

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени  
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

---

В. Г. Алексеев, Э. С. Напалков

**СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ И ФОРМАЛИЗОВАННОЕ  
ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

Учебное пособие

по курсу

«Автоматизация проектирования технологических процессов»

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

---

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени  
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

---

В.Г.Алексеев, Э.С.Напалков

Утверждено  
редсоветом МВТУ

СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ И ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Учебное пособие  
по курсу

"Автоматизация проектирования технологических процессов"

Под редакцией Б.И.Белова

Данное учебное пособие издается в соответствии с учебным планом. Рассмотрено и одобрено кафедрой П-8 09.05.82 г., методической комиссией факультета П и учебно-методическим управлением.

Рецензент к.т.н. доц. ВЗМИ Ермаков Ю.М.



Московское высшее техническое училище  
имени Н.Э. Баумана

Редактор Л.И. Толстой

Корректор Л.И. Малютина

---

Заказ 959 Объем 3л.л.+1вкл. (Зуч.-изд.л.) Тираж 200 экз.  
№ 99756 от 31.05.83 г. Цена 1.1 коп. План 1983 г., № 52

---

Типография МВТУ. 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

## ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие масштабы производства, выпуск качественно новой продукции предъявляют все более жесткие требования к сокращению сроков и повышению качества технологической подготовки производства (ТПП).

Этапы проектирования технологических процессов (ТП), средств технологического оснащения (СТО) – наиболее ответственные и сложные в ТПП.

Технологическая наука часто носит описательный характер; связи отдельных задач ее очень сложны; число технологических правил и количество объектов, рассматриваемых в процессе разработки ТП, чрезвычайно велико. Все это определяет необходимость анализа огромных информационных массивов при технологическом проектировании любых процессов, в частности технологических процессов механической обработки.

Процесс "ручного" проектирования ТП представляет собой ряд действий, с помощью которых инженер-технолог производит выбор элементов из рассматриваемых массивов технологических предметов, устанавливает между ними соответствия, формируя переходы и технологические операции. Выбор оптимального процесса осуществляется технологом путем сравнения нескольких вариантов при введении оценок на элементы, составляющие ТП.

Проектная деятельность инженера-технолога в значительной степени может быть охарактеризована как сложный творческий процесс.

Существенно повысить эффективность технологического проектирования позволяет применение систем автоматизированного проектирования (САПР).

### 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Автоматизированное технологическое проектирование включает: отработку и анализ изделий на технологичность; проектирование перспективных ТП; проектирование элементов производственной системы; моделирование элементов производственной системы; проектирование рабочих ТП. Общий порядок автоматизированного технологического проектирования показан на рис. 1.

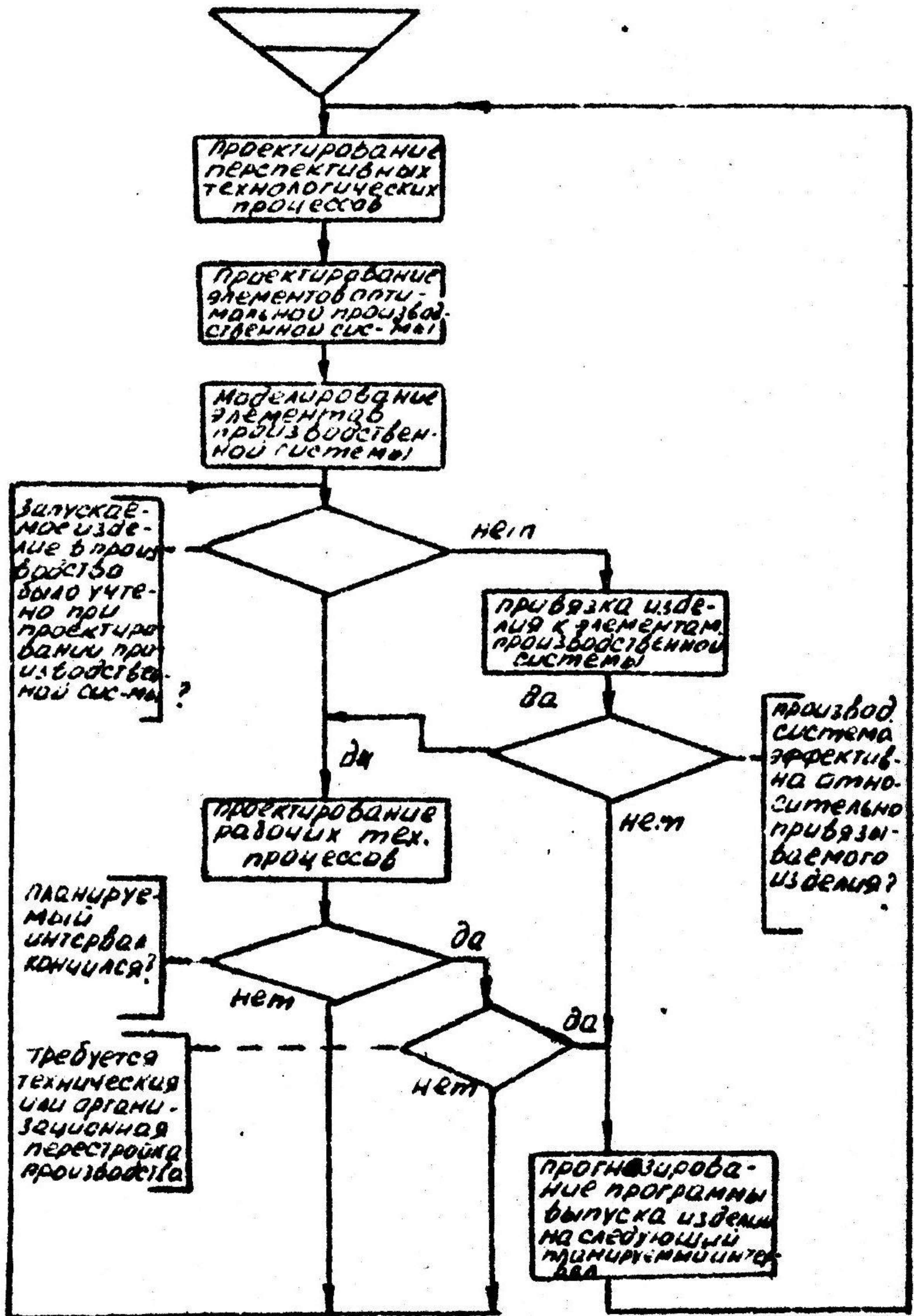


Рис. 1

Перспективными называются наиболее эффективные ТП, методы и средства осуществления которых предстоит полностью или частично освоить на предприятии, поскольку указанные ТП соответствуют самым современным достижениям науки и техники. Перспективные ТП разрабатываются при технологической и организационной перестройке предприятия. При автоматизированном проектировании перспективных ТП механической обработки осуществляют выбор заготовок, способа обработки, схем базирования, конструктивных схем технологической оснастки.

Под производственной системой понимается совокупность средств технологического оснащения, организованных для выполнения определенных технологических функций. Проектирование производственной системы при автоматизированном технологическом проектировании состоит из следующих этапов: определение состава технологического оборудования по видам производств; формирование производственных подразделений; разработка технологической планировки производственных подразделений; определение специализации рабочих мест с учетом выбранного оборудования.

Определение состава технологического оборудования заключается в определении номенклатуры и количества прогрессивного технологического оборудования, которое необходимо для изготовления изделий, выпускаемых предприятием в планируемый интервал времени.

Формирование производственных подразделений заключается в определении видов и количества производственных подразделений (цехов, участков, линий), которое осуществляется посредством распределения технологического оборудования, обеспечивающего оптимальную специализацию для данного типа производства.

Разработка технологической планировки производственных подразделений заключается в расстановке технологического оборудования с учетом принятой формы организации технологических процессов, минимизации грузопотоков, применения эффективных средств транспортирования и складирования материалов, заготовок, производственных отходов и т.д.

Определение специализации рабочих мест с учетом выбранного оборудования заключается в выборе и распределении технологической оснастки по единицам технологического оборудования на основе минимизации времени на его переналадку.

Проектирование производственной системы является итерационным процессом.

Рабочий ТП -- это технологический процесс, выполняемый по рабочей технологической и конструкторской документации. Автоматизированное проектирование рабочих ТП проводят на основе унифицированных (групповых и типовых) технологических процессов или операций, единичных технологических процессов-аналогов или единичных технологических операций-аналогов и индивидуального проектирования.

Главные этапы автоматизированного проектирования ТП на основе унифицированных процессов, а также задачи, решаемые на каждом этапе, должны соответствовать указанным в табл. 1 этапам и задачам.

Таблица 1

Этапы проектирования на основе унифицированных технологических процессов	Задачи, решаемые на этапе
1	2
Отбор изделий для автоматизированного проектирования технологических процессов	Предварительное ознакомление с назначением и конструкцией изделий, с требованиями к их изготовлению и эксплуатации. Определение возможности автоматизированного проектирования технологических процессов
Подготовка исходных данных для автоматизированного проектирования	Подготовка конструкторской документации к кодированию исходных данных. Заполнение бланка исходных данных при подготовке исходных данных без применения средств механизации и автоматизации. Ввод в ЭВМ
Формирование конструкторско-технологического шифра изделия	В зависимости от уровня автоматизации проектирования технологических процессов формирование конструкторско-технологического шифра осуществляется или на этапе подготовки исходных данных, или на начальном этапе решения задачи на ЭВМ

1	2
<p>Поиск соответствующих унифицированных процессов или операций, поиск единичного технологического процесса или операций-аналогов</p>	<p>Сравнение конструкторско-технологических шифров изделия, на которое разрабатывается технологический процесс, и изделий, хранимых в памяти ЭВМ</p>
<p>Доработка унифицированного технологического процесса или технологического процесса-аналога</p>	<p>Проектирование технологического маршрута, технологических операций. Расчет режимов обработки и норм времени. Печать комплекта технологических документов</p>

При индивидуальном проектировании ТП маршрут изготовления изделия и структуру операций проектируют на основе анализа конструктивно-технологических свойств изделия и технологических возможностей производственной системы. Порядок автоматизированного индивидуального проектирования ТП раскрыт в табл. 2.

Таблица 2

Этапы индивидуального проектирования	Задачи, решаемые на этапе
1	2
<p>Отбор изделий для автоматизированного проектирования технологических процессов</p>	<p>Предварительное ознакомление с назначением и конструкцией изделий, с требованиями к их изготовлению и эксплуатации. Определение возможности автоматизированного проектирования технологических процессов</p>
<p>Подготовка исходных данных для автоматизированного проектирования</p>	<p>Подготовка конструкторской документации к кодированию исходных данных. Заполнение бланка исходных данных без применения средств механизации и автоматизации. Ввод в ЭВМ</p>



1	2
Проектирование маршрутного технологического процесса	Выборка данных, необходимых для построения математической модели изделия, формирование математической модели изделия. Проектирование технологического маршрута
Выбор состава средств технологического оснащения	Выбор оборудования, инструмента и оснастки
Выбор или проектирование заготовки	Выбор вида заготовки или проектирование заготовки
Проектирование операционного технологического процесса	Выбор типовых переходов. Определение последовательности выполнения переходов. Выбор инструмента и приспособлений. Корректировка технологического маршрута
Расчет режимов и норм времени технологических операций	Определение числовых значений режимов технологических операций и норм времени. Печать комплекта технологических документов

В качестве типового метода автоматизированного технологического проектирования принимают метод, основанный на математическом моделировании. Под математическим моделированием подразумевается процесс использования математической модели при различных входных переменных.

Одна из первых задач автоматизации технологического проектирования состоит в том, что изделия, ТП данного класса необходимо декомпозировать по классификации, имеющей объективное содержание. Это требование вытекает из того, что иерархическая структура объекта проектирования определяет иерархическую структуру процесса проектирования, а следовательно, и моделей, используемых в этом процессе.

Модели в совокупности с математическими методами и алгоритмами проектирования составляют математическое обеспечение автоматизированного проектирования.

Математические модели проектирования ТП включают:  
математическую модель изделия – формализованное описание изделия в форме цифрового кода;

математическую модель производственной системы – формализованное описание производственной системы.

Математические модели изделия отражают математическое описание структуры и конструктивно-технологических свойств изделия.

Математические модели производственной системы отражают математическое описание предприятий, производств, цехов, участков, поточных линий, технологических процессов и средств производства.

Математические модели подразделяются на упорядочивающие и сочетательные – по характеру связей между элементами моделируемого объекта.

Упорядочивающие модели подразделяются по степени унификации проектных решений на табличные, сетевые и перестановочные. Они используются в тех случаях, когда моделируются состав и взаимосвязь элементов объекта по их упорядоченности, смежности, сопряженности и т.д. Сочетательные модели используются в тех случаях, когда моделируется только состав элементов объекта.

Для описания конструкторско-технологических свойств изделия и технологических возможностей производственной системы используют понятие "контур". Это экспликация таких понятий, как свойство, признак, характеристика, параметр и т.п. Для описания структуры производственной системы используют понятие "оператор".

Математическая модель изделия должна состоять из матрицы состава контуров изделий, графов взаимосвязи контуров изделия, графов взаимосвязи составных частей изделия, наборов описаний логических связей между контурами и составными частями изделия, а также из наборов описаний количественных отношений между значениями контуров.

Математическая модель производственной системы должна состоять из матрицы состава контуров операторов, графов взаимосвязи контуров операторов, графов взаимосвязи операторов, наборов описаний логических связей между контурами и операторами, а также из наборов описаний количественных отношений между значениями контуров.

Для получения унифицированных проектных решений при

отсутствии вариантов используют табличные модели производственной системы; для получения унифицированных и единичных проектных решений при наличии вариантов и необходимости оптимизации используют сетевые и перестановочные модели производственной системы.

Соответствие видов математических моделей видам проектных решений отражено в табл. 3.

Таблица 3

Класс математических моделей	Объекты технологического проектирования					
	ТТП	ГТП	ЕТП	СТО	УСТО	Сп СТО
Модели:						
табличные	+	+	-	+	-	-
сетевые	+	+	-	+	+	+
перестановочные	-	-	+	-	+	+

Примечания к табл. 3. 1. ТТП, ГТП, ЕТП - соответственно типовые, групповые, единичные технологические процессы.

2. СТО, УСТО, Сп СТО - соответственно стандартные, унифицированные, специальные средства технологического оснащения.

3. Знак "+" (" - ") означает, что класс математических моделей применим (не применим) при проектировании данного объекта.

Табличная модель производственной системы состоит из матрицы состава контуров операторов, строки которой полностью упорядочены; логические связи между контурами и операторами табличной модели регламентированы. Граф взаимосвязи операторов табличной модели при проектировании не используют.

