменты даны в масштабе с указанием размеров и конечного положения.

Для каждой силовой головки рассчитывается цикл ее работы с указанием длины быстрого подвода (БП), рабочей подачи (РП) и быстрого отвода (БО). Необходимо определить также длину дополнительного отвода (ДО), требующегося для смены инструмента.

При БО надо учитывать возможность появления рисок на обработанной детали, остающихся при БО инструментов. Если они недопустимы, то перед отводом инструмента следует отводить его в поперечном направлении.

Программирование работы линии начинается с составления общей циклограммы, которая дает графическое изображение скоординированной работы всех функциональных механизмов и устройств.

Для составления общей циклограммы необходимо первоначально определить для всех рабочих органов величины, координаты и длительность всех перемещений. Нужно тщательно проанализировать работу всех механизмов линии для того, чтобы более правильно выбрать последовательность движений механизмов. От этого зависит производительность линии. В циклограмме отражают перемещения всех механизмов, причем эти перемещения показывают в масштабе времени.

Все движения механизмов можно разделить на совмещенные и несовмещенные. Сумма несовмещенных движений составляет один цикл работы линии.

При составлении циклограммы необходимо стремиться уменьшить время и количество несовмещенных движений. Уменьшить время цикла можно путем частичного совмещения несовмещенных движений, а также путем сокращения длины хода и увеличения скорости перемещения механизмов. Циклограмма работы участка по рис. Д3.2 приведена на рис. Д3.4.

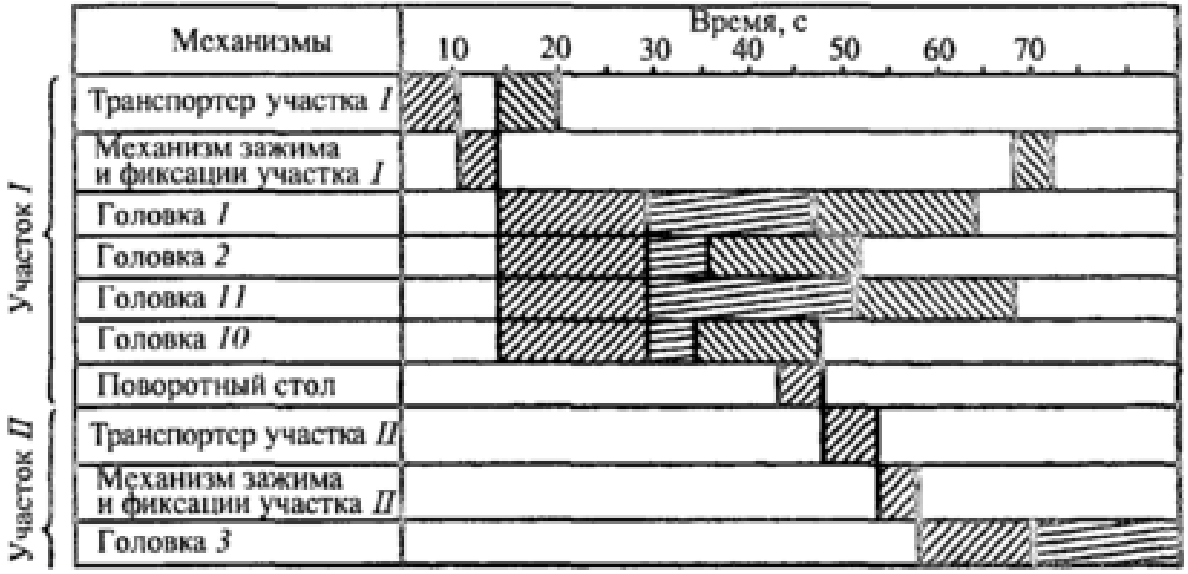


Рис. Д3.4. Циклограмма автоматической линии из сблокированных станков

Как видно, она идентична циклограммам других видов машин последовательного действия, например токарного автомата по обработке колец подшипников и автомата изготовления тарелочек осветительных приборов (см. гл. 1).

Д4. РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Расчет ожидаемых показателей производительности и надежности линии после выбора ее основных параметров должен ответить на вопрос, будет ли проектируемая линия обеспечивать заданную производственную программу выпуска изделий.

Производительность автоматических линий определяется длительностью их рабочего цикла и величиной внецикловых потерь. Согласно формуле, производительность линии

$$Q_{\text{а.л}} = \frac{1}{T}\eta_{\text{ис}} = \frac{1}{t_{\text{р}} + t_{\text{х}}} \frac{1}{\sum B_{\text{с}} + \sum B_{\text{орг}}},$$

где $\sum B_{\text{с}}$ и $\sum B_{\text{орг}}$ – собственные и организационно-технические внецикловые потери линии; T – рабочий цикл; $\eta_{\text{ис}}$ – коэффициент использования автоматической линии.

На ранних этапах проектирования (техническое предложение) задачей является выбор структурно-компоновочного варианта до конструктивной разработки. Поэтому расчеты производительности неизбежно имеют укрупненный характер. Величина рабочего цикла T определяется расчетом в первом приближении, значения коэффициента использования принимаются типовыми, например $\eta_{\text{ис}} = 0{,}70\ldots0{,}75$.

На завершающих этапах проектирования все конструктивные решения уже приняты, номенклатура механизмов и инструментов определена полностью. Это дает возможность выполнять уточненные расчеты с целью определить, сможет ли линия обеспечить производственную программу выпуска изделий.

