

Министерство науки, высшей школы  
и технической политики Российской Федерации  
Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева

В.А.Захаров

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ГТД

Учебное пособие

Самара 1993

УДК 621.757.002

Автоматизированное проектирование технологического процесса сборки ГТД: Учеб. пособие / В. А. Захаров; Самар. аэрокосм. ун-т. Самара, 1993. 92 с. ISBN № 5-230 - 16939-7.

Рассмотрены вопросы автоматизированного проектирования технологических процессов сборки авиационных двигателей на примере ГТД. Даны анализ конструктивно-технологических свойств двигателей и методика математического моделирования этих свойств. Показана последовательность проектирования технологического процесса сборки: формирование принципиальной схемы сборки и маршрута технологического процесса. Показана совокупность типовых решений в технологическом процессе сборки и алгоритмов их выбора.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 13.02 технологических специализаций при изучении курса "Сборка двигателей", а также при курсовом и дипломном проектировании. Оно будет полезно инженерно-техническим работникам при обучении на ФПК. Выполнено на кафедре ЦДЛА.

Табл. 5. Ил. 28. Библиогр.: 8 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С.П.Королева

Рецензенты: В.В.Николаев, В.Г.Мосоулин

ISBN 5-230-16939-7

© Самарский государственный аэрокосмический университет, 1993

## В в е д е н и е

Технический прогресс в авиадвигателестроении определяется прежде всего сокращением сроков разработки конструкции изделий и проектирования технологических процессов, совершенствованием управления производством и организацией труда. Действующая в России система технологической подготовки производства обеспечивает широкое применение прогрессивных технологических процессов, оснастки и оборудования, средств механизации производственных процессов. Наиболее совершенной формой является автоматизированная система технологической подготовки производства, в которой осуществляется комплексная автоматизация инженерно-технических работ на базе современной вычислительной техники.

Задачи автоматизации проектирования технологических процессов с применением ЭВМ относятся к области автоматизации умственного труда человека. Теоретической базой решения этих задач является математическое моделирование конструкции изделия и производственных процессов. Исходными данными при проектировании технологических процессов являются сведения о конструкции изделия и входящих сборочных единиц, видах соединений, схемах сопряжений и базирования, размерных связях, технических требованиях и т.п. При автоматизированном проектировании технологических процессов вся эта информация должна быть представлена с помощью системы формальных правил в виде математической модели. Необходимой частью исходной информации являются также сведения о составе сборочного оборудования, имеющегося на предприятии, и его технических характеристиках, сборочных приспособлениях и инструменте. Для ввода этой информации в ЭВМ необходима формализация ее описания и разработка методов поиска необходимой информации в памяти машины и вывода ее в нужном виде.

Процесс автоматизированного проектирования технологических процессов сборки часто базируется на множестве типовых решений и алгоритмах их выбора. Многочисленные задачи принятия тех или иных про-

ектных решений сводится к анализу соответствий между конечным множеством возможных решений и конечным множеством значений условий, влияющих на выбор этих решений.

Для организации проектирования на базе типовых решений необходимо разработать совокупность типовых решений и алгоритмов их выбора, описать их формальным образом, организовать ввод, размещение в памяти ЭМ и обеспечить возможность оперативной работы с ними.

В данном учебном пособии основное внимание уделено изложению методов математического моделирования конструктивно-технологических свойств изделия типа ГТД, элементов производственной системы и процессов сборки, а также методов алгоритмизации проектирования, рассчитанных на использование ЭМ.

При изложении рассматриваемых вопросов предполагается, что читатель уже знаком с основами построения и использования автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР-ТН), включающими вопросы построения и использования автоматизированных систем, методы автоматизированного проектирования технологических процессов, общие методические положения по разработке САПР-ТН, алгоритмизации проектно-технологических задач, настройке и эксплуатации САПР-ТН и др.

В основу написания пособия положены теоретические разработки доктора технических наук В.В.Павлова, адаптированные с учетом конструктивных особенностей авиационных двигателей.

## 1. ИЗДЕЛИЕ И ЕГО СВОЙСТВА

### 1.1. Краткие сведения о конструктивных типах авиационных газотурбинных двигателей

Среди воздушно-реактивных двигателей, применяемых в авиации, наиболее широкое распространение получили газотурбинные двигатели (ГТД) [1]. По принципу действия авиационные ГТД образуют две основные группы: турбореактивные двигатели прямой реакции; газотурбинные двигатели непрямо́й реакции (турбовинтовые, турбовальные). К первой, наиболее многочисленной группе, относятся ГТД следующих видов:

турбореактивные двигатели одноконтурные (ТРД) и с форсажной камерой (ТРДФ);

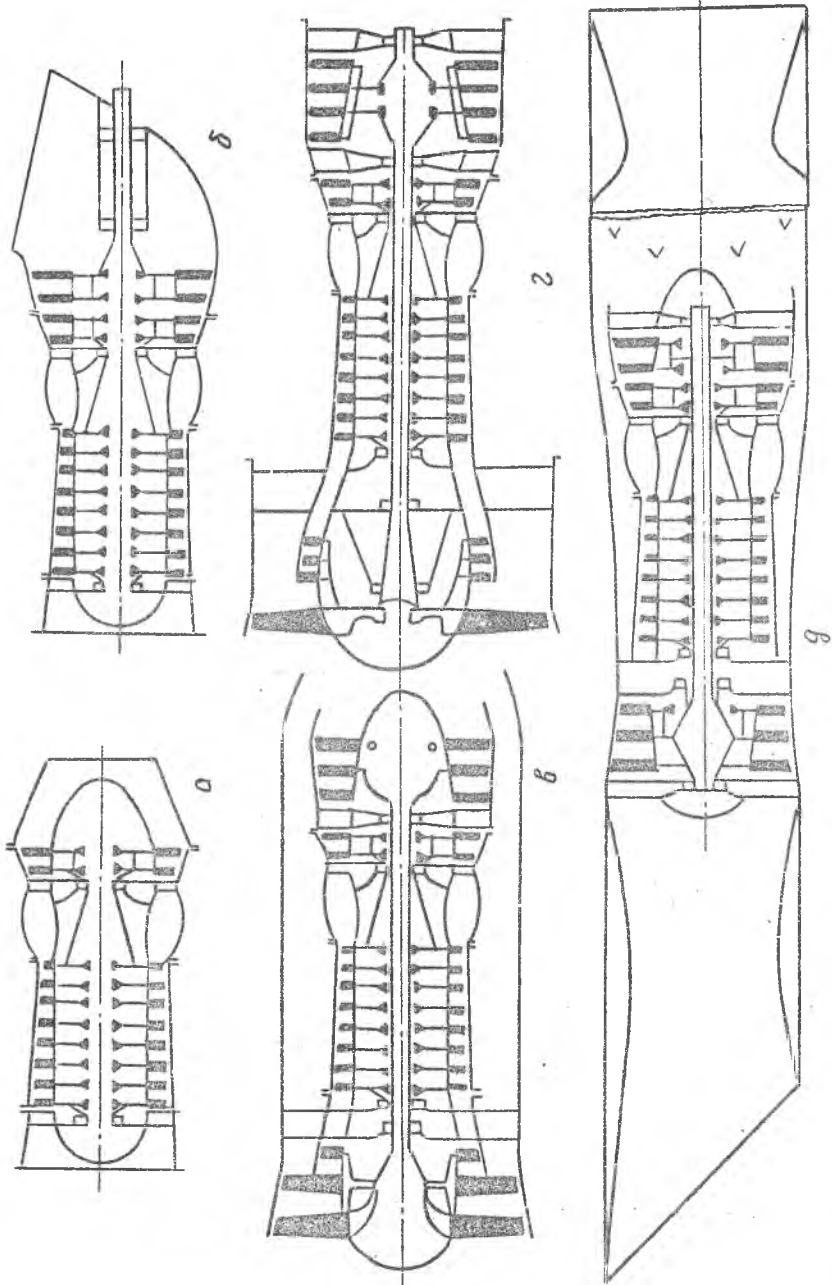
двухконтурные турбореактивные двигатели (ТРДД) и с форсажной камерой (ТРДФ).

Основные виды авиационных ГТД показаны на рис. 1.1.

Многообразие авиационных ГТД обусловлено, прежде всего, назначением самолета (вертолета), а также скоростью и высотой полета; дальностью и продолжительностью полета, экономичностью для соответствующих скоростей полета, уровнем шума и т.д.

Газотурбинные двигатели классифицируют также по принципу действия и назначению с учетом особенностей их основных составных частей, числа их роторов и других конструктивных признаков. Так, например, различают двигатели с осевым и центробежным компрессорами, с реверсом и без реверса тяги, регулируемым и нерегулируемым реактивным соплом и т.п.

К числу основных технических данных газотурбинных двигателей, отражающих уровень их технического совершенства, относятся как абсолютные величины (масса двигателя, тяга, расход топлива, габаритные размеры, ресурс, стоимость), так и удельные параметры (удельная тяга, удельный расход топлива, удельная масса, лобовая тяга, уровень



Р и с. 1.1. Конструктивные типы ГСД: а - ТРД; б - турбовальный ГСД; в - ТРДД с  $m = 3...4$ ; г - ТРДД с  $m \neq 6...8$ ; д - ТРДДФ

надежности и др.). Кроме того, к основным техническим данным двигателя относят ресурс, запасы газодинамической устойчивости, время запуска, время приемистости и т.п.

Наряду с перечисленными характеристиками большое значение приобретают в настоящее время производственная, эксплуатационная и ремонтная технологичность конструкции изделия (ТКИ). Так, требование к производственной технологичности конкретизируется величиной трудоемкости изготовления двигателя. Конструкция двигателя должна быть ориентирована на применение прогрессивных высокопроизводительных технологических методов изготовления деталей и сборки. Путь реализации этого требования начинается в процессе конструирования двигателя и предполагает совместное сотрудничество конструкторов и технологов. Многочисленные примеры показывают, что успешное решение задач повышения технических характеристик двигателя может быть достигнуто также за счет проведения технологических мероприятий.

Как показывают опытные данные, процесс создания современного двигателя с перспективными характеристиками в среднем превышает по времени процесс создания планера самолета примерно в 2 и более раза [1]. Это требует изыскания путей сокращения процесса создания двигателя как при его проектировании, так и при разработке технологического процесса его изготовления.

## 1.2. Способы представления информации о конструкции изделия и его элементах

При проектировании технологических процессов и производстве изделий машиностроения, в том числе и ИТД, вся конструкторская документация может быть представлена одним из двух способов. Первый - традиционный способ, когда вся конструкторская документация представляется на естественном языке в графическом, цифровом и алфавитно-цифровом виде, т.е. в виде сборочных и детальных чертежей, технических требований, текстового описания конструкции и т.п. Такой способ представления информации является вполне достаточным, если проектирование технологических процессов и производство изделия проводятся без применения средств вычислительной техники. В случае автоматизации инженерного труда с помощью ЭВМ рассмотренный способ представления информации об изделии не может быть использован. Это связано с тем, что при применении ЭВМ необходимо провести формализацию действий, выполняемых ранее инженером при ручном проектировании, ибо

только такие формализованные операции и процедуры могут быть переданы на исполнение ЭВМ.

Таким образом, возникает необходимость в использовании другого способа описания информации о конструкции изделия с использованием формализованных (искусственных) языков. Такие языки, хотя и сильно ограничены по словарному составу, зато обладают таким достоинством, как упрощенная грамматика и полная однозначность. С помощью формализованных языков разрабатывается математическая (расчетная) модель конструкции изделия, которая является аналогом моделируемого изделия, она включает минимум информации, необходимой и достаточной для решения конкретной задачи. Количество элементов расчетной модели, как правило, меньше, чем у моделируемого изделия, так как при разработке модели рассматриваются только свойства, существенно влияющие на решение конкретной задачи. Для сложных изделий могут разрабатываться несколько математических моделей, каждая из которых служит для решения отдельной задачи.

При автоматизации проектирования технологических процессов в системе автоматизированного проектирования (САПР) должно обеспечиваться системное единство всех ее компонентов и подсистем. Для реализации этого принципа создается математическое, информационное и программное обеспечение на основе единой системы математического моделирования объектов проектирования, обеспечивающей разработку взаимосвязанных моделей разнородных объектов (изделий, технологических процессов и др.). Для сборочных процессов наиболее удобными являются типовые математические модели системы ИСТРА [2,3,4,5,6]. В этой системе любой объект - конструкция изделия или оснастки, технологический процесс или процесс проектирования - моделируется одинаковыми средствами. Рассматриваемый объект  $A$  на любом уровне абстрагирования имеет с математической точки зрения один и тот же прообраз  $A$ , адекватный реальному объекту.

Абстрагирование при моделировании объекта осуществляется по двум направлениям - по глубине структурирования и по степени абстрагирования описания элементов и свойств объекта, а также отношений между ними. По глубине структурирования сложный объект рассматривается либо как неструктурированный, представляющий собой единое целое, либо как система взаимосвязанных элементов. По степени абстрагирования моделирование может осуществляться на уровнях теоретико-множественных (методами теории множеств и теории графов), на логическом уровне (методами математической логики) и на уровне количественных свойств и отношений. На каждом из этих уровней возможны опи-



сания объекта с различной степенью полноты и обобщения, соответствующие разным уровням абстрагирования.

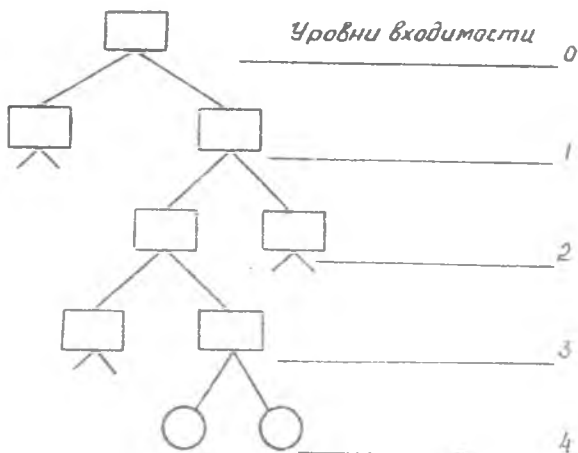
В математических моделях различают данные трех типов: данные об элементах самого объекта моделирования, данные о свойствах объекта и данные об отношениях между элементами и свойствами объекта. Одни и те же объекты, их реальные свойства и отношения рассматриваются либо как теоретико-множественные, либо как логические, либо как количественные величины и отношения. Переход от одного к другому уровню описания осуществляется регламентированными способами с помощью межуровневых отношений с указанием границ и условий перехода этих величин и отношений в другие.

### 1.3. Структура изделия, подлежащего сборке

При проектировании изделия решается задача по наилучшему обеспечению требований функционального назначения, производства и эксплуатации. В результате решения этой задачи определяется рациональное расчленение изделия на составные части – сборочные единицы и детали. Все эти части в конструкции изделия должны быть взаимосвязаны между собой, занимать относительно друг друга определенное положение, а их поверхности должны быть связаны размерами. Сопрягаясь друг с другом, они образуют различные соединения (болтовые, заклепочные, клеевые и др.).

Разделение конструкции изделия на составные части позволяет повысить технологичность конструкции, т.е. обеспечить технологическую преимущество конструкции на основе унификации, заимствование освоенных в производстве составных частей других изделий, удовлетворяющих заданным требованиям, и т.п. Степень расчленения изделия на составные части изображается с помощью структурной схемы, которая показывает состав и число уровней входимости его составных частей. Пример структурной схемы для условного изделия приведен на рис. 1.2. На этой схеме прямоугольниками обозначены сборочные единицы, а кружками – детали. Естественно, чем сложнее конструкция изделия, тем большее число уровней входимости имеется в структурной схеме. Изделия, представляющие собой авиационные газотурбинные двигатели, относятся к числу объектов, имеющих сложную многоуровневую иерархическую структуру. Так, приведенные на рис. 1.1 некоторые конструктивные схемы ГТД значительно различаются по своей структуре.