Сетевая модель производственной системы состоит из матрицы состава контуров операторов, строки которой частично упорядочены; логические связи между контурами и операторами регламентированы. Граф взаимосвязи операторов сетевой модели представляет собой ориентированный граф без ориентированных циклов.

Перестановочная модель производственной системы состоит из матрицы состава контуров операторов, строки которой не упорядочены; логические связи между контурами и операторами регламентированы. Граф взаимосвязи операторов перестановочной модели представляет собой ориентированный граф с

циклами.

Сочетательная модель производственной системы состоит из матрицы состава контуров, строки которой не упорядочены; логические связи между контурами и операторами регламентированы. Граф взаимосвязи операторов сочетательной модели представляет собой безреберный граф.

Организация процесса принятия решения на базе типовых математических моделей при автоматизированном технологическом проектировании определяет последовательность использования математических моделей, различающихся иерархическими уровнями описания изделия и производственной системы, степень унификации проектируемых объектов, а также способы решения задач технологического проектирования.

Процесс принятия решения для конкретной задачи технологического проектирования при наличии табличных, сетевых и перестановочных моделей происходит следующим образом (рис. 2): производят диагностирование табличной модели и, если решение по этой модели возможно, то решают задачу; если решение по табличной модели невозможно, то выполняют диагностирование сетевой модели и осуществляют решение задачи по этой модели; если решение по сетевой модели невозможно, то осуществляют диагностирование перестановочной модели и решение задачи по этой модели; если решение задачи невозможно ни по табличной, ни по сетевой, ни по перестановочной моделям, то осуществляют неавтоматизированное проектирование.

Диагностирование производственной системы при автоматизированном технологическом проектировании выполняют так, как указано на рис. 3.

Ниже в качестве примера приводится описание типового алгоритма автоматизированного проектирования технологических процессов (АПТП). Указанное проектирование осуществляется по методу многоуровневого синтеза технологических процессов с типизацией на уровнях проектирования.

Схема указанного типового алгоритма АПТП приведена на рис. 4.

1. Конструкторско-технологический анализ (блок В1) объектов производства выделяет информацию, необходимую для обеспечения АПТП.

2. Формирование исходной информации для АПТП (блок С1) осуществляется путем заполнения бланка исходных данных (БИД).

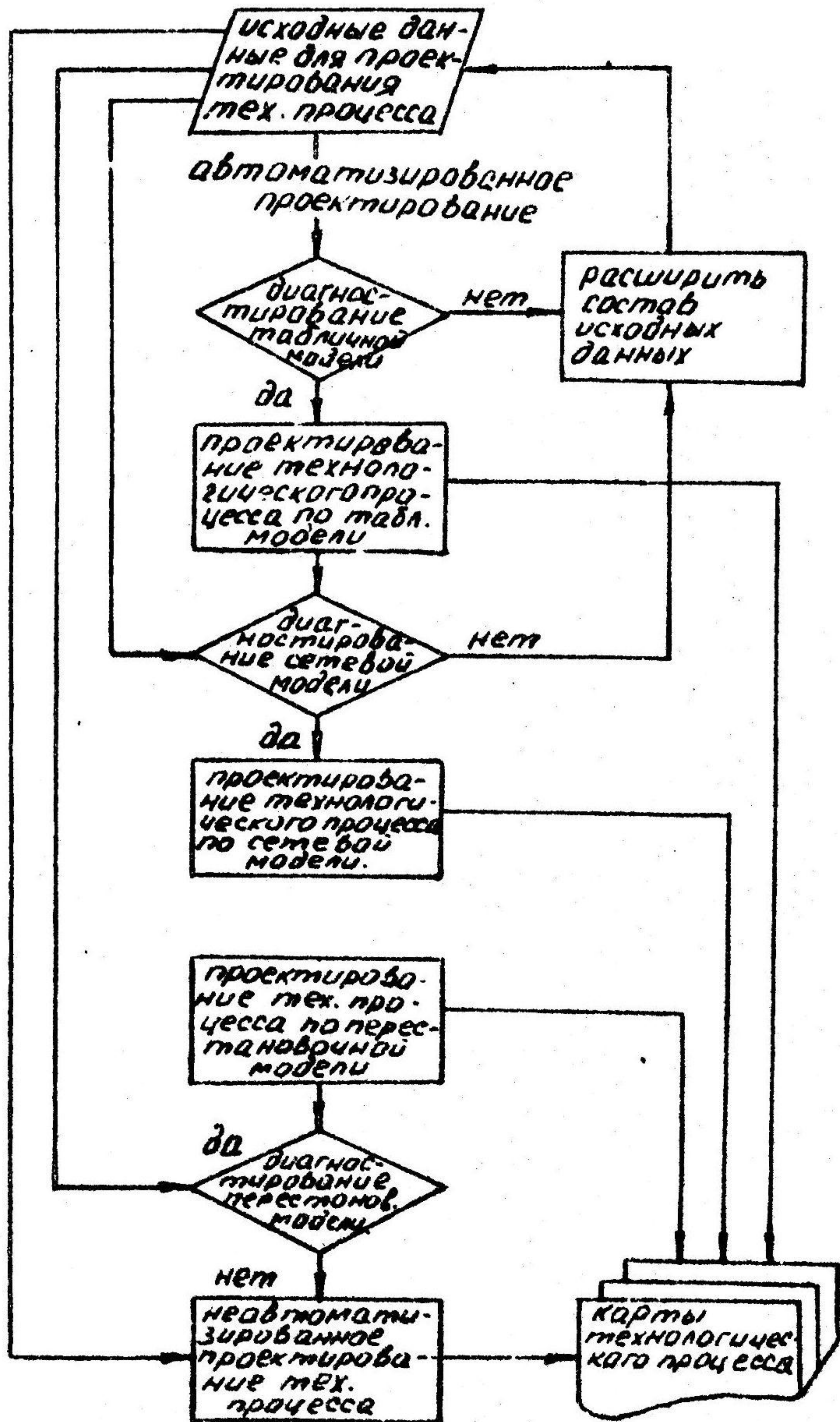


Рис. 2

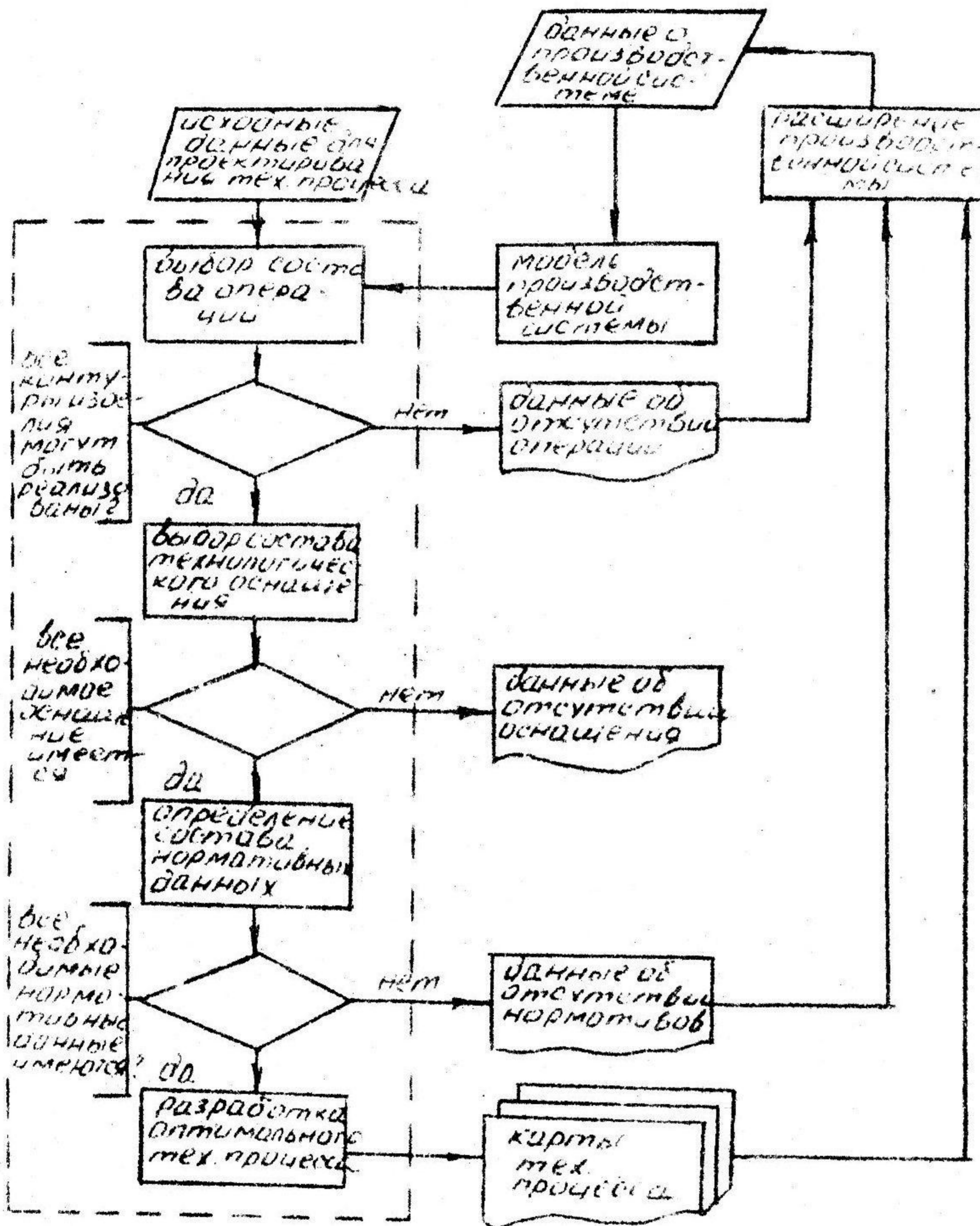


Рис. 3

3. Подготовка исходной информации для ввода в ЭВМ (блок Д1) осуществляется путем нанесения закодированной информации на машинный носитель.

4. После ввода исходной информации в ЭВМ (блок Е1) осуществляется машинное распределение информации (блок F1), обеспечивающее ее поиск и сортировку.

5. Блоки F2, E2 осуществляют формирование модели объекта производства на основе выделенных конструкторско-технологических характеристик.

6. Блок Д2 определяет направление АПП либо по методу типизации, либо по методу многоуровневого синтеза.

7. В случае выбора метода многоуровневого синтеза, блоком В2 осуществляется запись модели объекта производства в одноименный массив, в случае выбора метода типизации в блоке С2 осуществляется поиск и выбор окончательной модели технологического маршрута, соответствующей модели объекта производства.

8. Блоки А2, А3 и В3 реализуют первый уровень многоуровневого синтеза технологических процессов. Блок А2 выбирает метод изготовления объекта производства на основе анализа общих закономерностей производственного процесса и конструкторско-технологических характеристик объекта производства.

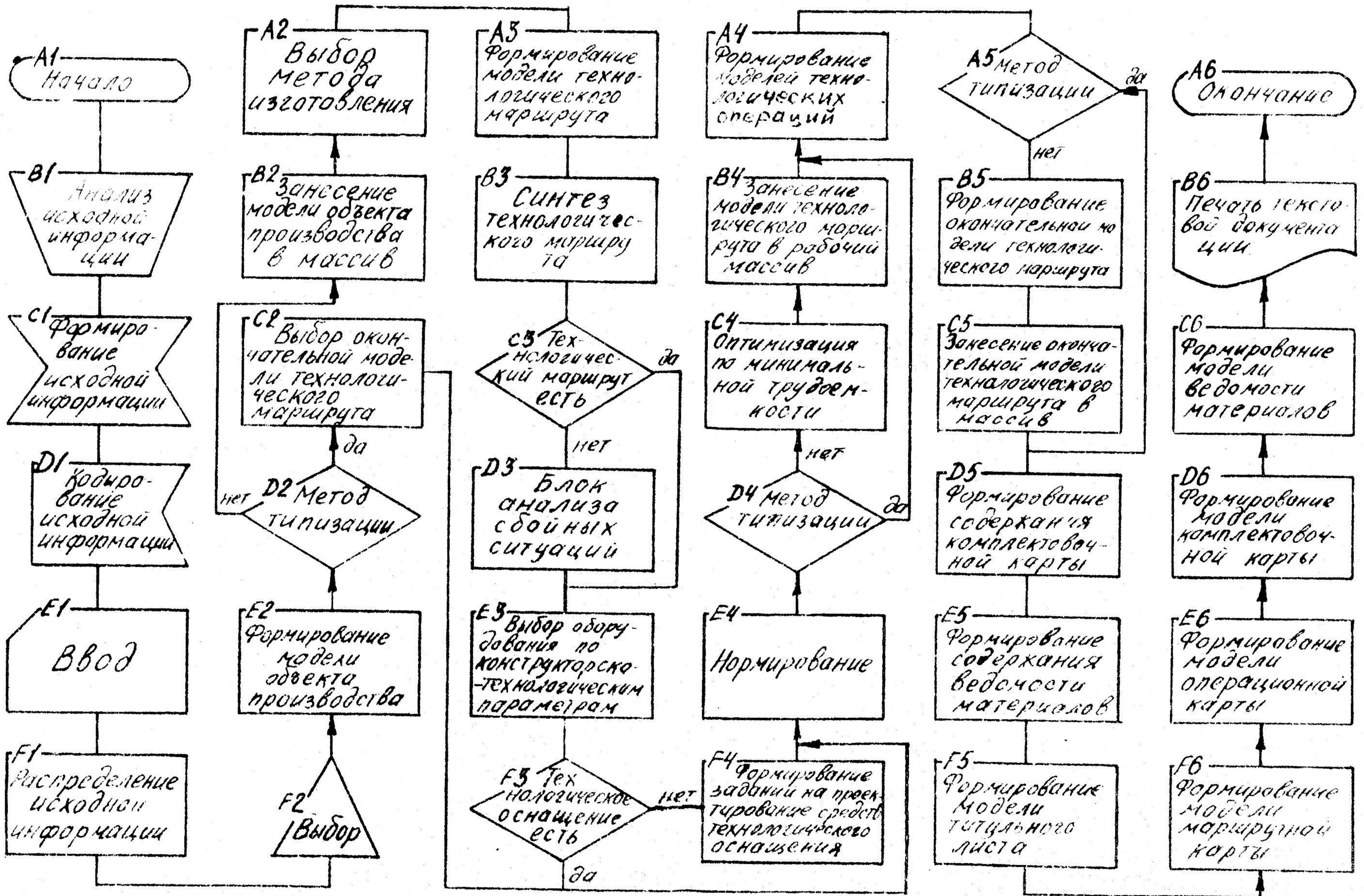
9. В блоке С3 осуществляется анализ возможности возникновения свободной ситуации. Если предварительный маршрут технологического процесса сформирован не полностью, то управление передается на блок Д3; если предварительный маршрут сформирован полностью, то блоком Е3 осуществляется выбор типовых технологических операций объекта производства.