Так как длительность рабочего цикла T в проекте является расчетной величиной, то ожидаемая фактическая производительность линии определяется оценкой ее коэффициента использования. При достаточно полной загрузке линии ($\eta_{\text{загр}} \to 1$) ее производительность зависит прежде всего от ее надежности в работе.

Для того чтобы автоматическая линия смогла обеспечить заданную по техническому заданию производительность, необходимо на стадии проектирования хотя бы в первом приближении оценить, какую надежность в работе будет иметь создаваемая автоматическая линия.

Судя по обобщенной формуле производительности, суммарные собственные потери системы автоматической линии зависят, с одной сторо-

ны, от надежности встроенного оборудования (станков, транспортных систем), с другой – от структурной схемы линии, вида межагрегатной связи (жесткой, гибкой и т.д.).

В свою очередь, надежность подсистем (станков, встроенных в линию, транспортных механизмов и др.) определяется надежность тех элементов, из которых они скомпонованы. Таким образом, для прогнозирования производительности и надежности проектируемых автоматических линий необходимо установить ожидаемую величину показателей надежности:

– элементов: механизмов, устройств, инструментов, аппаратуры управления (ω_i, Θ_i);

– подсистем – встроенных станков, потери которых складываются из суммы потерь всех элементов (B_i);

– линии в целом $\left(\sum B\right)$

$$\sum B = B\frac{q}{n_y}[1+\Delta(n_y-1)] = B\frac{q}{n_y}w,$$

где B – средние потери одного станка, встроенного в линию; q – число станков в линии; n_y – число участков, на которые разделена линия; Δ – коэффициент межучасткового положения потерь; w – коэффициент возрастания потерь из-за неполной их компенсации накопителями.

Блок-схема последовательности выполнения расчетов показателей надежности проектируемых автоматических линий на завершающих этапах проектирования приведена на рис. Д4.1. Как видно, на первом этапе расчета определяются внецикловые потери (см. гл. 3):

– из-за отказов механизмов и устройств циклического *1* и непрерывного *2* действий;

– из-за текущей замены *3* инструмента и его регулирования *4*, а также аварийной замены при поломках, потере размерной точности *5*;

– из-за технического обслуживания *6*;

– из-за переналадок на изготовление другой продукции *7*.

Все потери приводятся к единой форме исчисления (B – простои на единицу чистого проработанного времени) и суммируются:

$$B_o = B_{об} + B_{ин} + B_{т.о} + B_{пер}.$$

Далее учитываются структурные характеристики линии (q и n_y), отсюда находится ожидаемая величина коэффициента технического использования линии ($\eta_{т.и}$).

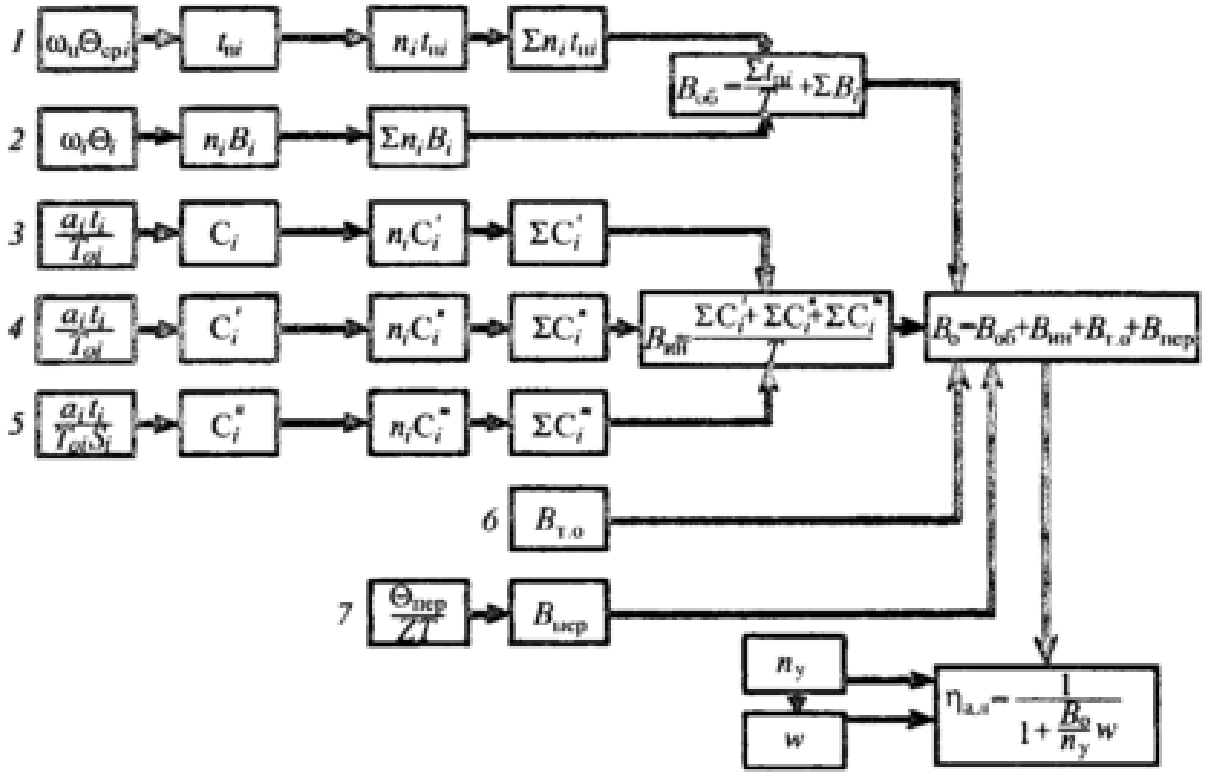


Рис. Д4.1. Блок-схема расчета показателей надежности проектируемых автоматических линий:

$\omega_ц$ и ω_i – интенсивности потока отказов механизмов и устройств циклического и непрерывного действия; $\Theta_{ср.i}$ и Θ_i – среднее время восстановления работоспособности механизмов и устройств циклического и непрерывного действия; t_{ni} – внецикловые потери на единицу продукции; B_i – внецикловые потери на единицу отработанного времени; n_i – число однотипных механизмов и инструментов; $B_{об}$ – суммарные потери по оборудованию; C_i, C_i', C_i'' – внецикловые потери по инструментам (замена, регулирование, аварийная замена); $B_{ин}$ – суммарные потери по инструменту; $B_{т.о}$ – потери по техническому обслуживанию; $\Theta_{пер}$ – среднее время переналадки; z – средний размер партии между переналадками; $B_{пер}$ – потери по переналадке; B_0 – суммарные собственные внецикловые потери

Достоинство результатов зависит в первую очередь от достоверности прогнозируемых значений безотказности (ω_i) и ремонтопригодности ($\Theta_{ср\,i}$) конструктивных элементов, из которых комплектуется автоматическая линия.

Источниками такой информации являются:

– лабораторные (стендовые) испытания;

– производственные исследования работоспособности (см. гл. 10).

Обоим видам присущи достоинства и недостатки. Стендовые испытания проводятся в условиях активного эксперимента с широким варьированием значений определяющих параметров. Однако при этом не удается воспроизвести комплекс воздействий, характерный для эксплуатации. Например, в реальных условиях эксплуатации автоматических линий обработки тел вращения наименее надежны механизмы автоматической загрузки и объема изделий – манипуляторы.

Основными причинами их отказов являются такие циклически действующие факторы, как забивание рабочей зоны стружкой, нестабильность размеров заготовок, величин перемещений механизмов, а также монотонно действующие факторы – изнашивание сопряжений. При испытании манипуляторов на стенде вне станка, без стружки и без реальных заготовок в течение значительного периода времени манипулятор может вообще не иметь отказов в работе, пока не начнет проявляться влияние износа, для чего необходим длительный период работы.

Для манипулятора истинные показатели надежности можно выявить лишь при наличии всего комплекса внешних воздействий, которые предполагают и наличие взаимодействующих механизмов:

– механизмов зажима, поворота и фиксации блока;

– суппортов;

– распределительного вала;

– инструментальной оснастки и т.д.

Таким образом, чтобы получить достоверные данные о надежности одного элемента машины (например, манипулятора), необходимо, по существу, испытывать всю машину.

Несколько более благоприятны условия стендовых испытаний аппаратуры управления: электрических, гидравлических, пневматических устройств. Здесь проще имитировать как рабочие параметры (ток, напряжение, давление и их перепады), так и спектр внешних воздействий (температуру, влажность, запыленность окружающей среды и т.д.).

Одной из важнейших проблем эффективности стендовых испытаний является получение максимального объема информации о надежности за минимальный отрезок времени.

Ускорение в условиях активного эксперимента испытаний механизмов, устройств и аппаратуры (метод ускоренных испытаний) позволяет обеспечивать следующие факторы.

1. Повышение интенсивности срабатывания элементов по сравнению с реальными условиями.

Так, механизмы зажима и фиксации в линиях из агрегатных станков срабатывают через 1...2 мин, хотя время срабатывания составляет не-

сколько секунд. При стендовых испытаниях частоту срабатывания можно повысить во много раз без изменения собственных параметров работы механизма.

Кроме того, может быть увеличен фонд времени работы по сравнению с производственными условиями (круглосуточные испытания, особенно по показателям долговечности), сокращены до минимума организационные простои.

2. Ужесточение режимов работы (скоростей обработки, температур, и т.д.), однако в определенных пределах, чтобы сохранить физическую природу отказов; необходимо учитывать, что изменение условий работы может вызвать нелинейное изменение значений показателей надежности.

Ускоренные стендовые испытания нашли широкое применение при исследовании работоспособности кинематических пар и сопряжений, элементов электрической, электронной, гидравлической, пневматической аппаратуры, режущих инструментов и т.д.

Основным источником информации об ожидаемой надежности узлов, механизмом и устройств машин в целом является обобщение результатов эксплуатационных исследований действующих автоматических линий в производственных условиях.

Достоинством производственных испытаний на надежность является прежде всего реальность полученных характеристик надежности, определяемых всем спектром внешних воздействий, который никогда не может быть воспроизведен в полной мере в лабораториях. Накоплению объема информации способствует одновременное наблюдение за работой большого количества однотипных элементов, что позволяет исключить влияние нестабильности условий их изготовления, монтажа, наладки, обслуживания.

Однако производственные исследования работоспособности действующих автоматических линий проводятся в ходе пассивного эксперимента, без варьирования значений определяющих параметров. Серьезным недостатком является большой интервал времени между проектированием линии и получением достоверной информации о надежности конструктивных, технологических и эксплуатационных решений, заложенных в ней.

На проектирование, изготовление, монтаж и отладку, пуск и освоение автоматической линии, стабилизацию ее работы уходит обычно несколько лет. Если к этому добавить длительность производственных испытаний, обработки и систематизации полученной информации о надеж-

ности, то часто оказывается, что в новых линиях, которые должны к этому времени проектироваться, будут использованы уже другие, более современные конструктивные элементы, т.е. информация о надежности морально устаревает.