При моделировании многоуровневая иерархическая структура изделия А описывается в виде графа-дерева



Р и с. 1.2. Структурная схема условного изделия

$$\mathcal{G} = (A, D), \quad (1.1)$$

где множество вершин

$$A = (A, A_1^I, A_2^I, \dots, A_K^I, A_1^{II}, \dots, A_n^{II}, \dots, A_m^J) \quad (1.2)$$

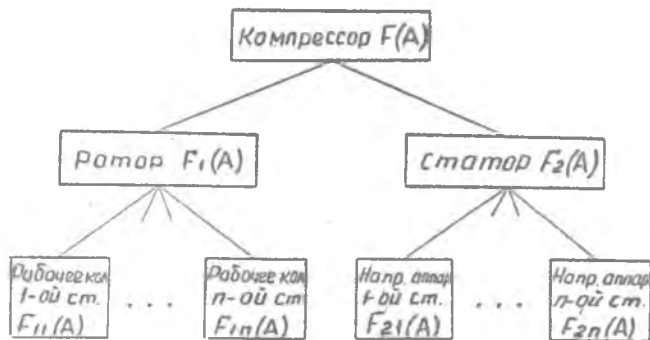
отражает состав элементов изделия, а состав дуг равен:

$$D \ni c_i(j) = \begin{cases} 1, & \text{если } A_i^J \ni A_j^{J-1}, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1.3)$$

Граф  $\mathcal{G}$  при составе дуг, определяемых выражением (1.3), характеризует декомпозицию (расчленение) объекта  $A$  на входящие в него структурные элементы более низших уровней. Висячие вершины этого графа представляют собой неделимые (моноконтные) элементы — детали  $a_i \in A$ .

Для двухуровневой структуры изделия состав элементов представляется множеством

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n). \quad (1.4)$$



Р и с. 1.3. Функциональная структура компрессора ГТД

Иерархическая структура изделия  $A$  или составных частей  $A_k$  может быть представлена в виде булевой матрицы, которую можно рассматривать как матрицу смежности вершин графа. Такая матрица имеет вид

$$\|c_{ij}\|_{A_k} = [A_k \times A_k], \quad (1.5)$$

где  $c_{ij} = 1$ , если взаимосвязь элементов  $A_i$  и  $A_j$  существует, и  $c_{ij} = 0$  в противном случае.

Более сложные структурные отношения между элементами описываются методами математической логики. На уровне логических отношений каждому множеству, булевой матрице или графу соответствуют наборы логических отношений  $R_i \in R^4$  между входящими в них элементами, представленными в виде логических переменных. Примером такого набора могут быть:

логические отношения вида

$$R_k(A) \rightarrow A = R^k(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$$

между  $A$  и элементами множества (1.4);

логические отношения вида

$$R_k(A) \rightarrow a_i = R^k(a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$$

между  $a_i \in A$  и другими элементами, входящими в состав множества  $a_i$ .

Помимо реальных элементов, в состав множества  $A$  может входить мнимый "пустой" элемент  $a_0$ , играющий служебную роль при моделировании.

#### 1.4. Конструктивно-технологические свойства изделия и отражение их в математических моделях

Кроме структуры изделия большое влияние на технологический процесс сборки оказывают конструктивно-технологические свойства, отличающиеся большим разнообразием. В системе математического моделирования ИСТРА для описания разнообразных конструктивно-технологических свойств изделия  $A$  введено единое формализованное понятие - контур  $F(A)$ , являющийся обобщением таких понятий, как свойство, признак, конструктивная характеристика, параметр и т.п.

По природе описываемых свойств все контуры разделяются на геометрические, физические, технико-экономические и др. Геометрические контуры характеризуют форму, взаимное расположение объектов в пространстве и ряд других свойств. Физические контуры характеризуют массу, механические, гидравлические, электрические и другие физические свойства изделия. Сюда могут быть отнесены и контуры, обусловленные специфическим назначением изделия (контуры герметизации, теплоизоляции, балансировки и т.п.). Технико-экономические контуры характеризуют трудовые и материальные затраты в проектировании, производстве и эксплуатации изделия, например, трудоемкость, себестоимость, цикл производства и другие.

Понятие контура может использоваться и для описания составных частей объекта, если эти части не рассматриваются как самостоятельные объекты. К числу таких составных частей в конструкции ГТД можно отнести: входное устройство, направляющие аппараты, диффузоры, сопловые аппараты; опоры роторов, уплотнения вращающихся валов; уплотнения неподвижных элементов гидрогазовых систем; разъемы и стыки корпусов; различные виды соединений деталей и сборочных единиц; различные виды зубчатых передач.

Кроме того, контуры разделяются на функциональные и технологические. Контуры, связанные с функциональным назначением элементов изделия в рабочем процессе, называются функциональными, а связанные со специфическими способами производства (сборки) - технологическими.

В структуре изделия могут быть сборочные единицы, которые, являясь составной частью изделия, не выполняют самостоятельной функции (например, корпус клапана с установленными резьбовыми шпильками) либо выполняют самостоятельную функцию (например, насос в отдельном корпусе).

Для пояснения понятия функционального контура рассмотрим, для примера, один из основных структурных элементов ГТД – компрессор. Его целевая функция  $Z_A$  оказывает большое влияние на весь процесс проектирования и производства. Структура компрессора А описывается схемой, изображенной на рис. 1.3. Отдельный элемент компрессора на уровне сборочной единицы  $A_i$ , как правило, не может реализовать целиком все функции  $Z_A$ . Однако подмножество элементов, образующих конструктивные контуры, реализует множество целевых функций так, чтобы

$$\bigcup_j^2 Z_{A_j} = Z_A.$$

Поскольку конструкция компрессора А обычно включает в себя одновременно и монолитные, и сборные функциональные элементы, то

$$\bigcup_{i,j}^N (Z_{a_i}, Z_{a_j}) = Z_A,$$

где  $N$  – общее количество функциональных элементов конструкции агрегата

(например, диффузор в одних конструкциях центробежного компрессора реализует свою функцию с помощью одной детали, полученной литьем, в других – с помощью группы деталей – сборочной единицы).

Функциональный контур при реализации конкретных задач рассматривается либо как теоретический, образованный совокупностью идеальных свойств, либо как реальный контур, образованный совокупностью свойств реальных элементов конструкции. Например, исполнительными звеньями компрессора являются ротор и статор. В свою очередь, исполнительными звеньями ротора являются рабочие колеса и валы. Исполнительными звеньями контура любого соединения, входящего в конструкцию компрессора, являются сопрягаемые части элементов конструкции и соединительные элементы: болты, винты, сварные швы и т.д.

Функциональные контуры подразделяются на основные, непосредственно определяющие заданные функции А, и вспомогательные, обеспечивающие существование основных контуров. Контуры, не влияющие на реализацию заданных функций А, называются свободными.

Таким образом, состав контуров изделия А на теоретико-множественном уровне представляется как множество

$$F(A) = (F_1, F_2, \dots, F_m). \quad (I.6)$$

Помимо реальных контуров, в состав  $F(A)$  может входить ишний "пустой" контур  $F_0$ , играющий служебную роль при моделировании. Если объект А состоит из элементов  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ , то множество контуров  $F(A)$  может быть расчленено на части, соответствующие отдельным элементам

$$F(a_i) \subseteq F(A),$$

причем

$$F(a_i) = (F_1(a_i), F_2(a_i), \dots, F_n(a_i)).$$

Структура контуров, полученная в результате поэтапного расчленения контура  $F(A)$ , описывается графом  $G = (F(A), C)$ , вид которого показан на рис. I.3. Между контуром  $F_j^i(A)$  и контуром  $F_j^i(a_i)$  элемента  $a_i \in A$  существует иерархическая подчиненность, связанная с иерархической структурой элементов конструкции сборочной единицы.

Следует отметить, что описание иерархических отношений между контурами  $F(A)$  отличается от описания иерархических отношений между элементами А в связи с существованием аддитивных и неаддитивных контуров.

Аддитивные контуры  $F_{ik}$  низшего уровня, рассматриваемые как самостоятельные элементы, обладают теми же свойствами, что и при рассматривании этих контуров в составе контура  $F_i$  высшего уровня. К аддитивным относятся контуры массы, объема, трудоемкости изготовления и др. Иерархическая структура аддитивных контуров описывается аналогично иерархической структуре элементов А. Характер логической связи контура  $F_i$  высшего уровня с набором контуров  $\{F_{i1}, \dots, F_{in}\}$  низшего уровня для аддитивных контуров имеет вид

$$F_i = F_{i1} \wedge F_{i2} \wedge \dots \wedge F_{in} = \bigwedge_{k=1}^n F_{ik}, \quad (I.7)$$

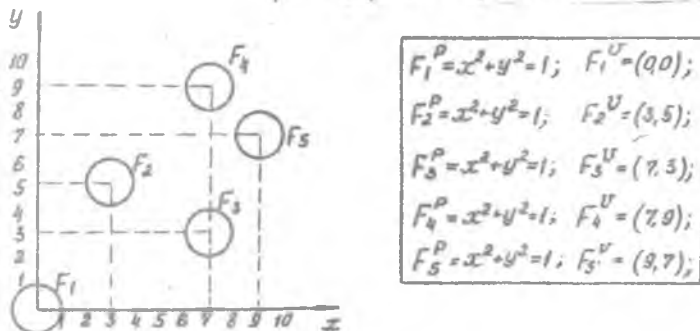
при этом

$$\forall m_i \in M_i (m_i = \sum_{k=1}^n m_{ik}),$$

где  $m_i$  и  $m_{ik}$  - числовые величины соответствующих параметров  $F_i$  и  $F_{ik}$ ;

$M_i$  - множество параметров  $F_i$ .

Неаддитивные контуры низшего уровня отличаются тем, что в составе контуров высшего уровня они приобретают новые свойства, отличные от свойств, которыми они обладают как самостоятельные элементы. К неаддитивным относятся контуры моментов инерции, центровки, геометрические контуры и т.п. Каждый неаддитивный контур  $F_j$  состоит из двух частей - из персонального контура  $F_j^P$ , характеризующего  $F_j$  как отдельный элемент, рассматриваемый независимо от других контуров, и унитарного контура  $F_j^U$ , характеризующего свойства  $F_j$ , отличные от свойств  $F_j^P$  в случае, когда  $F_j$  является частью контура высшего уровня. Так, в геометрическом контуре  $F_j$  персональный контур  $F_j^P$  будет контуром формы объекта в собственной системе координат  $F_j$ , а унитарный контур  $F_j^U$  - контуром положения относительно системы координат высшего порядка. Представление неаддитивного контура через персональный и унитарный контуры позволяет существенно упростить его математическое описание, так как описание персонального контура становится инвариантным по отношению к его положению во внешней системе координат (рис. I.4). Множество неаддитивных контуров  $\{F_{j1}, \dots, F_{jm}\}$ , рассматриваемых



Р и с. I.4. Представление неаддитивных контуров в виде персонального ( $F_j^P$ ) и унитарного ( $F_j^U$ ) контуров

в качестве самостоятельных контуров, при переходе к рассмотрению их как составных частей контура высшего уровня превращается в множество  $\{(F_{j_1}^P, F_{j_1}^U), (F_{j_2}^P, F_{j_2}^U), \dots, (F_{j_m}^P, F_{j_m}^U)\}$ . Если контуры низшего уровня неаддитивны, то

$$F_j = \bigwedge_{k=1}^m (F_{j_k}^P \wedge F_{j_k}^U). \quad (1.8)$$

При этом между параметрами контуров  $F_{j_k}$  и  $F_j$  будут более сложные количественные отношения.

Если изделие  $A_K$  рассматривается как структурированный объект, то состав контуров всех элементов  $A$  может быть описан с помощью матрицы  $[A \times F(A)]$ , называемой матрицей контуров сборочной единицы. Она имеет вид

$$\|C_{ij}(j)\|_{A_K, F(A_K)} = [A_K \times F(A_K)] = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \dots & P_m \\ C_{1(1)} & C_{1(2)} & \dots & C_{1(m)} \\ C_{2(1)} & C_{2(2)} & \dots & C_{2(m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n(1)} & C_{n(2)} & \dots & C_{n(m)} \end{bmatrix} \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{matrix} \quad (1.9)$$

Здесь  $C_{ij}(j) = 1$ , если элемент  $a_i$  имеет контур  $F_j$ , т.е.  $F_j \in F(a_i)$ .

Если изделие  $A_K$  рассматривается как неструктурированный объект (например, зубчатое колесо), то его модель включает в себя только множество контуров  $F(A_K)$  и наборы теоретико-множественных, логических и количественных отношений между контурами. Состав этих отношений зависит от решаемой задачи.

Теоретико-множественные отношения  $R^S$  описывают принадлежность элемента к определенному множеству (подмножеству), отношения смежности (сопряженности, соседства) и отношения порядка между элементами. Так, например, отношение порядка между контурами представляется определенным образом упорядоченным множеством:

$$F(A_K) = R^S(F(A_K)) = F_0, F_{1(1)}, F_{1(2)}, \dots, F_{1(k-1)}, F_{1(k)}, \dots, F_{1(m)}. \quad (1.10)$$

Контур  $F_0$  является "пустым" и играет служебную роль при моделировании.

Более сложные бинарные отношения представляются подмножествами  $[F(A_K) \times F(A_K)]$  декартова произведения  $F(A_K) \times F(A_K)$  или в виде булевой матрицы



$$\|C_{i(j)}\| \|F(A_K) = [F(A_K) \times F(A_K)] = \begin{vmatrix} C_{1(1)} & C_{1(2)} & \dots & C_{1(m)} \\ C_{2(1)} & C_{2(2)} & \dots & C_{2(m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{m(1)} & C_{m(2)} & \dots & C_{m(m)} \end{vmatrix} \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_m \end{matrix} \quad (1.11)$$

где  $C_{i(j)} = 1$ , если бинарные отношения между  $F_i$ ,  $F_j$  существуют, в противном случае  $C_{i(j)} = 0$ .

Примерами таких бинарных отношений между геометрическими поверхностями элемента конструкции могут быть: поверхности  $F_i, F_j$  - смежные; поверхности  $F_i, F_j$  соединены размером; поверхности  $F_i$  являются измерительной базой для  $F_j$  и т.п. Матрица (I-II) соответствует матрице смежности вершин графа  $G = (P(A), C)$ , дуги  $C_{i(j)}$  которого эквивалентны элементам  $C_{i(j)} = 1$ .

В зависимости от назначения модели объекта любой его контур  $F_i$  может рассматриваться либо только с качественной стороны (качественный контур  $F_i$ ), либо и с качественной, и с количественной стороны (количественный контур  $F_i$ ). В последнем случае контур можно расчленить на составные части вплоть до величин, имеющих определенное числовое значение и называемых параметрами контура  $F_i$  (обозначается  $m_i$ ). Если контур  $F_i$  характеризуется множеством  $M_i$  параметров, то требуемое качество  $F_i$  будет обеспечено, когда для каждого параметра  $m_i \in M_i$  погрешности числового значения не будут выходить за пределы установленного допуска  $T_{m_i}$ :

$$\forall m_i \in M_i (\omega m_i \leq T_{m_i}),$$

где  $\omega m_i$  - поле рассеивания погрешностей параметра  $m_i$ ;

$T_{m_i}$  - поле допуска на параметр  $m_i$ .