10. Блоки F3 и F4 осуществляют формирование технического задания на разработку недостающих СТО.

11. В блоке Е4 осуществляется техническое нормирование выбранных на предыдущем этапе типовых технологических операций и технологических операций, содержащихся в окончательной модели технологического маршрута.

12. Блоки С4 и В4 осуществляют оптимизацию выбора технологических операций по признаку минимальной трудоемкости выполнения.

13. На следующем этапе формируется модель технологических операций (блок А4). Она формируется как упорядоченный массив кодовых чисел технологических переходов.





14. Блоки С4-А4 реализуют третий уровень многоуровневого синтеза технологических процессов. Блок В5 осуществляет завершающий этап второго уровня проектирования технологических процессов, формируя окончательную модель маршрутного ТП.

В блоке С5 происходит занесение сформированной модели маршрутного ТП в одноименный массив.

15. Блоки Д4 и А5 предназначены для ускорения процесса проектирования по методу типизации.

16. Блоки Д5 и Е5 формируют текстовую документацию.

17. Блоки F 5, F 6, E6, Д6 и С6 формируют выходные массивы информации.

18. На заключительном этапе (блок В6) производится выдача на печать текстовой документации.

## 2. АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ РАБОТ ПО РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ АПТП

В настоящее время решение проблемы АПТП ведется по четырем основным направлениям. Первое - автоматизация проектирования отдельных составных частей ТП или вспомогательных задач; определение оптимальных режимов резания, расчет размерных цепей и т.д. Решение этих отдельных, узких и специфических задач связано как правило с рядом упрощений и допущений, сделанных в условиях соответствующей постановки. Эти упрощения и допущения позволяют создать более простые и работоспособные алгоритмы, однако делают неприемлемым использование результатов решения для других задач, связанных с рассматриваемой. Решение отдельных задач без учета их связей в конечном итоге приведет к огромным затратам времени при попытке совмещения этих задач. Однако анализ "частных" задач позволяет уточнить информационные потоки всей проблемы АПТП.

Во втором направлении используется принцип типизации. Работы здесь базируются на создании классификаторов деталей, поверхностей, типовых технологических операций, типовых технологических процессов, директивных технологий, комплексных технологических процессов. На основании этих данных строятся машинные библиотеки, содержащие запись ТП или отдельных его частей. В этом случае по установленным разработчиками правилам в соответствии с классом деталей, поверхностей и другой информацией ЭВМ осуществляет печать необходимых

данных, хранящихся в библиотеке. Основной недостаток этого направления в том, что классификаторы, используемые в качестве основного средства типизации производственных процессов разработки, строятся на основе субъективных оценок. Именно субъективизм приводит к тому, что классификаторы, директивные технологии и другие данные, а также в соответствии с ними построенные алгоритмы успешно действуют только на одном предприятии. При попытке применить их на другом предприятии, порой выпускающем ту же продукцию и имеющем те же средства производства, они полностью теряют смысл. Принцип типизации мог бы найти воплощение, если бы создавались такие классификаторы деталей, технологических операций и других данных, которые основывались на определении объективных параметров технологической науки и установлении законов их связи.

Третье направление включает в себя решение с помощью ЭВМ задач проектирования ТП, которое осуществляется для деталей определенного класса при последующем нахождении скрытых связей между элементами технологии и законов их функционирования. Это, в конечном счете, ведет к выявлению общих законов технологического проектирования и построению универсальной (для любых классов деталей) автоматизированной системы. Таким образом, отправляясь от ведущего частного случая, мы находим общее решение с помощью суперпозиции частных случаев. Успех использования этого метода в огромной степени зависит от изобретательности разработчика, от его умения увидеть то общее, что присуще технологическим процессам изготовления разных по своим свойствам деталей, от его умения вовремя заметить ошибки, чтобы не доводить работу до получения негативного результата.

Решение задач в этих трех направлениях базируется на распространенной в настоящее время методике записи на языке ЭВМ существующих (неформализованных или слабо формализованных) условий ТПП. Технологическое проектирование в традиционном описательном изложении не содержит данных о методах проектирования ТП, которые можно было представить математическими операциями, реализуемыми в виде программ для ЭВМ. Кроме того, выбор последовательности действий и средств для изготовления детали не может быть выведен математическим образом на основании исходных данных.

Четвертое направление связано с выявлением общих технологических законов, с построением на базе известной эмпирики технологической науки и с ее дедуктивной интерпретацией. Это

направление открывает широкие возможности для применения ЭВМ в технологии. Так, построенная аксиоматическая теория проектирования позволяет установить законы и правила алгоритмизации, создать алгоритмическую структуру, обеспечивающую решение задачи технологического направления с помощью ЭВМ для деталей любого класса.

Решение любой задачи с помощью ЭВМ требует наличия аналитических (либо иных, но количественных, а не качественных) зависимостей. Поэтому для осуществления автоматизации технологического проектирования с помощью ЭВМ необходимо провести формализацию технологии, т.е. провести замену содержательных предложений формулами.

Формализация задачи превращает технологическое проектирование из процесса рассуждений и построения аналогий в процесс строгого расчета. При этом форма образования ТП и его составных элементов может быть выражена с помощью аппарата математической логики; содержание ТП, характеризуемое рядом свойств объектов технологии, — средствами теории множеств, качественные отношения технологической науки — количественными зависимостями с помощью логических функций. В последнее время для решения трудноформализуемых задач широкое развитие приобретают структурно-лингвистические (семiotические) методы моделирования, в частности аппарат ситуационного управления, предполагающий построение моделей в виде сетей с семантикой. Существенным для функционирования таких моделей является не выбор вариантов из определенного числа возможных, а проблема формирования того или иного варианта на основе построения структур проблемных ситуаций (см. раздел 4).

### 3. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ (САПР-ТЕХНОЛОГ)

Как инженерный инструмент САПР часто ассоциируется с некоторой вычислительной системой, хотя это не совсем так. Вычислительная система (ВС) является одним из обеспечений САПР (техническим обеспечением). Все существующие методы применения ВС в проектировании можно классифицировать следующим образом: инженерные расчеты; имитационное моделирование; машинно-ориентированные системы проектирования; системы проектирования с автоматизированными подсистемами; системы автоматизированного проектирования. В целом САПР — это результат проведения множества организационно-технических

мероприятий.

Под "САПР-технолог" понимают взаимодействие коллектива проектировщиков (специалистов) и комплекса средств автоматизации технологического проектирования, объединенных в рамках организационной структуры для автоматизированного технологического проектирования (АТП).

Комплекс средств АТП объединяет формальное описание процессов технологического проектирования, осуществляемое на базе математических методов, математическое, алгоритмическое, программное, лингвистическое, информационное и техническое обеспечение, удовлетворяющее определенным организационным требованиям.

"САПР-технолог" предназначена для получения проектной технологической документации в соответствии с заданными технико-экономическими показателями.

Основные цели "САПР-технолог" таковы: увеличение производительности труда в области технологического проектирования; повышение организационного и технического уровня служб ТПП; сокращение сроков и снижение трудоемкости технологического проектирования; оптимизация технологических процессов и СТО; улучшение качества технологической документации.

Основными задачами "САПР-технолог" являются: проектирование единичных технологических процессов (маршрутных и операционных); нормирование технологических процессов; проектирование специальных СТО; составление текстовой и графической технической документации; решение различных инженерно-технических задач; оперативное планирование и управление ТПП, осуществляемое в форме функционирования информационно-поисковых подсистем технологического назначения "Спецоснастка", "Техл. процесс", "Сетевое планирование и управление ТПП".

Основные принципы построения "САПР-технолог" таковы: стандартизация элементов системы, преемственность решений, совершенствование методов и средств технологического проектирования, взаимосвязь САПР с другими системами (АСТПП, АСУП, АСУ ТП); системный подход к САПР и возможность ее совершенствования.

Сущность системного подхода в первую очередь состоит в разделении системы и среды с учетом относительности такого разделения. Это значит, что на каждой ступени детализации под системой понимают ту часть сложного комплекса, поведение которой нас интересует, а под средой - все объекты,

внешние по отношению к рассматриваемой системе и взаимодействующие с ней. Среду для САПР образует класс проектируемых технологических процессов, средств технологического оснащения, технологических задач, конструкторско-технологическая база, нормативные документы и т.д. Разделение системы и среды, связанное с уровнем рассмотрения системы, есть специфическая системотехническая модель система-среда. Важными видами моделей являются также модели декомпозиции, координации, структуры и эффективности системы. Все они - следствие одного из главных принципов системного подхода - принципа иерархичности, который выдерживается как в организации системы и среды, так и в процессе принятия решений (иерархия задач, целей и решений).

Важная черта системного подхода -- обязательный прогноз результатов проектных решений и использование прогноза для покрытия дефицита информации в процессе принятия решений, особенно на ранних стадиях технологического проектирования.

Следует также отметить необходимость применения специфического математического аппарата: теории сложных систем, теорий полезности и исследования операций, общей алгебры системного программирования.

Системное программирование скорее следует отнести к специфике инженерного инструмента - к ВС, которая только и может создать качественную САПР в приемлемые сроки.

Процесс технологического проектирования в "САПР-технолог" представляет собой поэтапное решение задач проектирования с помощью процедур, объединяющих аналитические, алгоритмические, эвристические, стохастические, теоретико-множественные, логические, лингвистические, семиотические, графические методы.

Системный подход и возможность совершенствования обеспечиваются: системной адаптацией; возможностью системного развития; возможностью работы элементов системы в автономных режимах; единством информационной базы; ориентацией на новые задачи; непрерывностью разработки; этапностью разработки и внедрения.

В состав САПР должны входить функциональная и обеспечивающая части.

Функциональная часть осуществляет реализацию основных целевых задач проектирования ТП. Основные структурные элементы функциональной части - подсистемы, строящиеся по объектному принципу. Объектный принцип построения - ориентиро-

ванность подсистем на решение задач конкретного класса технологического проектирования.

Подсистемы разделяют на две группы: автоматизированное проектирование технологических процессов (АПТП) и автоматизированное проектирование средств технологического оснащения (АПСТО). Основными структурными элементами подсистем являются блоки ручной и машинной обработки информации. Блок — функционально законченная часть структурной схемы системы, реализующая частный алгоритм АПТП или АПСТО. В САПР устанавливаются три основных вида блоков машинной обработки информации:

- а) общего назначения — эти блоки реализуют задачи, идентичные для функциональных подсистем одного уровня иерархии;
- б) специального назначения — реализуют задачи, специфичные для конкретной функциональной подсистемы;
- в) служебного назначения — обеспечивают совместное функционирование блоков общего и специального назначения.

Функциональные подсистемы должны содержать такие обязательные блоки: анализа исходной информации; кодирования и ввода информации; информационно-поисковый; формирования текстовой и графической документации; управления; стыковки с другими автоматизированными системами.

Функциональные подсистемы АПТП содержат также блоки проектирования ТП, формирования заданий на проектирование СТО, нормирование ТП.

Функциональные подсистемы АПСТО содержат также блоки: выбора конструкций из типовых решений, выбора типовых элементов конструкций и компоновки конструкций из типовых элементов, доработки типовых элементов конструкций и конструкций в целом, формирования задания на проектирование ТП, изготовления СТО.

Структурная схема функциональной части САПР приведена на рис. 5.

Обеспечивающая часть САПР представляет материальное воплощение функциональной части САПР и реализует информационные процессы в системе.

В состав обеспечивающей части САПР входят информационное, математическое, лингвистическое, программное, техническое, организационное обеспечение.

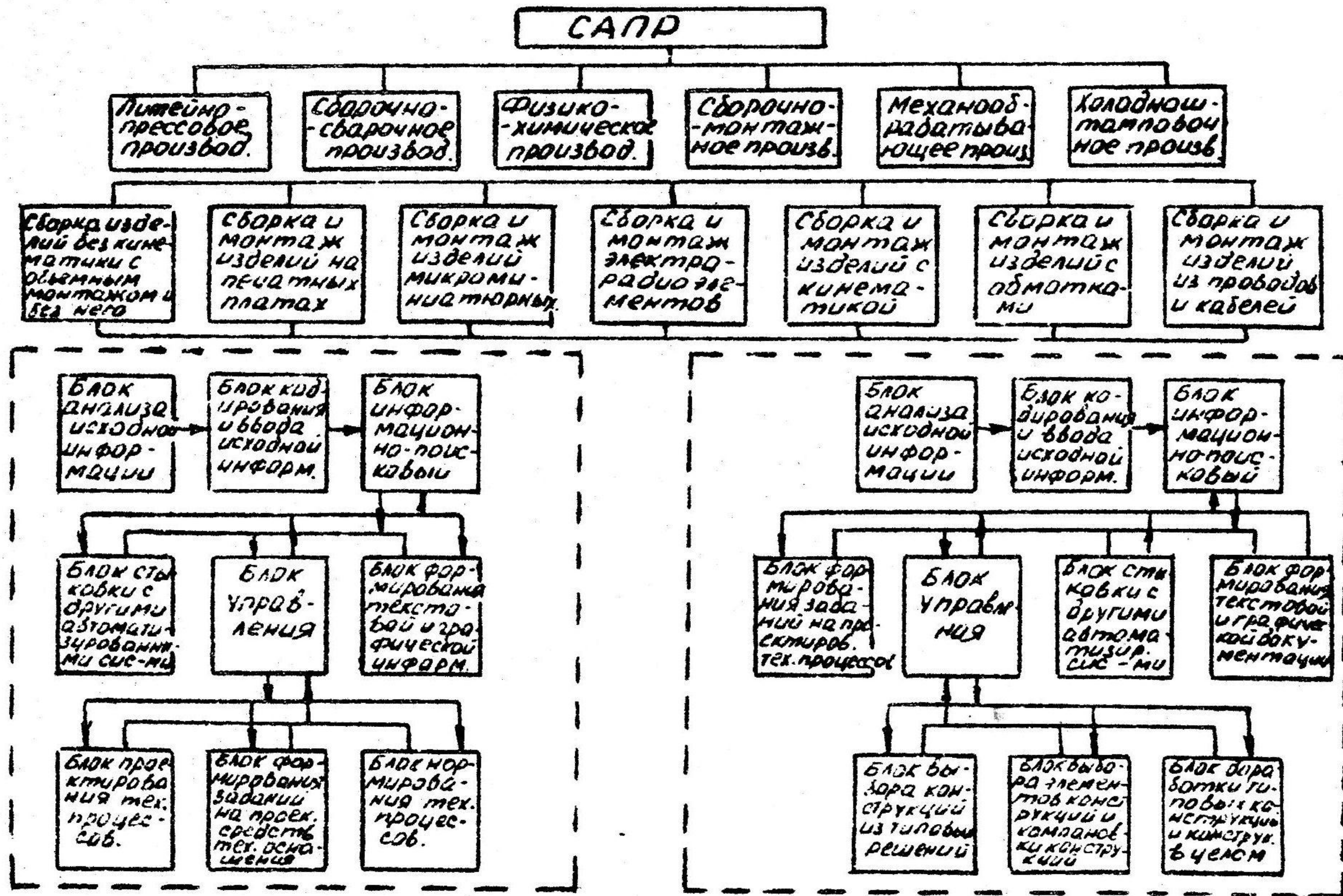


Рис. 5

Информационное обеспечение САПР-технолог предназначено для сбора, хранения, поиска, корректировки и автоматизированной обработки оперативной, нормативно-справочной и изменяющейся в результате проектирования информации.