Особенно это относится к элементам современных систем *автоматического управления станками* автоматических линий, которые непрерывно совершенствуются на основе развития приборостроения, автоматики и электроники (реле, пускатели, переключатели, логические элементы, трансформаторы, конечные выключатели и др.).

Поэтому для получения достоверных исходных данных при расчете ожидаемой надежности проектируемых систем необходимо сочетание информации, полученной методами стендовых и производственных испытаний.

Очевидно, чем выше технологическая и конструкторская новизна проектируемых автоматических линий, тем менее достоверные результаты дают опытно-статистические методы расчета ожидаемой надежности, тем больше необходимый объем стендовых испытаний элементов, механизмов и устройств, в первую очередь технологических механизмов, механизмов ориентации, загрузки и съема изделий и т.д.

Наиболее достоверными будут расчеты ожидаемых показателей надежности, если станки и автоматические линии компоновать в основном из нормализованных элементов, механизмов и узлов, которые имеют достаточно стабильную конструкцию, выпускаются в массовом количестве, применяются в системах различного технологического назначения.

Здесь нет необходимости расчленять, например, силовую агрегатную головку на элементы типа подшипников, зубчатых колес, клапанов, дросселей, цилиндров, конечных выключателей, а целесообразно определить статистическим путем надежность всей головки как единой системы. То же самое

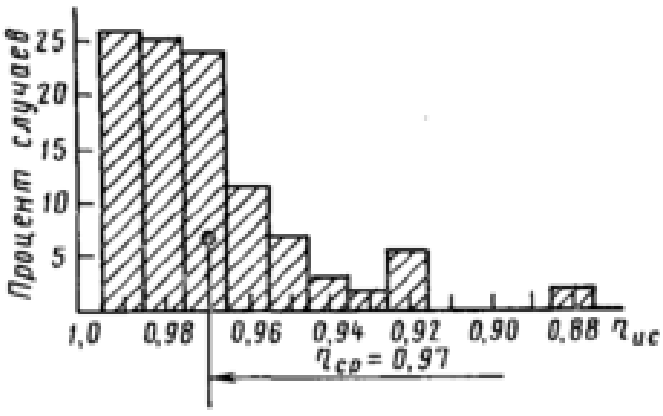


Рис. Д4.2. Диаграмма распределения значений коэффициентов технического использования агрегатных станков, встраиваемых в автоматические линии

относится к транспортерам, поворотным столам, контрольным устройствам и агрегатным станкам. Данные по их ожидаемой надежности тем более достоверны, поскольку основываются на очень обширном статистическом материале, так как однотипные конструкции широко распространены.

На рис. Д4.2 показана диаграмма распределения значений коэффициентов технического использования $\eta_{ис}$ агрегатных станков, встроенных в различные автоматические линии. При определении $\eta_{ис}$ каждого станка учтены потери двух агрегатных головок (по механизмам и инструменту), приспособления (механизм зажима и фиксации) и потери шагового транспортера, отнесенные к одной позиции.

Диаграмма свидетельствует, что, несмотря на разнообразие технологического назначения и режимов работы, надежность агрегатных станков стабильно группируется в достаточно узких пределах. Средний коэффициент использования одного агрегатного станка, встраиваемого в линию, согласно данным диаграммы, равен 0,97, что и можно принимать за основу при укрупненных расчетах ожидаемой надежности ($B = 0{,}03$; $\eta_{ис} = 0{,}97$).

Для линий, которые не удается компоновать на основе типовых узлов, приходится прибегать к поэлементным расчетам (см. рис. Д4.1).

Наиболее обширная статистическая и экспериментальная информация накоплена по отношению к инструментальной оснастке благодаря многочисленным стойкостным испытаниям. К тому же для основных типов инструментов время замены (без регулирования) является статистически устойчивой величиной (табл. Д4-1).

Д4-1. Типовая длительность замен и регулирования

Инструмент	Время замены, мин		Время подналадки, мин
	при наличии кондукторной плиты	без кондукторной плиты	
Спиральное сверло	1,0	0,2	–
Метчик			0,5
Зенкер	1,5	0,3	1,0
Чистовой резец	2,0	1,5	1,5
Торцовая фреза	–	6,0	2,0
Дисковая, консольная фреза		–	5,0

Потери по инструменту $\sum C_i$ рассчитывают по ожидаемым показателям стойкости, времени замены, времени участия в обработке одного изделия. Так, потери i-го инструмента для его замены при проектных режимах обработки [25]

$$C_i = \frac{a_i t_i}{T_{oi}},$$

где a_i – время обработки изделия i-м инструментом; t_i – время замены i-го инструмента при его поломке или затуплении, мин; T_{oi} – стойкость i-го инструмента при проектных режимах, мин.

Величину a_i берут из технологической карты обработки, величину стойкости T_{oi} – из справочников или по результатам эксплуатационных исследований действующих линий, время замены – из специальных таблиц типовых ожидаемых значений (см. табл. Д4.1).

Потери для всех n инструментов станка-автомата или участка из сблокированных станков суммируются:

$$\sum C_i = \sum_1^n \frac{a_i t_i}{T_{oi}} \gamma,$$

где γ – коэффициент, учитывающий аварийные замены.

Несколько сложнее прогнозировать потери из-за аварийной замены и регулировки инструментов. Однако, согласно проведенным исследованиям работоспособности [1], инструмент меняется из-за поломок только в одном из 15 случаев, поэтому коэффициенты возрастания потерь из-за поломок инструментов можно принимать равными 1,06...1,08.