Решение задач проектирования технологических процессов сборки основано на детальном анализе структуры и конструктивно-технологических свойств (контуров) изделия. Наибольшее влияние на технологический процесс сборки оказывают контуры, определяющие механическую взаимосвязь элементов изделия, и контуры, определяющие пространственную взаимосвязь элементов.

#### 1.4.1. Свойства (контуры), характеризующие механическую взаимосвязь элементов изделия

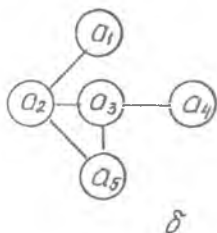
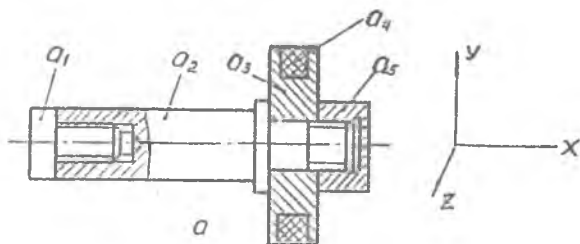
На наличие механических связей между элементами конструкции изделия указывают свойства-контуры сопряжения, базирования, связности, вида соединения.

Контур сопряжения между элементами и изделия. Сопряжения характеризуются соприкосновением (контактированием) поверхностей составных частей. Поверхность детали, участвующая в сопряжении, называется сопрягаемой. В зависимости от формы сопрягаемых поверхностей возможен общий, местный или точечный контакт деталей. Так, например, для плоских поверхностей характерен общий контакт деталей, сопряжение двух цилиндрических поверхностей скользящего подшипника имеет местный контакт, а сопряжение сферических поверхностей двух жестких тел - точечный контакт. Наличие сопряжения между элементами изделия  $A$  можно описать в виде графа сопряжений  $G = (A, C)$ , в котором множество вершин  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  соответствует элементам изделия, а множество дуг  $C$  включает дуги вида  $c_{ij}$ ,  $c_{ji} \in C$ , причем

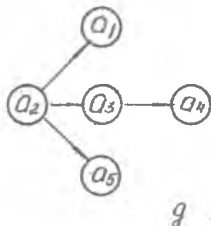
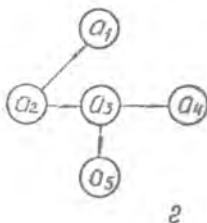
$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i \text{ и } a_j \text{ сопряжены,} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пример описания взаимосвязи элементов с помощью графа сопряжений показан на рис. 1.5,б. Другим вариантом описания контура сопряжения между элементами является матрица сопряжений, дающая представление о рассматриваемом контуре изделия в матричной форме. Пример описания сопряжения между элементами с помощью матрицы показан на рис. 1.5,в.

Контур базирования элементов изделия. В конструкции изделия каждый его элемент (деталь или сборочная единица) должен занимать относительно других элементов или выбранной системы координат строго определенное положение. Это условие достигается за счет базирования. Под базированием понимается придание элементу такого состояния, при котором он занимает требуемое положение относительно выбранной системы координат при воздействии неизбежных возмущающих факторов. Определенность базирования элементов достигается различными средствами, чаще всего за счет использования баз. База - это поверхность или сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая элементу изделия и используемая для базирова-

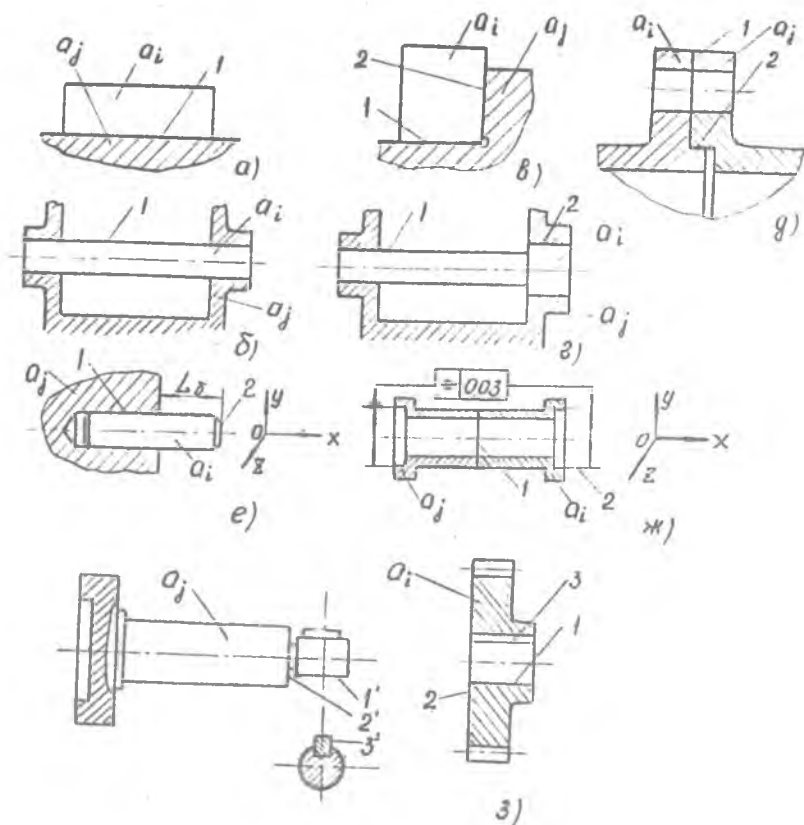


	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$a_1$		1	0	0	0
$a_2$	1		1	0	1
$a_3$	0	1		1	1
$a_4$	0	0	1		0
$a_5$	0	1	1	0	



Р и с. 1.5. Варианты описания контура сопряжения и базирования для сборочной единицы: а - схема сборочной единицы; б - граф сопряжения; в - матрица сопряжения; г - граф базирования элементов по оси  $X$ ; д - граф базирования элементов по осям  $Y$  и  $Z$ .

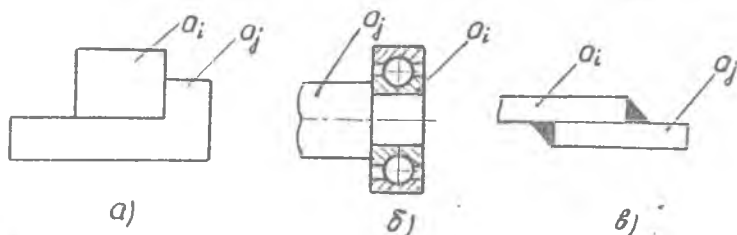
ния. На рис. 1.6 показаны примеры использования плоских и цилиндрических поверхностей в качестве баз. Как следует из рис. 1.6, в базировании участвуют как минимум два элемента: базисуемый элемент  $a_i$  и базовый элемент  $a_j$ . Базовые поверхности элементов  $a_i$  и  $a_j$  обычно одинаковые по форме и при сборке образуют поверхность сопряжения. По ГОСТ 21495-76 поверхность, относящаяся к базисуемому элементу, носит название основной базы, относящаяся к базовому элементу - вспомогательной базы. Так, например, на рис. 1.6,з поверхности 1,2,3 являются основной базой, а поверхности 1, 2, 3 - вспомогательной базой.



Р и с. I.6. Примеры использования поверхностей элементов в качестве баз: 1, 2, 3 - поверхности, принимаемые в качестве сборочных баз;  $a_i$  - базируемый элемент;  $a_j$  - базовый элемент

Базовый элемент может определять положение базируемого элемента как контактом (сопряжением), так и размером. Например, на рис. I.6, e положение элемента  $a_i$  относительно базового элемента  $a_j$  в направлении оси X определяется размером  $L_\delta$ . В плоскости YOZ базирование производится по цилиндрической поверхности I. На рис. I.6, e базирование элемента  $a_i$  по элементу  $a_j$  в направлении оси X осуществляется с помощью поверхности I, а в плоскости YOZ с помощью размера (допустимое смещение осей  $\leq 0,03$  мм).

При наличии базы базиремый элемент лишается возможности перемещения в одном или нескольких направлениях. Поэтому для выявления сборочной базы необходимо получить данные об ограничении возможных перемещений одного элемента со стороны другого в каком-либо направлении. Ограничение возможных перемещений элементов может осуществляться различными способами: за счет контакта поверхностей (рис. I.7, а); за счет возникновения сил трения по поверхности сопряжения (рис. I.7, б); за счет сил молекулярного сцепления (рис. I.7, в). Поскольку каждый элемент в изделии ограничивается в перемещениях по всем направлениям, то множество координатных направлений принимает значение  $\pm X$ ,  $\pm Y$ ,  $\pm Z$  при ограничении поступательных перемещений и  $\pm \dot{X}$ ,  $\pm \dot{Y}$ ,  $\pm \dot{Z}$  при ограничении вращательных перемещений. Для обеспечения ограничения перемещения элемента во всех координатных направлениях и осуществления базирования в общем случае должна иметься группа элементов, принадлежащих изделию.



Р и с. I.7. Способы ограничения возможных перемещений базиремого элемента  $a_i$  относительно базового  $a_j$

При описании схемы базирования на теоретико-множественном уровне используется направленный граф  $G = (A, C)$ . Для примера на рис. I.5, г, д представлен граф базирования элементов по координатным осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  для сборочной единицы (рис. I.5, а). Дуги графа исходят из базовых элементов в базиремые. В общем случае для одной и той же сборочной единицы может быть представлено несколько вариантов графа базирования.

Базирование элемента  $a_i$  по элементу  $a_j$  может быть описано с помощью единичного вектора  $B_{i(j)}^{\alpha}$ , обуславливающего существование реакции связи или активной силы, препятствующей перемещению элемента  $a_i$  относительно  $a_j$  в направлении  $\alpha$ . В декартовой системе координат возможны 12 единичных баз: шесть поступательных  $B^{+X}$ ,  $B^{-X}$ , ...,  $B^{-Z}$ , обеспечивающих определенность базирова-

ния вдоль осей, параллельных осям координат, и шесть вращательных  $B^{x_1}, B^{x_2}, \dots, B^{x_6}$ , обеспечивающих определенность базирования вокруг осей, параллельных осям координат. Если элемент  $a_i$  неподвижен, лишен всех степеней свободы, то он имеет 12 единичных баз. Представляя единичную базу  $B_{i(\alpha)}$  как булеву переменную (булевый вектор базирования), можно записать

$$B_{i(\alpha)} = \begin{cases} 1, & \text{если базирование в направлении } \alpha \text{ существует,} \\ 0 & \text{- в противном случае.} \end{cases}$$

Если элемент  $a_i$  связан с несколькими элементами  $a_j$ , то группа элементов  $a_j$  (где  $j = 1, 2, \dots, m$ ), полностью определяющих положение детали в изделии, будет определять и состав сборочной базы. Возможные составы сборочных баз элемента  $a_i$  можно описать совокупностью базовых элементов  $B_j(a_i) = \{a_{i(1)}, a_{i(2)}, \dots, a_{i(m)}\}$ , при наличии которых  $B_j(a_i) = 1$ .

Состав сборочных баз может быть описан логическим уравнением  $B(a_i)$ , в котором взаимосвязь логических переменных представляется следующим образом:

$$B(a_i) = \begin{cases} a_j \wedge \dots \wedge a_m, & \text{если } B_{i(1)} = \bigvee_j B_{i(j)}, B_{i(j)} \neq B_{i(1)}, \\ a_j \vee \dots \vee a_m, & \text{если } B_{i(1)} = B_{i(2)} = \dots = B_{i(m)}, \\ a_i, & \text{если элемент } a_i \text{ не нуждается в сборочной базе,} \\ 0, & \text{если определенность базирования } a_i \text{ не обеспечена.} \end{cases}$$

Здесь  $B_{i(1)}$  - вектор базирования, соответствующий случаю, когда обеспечена определенность базирования.

Для примера приведем логическое уравнение состава сборочных баз для элементов сборочной единицы, изображенной на рис. 1.5 а:

$$B(a_1) = a_2; B(a_2) = a_2; B(a_3) = a_2; B(a_4) = a_3; B(a_5) = (a_2 \wedge a_3).$$

Вид уравнения  $B(a_2) = a_2$  означает, что шток поршня не требует дополнительной сборочной базы, и если сборка начинается со штока, то  $B(a_2) = 1$ .

Контур связности элементов сборочной единицы. При анализе данных об ограничении возможных перемещений важной задачей является выявление кратчайших замкнутых цепей ограничения возможных перемещений. В результате решения этой задачи для каждой сопрягаемой пары элементов в направлении сопряжения определяется минимальная группа элементов, которая обеспечивает между ними силовое замыкание в этом направлении. Для сборочной единицы, изображенной на рис. 1.5, кратчайшие замкнутые цепи об-

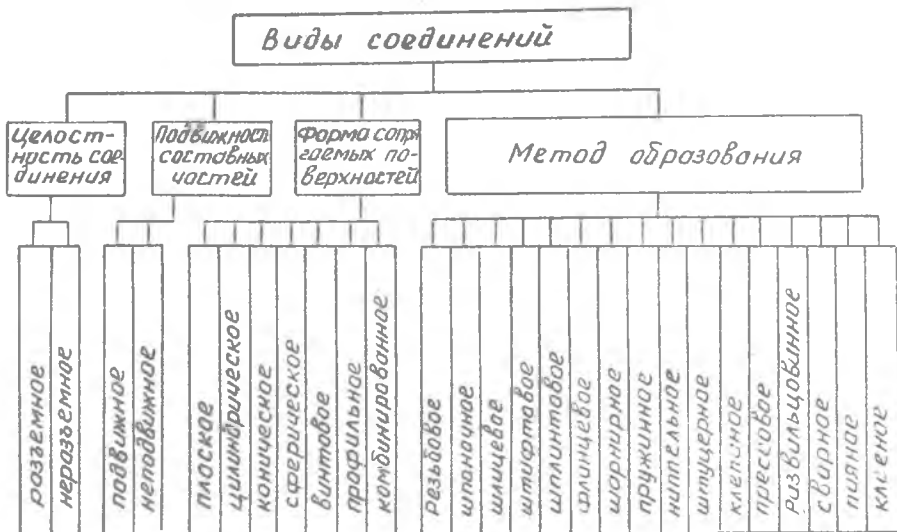
разуют элементы:  $(a_1, a_2)$ ,  $(a_3, a_4)$ ,  $(a_2, a_3, a_5)$ . Но не только детали одной замкнутой цепи, но все детали сборочной единицы находятся в состоянии ограничения возможных перемещений. Это означает, что у деталей, относящихся к разным замкнутым цепям одной сборочной единицы, также ограничены возможности относительного перемещения. Такое состояние, когда множество деталей сборочной единицы образует единое целое и возможное перемещение элемента  $a_i$  относительно  $a_j$  определяется с учетом влияния остальных элементов, называется контуром связности или контуром связанной системы элементов.

Любая пара деталей в изделии по любому направлению входит в группу деталей, образующих замкнутую цепь взаимных ограничений перемещений. Если, например, деталь  $a_1$  какой-либо сборочной единицы связана с деталью  $a_2$ , а деталь  $a_2$  с деталью  $a_3$ , то деталь  $a_1$  связана с деталью  $a_3$ . Таким образом связность деталей обеспечивается, если у них имеется хотя бы одна общая деталь. Совокупность элементов будет связанной системой, если граф сопряжений этих элементов будет тоже связан.