Информационное обеспечение САПР-технолог включает массивы, документы, архив, банк данных, базу данных.

Документы, являющиеся первичными носителями информации в САПР, отражают информацию на естественном языке (полный комплект конструкторской документации на объект производства, техническое задание на проектирование СТО, бланк исходных данных (БИД) или карту-программу, содержащую исходную информацию конструктивно-технологического характера, которая необходима для обеспечения АТП).

В информационное обеспечение входят массивы: моделей объектов производства и технологических маршрутов их изготовления; типовых технологических решений, переходов, операций; оборудования с техническими характеристиками; оснастки; типовых конструкций и их элементов СТО; технико-экономических нормативов специального назначения, состав которых определяется при разработке функциональных подсистем.

Архив в САПР - это функционально-организационная компонента, обеспечивающая хранение и постоянную доступность ко всей информации, которая необходима для нормального функционирования системы.

Основная задача архива - накопление, хранение и выдача по требованию пользователей информации, необходимой для решения задач проектирования.

Все пользователи разбиваются на три категории:  
внешние, общающиеся с архивом в терминах привычного им языка;

проблемные, общающиеся с архивом с помощью языков архива;

системные, осведомленные о детальной структуре архива (физической и логической) и занимающиеся его эксплуатацией.

Задача накопления данных заключается в сборе, вводе и обновлении данных, размещении на физических носителях и организации их логической структуры. Организация данных должна обеспечивать как прямой доступ к необходимой информации, так и возможность ассоциативного доступа в процессе решения задач проектирования.

Хранение информации подразумевает возможность ее закрепления на физических носителях информации, представляю-



ших как единичные объекты, так и системы объектов. Возможны два вида хранения — актуальный (реальный) и виртуальный (вычисленный).

Задача поиска информации возможна лишь тогда, когда четко известно, где, на каком физическом носителе эта информация хранится, т.е. должна существовать некоторая справочная система, обеспечивающая доступ к информации.

Архив системы базируется на определенной совокупности технических средств (память) и математического обеспечения (так называемый банк данных). Обычно банк данных (БД) рассматривают как информационно-справочную систему, основное назначение которой состоит в накоплении и поддержании в рабочем состоянии информационной базы САПР.

Под БД будем понимать функционально организованную компоненту САПР, осуществляющую централизованное информационное обеспечение коллектива пользователей или совокупности решаемых в системе задач.

Для САПР характерно, что в качестве показателя БД выступают не только разработчики, но и программы, решающие конкретные проблемы проектирования. Такая особенность накладывает определенный отпечаток не только на организацию БД, но и на поисковые средства, процедуры поиска, языки манипулирования и описания данных. Структура банка данных приведена на рис. 6.

Физическая структура определяется техническим обеспечением САПР вместе со структурно-фиксированным математическим обеспечением.

Логическая структура разбивает весь архив на разделы, внутри которых хранятся программы и данные, необходимые для этих программ. Программы представляют собой структуры, состоящие из отдельных сегментов, которые связаны в сложную сеть взаимными ссылками и управлениями. Каждый сегмент использует определенные части данных, относящихся к программе. Сегменты состоят из отдельных команд, использующих отдельные элементы операндов. При этом часть программ и данных стандартны для любых процедур (неизменяемая часть), а часть модифицируется или заменяется от задачи к задаче (редактируется). Все области, используемые при проектировании конкретного объекта, составляют базу данных.

База данных — поименованная совокупность данных, компонентами которой могут быть любые структурные элементы, связанные между собой заданным образом.



Структурный элемент базы данных – неделимый элемент информационного массива "САПР-технолог".

Под базой данных некоторой программы понимается совокупность массивов входных, промежуточных и выходных данных, обрабатываемых при исполнении программы. База данных может быть автономной, ориентированной на одну программу. База данных, общая для большинства программ некоторой подсистемы САПР, называется центральной базой данных.

Процедуры и операнды, вводимые в базу из других областей архива, считаются его неизменяемой частью, а получаемые извне или выдаваемые во внешнюю среду – изменяемой.

Необходимо отметить, что как программы могут использовать различные данные из архива, так и одни и те же данные могут быть использованы различными процедурами. Собственные процедуры архива, обеспечивающие выполнение двух основных целей – интеграцию архива для мультиприложений и дифференциацию использования – в совокупности называют системой управления банком данных (СУБД). Над такой системой, в свою очередь, стоит администратор банка данных (АБД) и средства поддержания и пополнения данных, облегчающие поиск и организацию данных в базу тезауруса. Тезаурус, в отличие от простого архива-каталога, является совокупностью единиц информации со сложными связями между ними. Схема тезауруса приведена на рис. 7.

Редактирование архива связано с изменением в системах различных классификаций. Основные этапы ре-

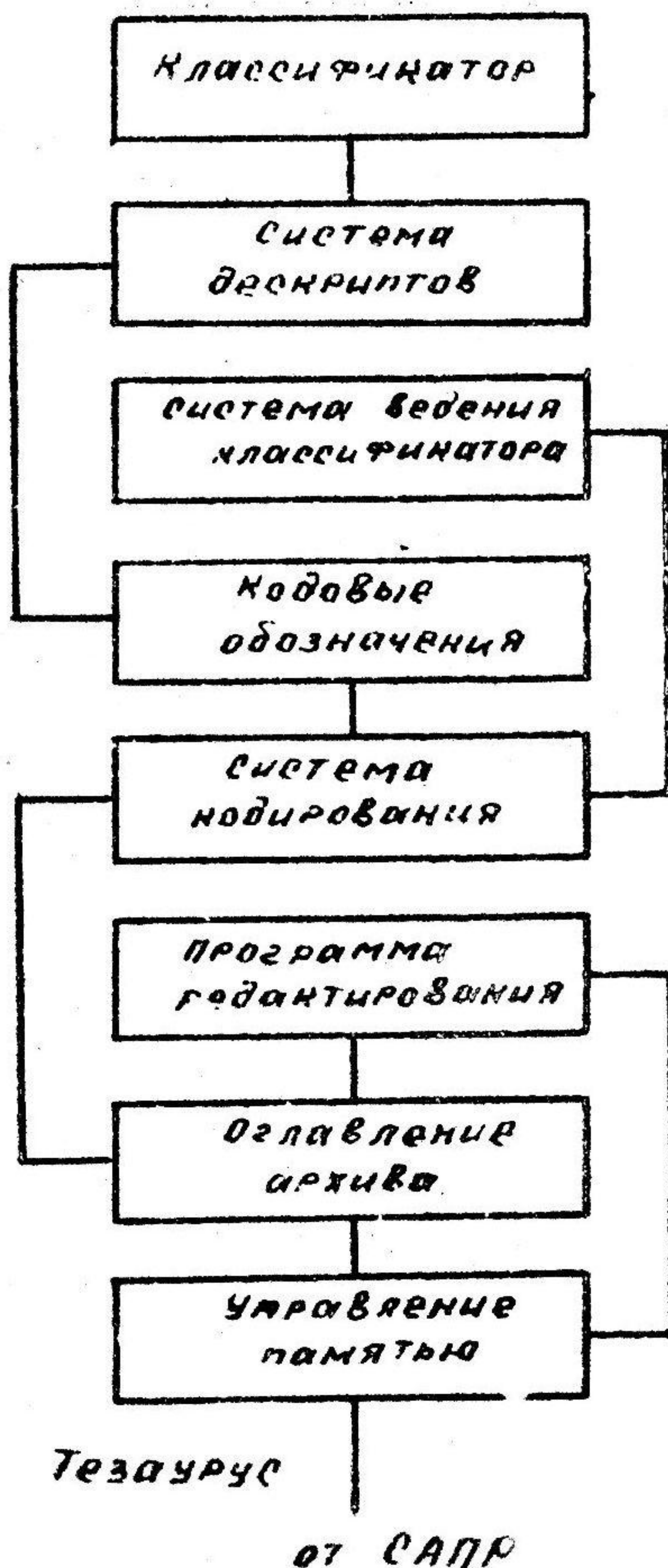


Рис. 7

дактирования архива: подготовка внешней памяти; пересылка информации; прием целевой информации; пополнение оглавления архива; изъятие информации, поглощаемой содержанием вновь поступающей информации; изменение тезауруса (кардинальное изменение элементной технологической и других баз, появление новых задач, изменение целей проектирования и т.п.); выдача информации по любому терминалу; составление и обновление нормативной части архива. Редактирование архива часто охватывает весь архив и связано с изменением классификационных определителей — дескрипторов.

Лингвистическое обеспечение САПР — это совокупность языков общения ЭВМ и инженера-пользователя. Лингвистическое обеспечение САПР представляет собой совокупность языков программирования и пользователя.

Языки программирования используются разработчиками САПР для записи программ. К этим языкам относятся универсальные алгоязыки АЛГОЛ-60, ФОРТРАН, ПЛ-1, а также, в первую очередь, языки Ассемблера, поскольку в задачах проектирования широко применяются специфические машинные операции (логические операции).

Языки пользователя служат для обмена информацией между инженером-пользователем и ЭВМ в процессе проектирования. В состав языка пользователя входят не только средства для передачи информации от человека к ЭВМ, но и средства для представления результатов исполнения программ на ЭВМ в удобном для инженера виде. Последние наиболее развиты в диалоговых языках, которые используются при функционировании САПР в интерактивном режиме.

Математическое обеспечение САПР — это математические методы, алгоритмы и модели для выполнения на ЭВМ проектных процедур и операций (см. раздел 4).

Программное обеспечение (ПО) САПР представляет собой собственно систему проектирования. Программное обеспечение состоит из общего ПО, которое необходимо для нормального функционирования САПР в целом, ее развития и обновления; специального ПО, ориентированного на заданный класс задач; средства связи для обеспечения режима диалога; средств для работы с архивом.

Обычно к общему ПО относят операционные системы (ОС) вычислительных машин, входящих в САПР (рис. 8), а к специальному ПО — пакет прикладных программ, т.е. программ, предназначенных для выполнения конкретных проектных процедур.

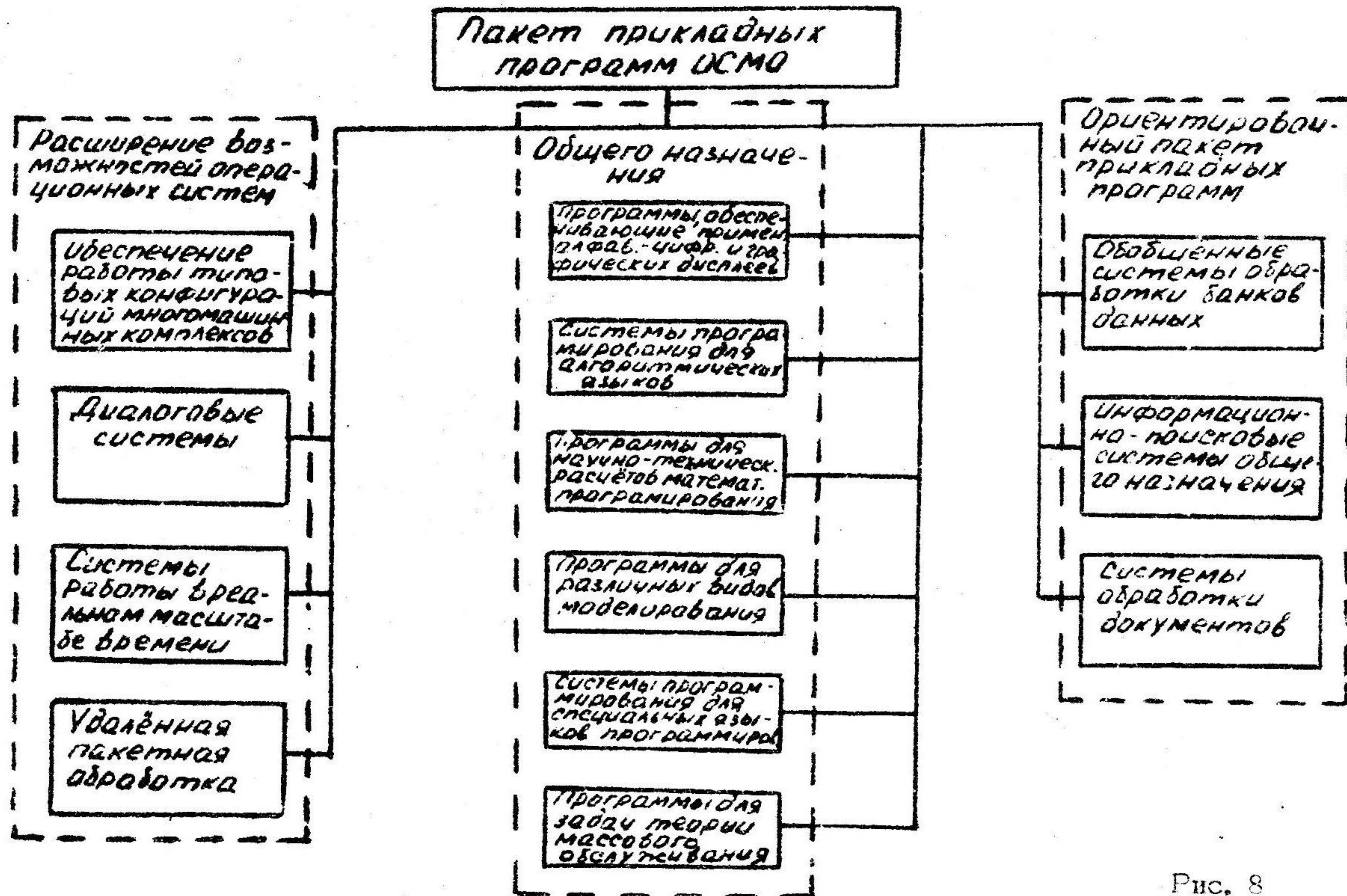


Рис. 8

В состав ПО САПР должны входить: средства автоматизации программирования, которые служат для расширения системы и организации режима диалога; средства для описания организации и хранения данных, в том числе для обслуживания работ с архивом; информационно-поисковая система (ИПС) для работы с архивом.

Ядро системы составляет группа трансляторов с языков различного уровня и диспетчер.