При значительном количестве инструментов (n =100...200) расчеты можно вести по типовому инструменту – представителю, что сокращает трудоемкость инструментов.

Потери по техническому обслуживанию можно принимать в размере $B_{т.о} = 0{,}04...0{,}08$ [1].

Большинство автоматических линий переналадок не имеет ($B_{пер} = 0$); время перекомпоновок столь значительно, что целесообразно рассчитывать производительность для каждого из видов продукции (см. гл. 3) в периоды между перекомпоновками.

Коэффициент технического использования автоматической линии, разделенной на участки-секции (см. гл. 6 и рис. Д4.1),

$$\eta_{а.л} = \frac{1}{1 + \left(B_o / n_y\right) w} = \frac{1}{1 + B_{уч} w},$$

где B_0 – суммарные расчетные собственные потери; $B_{уч}$ – суммарные внецикловые потери участка или сблокированной линии; n_y – число участков-секций, на которое разделена линия; w – коэффициент возрастания простоев (и внецикловых потерь) выпускного участка из-за некомпенсированных простоев предшествующих участков.

Влияние отказов инструментов и механизмов различных участков на общую надежность автоматической линии как системы неоднозначно. Любые отказы выпускного участка приводят к безусловной остановке завершающей рабочей позиции, а ведь только она выдает конечную продукцию. Отказы всех участков, кроме выпускного, в значительной степени компенсируются межоперационными накопителями и сказываются на выпуске продукции лишь частично.

Поэтому, согласно блок-схеме (см. рис. Д4.1), *целесообразно поэлементным методом рассчитывать потери лишь выпускного участка.* Это справедливо, разумеется, при равенстве рабочего цикла участков и делении линии по методу равных потерь ($B_1 = B_2 = \text{const}$). Возрастание потерь выпускного участка можно учитывать коэффициентом возрастания $w = 1{,}10\ldots1{,}20$.

Пример. Расчет ожидаемой надежности сблокированной автоматической линии из агрегатных станков, планировка которого приведена на рис. Д4.3.

Согласно проекту, линия имеет $q = 8$ рабочих позиций обработки, в которых будет расположено 16 силовых столов с несамодействующими головками, из них 12 имеют многошпиндельные сверлильные коробки, а 4 – фрезерные или расточные одношпиндельные насадки. На поз. I фрезеруются плоскости, на поз. II – IV сверлятся крепежные отверстия, на поз. VI и VII идет нарезание резьбы, на поз. VIII растачиваются отверстия.

Общее число режущих инструментов 140, проектная длительность рабочего цикла $T = 0{,}8$ мин. Межагрегатная связь жесткая (без деления линии на участки), линия не переналаживается. Необходимо оценить ожидаемые показатели надежности в работе, прежде всего коэффициент технического использования, применяя укрупненные и поузловые методы расчета.

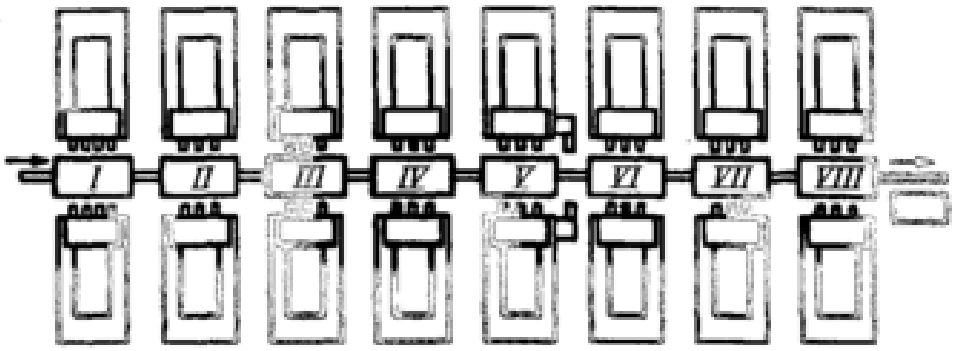


Рис. Д4.3. Схема планировки линии из агрегатных станков

При *укрупненных расчетах* определяющим фактором является в первом приближении число рабочих позиций.

Зная величину $q = 8$ и принимая по рис. Д4.2 $B = 0{,}03$, получаем общие ожидаемые потери линии:

$$B_o = Bq = 0{,}03 \cdot 8 = 0{,}24.$$

Коэффициент технического использования

$$\eta_{тех} = 1/(1 + B_o) = 1/(1 + 0{,}24) = 0{,}81.$$

При *поузловом методе расчета* необходимо по диаграмме (см. рис. Д4.1) определить ожидаемые потери:

– из-за отказов механизмов и устройств;

– при замене и регулировании инструментов;

– из-за технического обслуживания, учитывая число элементов каждого типа (механизмов и инструментов) и ожидаемые потери каждого элемента.

Результаты расчетов ожидаемых потерь по причине отказов оборудования (по основным типам механизмов и устройств) сведены в табл. Д4-2.