**Контур вида соединения.** Совокупность относительного положения элементов, вид связи между сопрягаемыми поверхностями элементов, лишаящие эти элементы определенного числа степеней свободы, характеризуют вид соединения между элементами. Для авиационных газотурбинных двигателей имеется большое количество разнообразных соединений элементов, отличающихся различными конструктивными, технологическими и экономическими факторами: степенью относительной подвижности, возможностью разборки, формой контактируемых поверхностей деталей, методом образования и др. В общем случае соединения могут быть неподвижные разъемные и неразъемные, подвижные разъемные и неразъемные и др. Основные виды соединений, используемые в авиадвигателестроении, показаны на схеме рис. 1.8. В этой схеме целостность соединения характеризует состояние соединения при его разборке; подвижность соединения характеризует возможность относительного перемещения составных частей в изделии; форма сопрягаемых поверхностей - вид контакта в соединении; метод образования соединения - конструктивные и технологические особенности образования соединения при сборке.

Составными частями каждого контура соединения являются:

контур пакета соединяемых деталей, характеризующий свойство элементов контура в месте соединения (состав пакета, толщина пакета, форма сопрягаемых поверхностей и т.п.);



Р и с. I.8. Основные виды соединений, используемых в авиадвигателе-строении

контур соединительного шва, характеризующий форму шва, количество рядов соединительных элементов и др.;

контур соединительного элемента, характеризующий свойства болта, винта, заклепки, сварной точки и т.п.;

контур положения соединительного элемента (болта, шайбы, заклепки и др.);

контур поверхности, подготавливаемой к соединению.

Структура контуров соединения элементов конструкций ГТД приведена в табл. I.I.



## Структура контуров соединения элементов конструкций

Вид соеди- нения	Контур пакета			Контур соединительных элементов		Контур собственно соединительных элементов													
	Состав пакета	Соприкасае- мые по- верхности	Контур места соединительного элемента	Контур места соединительного элемента	Контур соединительных элементов	Тело болта	Резьба болта	Тело гайки	Резьба гайки	Тело шайбы	Тело винта	Резьба винта	Тело заклепки	Замыкающая головка	Сварная точка	Сварной шов	Припой	Клеевая пленка	
	Деталь $a_1$	Деталь $a_2$	Деталь $a_3$	Поверхность $c_1$	Поверхность $c_2$	$F_{11}$ $F_{12}$ ...	$F_{21}$ $F_{22}$ ...	$F_{31}$ $F_{32}$ $F_{33}$ ...	$F_{41}$ $F_{42}$ $F_{43}$ $F_{44}$ ...	$F_{51}$ $F_{52}$ $F_{53}$ $F_{54}$ ...	$F_{61}$ $F_{62}$ $F_{63}$ $F_{64}$ $F_{65}$ ...	$F_{71}$ $F_{72}$ $F_{73}$ $F_{74}$ $F_{75}$ $F_{76}$ ...	$F_{81}$ $F_{82}$ $F_{83}$ $F_{84}$ $F_{85}$ $F_{86}$ ...	$F_{91}$ $F_{92}$ $F_{93}$ $F_{94}$ $F_{95}$ $F_{96}$ $F_{97}$ ...	$F_{101}$ $F_{102}$ $F_{103}$ $F_{104}$ $F_{105}$ $F_{106}$ $F_{107}$ ...	$F_{111}$ $F_{112}$ $F_{113}$ $F_{114}$ $F_{115}$ $F_{116}$ $F_{117}$ ...	$F_{121}$ $F_{122}$ $F_{123}$ $F_{124}$ $F_{125}$ $F_{126}$ $F_{127}$ ...	$F_{131}$ $F_{132}$ $F_{133}$ $F_{134}$ $F_{135}$ $F_{136}$ $F_{137}$ ...	$F_{141}$ $F_{142}$ $F_{143}$ $F_{144}$ $F_{145}$ $F_{146}$ $F_{147}$ ...
Резь- болто- вое все	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
соеди- винто- вое все	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Заклепочное соединение	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сварное соеди- нение ТЭС	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сварное сое- динение РЭС	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сварное сое- динение ДЭС	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Клеевое соеди- нение	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 1.4.2. Свойства (контуры), характеризующие пространственную взаимосвязь элементов изделия

Под пространственной взаимосвязью элементов конструкции понимается взаимное расположение элементов в пространстве и связь возможных движений относительно друг друга или какой-либо системы отсчета. Пространственная взаимосвязь выражается в виде геометрического контура формы и расположения поверхностей элементов; контура, выражающего характер возможных движений одного элемента относительно другого; контура ограничения доступа одного элемента со стороны другого; контура размерной связи между элементами.

Геометрический контур формы и расположения поверхностей элементов. Взаимное расположение элементов изделия задается в сборочном чертеже либо явным способом (в каноническом виде) с помощью линейных и угловых координат, либо неявным способом через установочные размеры и размеры сопряжений элемента  $a_i$  с другими элементами. В математических моделях взаимное расположение элементов отображается в виде геометрических контуров. Каждый геометрический контур  $F_i \in F(A)$  состоит из двух специфических частей: контура формы  $F_i^p$ , характеризующего форму соответствующих поверхностей, и контура положения  $F_i^u$ , характеризующего положение этих поверхностей в системе координат сборочной единицы. Взаимосвязь этих контуров описывается конъюнкцией

$$\bar{F}_i = F_i^p \wedge F_i^u.$$

Очевидно, если  $a_j \in A$ , то  $F_i^p(A) = \bigwedge_j (F_i^p(a_j) \wedge F_i^u(a_j))$ .

Здесь  $F_i^p(A)$  - контур формы всей сборочной единицы;

$F_i^p(a_j)$  - контур формы геометрического контура  $F_i(a_j)$ ;

$F_i^u(a_j)$  - контур положения геометрического контура  $F_i(a_j)$  в системе координат сборочной единицы;

$z$  - общее количество звеньев  $F_i(A)$ .

Контур положения  $F_i^u$  можно разложить на составляющие  $F_i^{u_x}(a_j)$ ,  $F_i^{u_y}(a_j)$ ,  $F_i^{u_z}(a_j)$ , определяющие положение  $F_i(a_j)$  относительно осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  базовой системы координат.

Форма элемента может быть образована набором различных поверхностей в любом их сочетании. Логическое отношение между такими контурами может быть описано неразделительной дизъюнкцией следующего вида:

$$F(\alpha_j) = F_1 \vee F_2 \vee \dots \vee F_m = \bigvee_{j=1}^m F_j. \quad (I.12)$$

Контуры формы элементов могут отображаться с использованием аппарата аналитической геометрии совокупностью уравнений линий и поверхностей, алгебраических соотношений, составляющих тело элемента, списками, отображающими конструкцию из типовых конструктивных элементов. Кроме того, контуры формы могут отображаться в виде типовых графических изображений, например, зубчатого колеса, винта, гайки и т.п.

Определение положения элемента конструкции в пространстве осуществляется путем задания положения типового геометрического элемента: точки, отрезка прямой, ограниченной плоскости или поверхности, а также геометрических фигур: шара, цилиндра, параллелепипеда и др.

При задании размеров  $i$ -го типового геометрического элемента используются три независимых параметра: длина  $x_{ii}$ , ширина  $y_{ii}$ , высота  $z_{ii}$ . Для задания положения типового элемента в пространстве задают смещение характерной точки (обычно начала собственной системы координат:  $x_{ii}$ ,  $y_{ii}$ ,  $z_{ii}$ ).

Моделирование формы и расположения элементов конструкции сложной формы производится с помощью совокупности типовых геометрических элементов с учетом условий сопряжений вида  $x_{k(i)} = x_{e(j)}$ ;  $y_{k(i)} = y_{e(j)}$ ;  $z_{k(i)} = z_{e(j)}$  и условий непересечения

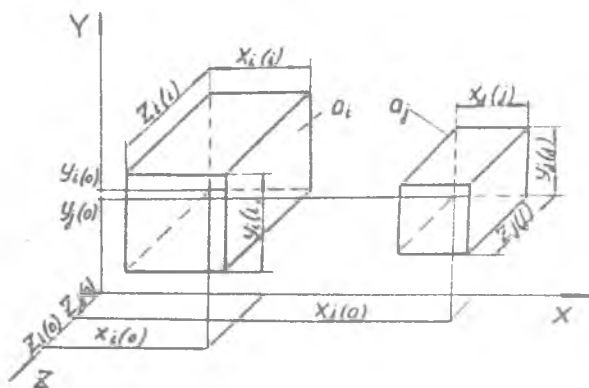
$$x_{k(i)} \neq x_{e(j)}; \quad y_{k(i)} \neq y_{e(j)}; \quad z_{k(i)} \neq z_{e(j)},$$

где  $k=1, 2$  - количество точек  $i$ -го типового геометрического элемента;  $e=1, m$  - количество точек  $j$ -го типового геометрического элемента.

Для решения практических задач (например, при проектировании технологических процессов) использование приведенного выше аппарата моделирования формы и расположения элементов часто нерационально из-за большого объема данных, необходимых для описания элементов изделия. В этом случае целесообразно пользоваться упрощенными, но более экономичными методами, например, прямоугольной моделью формы и расположения объектов. В этой модели элемент представляется как прямоугольный параллелепипед, грани которого параллельны плоскостям координат.

Форма объекта определяется тремя параметрами  $x_{ii}$ ,  $y_{ii}$ ,  $z_{ii}$  относительно собственной системы координат, а положение - тре-

мя линейными координатами  $x_i(o)$ ,  $y_i(o)$ ,  $z_i(o)$  относительно базовой системы координат (рис. I.9). Если точность описания с помощью одного параллелепипеда недостаточна, то он описывается набором нескольких параллелепипедов, неподвижно связанных друг с другом.



Р и с. I.9. Пример описания формы и положения объекта в прямоугольной системе координат

При моделировании расположения элементов в пространстве большое значение имеет описание условия размещения элемента  $a_i$  относительно элемента  $a_j$ . Если обозначить границы областей, ограничивающих элементы  $a_i$  и  $a_j$  соответственно  $S_1$  и  $S_2$ , то условием размещения элемента  $a_i$  относительно элемента  $a_j$  будет условие взаимного непересечения областей  $S_1$  и  $S_2$ . Области  $S_1$  и  $S_2$  представляются соответствующими уравнениями их границ:

$$f_1(\rho, \mu_1, \theta_1) = 0,$$

$$f_2(\rho, \mu_2, \theta_2) = 0,$$

где  $\rho$  - текущая координата областей  $S_1$  и  $S_2$  ( $x, y, z$  - для пространственной модели решения задачи);  $\mu_1, \theta_1$  и  $\mu_2, \theta_2$  - параметры размещения областей соответственно.

Математическая постановка любой задачи размещения геометрических элементов включает в себя:

условия взаимного непересечения областей  $S_1$  и  $S_2$  между собой

$$\varphi_{i,j}(u_i, u_j) \geq 0 \quad (i, j = \overline{1, n}, i \neq j);$$

условие размещения элементов в некоторой области

$$\varphi_i(u_i) \geq 0 \quad (i = \overline{1, n}).$$

Контур возможных движений одного элемента изделия относительно другого. Возможные движения одного элемента изделия относительно другого описываются с помощью траектории движения в двух- и трехмерном пространстве и с помощью состава и взаимосвязи возможных движений. Описание траектории возможного движения на количественном уровне осуществляется известными методами аналитической геометрии.

На теоретико-множественном и логическом уровнях описание возможных движений осуществляется с использованием векторных величин  $D_{i(j)}$ , характеризующих вид, направление и величину возможного движения элемента  $a_i$  относительно элемента  $a_j$ . В декартовой системе координат существует шесть поступательных  $D^{+x}, D^{-x}, \dots, D^{-z}$  и шесть вращательных  $D^{+x}, D^{-x}, \dots, D^{-z}$  единичных векторов возможных перемещений. Следует отметить, что логические значения  $D_{i(j)}$  и единичной базы  $B_{i(j)}$  противоположны, т.е. если  $D_{i(j)} = I$ , то  $B_{i(j)} = 0$ , и наоборот. Контур возможных движений  $a_i$  относительно  $a_j$  описывается уравнением  $D_{i(j)}$ , включающим в себя состав возможных перемещений и описание их взаимосвязи, по очередности реализации с помощью логических операций:

$$D_{i(j)} = D^{\alpha} \wedge D^{\beta} \quad - \text{если } D^{\alpha} \text{ и } D^{\beta} \text{ могут быть реализованы только одновременно,}$$

$$D_{i(j)} = D^{\alpha} \vee D^{\beta} \quad - \text{если } D^{\alpha} \text{ и } D^{\beta} \text{ могут быть реализованы либо одновременно, либо поочередно в любой последовательности,}$$

$$D_{i(j)} = D^{\alpha} \nabla D^{\beta} \quad - \text{если } D^{\alpha} \text{ и } D^{\beta} \text{ могут быть реализованы только поочередно в любой последовательности.}$$

В связанной системе элементов содержание уравнения  $D_{i(j)}$  зависит от структуры графа сопряжений.

Любому конкретному сопряжению  $a_i$  с  $a_j$  соответствует определенный вид уравнения  $D_{i(j)}$ , что позволяет классифицировать

сопряжения элементов конструкции в зависимости от характера возможных движений на поступательный класс подвижности, вращательный класс подвижности и составной класс подвижности. Классификационные таблицы показаны в [2].

При необходимости анализа возможных движений элементов конструкции в направлении различных осей координат граф сопряжений этих элементов можно разложить на суграфы, ребра которых соответствуют сопряжениям в направлении данных осей координат.

Весьма удобным методом, хорошо приспособленным для выполнения расчетов на ЭВМ, является описание траектории движения с помощью матриц перемещения  $\|D^k\|$ . Матрица перемещения получается из системы уравнений, описывающих ортогональное преобразование координат точек тела из начального состояния  $(x_1, y_1, z_1)$  в конечное состояние  $(x_2, y_2, z_2)$ . При переходе к однородным координатам  $x, y, z, t$ , удовлетворяющим условиям

$$\frac{x_i}{t} = x_i; \quad \frac{y_i}{t} = y_i; \quad \frac{z_i}{t} = z_i; \quad t = 1,$$

эта система уравнений примет в матричной форме вид

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (I.13)$$

Преобразование (I.13) можно истолковать как ортогональное аффинное преобразование координат твердого тела в четырехмерном пространстве, определяемое оператором

$$|D| = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}, \quad (I.14)$$

который и представляет собой матрицу перемещения. Минор матрицы (I.14), включающей элементы  $a_{i(j)}$ ,  $j \neq 4$ , описывает вращение тела вокруг оси, проходящей через начало координат. При отсутствии поворотов значения элементов минора равны  $a_{i(i)} = 1$  и  $a_{i(j)} = 0$ ,  $i \neq j$ . В этом случае матрица (I.14) принимает вид

$$|D^\alpha| = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & 1 & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & 1 & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (I.15)$$

и описывает поступательное движение тела в направлении  $\alpha$ ,  $\alpha = x, y, z$ . Если поступательное движение равно нулю и существует только вращательное движение, то оно описывается матрицей вида

$$|D^\alpha| = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (I.16)$$

Матрица движения  $|D^\alpha|$  описывает движение как векторную величину - возможное перемещение  $D^\alpha$ , имеющее модуль  $d^\alpha$ . На логическом уровне возможное перемещение  $D^\alpha$  рассматривается как логическая переменная

$$D^\alpha = \begin{cases} 1, & \text{если } d^\alpha > \Delta^\alpha, \\ 0, & \text{если } d^\alpha \leq \Delta^\alpha, \end{cases}$$

где  $\Delta^\alpha$  - величина вектора  $D^\alpha$ , заданная при решении конкретной задачи.