Другая часть ПО – ИПС (используемая ядром). Она включает программы поиска, редактирования оглавления, создания ассоциативных полей, организации текстов.

Третья группа – программы управления данными, памятью, выполнением директив.

Четвертая группа – метаалгоритм (библиотека программ проектирования), т.е. упорядоченная совокупность подпрограмм со многими входами и выходами. В некоторых случаях такой метаалгоритм является совокупностью моделей решения, которая представляет собой среду для существования автономных программ-модулей. Модульная структура позволяет в этом случае добиться большой компактности системы.

Основное требование к специальному ПО – единство представления и организации информации о проектируемом устройстве для всех задач проектирования, единый вид оформления специальных процедур и методов обращения к ним, а также единый вид выхода из них.

В состав специального ПО должны входить программы: управления оценкой эффективности проектных решений; декомпозиции объектов проектирования и алгоритмов; сборки моделей объектов из отдельных элементов проектирования; различного вида минимизации; преобразования структуры объектов проектирования; по видам производства; для ведения диалогового режима проектирования; проектирования специальной технологической оснастки, состоящей из управляющих программ и специальных программ для проектирования технологической оснастки по видам производства; обеспечения ИПС технологического профиля, предназначенного для функционирования в задачах "ТП", "Оснастка", "Сетевое планирование и управление технологической подготовкой производства (СПУ ГПП)".

Техническое обеспечение САПР предназначено для реализации технологического преобразования информации в ходе проектирования. Основу технического обеспечения САПР составляет ВС с развитыми терминалами (рис. 9). Для целей "САПР-

технолог" пригодны лишь вычислительные системы третьего поколения. Наличие мультиплексного и селекторного каналов позволяет подключить любое количество терминалов и соединить машины в единую систему.

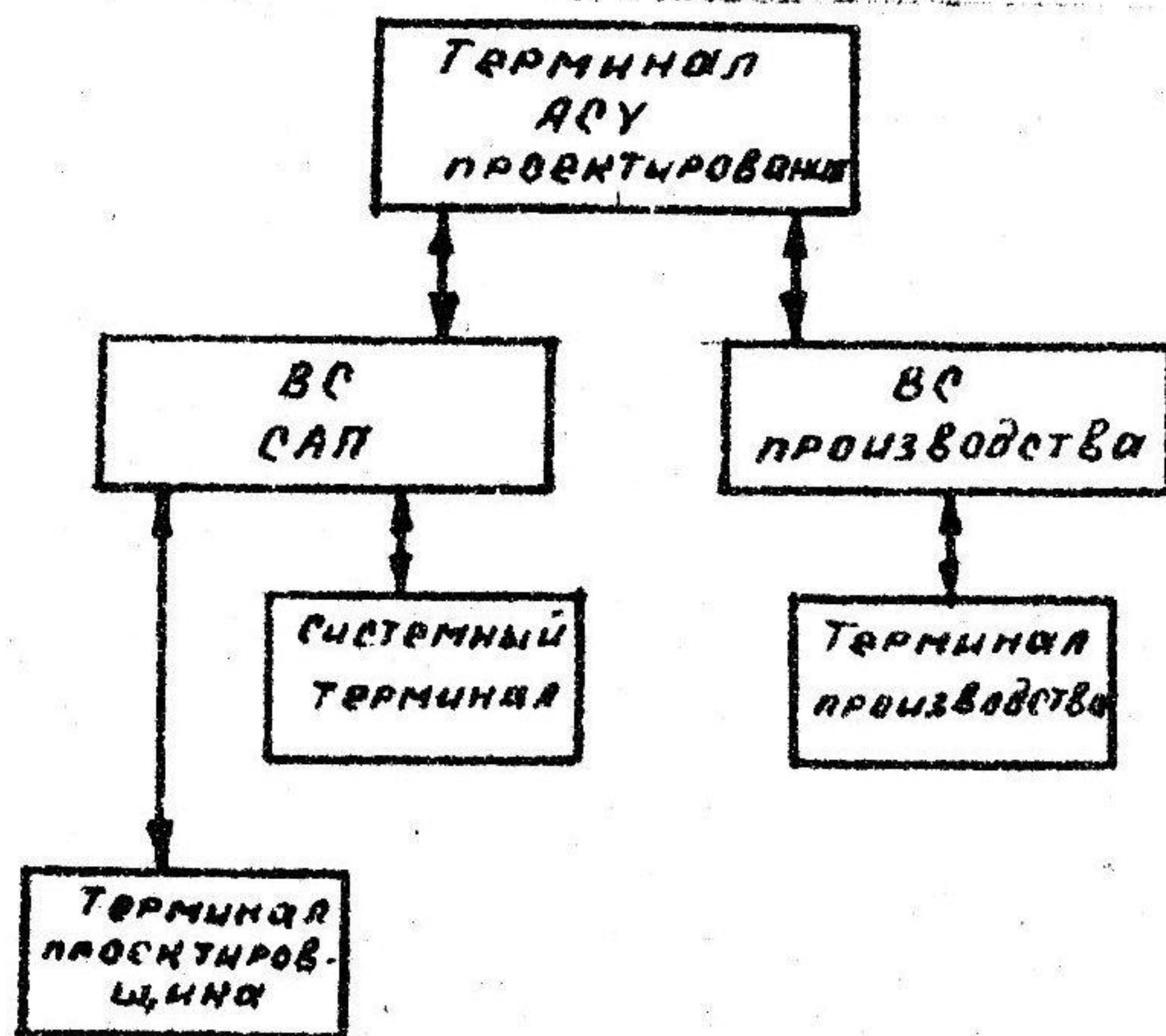


Рис. 9

В состав типового комплекса технических средств САПР входят устройства: подготовки информации; ввода с перфолент и перфокарт, с клавиатуры телетайпа, с прибора типа "световое перо", дисплей, ЭВМ; вывода информации; графического отображения информации; связи технолог-ЭВМ; размножения информации. Для обеспечения эффективной работы в САПР человека в некоторых случаях целесообразно подключать к ВС в качестве терминалов малые ЭВМ.

Методическое и организационное обеспечение устанавливает состав и правила функционирования средств САПР и подразделений проектной организации.

Структура методического и организационного обеспечения представлены соответственно на рис. 10 и 11. Такой современный инструмент, как САПР, требует соответствующей стратегии проектирования, основанной на высоком уровне формализации технологических задач и наличии хорошего организационного и методического обеспечения, которые органически входят в состав САПР.

Таким образом, можно сказать, что стратегия проектирования — это органическое единство инструмента и метода.

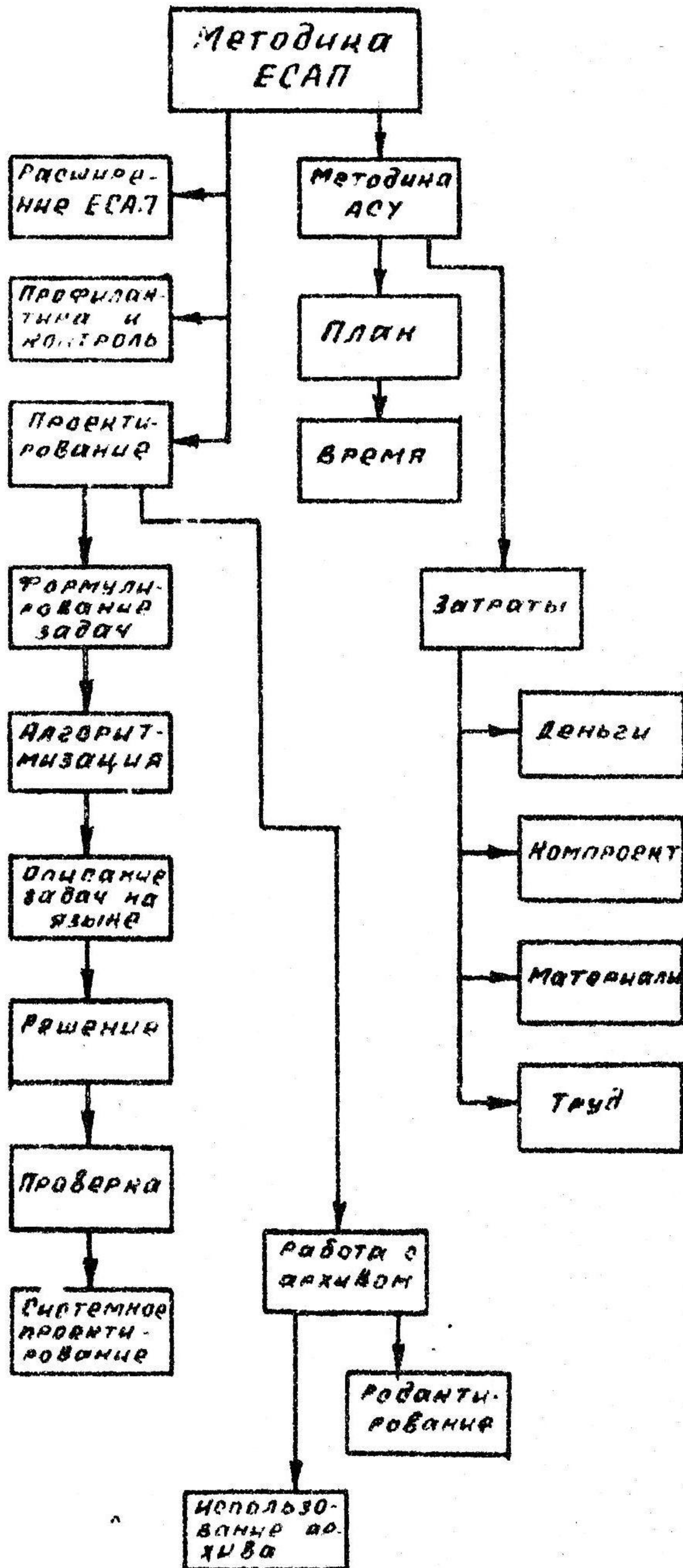


Рис. 10



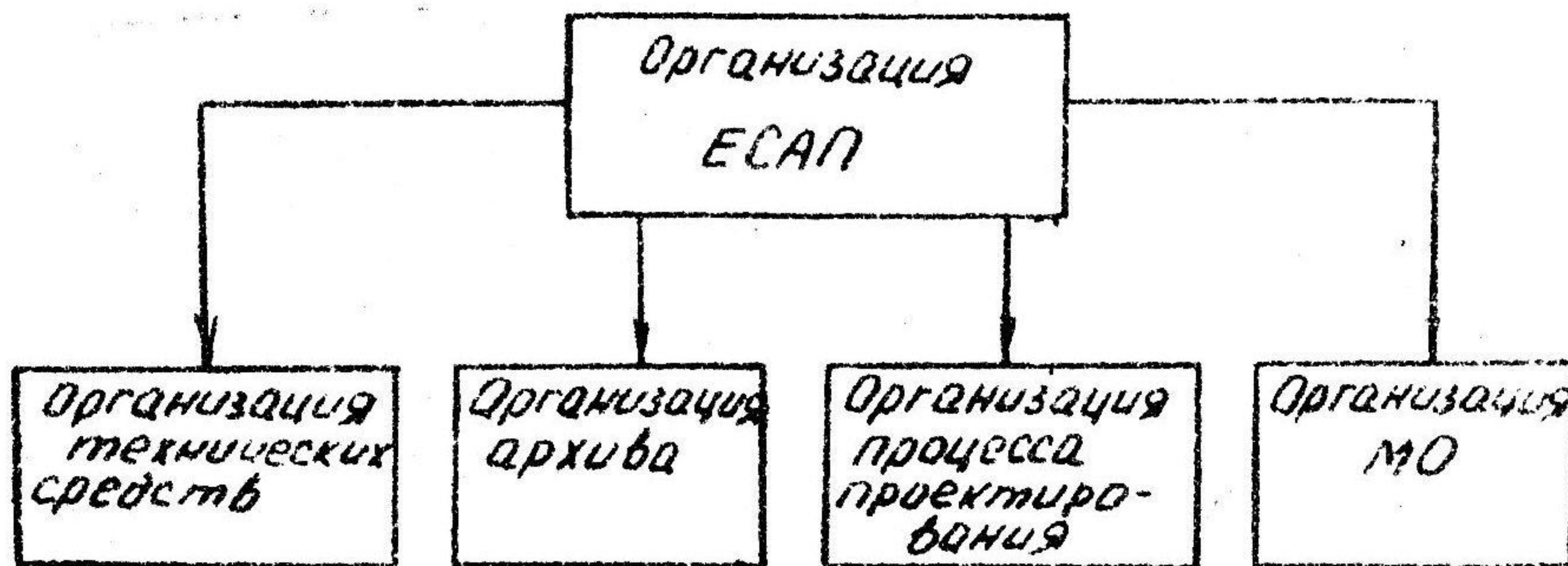


Рис. 11

#### 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ СИТУАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ АПТП

##### Продолжение системных аспекты задачи проектирования

В основе системных исследований лежат различные представления о структуре и функции объектов проектирования, к которым относятся изделия и технологические процессы их изготовления (обработки или сборки). Структура определяется как совокупность взаимосвязанных между собой элементов, образующих единое целое. Функция характеризует процесс установления данных взаимосвязей, который сопровождается качественным и количественным изменением свойств объекта.

Поскольку структура технологического процесса зависит от структуры изделия, необходимо прежде всего выработать нормы соответствия между выделяемыми составными частями обеих структур. Это соответствие строится на том, что в качестве первичных элементов технологического процесса принимают элементарные планы изготовления, которые относятся к первичным элементам изделия и определяются с помощью переходов, выполняемых в одной или нескольких операциях технологического процесса. Основу любого плана должна составлять вполне установившаяся "физическая" теория, отражающая сущность технологии.

Системные представления исследуемых объектов приводят к разработке логической теории проектирования, которую можно представить в виде соответствующей функциональной системы, обладающей иерархической структурой и отличающейся на-

личием двух предметных областей – конструкторской средой (Д) и технологической средой (Т). Такая система может быть названа объектом-комплексом КДТ.

Априорная модель данной системы может быть представлена в виде функционально-топологической структуры  $M_0$ , которая отражает глобальную стратегию проектирования и характеризует сложность общей решаемой задачи (рис. 12).