Выполнив необходимые расчеты, получим ожидаемые потери по оборудованию:

$$B_o = \left(\sum n_i t_{пi}\right)/T + n_i B_i = 0{,}0513/0{,}8 + 0{,}00020 = 0{,}064.$$

Д4-2. Внецикловые потери компонентов линии

Узлы	n_i	$t_{пi} \cdot 10^{-3}$	$n_i t_{пi} \cdot 10^{-3}$
Циклического действия:			
силовой стол с многошпиндельной коробкой	12	0,3	3,6
силовой или подкатный стол с расточной или фрезерной насадкой	4	0,8	3,2
приспособление для зажима и фиксации изделий	8	2,0	16,0
транспортер с приводом	1	4,0	4,0
кондукторные плиты подвижные	12	0,05	0,6
устройство для контроля наличия отверстий	2	2,0	4,0
электрооборудование (комплект)	1	6,0	6,0
гидрооборудование (комплект)	1	13,9	13,9
Итого	$\sum n_i t_{пi} = 51{,}3 \cdot 10^{-3}$ мин/шт.		
Непрерывного действия:			
насосная станция	2	0,10	0,20
Итого	$B_i n_i = 0{,}20$		

Аналогичные расчеты выполняем и для инструментов, группируя однотипные инструменты между собой для упрощения расчетов.

Так, в линии n_i шесть однотипных сверл диаметром 8,5 мм. Принимая в качестве исходных данных стойкость в количестве деталей $T_{oi}/a_i = 970$ шт., время замены при затуплении $t_i' = 0{,}2$ мин, получаем:

$$C_i' = 0{,}2/970 = 0{,}21 \cdot 10^{-3} \text{ мин/шт.};$$

$$n_i C_i = 0{,}21 \cdot 10^{-3} \cdot 6 = 1{,}26 \cdot 10^{-3} \text{ мин/шт.}$$

Аналогично для аварийных замен (поломок) принимаем: среднее количество нормально отработанных циклов между двумя поломками $S = 35$; среднее время замены при поломке $t_i'' = 6$ мин.

Отсюда:

$$C_i'' = \frac{a_i t_i''}{T_{oi} S} = \frac{6}{970 \cdot 35} = 0{,}2 \cdot 10^{-3} \text{ мин/шт.};$$

$$n_i C_i'' = 6 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-3} = 1{,}2 \cdot 10^{-3} \text{ мин/шт.}$$

Для расточных резцов и других мерных инструментов дополнительно рассчитываем и величину потерь из-за регулирования.

Суммируем полученные данные для всех инструментов:

$$\sum C_i = \sum C_i' n_i + \sum C_i'' n_i + \sum C_i''' n_i = 80 \cdot 10^{-3} = 0{,}08 \text{ мин/шт.};$$

$$B_{ин} = 0{,}08/0{,}8 = 0{,}10.$$

Потери на техническое обслуживание согласно рекомендациям принимаем равными: $B_{т.о} = 0{,}043$.

Таким образом, общие ожидаемые потери проектируемой линии согласно поузловому расчету

$$B_о = B_{об} + B_{ин} + B_{т.о} = 0{,}064 + 0{,}10 + 0{,}043 = 0{,}207.$$

Коэффициент технического использования

$$\eta_{тех} = 1/(1 + B) = 1/(1 + 0{,}207) = 0{,}83.$$

Как видно, результаты укрупненного и поузлового расчета достаточно близки.

При длительности рабочего цикла $T = 1{,}5$ мин ожидаемая техническая производительность линии:

$$Q_{а.л} = \frac{1}{T} \eta_{тех} = \frac{480}{1{,}5} 0{,}83 = 265 \text{ шт./смена.}$$

Ожидаемая фактическая производительность при коэффициенте загрузки $\eta_{загр} = 0{,}90$ составит

$$Q_{а.л} = 265 \cdot 0{,}90 = 238 \text{ шт./смена.}$$

Д5. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Процесс создания автоматических линий требует сложного взаимодействия многих коллективов разработчиков, одни из которых интегрируются в составе головной проектно-конструкторской организации, другие связаны с ней коммерческими отношениями.

Общая схема организации работ по созданию автоматической линии приведена на рис. Д5.1. Как видно, последовательность этапов (центральная колонка) является типовой, как и при создании отдельных машин-автоматов (см. разд. 7.2), но несоизмеримо шире круг задействованных подразделений и организаций и взаимодействие между ними.

Проектно-конструкторская организация, способная взять на себя функции головного разработчика, работает исходя из принципа дифференциации выполняемых функций по специализированным подразделениям и концентрации их усилий во времени, т.е. технология создания сложной новой техники базируется на тех же принципах, что и технология изготовления продукции (см. гл. 5).

В составе головного разработчика имеются основные конструкторские отделы: типового, специализированного и нестандартного оборудования, систем автоматического управления.

Создание новой автоматической линии, участка, цеха – дорогой и ответственный процесс, требующий максимального привлечения внешней информации:

- по аналогичным разработкам в стране и за рубежом;
- по опыту реализации собственных предшествующих разработок;
- по конъюнктуре на рынке и т.д.

Эти функции выполняют группа (или отдел) надежности, отделы технической информации и патентных исследований, другие подразделения.

Процесс создания линии начинается с анализа заявки на проектирование с позиций возможности и выгодности выполнения данного проекта, что обычно осуществляет специальная группа, где собраны самые опытные, квалифицированные разработчики.

Если их мнение положительно, головной разработчик заключает с заказчиком предварительный договор, а именно: на подробную проработку вопроса, разработку технического задания и технического предложения. В рамках данной работы испрашивается информация о работе действующих аналогичных линий, часто с выездом на места и проведением дополнительных исследований и анализа их по качеству продукции, производительности, надежности в работе, экономической отдаче (см. гл. 10).