Контур ограничения доступа одного элемента со стороны другого в процессе сборки. Важным проявлением пространственной взаимосвязи в процессе сборки является ограничение доступа одного элемента со стороны другого. В процессе сборки каждый элемент  $a_i$  изделия переходит из свободного в связанное состояние. Этот переход осуществляется путем реализации некоторых возможных перемещений  $a_i$  относительно установленных ранее элементов изделия. Установка каждого элемента  $a_i$  при сборке возможна, если установленные ранее элементы не препятствуют такой установке, т.е. не ограничивают доступ. Набор элементов, закрывающих доступ перемещению  $a_i$  в требуемую зону, обозначается

$$W_j(a_i) = \{a_j(m), a_j(n), \dots, a_j(m)\}.$$

На логическом уровне состав элементов, препятствующих доступу в требуемую зону, описывается уравнением  $W(a_i)$ , включающим в себя состав этих элементов и логические отношения между ними, которые определяются путем анализа уравнений возможных перемещений относительно этих элементов. Доступ существует, если  $W(a_i) = 0$ , и отсутствует, если  $W(a_i) = 1$ .

$$W(a_i) = \begin{cases} a_{j(1)} \vee \dots \vee a_{j(m)}, & \text{если } W(a_{j(1)}) = \dots = W(a_{j(m)}) = 1, \text{ то есть лю-} \\ & \text{бой из элементов } a_{j(1)}, \dots, a_{j(m)} \text{ ограничивает доступ} \\ & \text{для установки элемента } a_i, \\ a_{j(1)} \wedge \dots \wedge a_{j(m)}, & \text{если } W(a_{j(1)}) \wedge \dots \wedge W(a_{j(m)}) = 1, \text{ то есть} \\ & \text{элементы } a_{j(1)}, \dots, a_{j(m)} \text{ ограничивают доступ элемен-} \\ & \text{ту } a_i \text{ только все вместе взятые.} \end{cases}$$

Состав уравнений  $W(a_i)$  можно определить непосредственно по сборочному чертежу изделия при анализе характера возможных движений элементов. Например, для деталей сборочной единицы, изображенной на рис. 1.5, а, уравнения  $W(a_i)$  равны:

$$W(a_1) = 0; W(a_2) = a_5; W(a_3) = a_5; W(a_4) = 0; W(a_5) = 0.$$

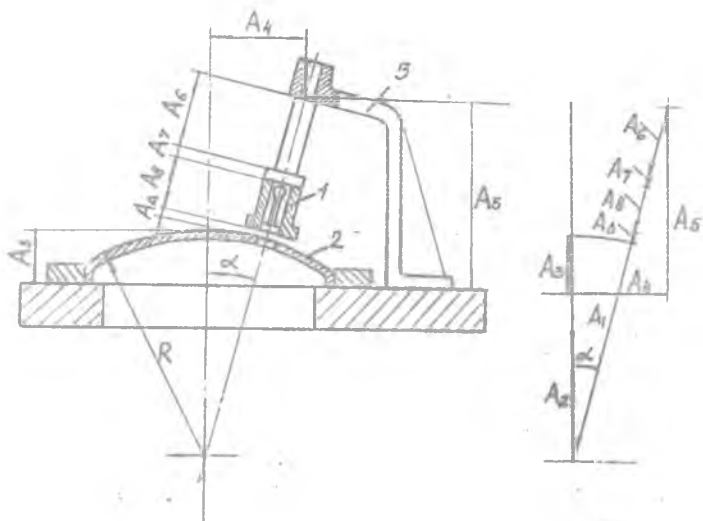
Контур размерной взаимосвязи элементов изделия. Важнейшим показателем качества каждого геометрического контура является его точность, определяемая как степень соответствия параметров этого контура заданным значениям. Каждое изделие проектируется таким образом, чтобы оно полностью выполняло свою функцию до тех пор, пока погрешность параметров геометрических контуров будет лежать внутри поля допуска. Степень точности любого элемента конструкции определяется исходя из точности отдельных функциональных контуров.

В сборочной единице ее элементы образуют связанную систему тел, в которой точность положения любого элемента и, следовательно, точность положения его поверхностей зависит от точности положения других элементов. Эта взаимосвязь называется размерной взаимосвязью элементов. Размерные связи между самими элементами изделия называются конструкторскими, а между элементами в системе "изделие - технологическая оснастка и оборудование" - технологическими. При сборке многих соединений, используемых в ГТД, преобладают конструкторские размерные связи. Однако для сборочных единиц, включающих сварные и



клепаные соединения, часто существуют технологические размерные связи. Например, на рис. I.10 представлена технологическая размерная связь, характеризующая величину изменения зазора под сварку между патрубком 1 и сферическим днищем 2. Здесь размеры  $A_1, A_2, A_3, A_6, A_7$  относятся к элементам изделия, а остальные ( $A_4, A_5, A_8$ ) — к элементам технологической оснастки.

Размерные связи описываются размерными цепями, представленными либо в традиционном виде, либо как графы размеров, вершинами которых являются поверхности, линии или точки, соединяемые размерами, а ребрами (дугами) служат сами эти размеры. Размерные цепи разделяют-



Р и с. I.10. Технологическая размерная связь при изготовлении сварной сборочной единицы: 1 — патрубок; 2 — сферическое днище; 3 — технологическая оснастка

ся на простые и связанные. Простая размерная цепь соответствует простому циклу в графе размеров. Связанная размерная цепь соответствует такому графу размеров, который содержит не менее двух простых циклов. Каждому простому циклу, включающему в себя замыкающее звено, соответствует алгебраическое уравнение простой размерной цепи. Число этих уравнений при сложной структуре размерных связей равно числу простых циклов в графе размеров. Для примера на рис. I.11, а показана конструктивная схема маслонасоса. Шестерня  $a_3$  маслонасоса вращается в скользящих подшипниках корпуса  $a_2$  и крышки  $a_1$ . Вращение

осуществляется с помощью зубчатого колеса  $a_4$ , установленного на хвостовике шестерни  $a_3$ . На рис. I.11,б показан граф размерных связей деталей маслонасоса в направлении оси  $X$ . Если в граф размерных связей добавить дугу  $l_{22}(a_4) = 1$  и принять соответствующее этой дуге расстояние  $l_{22}(a_4)$  между поверхностями (контурами)  $F_{22}$ ,  $F_{24}$  деталей  $a_2, a_4$  в качестве замыкающего звена размерной цепи, а расстояния  $l_{ij}$ , соответствующие остальным дугам графа, принять в качестве составляющих звеньев, то получим связанную размерную цепь, в которой будет несколько простых циклов, соответствующих простым элементарным путям из вершины  $F_{22}$  в вершину  $F_{24}$ .

При анализе размерных связей сборочной единицы множество  $l_i$  ребер графа размеров  $L = (A, l)$  можно разделить на подмножество собственных размеров  $l_i$  элементов  $a_i \in A$ , соединяющих поверхности, линии и точки каждого из этих элементов, и подмножество размеров - сопряжений  $l_{ij}$ , соединяющих сопрягаемые поверхности разных элементов  $a_i, a_j \in A$ . В физическом смысле размеры сопряжений являются зазорами (или натягами) между сопрягаемыми поверхностями различных элементов. Сопряженность между поверхностями (контурами) различных элементов  $a_i$  и  $a_j$  следует понимать в широком смысле: всякие два контура, принадлежащие разным элементам сборочной единицы, будут сопряженными, если при изменении одного из них необходимо и возможно изменение контура другого элемента таким образом, что их взаимное влияние на основные функциональные контуры сборочной единицы не изменится.

Каждому простому циклу в графе размеров соответствует алгебраическое уравнение размерной цепи вида

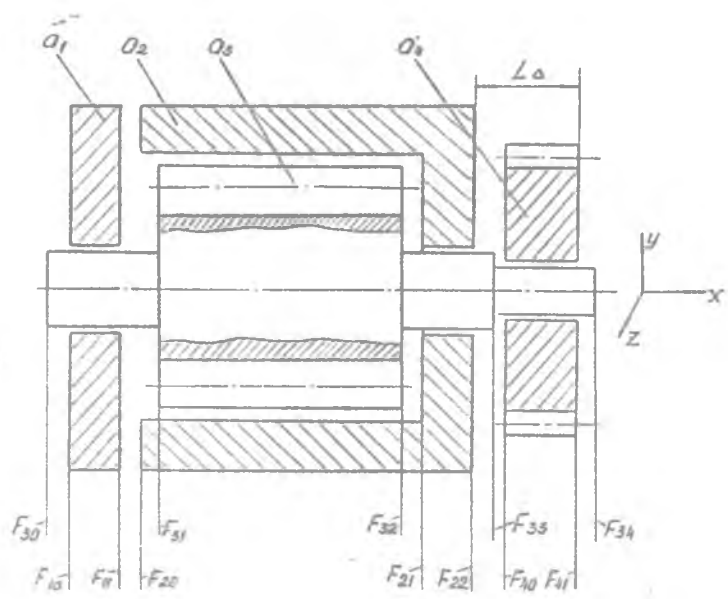
$$L_A = \sum_{i=1}^{n-1} l_i + \sum_{ij}^k l_{ij}, \quad (I.17)$$

где  $L_A$  - замыкающее звено размерной цепи;

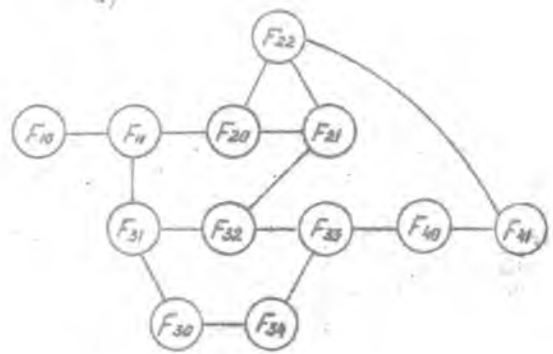
$l_i$  - размеры элементов  $a_i \in A$ ;

$l_{ij}$  - размеры сопряжений.

Существует органическая взаимосвязь между графом размеров и графом сопряжений элементов сборочной единицы. Граф размеров есть развертка графа сопряжений и, наоборот, граф сопряжений есть свертка графа размеров. В графе размеров неизвестными являются размеры сопряжений и размер замыкающего звена размерной цепи. Влияние размеров сопряжений на замыкающее звено размерной цепи зависит от структуры графа сопряжений и, как следствие, от структуры сборочной размерной



a)



b)

Р и с. I.II. Конструктивная схема маслонасоса (a) и граф размерных связей по оси X (b)

цепи. Если граф сопряжений линейный, а размерная цепь простая, то размеры сопряжений не влияют на замыкающее звено размерной цепи, поскольку при соединении элементов конструкции зазоры в местах сопряжений становятся равными нулю. В этом случае расчет сборочной размерной цепи осуществляется известными методами (в соответствии с РД50-635-87).

При расчете сборочных размерных цепей могут решаться прямая и обратная задачи. При решении прямой задачи исходя из требования к замыкающему звену, характеризуемому номинальным размером  $L_A$ , координатой середины поля допуска  $\Delta_{0.6A}$  и допуском  $T_{L_A}$  определяют номинальный размер  $L_i$ , координату середины поля допуска  $\Delta_{0.6i}$  и величину поля допуска  $T_{L_i}$  составляющих звеньев. Такая задача обычно решается при проектировании конструкции изделия или сборочной единицы. При решении обратной задачи исходя из значений номинальных размеров составляющих звеньев  $L_i$ , координаты середины поля рассеивания  $\Delta\omega_{Li}$  (или координаты середины поля допуска  $\Delta_{0.6i}$ ) и величины поля рассеивания  $\omega_{Li}$  (или поля допуска  $T_{L_i}$ ) определяют характеристики замыкающего звена: номинальный размер  $L_A$ , координату середины поля рассеивания  $\Delta\omega_{LA}$  и поле рассеивания  $\omega_{LA}$ . Такая задача решается обычно при проектировании технологического процесса сборки.

Решение обратной задачи (в соответствии с РД50-635-87) производится следующим образом. Номинальный размер замыкающего звена размерной цепи вычисляется по формуле

$$L_A = \sum_{i=1}^{n-1} \psi_{Li} L_i, \quad (1.18)$$

где  $\psi_{Li}$  - передаточное отношение для  $i$ -го звена размерной цепи.

Координата середины поля рассеивания замыкающего звена вычисляется по формуле

$$\Delta\omega_{LA} = \sum_{i=1}^{n-1} \psi_{Li} \Delta\omega_{Li}. \quad (1.19)$$

При условии, что поле рассеивания составляющих звеньев  $\omega_{Li} \leq T_{L_i}$ , поле рассеивания замыкающего звена  $\omega_{LA}$  при расчете по методу "максимума-минимума" определяется по формуле

$$\omega_{L\Delta}(\max-\min) = \sum_{i=1}^{n-1} |\xi_{Li}| \omega_{Li} \quad (I.20)$$

При расчете по вероятностному методу

$$\omega_{L\Delta}(\text{вер}) = t_{\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \xi_{Li}^2 \lambda_{Li}^2 \omega_{Li}^2} \quad (I.21)$$

В формуле (I.21) коэффициент риска  $t_{\Delta}$  выбирается из таблицы значений функции Лапласа  $\Phi(t)$  в зависимости от принятого риска  $\rho$ ; коэффициент  $\lambda_{Li}$  характеризует закон рассеивания размера составляющего звена. При рассеивании размера  $L_i$  по закону Гаусса  $\lambda_{Li}^2 = \frac{1}{\sigma}$ , а по закону равной вероятности  $\lambda_{Li}^2 = \frac{1}{3}$ .

Если граф сопряжений нелинейный, а размерная цепь связанная, то при соединении элементов конструкции некоторые зазоры станут равными нулю, а другие могут сохраняться и влиять на замыкающее звено размерной цепи, и тогда число неизвестных величин, включая замыкающее звено размерной цепи, будет больше числа уравнений, соответствующих простым циклам в графе размеров. Здесь размерные связи не могут быть определены обычными методами решения размерных цепей, и решение осуществляется на основе анализа пространственной взаимосвязи элементов связанной системы тел, для которой возможные перемещения элемента  $a_i$  относительно  $a_j$  определяются с учетом влияния остальных тел. При анализе пространственной взаимосвязи элементов связанной системы тел отклонение реальной поверхности тела от номинального положения представляется как поступательное перемещение в соответствующем направлении.

В связанной системе тел содержание уравнения перемещения  $D_i(i,j)$  зависит от структуры графа сопряжений и определяется по формуле [6]

$$D_i(i,j) = \bigwedge_j^N (D_i(i,j))_{\mathcal{J}} = \bigwedge_j^N (\bigvee_{\mathcal{I}}^N D_i(i+1))_{\mathcal{J}} \quad (I.22)$$

где  $N$  - общее число простых цепей между элементами  $a_i$  и  $a_j$  в графе сопряжений;  
 $\mathcal{J}$  - номер цепи.

Если граф сопряжений - простая цепь ( $N = 1$ ), то в уравнении (I.22)

$$D_i^\alpha(j) = \prod_{i+1=j}^i D_2(i+1), \quad d_i^\alpha(j) = \sum_{i+1=j}^i d_2(i+1) \quad (I.23)$$

Если граф сопряжений имеет более сложную структуру ( $N > 1$ ), то

$$D_i^\alpha(j) = \bigwedge_{\sigma} (D_i^\alpha(j))_{\sigma}, \quad d_i^\alpha(j) = (d_i^\alpha(j))_{\sigma \min}, \quad (I.24)$$

где  $(D_i^\alpha(j))_{\sigma}$  вычисляется по формуле (I.23), как  $D_i^\alpha(j)$ .