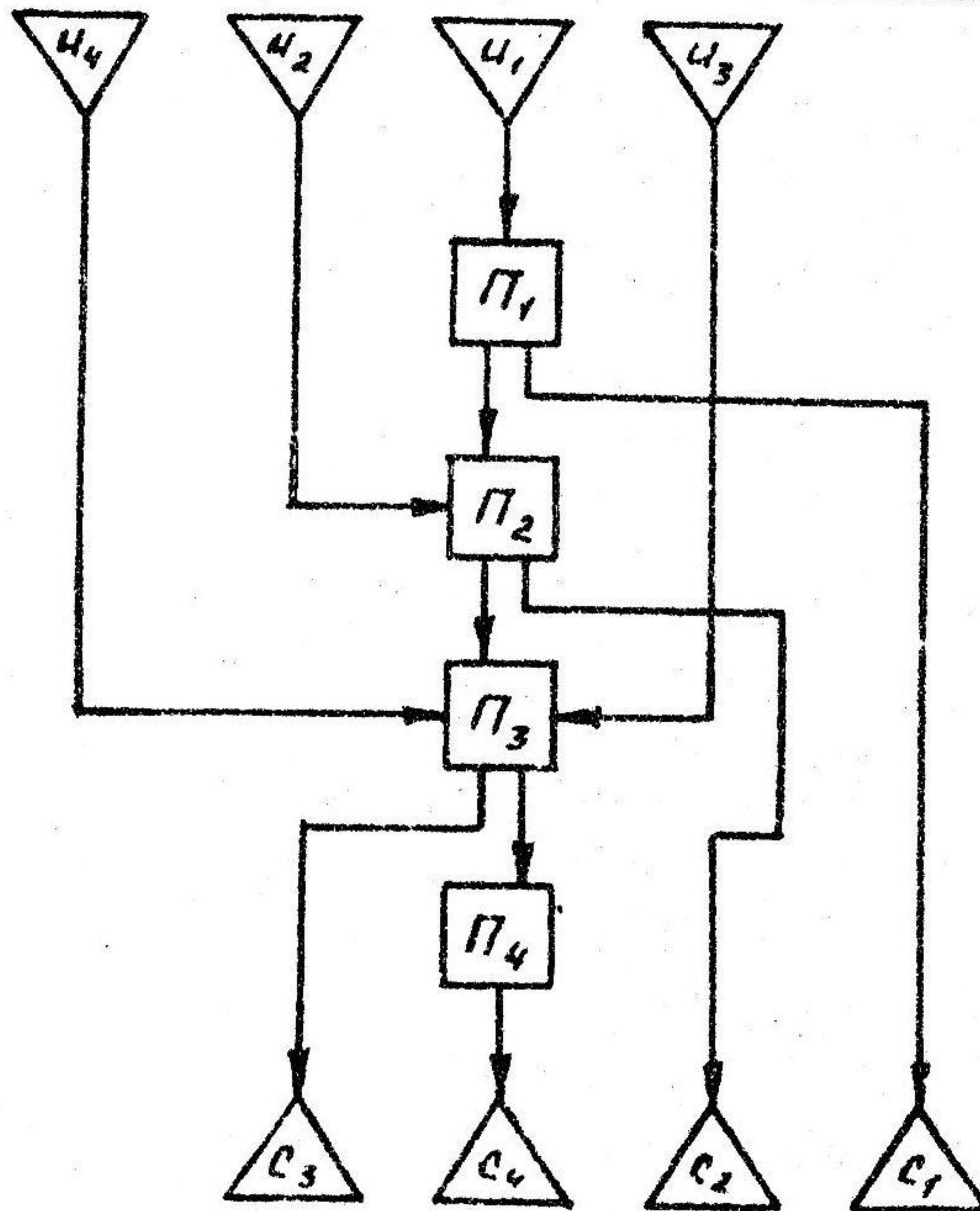


Рис. 12

Построение модели  $M_0$  основано на описании объекта КДТ в терминах элементарных подсистем, где каждая из подсистем может быть отнесена к одному из непересекающихся классов:

источники (И) – подсистемы выдачи информации;

преобразователи (П) – подсистемы приема, переработки и выдачи информации;

стоки (С) – подсистемы приема информации.

Внешние источники моделируют поступление исходных данных об элементах  $I_1$  конструкции изделия, элементарных планах  $I_2$  изготовления, технических средствах  $I_3$  и технологических

средствах  $I_4$  их реализации.

Под техническими средствами реализации подразумеваются используемые типы оборудования, оснастки и инструмент, а под технологическими средствами – технологические переходы и операции, частичная упорядоченность которых в пространстве определяется структурой так называемого обобщенного имплицитного комплексного маршрута (ИКМ) изготовления изделия. Структура ИКМ является разновидностью обобщенного эксплицитного комплексного маршрута (ЭКМ). Отличие состоит в том, что в ИКМ содержание каждой операции не имеет явно выраженного типового характера, а задается через перечень переходов, которые в принципе могут входить в состав данной операции. Подобная форма представления операций создает основу для реализации более гибкой и универсальной схемы проектирования, открытой для неограниченного расширения.

Преобразователи, изображенные на рис. 12, предназначены для порождения решений, обеспечивающих целенаправленное продвижение информации об изделии из исходного состояния в состояние реализованной конструкции, а затем, после выбора планов изготовления – в состояние спроектированного технологического процесса. В зависимости от влияния на процесс функционирования модели  $M_0$  все преобразователи делятся на активные и пассивные. Активные преобразователи оказывают непосредственное воздействие на изменение значений параметров и структуры заданного изделия, они могут иметь произвольное число входов и выходов. К активным преобразователям относятся:  $P_1$  – описание конструкции изделия;  $P_2$  – выбор элементарных планов изготовления;  $P_3$  – расчет параметров переходов в элементарных планах изготовления (выбор технических средств, определение выдерживаемых размеров и т.д.). Пассивные преобразователи выполняют роль задержек принимаемых решений на некоторое число шагов и имеют всегда только один вход и один выход. К ним можно отнести преобразователь  $P_4$ , обеспечивающий формирование общей структуры технологического процесса в виде соответствующей последовательности операций и переходов. Так как одни и те же операции и переходы могут принадлежать к различным планам изготовления, то появляется возможность с помощью имеющихся планов регулировать степень концентрации операций в проектируемом маршруте с учетом оценки вариантов совмещенного или отдельного изготовления отдельных элементов изделия.

Внешние стоки  $C_1 - C_4$  служат для устранения некоррект-

ностей и ошибок, возникающих в процессе проектирования. Они позволяют устанавливать логическую структуру решения до того, как определяются детальные элементы этого решения.

Таким образом, модель  $M_0$  дает возможность обнаружить принципы, объясняющие, каким образом должна происходить дальнейшая конкретизация функций проектирования (последнее уже связано с графовым представлением объекта КДТ).

### Формальная схема решения задачи

Пусть база данных автоматизированной системы проектирования располагает конечными множествами элементарных планов  $N$  изготовления, технологических  $B$  и технических  $C$  средств. Конкретная задача проектирования будет состоять в том, чтобы для заданной конструкции  $\bar{D}$  изделия выбрать такое подмножество допустимых элементарных планов  $\bar{N} \subset N$ , которое позволило бы при минимальном количестве технологических средств  $\bar{B} \subset B$  обеспечить минимальную стоимость изготовления с помощью технических средств  $\bar{C} \subset C$ .

Допустим, что для заданной конструкции  $\bar{D}$  изделия может быть спроектирован целый ряд технологических процессов изготовления из индексного множества  $L = \{l\}$ . Обозначим через  $\omega_k(l)$  стоимость  $k$ -й операции в составе  $l$ -го процесса, а через  $\bar{E}_{ij}$  - набор операций, включающих изготовление  $i$ -го элемента при выборе  $j$ -го элементарного плана,  $k = (\bar{i}, k^e)$ ,  $i = (\bar{i}, \bar{i})$ ,  $j = (\bar{j}, \bar{j})$ . Исходя из этого критерий минимальной стоимости изготовления изделия  $\bar{D}$  формулируем в следующем виде:

$$W(\bar{D}) = \min_{l \in L\{l\}} \sum_{k=1}^{k^e} \omega_k(l).$$

С учетом перечисленных выше условий критерий минимального количества затрачиваемых при этом технологических средств (операций) формулируем в таком виде:

$$Q(\bar{D}) = \min \Delta \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |\bar{E}_{ij}| \delta_{ij},$$

где  $\Delta$  - обозначение арифметического сложения отдельных наборов операций (напомним, что в теории множеств арифметическому сложению соответствует симметрическая разность множеств, т.е. дополнение их пересечения до объединения);

$|\bar{E}_{ij}|$  - мощность набора  $\bar{E}_{ij}$ ;

$\delta_{ij}$  - переменная, принимающая значения:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{- если } i\text{-й элемент изделия изготавливается по} \\ & j\text{-му плану;} \\ 0 & \text{- в противном случае,} \end{cases}$$

где

$$\sum_{j=1}^J \delta_{ij} = 1.$$

Условия проектирования задаются в виде ограничений на особенности описания конструкторской и технологической среды объекта КДТ.

С точки зрения общей теории принятия решений эта задача может быть отнесена к так называемым лексикографическим задачам нахождения оптимального пути на некотором гиперграфе по последовательно применяемым критериям, которые взаимно дополняют друг друга. В данном случае решение задачи обусловлено двумя стратегиями. Вначале необходимо определить наиболее предпочтительные варианты проектирования по критерию  $Q$ , а затем выбрать из наиболее предпочтительных вариантов тот, который является оптимальным по критерию  $W$ .

Рассмотрим особенности первой стратегии. Представим процесс проектирования в виде ориентированного графа  $G = (\bar{D}, \bar{H})$ , вершинам которого поставлены в соответствие номера  $\bar{d}_i$  элементов изделия  $\bar{D}$ , а дугам - планы изготовления  $h_{ij} \in \bar{H}$ , взвешиваемые наборами технологических операций  $\bar{E}_{ij} \subset \bar{B}$ .

Введем дополнительно еще две вершины: источник  $d_0$  и сток  $d_{**}$ , а также дуги, соединяющие их соответственно с первым и последним элементами изделия. В результате получим взвешенную сеть  $G'$ , в которой любой ориентированный путь будет означать определенный вариант проектирования или пересылки технологических средств из  $d_0$  в  $d_{**}$ . Пример изображения такой сети приведен на рис. 13.

Найденные компоненты оптимального решения данной задачи будут являться, в свою очередь, оптимальным и допустимым решением задачи о покрытии множества элементов  $\{\bar{d}_i\}$  множеством планов  $\{h_j\}$ .

Чтобы выявить все варианты оптимального решения, воспользуемся следующим алгоритмом.

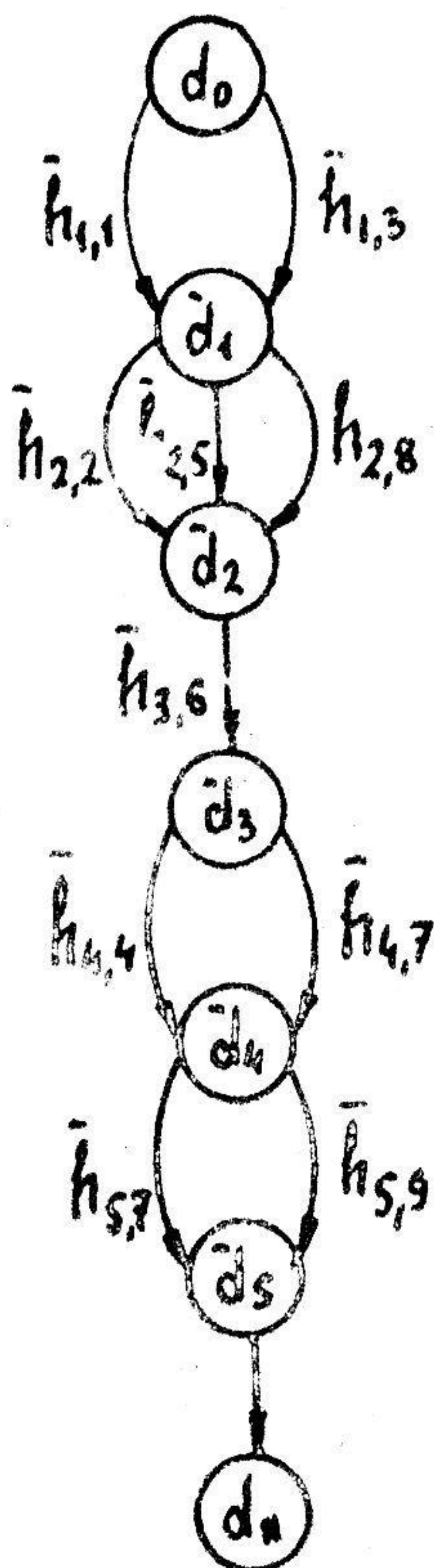


Рис. 18

Шаг 1. Принять набор технологических средств планов изготовления начальной вершины равным пустому множеству. Исходя из этого, присвоить начальной вершине вес 0.

Шаг 2. Просмотреть все дуги, начальные вершины которых имеют вес, а конечные нет. Определить набор планов изготовления  $\bar{H}_{i+1}$ , который пересылается в каждую из конечных вершин

$\bar{d}_{i+1}$  путем суммирования набора планов  $\bar{H}_i$ , фиксируемого в начальной вершине  $\bar{d}_i$ , и плана  $\bar{h}_{(i+1)j}$ , пересылаемого по дуге  $(\bar{d}_i, \bar{d}_{i+1})$ :

$$\bar{H}_{i+1} = \bar{H}_i \Delta \bar{h}_{(i+1)j}$$

Шаг 3. Определить составы технологических средств  $\bar{E}_{i+1}$  планов изготовления  $\bar{H}_{i+1}$ , фиксируемых в конечных вершинах  $\bar{d}_{i+1}$  по каждому из допустимых направлений:

$$\bar{E}_{i+1} = \bar{E}_i \Delta \bar{E}_{(i+1)j}$$

Шаг 4. Присвоить конечным вершинам веса:

$$Q_{i+1} = |\bar{E}_i \Delta \bar{E}_{(i+1)j}|$$

Выбрать конечную вершину с наименьшим весом и отметить план  $\bar{h}_{(i+1)j}$  стрелкой. Если таких вершин оказалось несколько, то выбрать любую из них. Вернуться к шагу 2, повторяя описанные выше действия до тех пор, пока не будет построено дерево всех допустимых путей, конечным вершинам которых присвоены наименьшие веса.

Обратимся к практическому примеру построения такого дерева, используя сеть, представленную на рис. 18.

Допустим, что планы изготовления  $h_j$  выражаются через следующие наборы  $E_j$  технологических операций:

$$E_1 = (B_1); E_2 = (B_5, B_6); E_3 = (B_1, B_3); E_4 = (B_5);$$

$$E_5 = (B_1, B_2, B_6); E_6 = (B_6); E_7 = (B_2, B_6);$$

$$E_8 = (B_3, B_5, B_7); E_9 = (B_1, B_5, B_6).$$

На шаге 1 имеем:  $\bar{H}_0 = \emptyset; \bar{E}_0 = \emptyset; Q_0 = 0.$

На шаге 2 получим:  $\bar{H}_1 = \bar{H}_0 \Delta \bar{h}_{1,1} = (\bar{h}_{1,1});$   
 $\bar{H}_1 = \bar{H}_0 \Delta \bar{h}_{1,3} = (\bar{h}_{1,3}).$

На шаге 3 определяем наборы:

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_0 \Delta \bar{E}_{1,1} = (B_1);$$

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_0 \Delta \bar{E}_{1,3} = (B_1, B_3).$$

На шаге 4 определяем веса:

$$Q_1 = |(B_1)| = 1; Q_1 = |(B_1, B_3)| = 2.$$

Сравнивая величины 1 и 2, выбираем вершину  $\bar{d}_1$  с весом  $Q_1 = 1$  и отмечаем план  $h_{1,1}$  стрелкой:  $h_{1,1} \rightarrow$ .