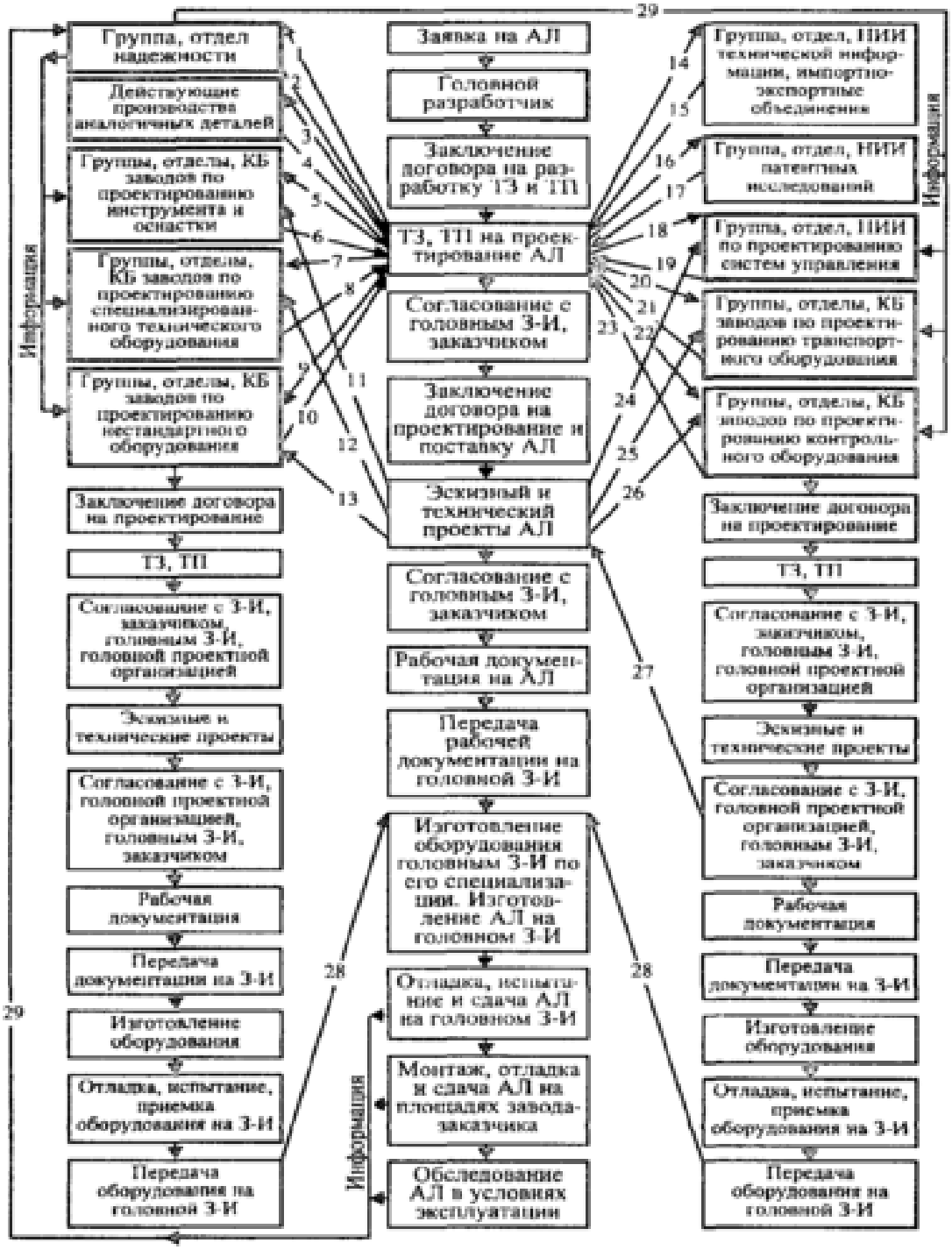


Рис. Д5.1. Схема организации работ по созданию автоматической линии: АЛ – автоматическая линия; ТЗ и ТП – техническое задание и техническое предложение; З-И – завод-изготовитель; ИД – исходные данные; *1* – заказ; *2*, *4*, *15*, *17* – информация; *3* – запрос, выезд специалиста; *5*, *7*, *9*, *18*, *20*, *22* – исходные данные; *6*, *8*, *10*, *19*, *21*, *23* – конструкторские проработки; *11* – *13*, *24* – *26* – выдача и согласование заявок; *14*, *16* – заказ, посещение специалистов; *27* – согласование технической документации; *28* – передача оборудования; *29* – реализация обратной связи на последующее проектирование

Систематизируется техническая и патентная информация. Итогом является разработанное совместно с заказчиком техническое задание, после чего исходные данные передаются специализированным конструкторским отделам для проработки и окончательной выработки технического предложения; определяется головное предприятие-изготовитель и предприятия-смежники.

Таким образом, по первому договору между заказчиком и головным разработчиком рождается техническое предложение, т.е. предлагаемое принципиальное решение варианта автоматической линии со всеми технико-экономическими обоснованиями. Это подвергается самому серьезному обсуждению с заказчиком, в результате чего в техническое предложение вносятся соответствующие изменения и дополнения. При этом неизбежны компромиссы, прежде всего по срокам и стоимости.

И лишь по достижении обоюдного согласия и полного устранения спорных моментов заключается основной договор: на проектирование и поставку автоматической линии. После этого начинается скоординированная работа многих подразделений и организаций-смежников.

Как видно на рис. Д5.1, на этапе разработки эскизного проекта получают задания основные конструкторские отделы, которые далее отвечают за те или иные компоненты линии по всему "технологическому" маршруту – разработки, изготовления, поставки.