Каждое сопряжение элементов обеспечивает вполне определенный характер возможных перемещений сопрягаемых элементов относительно друг друга. Пусть тела  $a_i, a_j$  сопряжены встык по нескольким поверхностям  $F_{i^*} - F_{j^*}, F_{i^{**}} - F_{j^{**}}, \dots$ , и допуски на отклонения сопрягаемых поверхностей от номинала заданы в виде наибольших и наименьших допустимых отклонений  $\delta_{i^*}^{+\alpha}, \delta_{i^*}^{-\alpha}, \delta_{j^*}^{+\alpha}, \delta_{j^*}^{-\alpha}, i^* = i', i'', \dots; j^* = j', j'', \dots$

Размеры сопряжений вида  $l_{i^*(j^*)}$  являются зазорами между сопрягаемыми поверхностями  $a_i, a_j$ . Зависимость между зазорами определяется по формуле (I.24). Поскольку тела  $a_i, a_j$  сопряжены, наименьший зазор между ними равен нулю, поэтому

$$D_{i^*(j^*)}^\alpha = 0, \quad d_{i^*(j^*)}^\alpha = |l_{i^*(j^*)}|_{\min} = 0.$$

При анализе пространственной взаимосвязи элементов граничная поверхность (линия, точка) тела, за которой свободное пространство простирается в положительном направлении (например, по направлению координатной оси), принимается за увеличивающий элемент этого тела. Уменьшающими элементами тела будут считаться граничные поверхности, за которыми свободное пространство простирается в отрицательном направлении. Для сборочной единицы, изображенной на рис. I.II, а, увеличивающими элементами будут поверхности  $F_{11}, F_{22}, F_{32}, F_{33}, F_{34}, F_{41}$ , а уменьшающими - поверхности  $F_{10}, F_{20}, F_{21}, F_{30}, F_{31}, F_{40}$ . Если  $i^* = i', i'', \dots$ , - индексы увеличивающих, а  $j^* = j', j'', \dots$  индексы уменьшающих элементов тел  $a_i, a_j$ , то наибольшее отклонение  $j^*$ -го элемента тела  $a_j$  относительно  $i^*$ -го элемента тела  $a_i$  вычисляется по формуле

$$\delta_{i^*(j^*)}^{-\alpha} = (\delta_{i^*}^{+\alpha} + \delta_{j^*}^{-\alpha})_{\max}, \quad (I.25)$$

а зазоры между сопрягаемыми поверхностями - по формуле

$$|\delta_{i(j)}^+| = (\delta_{i^*}^{+\alpha} + \delta_{j^*}^{-\alpha})_{max} - (\delta_{i^*}^{+\alpha} + \delta_{j^*}^{-\alpha}).$$

Наименьшее отклонение вычисляется по формуле

$$\delta_{i(j)}^{-\alpha} = (\delta_{i^*}^{-\alpha} + \delta_{j^*}^{+\alpha})_{min}, \quad (I.26)$$

зазоры между сопрягаемыми поверхностями при этом определяются по формуле

$$|\delta_{i(j)}^-| = (\delta_{i^*}^{-\alpha} + \delta_{j^*}^{+\alpha}) - (\delta_{i^*}^{-\alpha} + \delta_{j^*}^{+\alpha})_{min}.$$

При сложной структуре размерных связей между элементами  $F_i$ ,  $F_j$  тел  $a_i$ ,  $a_j$  в графе размеров может существовать несколько цепей. В соответствии с (I.23) предельные отклонения  $\delta_{i(j)}^{+\alpha}$  и  $\delta_{i(j)}^{-\alpha}$  по каждой  $\mathcal{J}$ -й простой цепи определяются формулами

$$(\delta_{i(j)}^+)_\mathcal{J} = \sum_{i^*}^m \delta_{i^*}^{+\alpha} + \sum_{j^*}^k \delta_{j^*}^{-\alpha}, \quad (I.27)$$

$$(\delta_{i(j)}^-)_\mathcal{J} = \sum_{i^*}^m \delta_{i^*}^{-\alpha} + \sum_{j^*}^k \delta_{j^*}^{+\alpha}.$$

Здесь  $i^* = i_1, i_2, \dots, i_m$  и  $j^* = j_1, j_2, \dots, j_k$  - вершины  $\mathcal{J}$ -й цепи, причем  $j^*$  - индексы увеличивающих, а  $j^*$  - индексы уменьшающих элементов, независимо от того, каким телам принадлежат эти элементы. Если в графе размеров между вершинами  $a_i$  и  $a_j$  существует несколько простых цепей, то в соответствии с (I.24)-(I.26) предельные отклонения  $\delta_{i(j)}^{+\alpha}$  и  $\delta_{i(j)}^{-\alpha}$  будут:

$$\delta_{i(j)}^{+\alpha} = (\delta_{i(j)}^+)_\mathcal{J}_{max}, \quad (I.28)$$

$$\delta_{i(j)}^{-\alpha} = (\delta_{i(j)}^-)_\mathcal{J}_{min}. \quad (I.29)$$

Связанная сборочная размерная цепь, в которой число неизвестных звеньев превышает число входящих простых цепей, рассчитывается поэтапно. Каждый этап соответствует установке очередного элемента  $a_i$  собираемого изделия; все ранее установленные элементы обозна-

ются единым символом  $a_j'$ . В этом случае число неизвестных в размерной цепи равно числу зазоров между сопрягаемыми поверхностями  $a_i'$  и  $a_j'$  плюс неизвестная погрешность замыкающего звена. Поскольку минимальный зазор при сопряжении  $a_i'$  и  $a_j'$  равен нулю, то число неизвестных уменьшается на единицу и общее число неизвестных оказывается равным числу алгебраических уравнений размерной цепи, что позволяет поэтапно вычислить все размеры, вплоть до замыкающего звена размерной цепи.

Наряду с другими факторами на погрешности параметра  $\omega_{mj}$  влияют деформации элемента конструкции под действием нагрузок, неизбежных при сборке. Величина поля рассеяния деформационных погрешностей  $\omega_{mj}$  зависит от абсолютной жесткости элемента конструкции, а также от величины и характера приложения нагрузок. Однако для оценки влияния деформационных погрешностей на качество сборки важна не столько абсолютная величина  $\omega_{mj\text{деф}}$ , сколько соотношение ее с полем допуска  $\Omega_{mj\text{деф}}$ , которое составляет часть поля допуска  $\Delta_{mj}$ , предназначенную для покрытия деформационных погрешностей. Поэтому одним из важнейших свойств реального элемента конструкции является его относительная жесткость при сборке по параметру  $m_j$ , характеризующая коэффициентом относительной жесткости

$$g_{mj} = \frac{\Omega_{mj\text{деф}}}{\omega_{mj\text{деф}} K_{mj\text{деф}} K_g}, \quad (2.35)$$

где  $K_{mj\text{деф}}$  - коэффициент приведения;  
 $K_g$  - коэффициент запаса жесткости.

Элемент конструкции будет относительно жестким по параметру  $m_j$  при  $g_{mj} \geq 1$  и нежестким - при  $g_{mj} < 1$ . При сборке изделия из элементов малой жесткости необходимо создавать строго определенное силовое поле для обеспечения точности формы геометрических контуров. Такие условия могут быть обеспечены путем базирования и фиксации элементов малой жесткости на достаточно жесткие элементы изделия или специальном сборочном приспособлении.



## 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ

### 2.1. Общие положения

Сборочные работы многовариантны как по возможному составу и последовательности выполнения операций технологического процесса, так и по составу применяемой оснастки и оборудования. Поэтому проектирование оптимальных технологических процессов сборки сложных изделий требует трудоемких вычислений, связанных с выбором рациональной схемы сборки, состава операций и оснащения сборочных работ, с расчетом точности сборочных параметров, с нормированием труда, определением трудоемкости и технологической себестоимости сборки. Кроме того, сборочные работы органически взаимосвязаны с другими процессами изготовления изделия. Поэтому все задачи проектирования технологического процесса сборки необходимо решать комплексно, с учетом других задач технологической подготовки производства изделий. Такое решение возможно только при автоматизированном технологическом проектировании в САПР.

Следует отметить, что научные знания о проектировании технологических процессов сборки исторически развивались без использования в решении ее задач ЭВМ, в связи с чем большинство положений носит чрезвычайно общий характер, то есть сформулированы расплывчато и неопределенно с точки зрения требований вычислительной техники, программной реализации, теории алгоритмов. Поэтому для автоматизации задач проектирования технологического процесса следует рассматривать физику изучаемых явлений, основанную на изучении взаимодействий в технологическом процессе сборки.

В формализованной системе проектирования технологического процесса сборки фундаментальные положения принимаются в качестве исходных, т.е. первичных и общих положений, которые характерны для всех рассматриваемых областей знаний, для любых ситуаций, заданий и решений. Эти исходные положения выполняют роль аксиом. Для выявления требований к построению формализованной системы проектирования технологического процесса такое проектирование должно рассматриваться в едином комплексе с другими производственными проблемами.

Технологическое проектирование в САПР базируется на математическом моделировании производства, отражающем закономерности и связи между свойствами изделия и технологической системы в виде математических отношений. Эти отношения отражают реальное физическое содер-

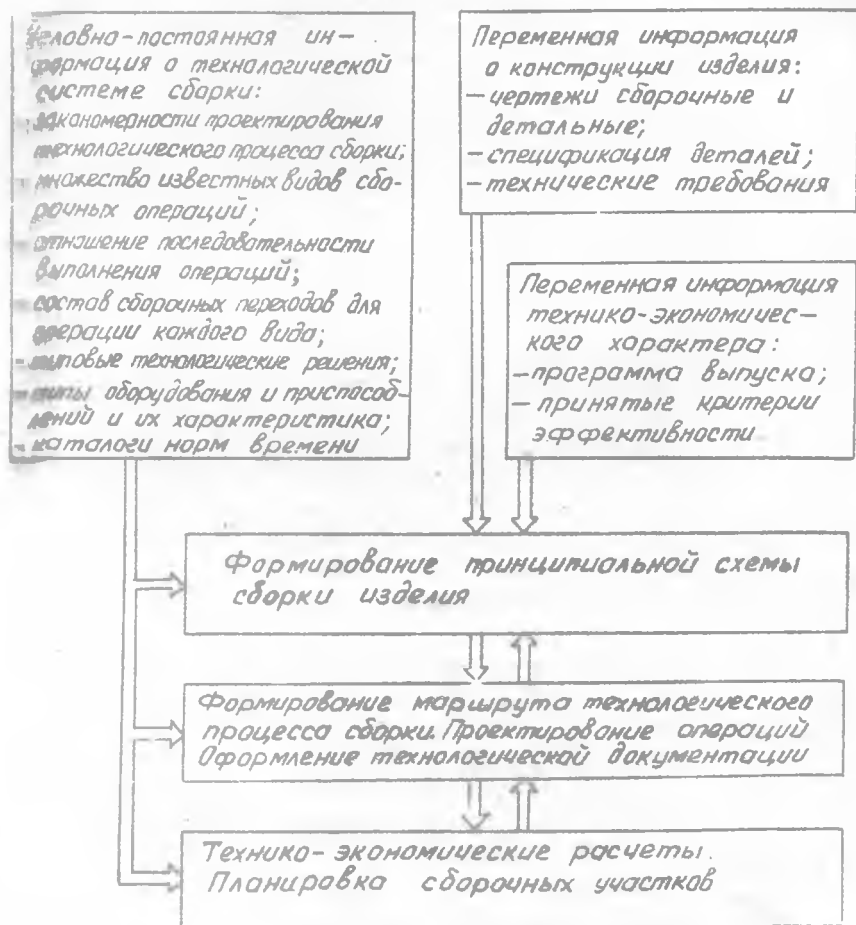
знание процессов производства, и знание их необходимо не только при автоматизированном, но и при традиционном проектировании.

Задачи автоматизации технологического проектирования сводятся к моделированию на ЭВМ деятельности инженера — технолога, что возможно лишь при формализации методов решения этих задач. Поэтому необходимой предпосылкой автоматизации проектирования сборочных работ является всестороннее исследование факторов, влияющих на сборку, в целях формализации и математического моделирования технологического процесса и оснащения сборки.

## 2.2. Последовательность проектирования технологического процесса сборки

Сложность авиационных ГТД как объектов производства и разнообразие методов и средств производства приводят к тому, что проектирование технологического процесса сборки выполняется в несколько этапов путем последовательного решения задач различного уровня. Общая схема проектирования технологического процесса сборки изображена на рис. 2.1. В этой схеме алгоритмический процесс проектирования технологического процесса сборки подразделен на три составные части, которые можно использовать как автономно, так и совместно. При этом будет решена или часть задач проектирования, представляющая самостоятельный практический интерес, или задача проектирования технологического процесса сборки в целом. Ниже рассматриваются более подробно только две первые части проектирования технологического процесса. Третья часть процесса проектирования достаточно полно описана в соответствующей литературе [4].

При наличии в изделии технологически независимых составных частей (сборочных единиц), определяемых схемой членения, проектирование технологического процесса сборки производят отдельно на каждую составную часть, а технологический процесс сборки всего изделия представляется как совокупность технологических процессов сборки составляющих изделие сборочных единиц и общей сборки изделия. Это дает возможность при автоматизации процесса проектирования ограничиться разработкой алгоритма проектирования отдельной сборочной единицы. В зависимости от числа сборочных единиц, входящих в изделие, алгоритмический процесс проектирования повторяется соответствующее число раз. Это обеспечивает универсальность алгоритмического процесса проектирования для относительно сложной структуры изделия.



Р и с. 2.1. Схема проектирования технологического процесса сборки

### 2.3. Формирование принципиальной схемы сборки

Принципиальная схема сборки изделия представляет собой первый уровень проектирования технологического процесса сборки и выражает упорядоченную последовательность образования изделия из элементов  $a_i \in A$ . Кроме того, схема описывает иерархическую структуру сборочных единиц, соответствующих этапам сборки изделия.

Любая принципиальная схема сборки возможна только при условии, что при такой схеме хотя бы один технологический процесс сборки обеспечивает требуемое качество изделия. Поэтому при разработке принципиальной схемы сборки необходимо учитывать (или даже проектировать) возможные варианты укрупненных технологических процессов, отражающих состав и последовательность основных операций и основные технико-экономические показатели сборки. При этом следует иметь в виду, что последовательность выполнения всех основных операций сборки зависит главным образом от последовательности установки элементов изделия. Поэтому для получения оптимального технологического процесса сборки необходимо прежде всего анализировать различные варианты установки элементов изделия.

При выполнении операций установки происходит образование формы изделия, то есть реализуются его геометрические контуры. Устанавливаемый элемент  $a_i$  перемещается в зону установки и базируется на элементы сборочной базы. Затем производится фиксация или крепление этого элемента с помощью либо крепежных элементов изделия, либо сборочного приспособления в зависимости от вида соединения.

Содержание и возможная последовательность выполнения операций установки отдельного элемента  $a_i$  зависит от состояния контуров  $F(a_i)$  перед установкой. Если контуры  $F(a_i)$  до установки находятся в состоянии  $F_i^s(a_i) = I$  (то есть в виде жесткого элемента конструкции), а  $F_i^p(a_i) = 0$ , то необходимо в процессе установки реализовать только контуры положения  $F_i^s(a_i)$ . В этом случае процесс установки элемента  $a_i$  является линейно упорядоченным, включающим операции перемещения к месту установки, базирования и фиксации. Если контуры элемента  $a_i$  до установки находятся в состоянии  $F_i^s(a_i) = 0$  и  $F_i^p(a_i) = 0$ , то в процессе установки необходимы соответствующие операции для получения требуемой формы контуров  $F_i^p(a_i)$ . Реализация контуров  $F_i^p(a_i)$  осуществляется либо путем фиксации нежесткого элемента на жестких элементах сборочной базы (например, при установке ленточного комута на трубопровод), либо путем применения дополнительных формообразующих операций: гибки, рихтовки или механической обработки.