Повторяя шаги 2-4, приходим к формированию наборов планов изготовления:

$$\bar{H}_2 = \bar{H}_1 \Delta \bar{h}_{2,2} = (\bar{h}_{1,1}; \bar{h}_{2,2});$$

$$\bar{H}_2 = \bar{H}_1 \Delta \bar{h}_{2,5} = (\bar{h}_{1,1}; \bar{h}_{2,5});$$

$$\bar{H}_2 = \bar{H}_1 \Delta \bar{h}_{2,8} = (\bar{h}_{1,1}; \bar{h}_{2,8}).$$

Веса указанных наборов планов изготовления выразятся так:

$$Q_2 = |\bar{E}_1 \Delta \bar{E}_{2,2}| = |(B_1) \Delta (B_5, B_6)| = 3;$$

$$Q_2 = |\bar{E}_1 \Delta \bar{E}_{2,5}| = |(B_1) \Delta (B_1, B_2, B_6)| = 3;$$

$$Q_2 = |\bar{E}_1 \Delta \bar{E}_{2,8}| = |(B_1) \Delta (B_3, B_5, B_7)| = 4.$$

Сравнивая теперь уже величины 2, 3 и 4, выбираем вершину  $\bar{d}_1$  с весом  $Q_1 = 2$ . Отмечаем план  $h_{1,3}$  стрелкой:

$h_{1,3} \rightarrow$ . Слова повторяем шаги 2-4. На этот раз фиксируем наборы, веса которых равны:

$$Q_2 = |\bar{E}_1 \Delta \bar{E}_{2,2}| = |(B_1, B_3) \Delta (B_5, B_6)| = 4;$$

$$Q_2 = |\bar{E}_1 \Delta \bar{E}_{2,5}| = |(B_1, B_3) \Delta (B_1, B_2, B_6)| = 4;$$

$$Q_2 = |\bar{E}_1 \Delta \bar{E}_{2,5}| = |(B_1, B_3) \Delta (B_1, B_5, B_4)| = 4.$$

В итоге выбираем вершину  $\bar{d}_2$  с весом  $Q_2 = 3$  и отмечаем планы  $\bar{h}_{2,2}$  и  $\bar{h}_{2,5}$  стрелками:  $\bar{h}_{1,1} \rightarrow \bar{h}_{2,2}$  и  $\bar{h}_{1,1} \rightarrow \bar{h}_{2,5}$ .

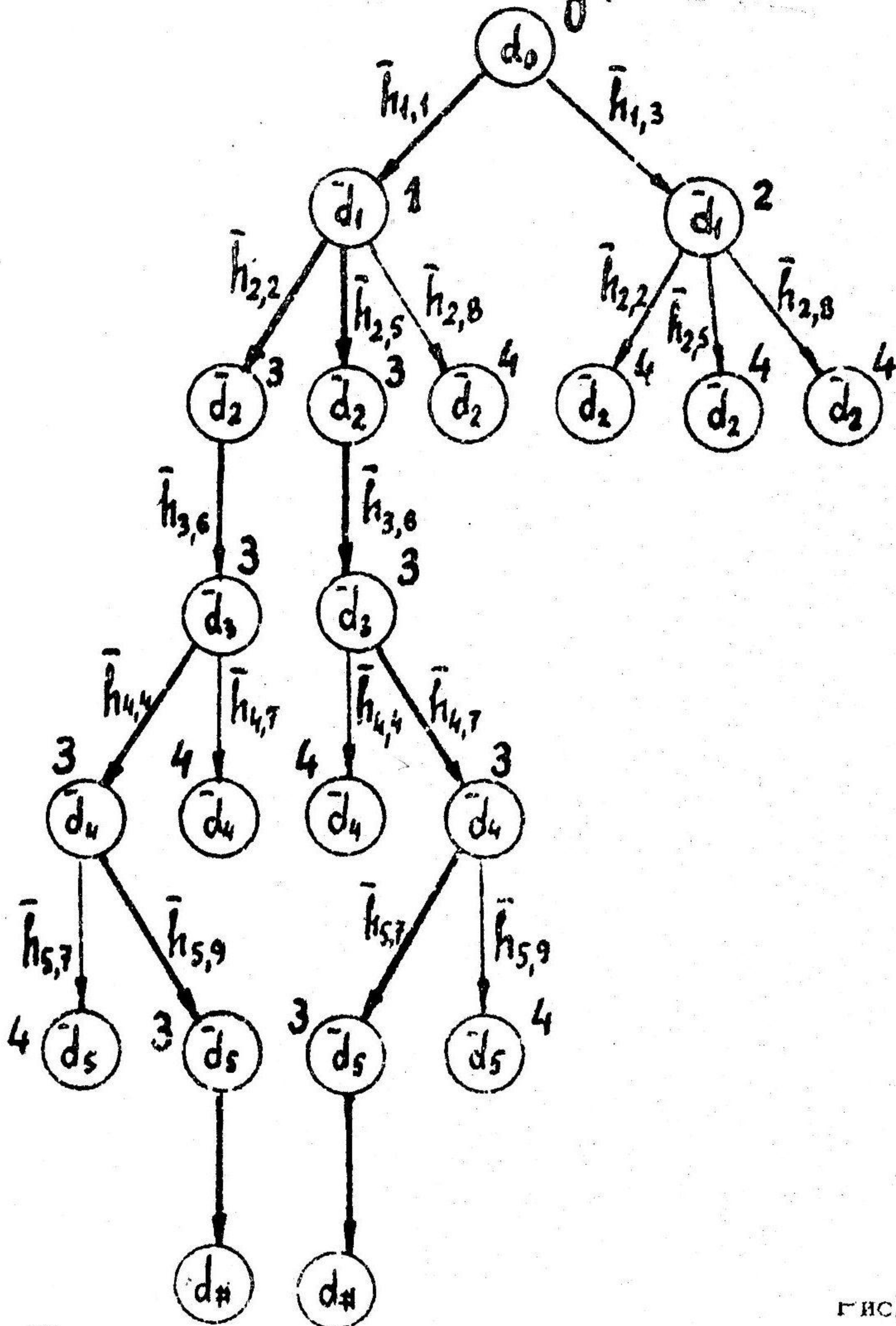


рис. 14



Продолжая процесс, окончательно получим два варианта оптимального решения (рис. 14):

$$\begin{aligned} \bar{h}_{1,1} &\rightarrow \bar{h}_{2,2} \rightarrow \bar{h}_{3,6} \rightarrow \bar{h}_{4,4} \rightarrow \bar{h}_{5,9} \rightarrow \# \\ \bar{h}_{1,1} &\rightarrow \bar{h}_{2,5} \rightarrow \bar{h}_{3,6} \rightarrow \bar{h}_{4,7} \rightarrow \bar{h}_{5,7} \rightarrow \# \end{aligned}$$

Дальнейшее совершенствование алгоритма связано с учетом приоритетности планов при изготовлении различных элементов изделия и применением метода ветвей и границ.

Решение задачи по критерию  $W$  основано на целом ряде промежуточных преобразований и вычислений, результатом которых является формирование структур и оценка технологической стоимости операций, выполняемых по каждому из сравниваемых вариантов проектирования.

Следует отметить, что в подобной системе выбор планов изготовления осуществляется из ограниченной совокупности альтернативных решений. Поэтому проектируемые ТП не могут считаться в строгом смысле оптимальными, несмотря на достигаемые минимальные значения критерия  $W$ . Этим самым утверждается положение о доминирующей роли человеческого фактора в процессе принятия решений.

#### Блок-схема функционирования системы

С точки зрения теории управления процесс проектирования представляет собой замкнутую систему, где объектом управления (объектом КДТ) является модель  $M_1$ , а в качестве управляющего устройства используется порождающая модель  $M_2$ , предназначенная для хранения знаний об исследуемом объекте. Если набор процедур модели  $M_2$  достаточно обширен и разнообразен, то можно ожидать, что такая система знаний за счет лишь небольших усилий, связанных с введением новой информации, может адаптироваться к новому объекту управления.

Процесс проектирования строится на основе сочетания принципов программного управления и управления с обратной связью — фиксации ответной реакции модели  $M_1$  на различные виды управляющих воздействий, отражающих целенаправленный процесс передачи и преобразования конструкторской и технологической информации.

Порождающая модель  $M_2$  имитирует мыслительную деятельность технолога и включает в свой состав следующие блоки:

$M_{22}^{(D)}, M_{22}^{(T)}$  - формирование структур проблемных ситуаций в соответствии с правилами  $\Gamma_{K\Gamma}^{(D)}, \Gamma_{K\Gamma}^{(T)}$  корреляционной грамматики модельного языка;

$M_{23}^{(D)}, M_{23}^{(T)}$  - классификация проблемных ситуаций в соответствии с правилами  $\Gamma_{OB}^{(D)}, \Gamma_{OB}^{(T)}$  обобщения;

$M_{21}^{(D)}, M_{21}^{(T)}$  - контроль ситуаций в соответствии с правилами  $\Gamma_{OC}^{(D)}, \Gamma_{OC}^{(T)}$  описания и коррекции.

Правила корреляционной грамматики по своему содержанию отражают специфику проектирования. Они подразделяются на группы, управляющие переработкой информации на отдельных участках вывода решений. Правило  $G_K^{K\Gamma}$  применимо к ситуации

$S(i)$ , подлежащей структурированию, если предикат применимости  $\Pi P_K$  данного правила принимает истинное значение, т.е. когда  $\Pi P_K [S(i)] = 1$ . В противном случае, когда

$\Pi P_K [S(i)] = 0$ , правило  $G_K^{K\Gamma}$  считается неприменимым к  $S(i)$ .

В правилах обобщения проблемных ситуаций используются процедуры, связанные с образованием понятий-классов, число которых должно быть соизмеримо с числом выделяемых в системе классов управляющих воздействий. Обобщение производится на основе распознавания смыслового содержания ситуаций, т.е. с учетом семантики отношений между элементами, что является отличительной особенностью ситуационного моделирования.

Правила коррекции позволяют контролировать правильность построения ситуаций из относительно произвольных совокупностей элементов конструкции и технологии. При этом используется аппарат правдоподобных рассуждений, обеспечивающий необходимый запас устойчивости системы в режиме ее функционирования. Намечаемое решение считается допустимым, если оно удовлетворяет, по крайней мере, трем требованиям: является непротиворечивым, целенаправленным и транзитивным. Это позволяет резко сократить число анализируемых вариантов проектных решений и тем самым повысить эффективность решения всей задачи проектирования.

Выделенные множества правил дают представление об основных процедурах, с помощью которых осуществляется взаимо-

действие моделей  $M_1$  и  $M_2$ . Связь между ними осуществляет модель  $M_3$  проектирования в соответствии с критерием  $Q$  минимизации технологических средств. В основе проектирования лежат правила трансформационной грамматики модельного языка.

Правила трансформационной грамматики обеспечивают возможность построения графа преобразования от обобщенного описания конструкторской ситуации к описанию технологических решений. Порядок выбора правил зависит от результатов проверки выполнения условий их применимости по наиболее значимым для ситуаций данного класса признакам. Указанный процесс, называемый процессом экстраполяции, состоит из конечного числа шагов и определяет прагматическую направленность технологического проектирования.

Таким образом, общая модель системы имеет вид

$$M = \langle M_0, M_1, M_2, M_3, M_4 \rangle,$$

где  $M_4$  — блок оптимизации результирующего решения в соответствии с критерием  $W$  минимальной себестоимости изготовления изделия.

Блок-схема функционирования системы показана на рис. 15. Входная информация об изделии поступает от объекта  $M_1^{(D)}$  к анализатору  $M_{21}^{(D)}$ , который определяет ее дальнейшее движение в системе. Если входное сообщение оказалось типовым, то оно передается в коррелятор  $M_{22}^{(D)}$  для получения описания в структурированном виде.