Полностью разработанный эскизный проект согласовывается по всем позициям с головным заводом-изготовителем, после чего осуществляются разработка технической документации (технический и рабочий проекты) и ее передача головному заводу. Из рис. Д5.1 следует, что оборудование линии поставляется предприятиями-смежниками по разработкам головного проектанта или собственным (включая имеющиеся). Головной завод-изготовитель выполняет комплектацию всего состава оборудования линии, ее общий монтаж, в том числе состыковку технологической, транспортной, управляющей подсистем, отладку и испытания на холостом ходу, на опытных партиях заготовок.

Далее осуществляются демонтаж, транспортирование оборудования и его повторный монтаж на площадях заказчика, приемосдаточные испытания по тому же перечню показателей, что и для локального оборудования (см. гл. 7 и 10). Вся информация о результатах поступает как заказчику, который принимает окончательное решение о приемке линии (или ее неприемке, доработке и т.д.), так и головному разработчику, где данная информация систематизируется в отделе надежности. И если при создании или поставке локального оборудования взаимоотношения завершаются подписанием акта сдачи-приемки и финансовыми расчетами, то для автоматических линий характерны периодические обследования работоспособности в условиях эксплуатации (см. гл. 10). Тем самым реализуется обратная связь – от реализации проектов к последующим разработкам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автоматические линии в машиностроении**: Справочник. Т. 1 / Под ред. Л.И. Волчкевича. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.

2. **Беликов А.И., Волчкевич Л.И., Замчалов Ю.П.** и др. Конспект лекций по курсу "Введение в специальность". М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 60 с.

3. **Белянин П.Н., Идзон М.Ф., Жогин А.С.** Гибкие производственные системы. М.: Машиностроение, 1988. 256 с.

4. **Бойцов В.В.** Автоматизация и механизация в мелкосерийном и серийном производстве. М.: Машиностроение, 1961. 416 с.

5. **Брук И.В., Черпаков Б.И.** Гибкие механообрабатывающие производственные системы. М.: Высш. шк., 1987. 103 с.

6. **Владзиевский А.П.** Автоматические линии в машиностроении. Кн. 1. М.: Машгиз, 1958. 429 с.

7. **Волчкевич Л.И., Ковалев М.П., Кузнецов М.М.** Комплексная автоматизация производства. М.: Машиностроение, 1983. 267 с.

8. **Волчкевич Л.И.** Автоматизация производства электронной техники. М.: Высш. шк., 1988. 285 с.

9. **Вороничев Н.М., Генин В.Б., Тартаковский Ж.Э.** Автоматические линии из агрегатных станков. М.: Машиностроение, 1971. 552 с.

10. **Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.А.** Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.

11. **Дальский А.М.** Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 223 с.

12. **Дащенко А.И., Белоусов А.П.** Проектирование автоматических линий. М.: Высш. шк. 1983. 327 с.

13. **Качество** машин / Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 1995. Т. 1. 256 с.; Т. 2. 430 с.

14. **Клусов И.А., Волков Н.В., Золотухин В.И.** и др. Автоматические роторные линии. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.

15. **Кошкин Л.Н.** Роторные и роторно-конвейерные линии. М.: Машиностроение, 1982. 336 с.

16. **Кузнецов М.М., Волчкевич Л.И., Замчалов Ю.П.** Автоматизация производственных процессов. М.: Высш. шк., 1978. 425 с.

17. **Металлорежущие** станки и автоматы / Под ред. А.С. Проникова. М.: Машиностроение, 1981. 480 с.

18. **Орлов П.И.** Основы конструирования. В 2-х т. Т. 2. М.: Машиностроение, 1977. 560 с.

19. **Проектирование** автоматических участков и цехов / Под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Высш. шк., 2000. 270 с.

20. **Проектирование** металлорежущих станков и автоматических линий. Т. 3 / Под ред. А.С. Проникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 584 с.

21. **Проников А.С.** Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

22. **Технология** машиностроения / Под ред. А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 1997. Т. 1. 564 с.

23. **Федоров Б.С.** Охрана атмосферного воздуха. М.: Макцентр, 2001. 232 с.

24. **Царев А.М.** Системы машин переменной компоновки и структуры в машиностроении. Тольятти: Изд-во ТолПИ, 2000. 382 с.

25. **Шаумян Г.А.** Автоматы и автоматические линии. М.: Машиностроение, 1961. 552 с.

26. **Шаумян Г.А.** Комплексная автоматизация производственных процессов. М.: Машиностроение, 1973. 639 с.

27. **Шор Я.Б.** Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: Сов. радио, 1962. 552 с.

28. **Эрпшер Ю.Б.** Надежность и структура автоматических станочных систем. М.: Машгиз, 1962. 241 с.

Учебная литература

ВОЛЧКЕВИЧ Леонид Иванович

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Лицензия ИД № 05672 от 22.08.2001 г.

Редактор *А.П. Лебедева*
Художественный редактор *Т.Н. Галицына*
Корректор *В.О. Кабанова*
Компьютерное макетирование *М.А. Филатовой*

Сдано в набор 17.01.2005 г. Подписано в печать 18.05.2005 г.
Формат 60 × 88 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,52. Уч.-изд. л. 24,48.
Тираж 2000 экз. Заказ 1117

Ордена Трудового Красного Знамени
ОАО «Издательство "Машиностроение" ,
107076, Москва, Стромынский пер., 4

Оригинал-макет изготовлен в Издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, к. 14

Отпечатано в ГУП ППП "Типография "Наука" РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6