Последовательность установки элементов изделия А можно описать как упорядоченное множество  $P_j$  или в виде перестановки из  $n$  символов:

$$P_j = a_{j1}, \dots, a_{j,k-1}, a_{jk}, \dots, a_{jn},$$

где индекс  $k$  показывает очередность установки элемента  $a_{jk}$  в последовательности  $P_j$  при сборке. Влияние всех факторов на последовательность установки элементов изделия описывается условиями, отражающими, главным образом, возможность базирования и доступа к месту установки каждого элемента  $a_i \in A$ . Уравнения  $B(a_i)$  описывают возможные составы сборочных баз, а уравнения  $W(a_i)$  - составы элементов, препятствующих установке  $a_i$  из-за невозможности реализации требуемых перемещений.

Формирование принципиальной схемы сборки производится путем решения отдельных задач в следующей последовательности:

1. Выявление конструктивно-технологических свойств изделия.
2. Выбор оптимальной схемы технологического членения изделия.
3. Выбор оптимальной схемы базирования и состава технологического оснащения, используемого при базировании.
4. Определение состава элементов, ограничивающих доступ к месту установки каждого элемента  $a_k \in A$ .
5. Определение последовательности формирования сборочных единиц и изделия в целом.
6. Составление принципиальной схемы сборки изделия и отдельных сборочных единиц.

Ниже рассмотрены процессы решения отдельных задач формирования схемы сборки. Алгоритмы решения этих задач представляют собой процедуру генерации путем последовательного преобразования исходной информации по жестко заданной системе с учетом ограничивающих условий.

### 2.3.1. Выявление конструктивно-технологических свойств изделия

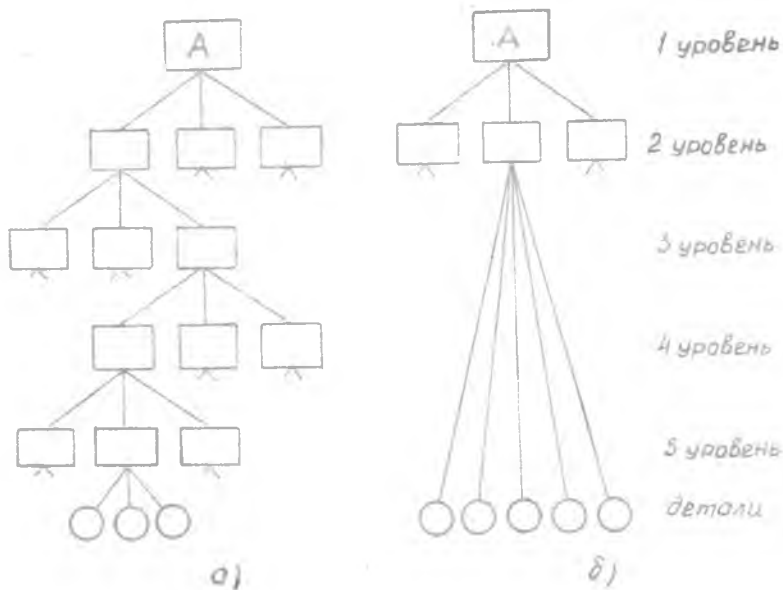
В результате анализа сборочных чертежей и другой конструкторской документации выявляются конструктивно-технологические свойства, характеризующие механическую взаимосвязь элементов изделия, пространственную взаимосвязь, виды соединений и др. Все эти свойства подробно описаны в разд. I.

### 2.3.2. Выбор оптимальной схемы технологического членения

Одним из главных вопросов, решаемых при формировании принципиальной схемы сборки, является поиск оптимального варианта технологического членения изделия на составные части и определение порядка входимости одних сборочных единиц в другие.

При определении составных частей изделия за основу может быть принят состав функциональных элементов изделия. Так, например, для авиационных ГТД такими функциональными элементами являются входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина, реактивное сопло и др. В современных конструкциях ГТД, отвечающих требованиям технологичности, перечисленные функциональные элементы обычно представляют самостоятельные для процесса сборки модули. Однако при разработке конструкции каждого функционального элемента конструктору не всегда удается учесть все технологические требования, предъявляемые к сборочной единице. Поэтому для удовлетворения технологических требований при проектировании технологического процесса возникает необходимость в определении оптимального варианта расчленения изделия  $A$  на составляющие технологические сборочные единицы  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}$ . При этом выделенные технологические сборочные единицы могут только частично отвечать функциональным целям в изделии.

Конструкция изделия или сборочной единицы позволяет, как правило, по-разному расчленить ее на составляющие элементы. Поэтому обычно разрабатывается несколько вариантов схемы расчленения изделия на технологические элементы, после чего производится их анализ. Степень расчленения изделия на технологические составные части во многом зависит от принятой формы сборки: дифференцированной или недифференцированной. При дифференцированной форме сборки необходимо широкое расчленение изделия на сборочные единицы различного уровня и детали (рис. 2.2, а). В этом случае сборка выполняется широким фронтом при наименьшем цикле. Свободный доступ к зонам сборочных работ позволяет широко применять механизированное и автоматизированное оборудование, что обеспечивает большую производительность труда и высокое качество изделия. При недифференцированной форме сборки изделие собирается непосредственно из деталей и незначительного числа сборочных единиц (рис. 2.2, б). Из-за стесненных условий и ограниченного доступа к зонам сборочных работ преобладает ручной труд (и соответственно большая трудоемкость). В серийном производстве применяют преимущественно дифференцированную форму сборки.



Р и с. 2.2. Схемы членения изделия на составные части: а – для дифференцированной формы сборки; б – для недифференцированной формы сборки

Алгоритм решения задачи технологического членения изделия строят на основе следующих технологических положений:

1. Возможность любую сборочную единицу, выделенную при технологическом членении, собирать, контролировать или считать независимо от других сборочных единиц.
2. Наличие у каждой выделенной сборочной единицы комплекта сборочных баз для возможности установки ее на более крупную сборочную единицу.
3. Возможность разработки для выделенной сборочной единицы соответствующих требований, определяющих качество сборки.
4. Обеспечение взаимозаменяемости каждой выделенной сборочной единицы.
5. Отсутствие в сборочной единице элементов, закрывающих доступ элементам из других сборочных единиц.
6. Доступность мест разъемов выделенных сборочных единиц для выполнения требуемых операций. Такая доступность определяется пре-

де всего наличием необходимых зон доступа для инструмента, оснастки и различных элементов оборудования.

7. Выделение в самостоятельную сборочную единицу соединений, требующих для сборки специального оборудования (сварка, пайка и др.).

8. Возможность механизации и автоматизации технологического процесса сборочной единицы.

9. Возможность использования для сборки выделенной сборочной единицы типовых технологических процессов.

При формировании состава сборочной единицы в общем случае должны выполняться следующие условия:

граф соединений элементов конструкции, входящих в сборочную единицу  $A_k$ , должен быть связан;

в состав  $A_k$  должны входить исполнительные звенья всех заданных контуров;

состав элементов  $A_k$  должен быть совместимым и собираемым.

При разработке схемы членения возникает проблема выбора элементов конструкции, которые могут входить в состав изделия или сборочной единицы. Условия вхождения  $a_i$  в  $A$  в зависимости от составов их функциональных контуров определяются отношениями

(2.1)

$$a_i \in A, \text{ если } F(a_i)' \cap F(A) \neq \emptyset,$$

(2.2)

$$a_i \in A, \text{ если } F(a_i)'' \cap F(A) = F(a_i)'',$$

где  $F(a_i)'$  - подмножество основных функциональных контуров  $a_i$ ;

$F(a_i)''$  - подмножество контуров сопряжения  $a_i$  с другими элементами, входящими в состав  $A$ .

Совместимость и собираемость элементов, входящих в  $A$ , осуществляется следующим образом. Набор элементов, при наличии которых элемент  $a_i$  может входить в состав  $A$ , обозначается в виде  $B_k(a_i)$ . Очевидно, что  $a_i$  может входить в  $A$  только в том случае, если в составе  $A$  существует хотя бы один набор элементов вида  $B_k(a_i)$ :

(2.3)

$$a_i \in A; \text{ если } \exists B_k(a_i) (B_k(a_i) \subseteq A).$$

Кроме наборов типа  $B_k(a_i)$  могут существовать такие наборы элементов  $W_j(a_i)$ , при наличии которых вхождение  $a_i$  в  $A$  невозможно. Тогда



$$a_i \in A, \text{ если } \forall W_j(a_i) (W_j(a_i) \notin A). \quad (2.4)$$

На логическом уровне описания эти отношения принимают следующий вид:

$$a_i \in A, \text{ если } B(a_i) = 1, \quad (2.5)$$

$$a_i \in A, \text{ если } W(a_i) = 0. \quad (2.6)$$

Состав элементов  $A$  будет собираемым, если существует хотя бы одна возможная последовательность установки элементов  $A$  при сборке. Эта последовательность представляет собой упорядоченное множество

$$A_S = (a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k, \dots, a_n),$$

где  $1, 2, \dots, k$  - порядковые номера элементов в соответствии с очередностью их установки.

Подмножество элементов, предшествующих  $a_k$  в упорядоченном множестве  $A_S$ , обозначается символом  $\dot{A}_k = (a_1, a_2, \dots, a_{k-1})$ . Следование элемента  $a_k$  непосредственно за элементами  $\dot{A}$  можно рассматривать как допустимость вхождения  $a_k$  в  $\dot{A}_k$ . Поэтому условия существования  $A_S$  имеют вид

$$\forall a_k \in A_S [ \exists B_S(a_k) (B_S(a_k) \subseteq \dot{A}_k) ], \quad (2.7)$$

$$\forall a_k \in A_S [ \exists W_S(a_k) (W_S(a_k) \notin \dot{A}_k) ]. \quad (2.8)$$

На состав  $B_S(A_k)$  и  $W_S(A_k)$  влияют физико-механические свойства элементов конструкции, точностные и другие характеристики их контуров. На логическом уровне описание условий (2.7), (2.8) переходит в описание условий вида (2.5)-(2.6).

При разработке схемы технологического членения возникает также задача выделения наименьшей технологически законченной сборочной единицы как структурного образования. Такую единицу принято называть элементарной. Это минимальная группа деталей, где между всеми деталями выполняется отношение связности по всем направлениям и не ограничивается доступ к месту соединения деталей, не вошедшим в эту группу. Сборочную единицу следующего уровня членения (после элементарной) можно представить в виде совокупности элементарных сборочных единиц, де-

тали которых связаны между собой. Связность деталей двух элементарных сборочных единиц обеспечивается, если у тех имеется хотя бы одна общая деталь. Поэтому две элементарные сборочные единицы, имеющие общие детали, также удовлетворяют требованиям к составу сборочной единицы и, следовательно, при необходимости могут быть выделены в отдельные сборочные единицы.

Последовательность разработки схемы технологического членения без применения ЭВМ может быть выражена следующим образом:

1. Выявление кратчайших замкнутых цепей и формирование элементарных сборочных единиц.

2. Сортировка всех элементарных сборочных единиц по видам работ, предполагающих их выполнение на отдельных рабочих местах (сварка, пайка, склеивание и т.п.).

3. Упорядочение всех выделенных групп элементарных сборочных единиц в соответствии с принятым в технологии порядком выполнения этапов сборки (так, первыми выполняются сварные соединения, затем соединения на пайке, склеивании, соединения с натягом и т.д.).

4. Уточнение состава групп сборочных единиц с учетом требований доступа.

5. Упорядочение сборочных единиц в каждой группе по базированию.

6. Формирование групп элементарных сборочных единиц, образующих сборочную единицу следующего уровня.

7. Упорядочение сборочных единиц различного уровня по входимости в изделие.

8. Окончательное построение схемы технологического членения изделия.

При автоматизированном проектировании технологического процесса сборки изделия процесс формирования деталей, входящих в элементарную сборочную единицу, осуществляется по этапам. На первом этапе из множества деталей изделия по каждому координатному направлению выделяют все подмножества  $A_i \subset A$ , которые образуют замкнутые цепи, где каждая из деталей  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  ограничена в возможных перемещениях по одному и тому же направлению  $\alpha$  другими деталями. На втором этапе полученные подмножества деталей, образующих замкнутые цепи, объединяют в минимальные по числу входящих деталей группы, где для каждой детали выполняется требование ограничения возможного перемещения по каждому координатному направлению и связности (когда детали, относящиеся к разным замкнутым цепям, также имеют ограничения возможных перемещений относительно друг друга).

Однако полученная группа деталей может еще не отвечать условию неограничения доступа к месту сопряжения деталям, не вошедшим в эту группу. Поэтому, чтобы группа деталей удовлетворяла всем требованиям к элементарной сборочной единице, выполняется третий этап, где все группы, имеющие одни и те же детали с нефиксированными сопряжениями, объединяются с тем, чтобы обеспечить условие не ограничить доступ к месту соединения деталям, не вошедшим в эту группу.

При выборе схем членения и сборки с использованием ЭМ объем исходных данных для решения этих задач весьма велик. Поэтому более рационален диалоговый метод проектирования, когда часть задач решается на ЭМ, а часть самим технологом в несколько этапов. Вначале готовят исходные данные: технолог по сборочным чертежам изделия выявляет состав деталей и их конструктивно-технологические свойства, влияющие на возможность расчленения и сборки изделия. Если выявленные свойства достаточны для формирования набора всех возможных вариантов сборочных единиц  $A_2^3$  на ЭМ, то данная задача решается с применением ЭМ, а если исходных данных недостаточно, то состав вариантов сборочных единиц  $A_2^3$  формирует технолог. При большом числе деталей для сокращения объема вычислений разрабатывают укрупненную расчетную модель изделия. Элементами модели являются группы деталей, целесообразность объединения которых в сборочную единицу очевидна из технологических и технико-экономических соображений. далее последовательно формируются схемы технологического членения изделия либо ЭМ, либо технологом. При формировании схем на ЭМ целесообразна предварительная оценка их технологом, чтобы сократить число вариантов, оставляя для дальнейшего анализа лишь рациональные. На основе набора схем членения формируют набор возможных схем сборки изделия и выбирают оптимальную схему членения и сборки путем моделирования сборочных работ на ЭМ в соответствии с принятыми схемами. За критерии оптимизации чаще всего принимают трудоемкость, технологическую себестоимость или цикл сборки. Схема членения изделия  $A$  представляется в виде графа дерева  $G^* = (A^*, C^*)$ . В этом графе множество вершин отражает состав элементов сборочной единицы

$$A^* = (A_k^I, A_1^II, A_2^II, \dots, A_n^{II}, A_1^III, \dots, A_m^N).$$

Состав дуг графа •

$$c^* \varepsilon b_i = \begin{cases} 1, & \text{если } A_i \in A_j^{j+1}, \\ 0 & - \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2.9)$$

Пример графа членения для сборочной единицы, приведенной на рис. 2.3,а, показан на рис. 2.3,б.

### 2.3.3. Выбор схем базирования и состава оснащения сборки

Одной из важных задач, решаемых при проектировании технологического процесса сборки, является определение требуемых составов сборочных баз, обеспечивающих определенность базирования устанавливаемых элементов изделия. При решении этой задачи значение единичной базы  $V_{i(j)} = 1$  принимается только в случае, когда существует механическая связь элементов и обеспечивается определенность базирования с необходимой точностью. Выполнение последнего условия определяется на основе расчета сборочных размерных цепей.