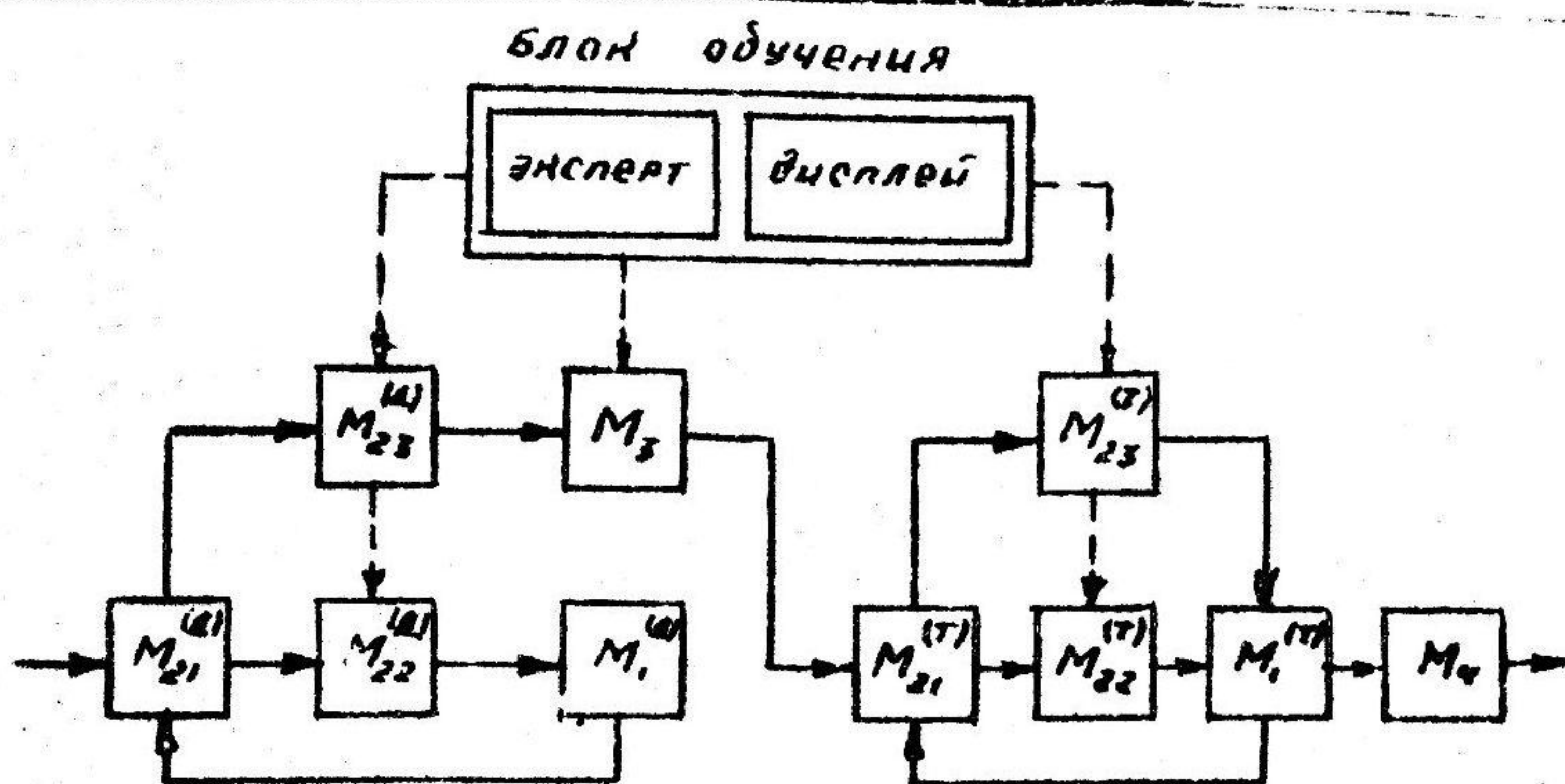


Рис. 15

При появлении на входе структурированной конструкторской ситуации, вызывающей необходимость формирования технологических проектных решений, в работу включается классификатор  $M_{23}^{(D)}$ , оценивающий принадлежность ситуации к существующим обобщенным классам описания конструкции. Найденные классы образуют область определения элементарных планов изготовления, для генерации которых предназначен экстраполятор  $M_3$ . В процессе экстраполяции комплексный план изготовления (КПИ) всего изделия последовательно выдается на объект  $M_1^{(T)}$ . При этом функционирует подсистема моделей  $M_2^{(T)}$ . Анализатор  $M_{21}^{(T)}$  контролирует допустимость выдаваемых на объект решений, так как в процессе экстраполяции невозможно априорно учесть все факторы, влияющие на ход проектирования. На основе поступающей информации коррелятор  $M_{22}^{(T)}$  производит структурирование элементарных планов изготовления. Возникшая ситуация через анализатор  $M_{21}^{(T)}$  пересылается в классификатор  $M_{23}^{(T)}$  для обобщения. Здесь с обобщенными классами описания технологии являются технологические операции, выполняемые в составе КПИ. При наличии нескольких альтернативных вариантов последовательностей изготовления изделия оптимизатор  $M_4$  выбирает наилучший вариант по критерию  $W$  с последующей выдачей результатов проектирования в форме технологической карты.

На этапе дообучения к работе системы подключаются эксперты, задача которых состоит не только в сообщении новых данных, служащих для пополнения и исправления существующей информационной базы, но и в проверке адекватности порожденных законов проектирования условиям данного производства.

Диалог с экспертами осуществляется через специальный блок обучения, имеющий информационные связи со всеми основными моделями системы (на рис. 15 эти связи изображены пунктирными линиями). Если поведение общей модели удовлетворяет предъявляемым требованиям, то ее построение можно считать законченным. С этого момента модель  $M$  может рассматриваться как автомат, способный выполнять определенные функции человека. Таким образом, замыкается цикл, способствующий переходу мыслительной деятельности человека от наглядно-действенных форм восприятия действительности к построению механизмов целесообразного поведения модели в той или иной среде.

## Анализ потоков информации

Построение информационной модели системы проектирования связано с разработкой методов обследования существующих на предприятии потоков информации. Основная задача обследования сводится к подготовке обучающей выборки и выделению из нее элементарных планов изготовления. Объем исходных данных здесь может быть достаточно велик. Поэтому разрабатываемые методы обследования должны быть ориентированы на возможность использования ЭВМ.

Обучающая выборка комплектуется из чертежей специально подобранных изделий и прилагаемых к ним описаний технологических процессов, в которых сосредоточены наиболее рациональные варианты решений и передовой опыт проектирования на предприятии. В условиях многономенклатурного мелкосерийного или единичного производства такими вариантами решений является типовая и индивидуальная технология. Однако содержательное описание технологической документации обычно изобилует большим количеством произвольных высказываний в одном и том же смысле, что затрудняет проведение анализа.

Чтобы избежать неоправданного терминологического разнообразия, необходимо унифицировать описание анализируемых текстов в терминах понятий языка описания ситуаций модели проектирования.

Дальнейшая обработка обучающей выборки осуществляется на основе применения методов системной и процедурной идентификации. Здесь под идентификацией понимается процесс присвоения информационным единицам описания уникальных имен (кодов).

При системной идентификации исходят из того, что идентифицируемые понятия образуют список, в котором каждый элемент соответствует понятию. После исключения из списка одинаковых понятий и порядковой нумерации оставшихся процесс идентификации заканчивается. Этот метод применяется при кодировании единиц номенклатуры оборудования, оснастки и инструмента.

Процедурная идентификация характеризуется тем, что вводится процедура предварительного упорядочения понятий, образующих один список. После получения упорядоченного списка приступают к порядковой нумерации понятий. Метод процедурной идентификации используется при кодировании технологических операций, переходов и связанных с ними элементарных

планов изготовления. Исходя из этого, в решении основной задачи обследования выделяют следующие этапы:

- 1) определение имен операций индивидуальных технологических маршрутов в составе обучающей выборки;
- 2) определение имен переходов, которые выполняются (или могут выполняться) в составе выделенных операций;
- 3) определение имен элементарных планов изготовления, содержащих выделенные переходы.

Остановимся на рассмотрении лишь первого этапа обследования, поскольку остальные этапы логически из него вытекают.

Определение имен операций связано с их упорядочением в процессе построения структуры ИКМ. Идентифицируются формулировки операций (дескрипторы), в терминах которых описываются все индивидуальные маршруты обучающей выборки. Процедура упорядочения базируется на последовательном объединении всех индивидуальных маршрутов в один список. В процессе объединения один из маршрутов принимается за очередной базовый (А), а другой - за очередной присоединяемый (В). В силу того, что индивидуальные маршруты почти всегда пересекаются в отдельных операциях, возникает задача формирования списка минимальной длины.

Будем считать, что процесс объединения протекает в пошаговом режиме. Причем за один шаг происходит выбор и включение в результирующий маршрут одной операции из А или из В. Для решения задачи воспользуемся методами теории расписаний.

Пусть каждая из  $n$  различных операций имеется в составе как базового, так и присоединяемого маршрутов. Обозначим через  $a_i, b_i$  моменты начала выбора  $i$ -й операции соответственно из А и В; через  $v_i, \omega_i$  - отрезки путей, определяющих после включения  $i$ -й операции количество последовательно выбираемых операций соответственно из А и В.

С учетом этого для каждого момента времени можно установить два логических условия выбора и включения операций:

- 1) две одинаковые операции, выбираемые из разных маршрутов, не могут иметь разных включений:

$$a_i - b_i \geq 1 \quad | \quad b_i - a_i \geq 1;$$

- 2) две одинаковые операции, выбираемые из одного маршрута, не могут иметь одного включения:

$$a_{i+1} - a_i \geq 1 \quad | \quad b_{i+1} - b_i \geq 1,$$

где знак | читается "или".

В результате решения задачи необходимо найти такую очередность выбора операций из А и В, которая минимизировала бы их общее число в результирующем маршруте.

Если  $v_i$  и  $w_i$  равны нулю (оптимальный режим выбора), то второе условие автоматически сводится к первому, т.е.

$a_{i+1} - a_i = b_{i+1} - b_i$  или  $b_{i+1} - b_i = a_{i+1} - a_i$ . Иначе говоря, имеется возможность минимизировать  $(a_{i+1} - b_i)$  и  $(b_{i+1} - b_i)$  за счет уменьшения числа включаемых операций без нарушения логических условий выбора. Эту возможность выразим следующей целевой функцией:

$$F_i = (a_{i+1} - a_i) (b_{i+1} - b_i) = (1 + v_i) (1 + w_i).$$

Следовательно, задача минимизации суммарного числа включаемых операций сводится к минимизации критерия:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = n + \sum_{i=1}^n (v_i + v_i w_i + w_i).$$

При этом F обращается в минимум, если моменты выбора операций из маршрута В упорядочены по максимальному возрастанию номеров повторений аналогичных операций в маршруте А.

Опишем эвристический алгоритм решения данной задачи.

1. Пронумеровать операции, входящие в состав маршрутов А и В, используя обозначения:

$$A = \langle i_k \rangle, \quad k = 1, 2, \dots, K;$$

$$B = \langle i_m \rangle, \quad m = 1, 2, \dots, M.$$

2. Каждой операции из В поставить в соответствие некоторую эквивалентную ей по дескриптивному обозначению операцию из А, образовав паросочетание:

$$\Pi_{m, k_{\min}} = (i_m, i_{k_{\min}}),$$

где  $i_{k_{\min}}$  - обозначение операции, имеющей минимальный порядковый номер в маршруте А;  $k_{\min} = 0, 1, 2, \dots$  (т.е. если аналогичные операции в А отсутствуют, то  $k_{\min} = 0$ ).

3. Для каждого паросочетания, принимаемого за вершину в некотором графе  $(\Pi, F)$ , определить максимальный путь

$\bar{\Pi}_{m, k_{\min}}$  до вершины  $\Pi_{M, k_M}$ :

$$\bar{\Pi}_{m, k_{\min}} = \sum_{j=k_{\min}^+}^{k_M} \Pi_{m^+, j}$$

где знак "+" - маркировка операций, принадлежавших таким паросочетаниям, в которых при  $m^+ > m$  имеет место  $k_{\min}^+ > k_{\min}$ .

4. На множестве паросочетаний отметить знаком "ж" элементы максимального суммарного пути  $\mathcal{P}^*$ , ведущего из вершины  $\Pi_{1,1}$  в вершину  $\Pi_{m,k_m}$ , проверяя выполнение условия

$$(\forall \Pi_{m^*, k_{min}^*}, \Pi_{m^*+1, k_{min}^*+1} \in \mathcal{P}^*): [(\mathcal{J}_{m^*, k_{min}^*} > \mathcal{J}_{m^*+1, k_{min}^*+1}) \rightarrow (\mathcal{J}_{m^*, k_{min}^*} < \mathcal{J}_{m^*+1, k_{min}^*+1})]$$

Иными словами, для любых двух паросочетаний  $\Pi_{m^*, k_{min}^*}$  и  $\Pi_{m^*+1, k_{min}^*+1}$ , входящих в множество  $\mathcal{P}^*$ , если

$$\mathcal{J}_{m^*, k_{min}^*} > \mathcal{J}_{m^*+1, k_{min}^*+1}, \text{ то } \Pi_{m^*, k_{min}^*} \text{ предшествует } \Pi_{m^*+1, k_{min}^*+1}.$$

5. Построить результирующий маршрут, используя на каждом шаге правила формирования паросочетаний  $\Pi_{m,k} \in \Pi$ , из операций, поочередно выбираемых из А и В:

$$1. (\forall \Pi_{m,k} \in \Pi)(\forall \Pi_{m^*, k_{min}^*} \in \mathcal{P}^*): \{[(k < k_{min}^*) \wedge (m < m^*)] \rightarrow \Pi_{m+1, k}\},$$

$$2. (\forall \Pi_{m,k} \in \Pi)(\forall \Pi_{m^*, k_{min}^*} \in \mathcal{P}^*): \{[(k < k_{min}^*) \wedge (m = m^*)] \rightarrow \Pi_{\lambda, k_{min}^*+1}\},$$

$$3. (\forall \Pi_{m,k} \in \Pi)(\forall \Pi_{m^*, k_{min}^*} \in \mathcal{P}^*): \{[(k = k_{min}^*) \wedge (m = m^*)] \rightarrow \Pi_{m, k}\},$$

где  $\lambda$  - знак пустого символа.

Обратимся к примеру построения последовательности паросочетаний операций на основе представленных ниже описаний маршрутов, где в качестве дескрипторов операций используются трехзначные коды:

U/A	011	083	034	061	112	070	037	051	111	141	122	150
K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U/B	011	021	034	070	037	036	081	070	111	150		
m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
$k_{min}$	1	0	3	6	7	0	0	6	9	12		
$\mathcal{J}_{m, k_{min}}$	6	6	5	3	2	3	3	2	1	0		
$\mathcal{P}^*$	ж		ж	ж	ж				ж	ж		



В результате получаем:  $\Pi^* = \langle \Pi_{1^*, 1^*}; \Pi_{3^*, 3^*}; \Pi_{4^*, 6^*}; \Pi_{5^*, 7^*}; \Pi_{9^*, 9^*}; \Pi_{10^*, 12^*} \rangle$ ,  
откуда следует:  $\Pi = \langle (1^*, 1^*), (2, \lambda), (\lambda, 2), (3^*, 3^*), (7, 4), (\lambda, 5), (4^*, 6^*), (5^*, 7^*), (6, \lambda), (7, \lambda), (8, \lambda), (7, 8), (9^*, 9^*), (\lambda, 10), (\lambda, 11), (10^*, 12^*) \rangle = \langle 011, 021, 033, 034, 061, 112, 070, 037, 036, 081, 070, 051, 111, 141, 122, 150 \rangle$ .

Здесь в скобках представлены номера операций, выбираемых из маршрутов А и В.

После описания элементов последовательности в терминах дескрипторов переходят к их нумерации. Полученный результирующий маршрут принимается за очередной базовый, к которому присоединяется следующий маршрут, и т.д.

Описанный метод обработки обучающей выборки в сочетании с другими методами обследования позволяет в дальнейшем оценить уровень технологической подготовки данного производства и перспективы ее развития, определить последовательность расширения сферы охвата по различным классам объектов, методам их изготовления и применяемым видам технических средств, осуществить сбор и оценку нормативной информации.

### Литература

1. ГОСТ 3.1109-73 ЕСТД. Процессы технологические. Основные термины и определения.
2. ГОСТ 14.402-76 ЕС ТПП. Автоматизированная система технологической подготовки производства. Состав и порядок разработки.
3. ГОСТ 22487-77. Автоматизированное проектирование. Термины и определения.
4. ГОСТ 22770-77. Автоматизированное проектирование. Организация технологического проектирования.
5. ГОСТ 22771-77. Автоматизированное проектирование. Требования к информационному обеспечению.

## Оглавление

Введение .....	3
1. Основные положения автоматизированного техно- логического проектирования .....	3
2. Анализ направлений работ по решению проблемы АПТП .....	15
3 Система автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР-технолог) .....	17
4. Теоретические основы разработки ситуационных моделей АПТП .....	31
Литература .....	47