Состояние установленного элемента  $a_i$  при базировании характеризуется логической величиной  $B(a_i)$ :

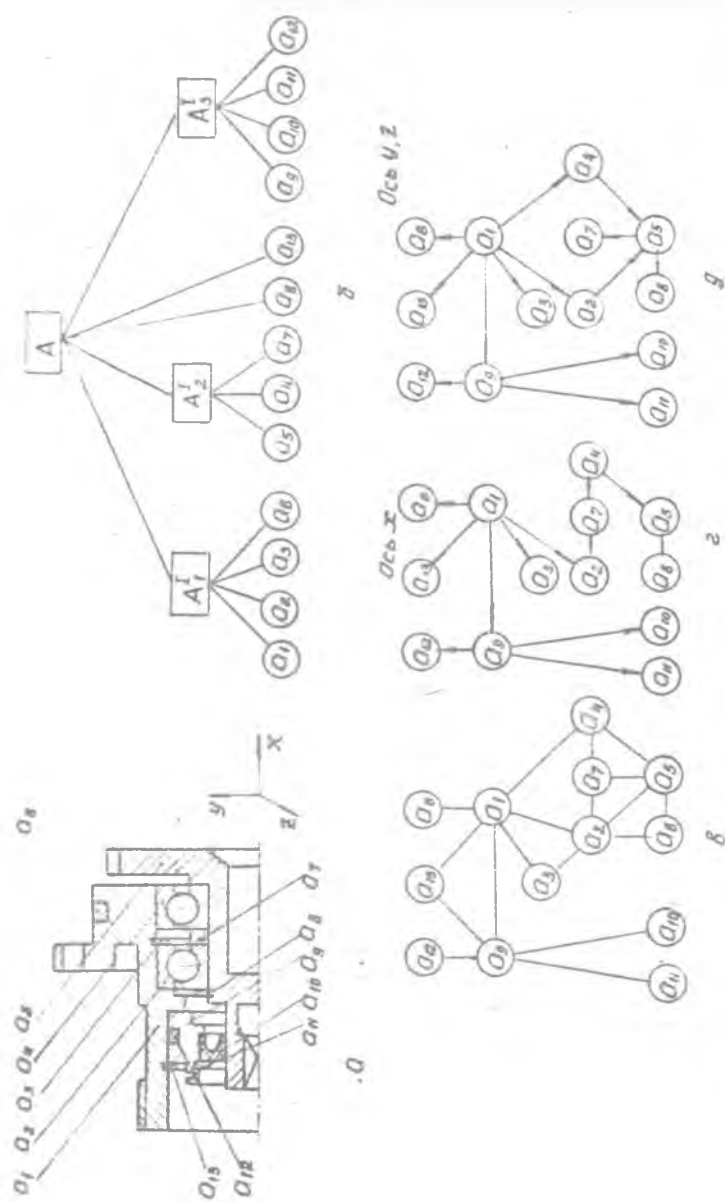
$$B(a_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } V_i\{m\} \wedge V_{i(0)} = V_{i(0)}, \\ 0, & \text{если } V_i\{m\} \wedge V_{i(0)} \neq V_{i(0)}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Здесь  $V_{i(0)}$  - вектор базирования, соответствующий определенности базирования элемента  $a_i$ ;  $V_i\{m\}$  - вектор базирования элемента  $a_i$  относительно совокупности  $\{m\}$  базовых элементов  $a_j$ , вычисляемый с помощью логического сложения векторов  $V_{i(j)}$  по формуле

$$V_i\{m\} = V_{i(1)} \vee V_{i(2)} \vee \dots \vee V_{i(m)} = \bigvee_{j=1}^m V_{i(j)}. \quad (2.11)$$

Возможные составы сборочных баз элемента  $a_i$  описываются либо совокупностью базовых элементов  $V_K(a_i) = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}\}$ , при наличии которых  $V_K(a_i) = 1$ , либо логическим уравнением  $B(a_i)$ , в котором взаимосвязь логических переменных описывается так:

$$B(a_i) = \begin{cases} a_j \wedge \dots \wedge a_m, & \text{если } V_{i(0)} = \bigvee V_{i(j)}, V_{i(j)} \neq V_{i(0)}, \\ a_j \vee \dots \vee a_m, & \text{если } V_{i(0)} = V_{i(j)} = \dots = V_{i(m)}, \\ 1, & \text{если элемент } a_i \text{ не нуждается в сборочной базе.} \end{cases} \quad (2.12)$$



Р и с . 2.3. Пример построения технологических схем для сборочной единицы: а - конструктивная сборочная единица; б - схема технологического членения; в - граф сборки; г, д - графы базирования.

В уравнении (2.12)  $B(a_i) = I$ , если определенность базирования этого элемента обеспечена до базирования  $a_i$ . Таким образом, на основе формул (2.10), (2.11), (2.12) возможные составы сборочных баз могут определяться расчетным путем с применением ЭВМ. Однако при диалоговом проектировании эта задача сравнительно легко решается и без ЭВМ на основе анализа механических и пространственных связей деталей непосредственно по сборочным чертежам изделия. При анализе взаимосвязей деталей следует учитывать, что для обеспечения определенности базирования реальная сборочная база должна обладать следующими свойствами:

поверхность, линия, точка, входящие в базу, должны иметь точность положения, обеспечивающую требуемую точность положения базированного элемента относительно других элементов собираемого изделия, и, при необходимости, точность формы базированного элемента;

базовые элементы должны обеспечивать возможность фиксации базированного элемента изделия.

Для примера в табл. 2.1 приведены логические уравнения состава сборочных баз для сборочной единицы, изображенной на рис. 2.3, а. Состав сборочных баз определен на основе анализа схем сопряжения и базирования, показанных на рис. 2.3, в, г, д.

При определении состава сборочных баз большое значение имеет выбор (определение) первого базового элемента. В качестве базового элемента выбирается такой, поверхности которого будут определять положение всей сборочной единицы в изделии. Следовательно, можно сказать, что базовым элементом сборочной единицы является элемент, который имеет контакт с одним или несколькими элементами другой сборочной единицы, в состав которой входит рассматриваемая сборочная единица. В качестве базового может быть принят также такой элемент, который при установке не нуждается в сборочной базе. Процесс определения других базовых элементов всей системы базирования начинается от первого базового элемента в соответствии с правилами: из двух связанных сопряжением или размером элементов базовым для другого в направлении координатной оси является тот, для которого база в данном направлении уже определена.

Определенность базирования устанавливаемого элемента  $a_i$  обеспечивается за счет сопряжения  $a_i$  по базированному контуру  $F_K(a_i)$  с контуром установочной базы  $F_S(a_j)$  и фиксации элемента  $a_i$  относительно базового элемента  $a_j$ . Поверхности контуров  $F_K(a_i)$  и  $F_S(a_j)$  одинаковы по форме, поэтому после сопряжения  $a_i$  с  $a_j$  базовый элемент является как бы дополнением  $a_i$  по базированному

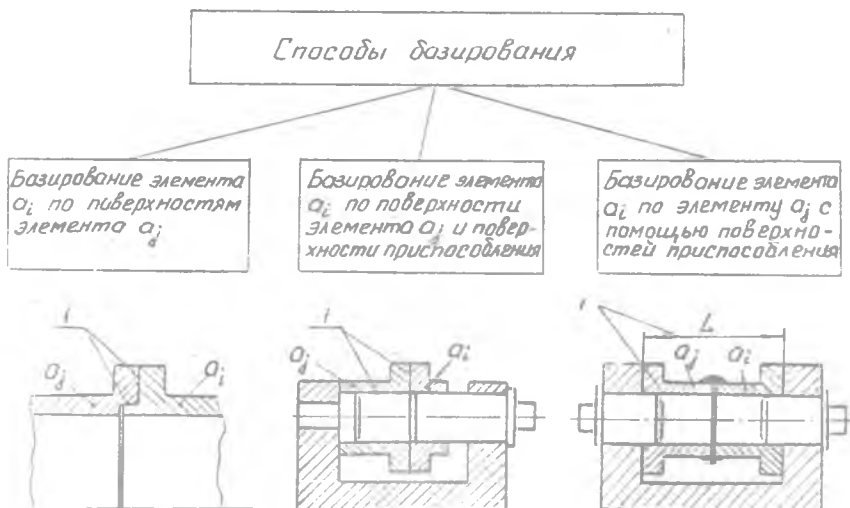
Номер элемента	Наименование	Логические уравнения состава сборочных баз	Логические условия состава элементов, препятствующих доступу
$a_1$	Корпус	$B(a_1) = 1$	$W(a_1) = 0$
$a_2$	Подшипник	$B(a_2) = a_1$	$W(a_2) = a_3 \wedge (a_7 \vee a_4 \vee a_5)$
$a_3$	Кольцо стопорное	$B(a_3) = a_1$	$W(a_3) = a_4 \wedge a_5$
$a_4$	Подшипник	$B(a_4) = a_1 \wedge a_7$	$W(a_4) = a_5$
$a_5$	Колесо зубчатое	$B(a_5) = a_2 \wedge a_4$	$W(a_5) = a_8$
$a_6$	Кольцо уплотнительное	$B(a_6) = a_1$	$W(a_6) = 0$
$a_7$	Кольцо дистанционное	$B(a_7) = a_2 \wedge a_5$	$W(a_7) = a_2$
$a_8$	Кольцо стопорное	$B(a_8) = a_5$	$W(a_8) = (a_9 \vee a_{10} \vee a_{11} \vee a_{12} \vee a_{13})$
$a_9$	Корпус уплотнения	$B(a_9) = a_1$	$W(a_9) = a_{13}$
$a_{10}$	Манжета	$B(a_{10}) = a_9$	$W(a_{10}) = a_{11}$
$a_{11}$	Кольцо стопорное	$B(a_{11}) = a_9$	$W(a_{11}) = 0$
$a_{12}$	Кольцо уплотнительное	$B(a_{12}) = a_9$	$W(a_{12}) = a_{13} \wedge a_1$
$a_{13}$	Кольцо стопорное	$B(a_{13}) = a_1$	$W(a_{13}) = 0$

контур  $F_K(a_i)$ . Поскольку положение установочной базы  $F_S^P(a_j)$  обеспечено относительно базовой системы координат изделия А с требуемой точностью, то в результате базирования  $a_i$  на  $a_j$  получится

$$[F_K^P(a_i) \equiv F_S^P(a_j) \wedge F_S^U(a_j) = 1] \rightarrow F_K^U(a_i) = 1,$$

то есть за счет сопряжения  $a_i$  с  $a_j$  по контуру  $F_K^P(a_i) \equiv F_S^P(a_j)$  реализуется контур положения  $F_K^U(a_i)$ . Одновременно реализуются и те контуры положения, которые связаны с  $F_K(a_i)$  по условиям существования.

В состав сборочной базы  $B_K(a_i)$  могут входить как предварительно установленные элементы изделия, так и базовые элементы сборочного приспособления. С этой целью используют три способа базирования, показанные на схеме рис. 2.4.



Р и с. 2.4. Способы базирования элементов сборочной единицы: I - поверхности, образующие сборочную базу



При использовании в схемах базирования базовых поверхностей приспособления одновременно рассматривается конструктивная схема приспособления.

Как правило, любой элемент конструкции сборочной единицы может иметь несколько вариантов базирования. Возможны состав сборочных баз  $B(a_i)$  для каждого элемента  $a_i$  определяется установлением состава контуров  $a_i$ , которые могут быть дополнены контурами базовых элементов изделия или сборочного приспособления. Для обеспечения определенности базирования элемента  $a_i$  с учетом возможных составов этих контуров и определяются возможные составы сборочных баз для  $a_i$ . Выбор схемы базирования (в системе САПР) осуществляется следующим образом: вначале формируется множество возможных схем, которые подвергаются ряду проверок: проверке на отсутствие нерациональных сочетаний сборочных баз, предварительной проверке на точность, проверке на существование возможной последовательности установки с учетом базирования и доступа. Из всех возможных схем базирования выбирается схема, оптимальную по заданному критерию (обычно технологическая себестоимость).

Объем вычислений при выборе оптимального варианта базирования часто настолько велик, что эта задача может успешно решаться только на ЭМ с использованием моделей сборочной единицы.

Выявление базовых контуров, необходимых для обеспечения определенности базирования реализуемых контуров элемента, осуществляют путем анализа взаимосвязи этих контуров по условиям существования. Эти задачи решают с помощью матрицы взаимосвязи этих контуров, включающей контуры элемента  $a_i$  и множество контуров установочных баз  $F(B)$  всех базовых элементов. Каждое покрытие матрицы, удовлетворяющее условию (2.10), определяет возможную схему базирования при сборке изделия А, если существует хотя бы одна такая последовательность установки всех  $a_i \in A$ , реализация которой возможна. Схема базирования отражает составы сборочных баз и связь базлируемых элементов изделия с элементами сборочных баз. Изображение этой взаимосвязи осуществляется с помощью графа базирования, в котором множество вершин есть множество элементов изделия и базовых элементов сборочной оснастки, и дуги  $a_i(j) = 1$ , если  $a_j \in B_k(a_i)$ .

После выбора схемы базирования для каждой сборочной единицы входящей в изделие А, решают задачу выбора состава сборочных приспособлений.

Конструктивную схему сборочного приспособления выбирают по математической модели, включающей матрицу контуров базовых и несущих

элементов приспособления и граф  $G = (N, C)$  сопряжений этих элементов.

#### 2.3.4. Определение состава элементов, ограничивающих доступ устанавливаемому элементу при выполнении операции установки

Отношения  $W(a_i)$  отражают условия доступа устанавливаемого элемента при выполнении операции установки. Эти условия описываются на основании анализа возможных перемещений  $a_i \in A$  в процессе установки. Переход элемента  $a_i$  из свободного состояния в требуемую зону осуществляется реализацией некоторых возможных перемещений элемента  $a_i$  относительно размещенных ранее элементов изделия А. Доступ элемента  $a_i$  в заданную зону возможен, если другие элементы  $a_j \in A$  не препятствуют какому-либо из этих перемещений. Состав элементов, препятствующих перемещению элемента  $a_i$  и делающих доступ невозможным, описывается уравнением

$$W(a_i) = \begin{cases} a_s \vee \dots \vee a_j, & \text{если } D_i(s) = \dots = D_i(j) = 0, \text{ то есть} \\ & \text{любой из элементов } a_s, \dots, a_j \text{ препятствует} \\ & \text{доступу } a_i; \\ a_s \wedge \dots \wedge a_j, & \text{если } D_i(s) \wedge \dots \wedge D_i(j) = 0, \\ & \text{то есть элементы} \\ & a_s, \dots, a_j \text{ препятствуют установке } a_i \text{ только} \\ & \text{вместе взятые} \end{cases} \quad (2.13)$$

В состав уравнений  $D_i(s), \dots, D_i(j)$ , влияющих на содержание  $W(a_i)$ , включаются освобождающиеся возможные перемещения, реализация которых приводит к утрате связи элемента  $a_i$  с элементами  $a_s, \dots, a_j$ . Если  $W(a_i) = 0$ , то доступ  $a_i$  в требуемую зону возможен, а если  $W(a_i) = 1$ , то доступ невозможен. При диалоговом проектировании состав уравнений (2.13) можно определить непосредственно по чертежу сборочной единицы. Для примера в табл.2.1 приведен состав уравнений  $W(a_i)$  для сборочной единицы, изображенной на рис.2.3,а.

#### 2.3.5. Определение последовательности формирования сборочных единиц и изделия в целом

Исходными данными для определения последовательности установки элементов являются схема базирования (или таблица составов сбо-

рочных баз) и таблица составов элементов, препятствующих доступу при установке каждого элемента сборочной единицы.

Процесс установки элементов в каждой сборочной единице представляется как упорядоченная последовательность  $P_m$  из элементов  $a_i \in A$ . Например  $P_j = a_{j1}, a_{j2}, a_{j3}, \dots, a_{jk-1}, a_{jk}, \dots, a_{jn}$ . Последовательность установки может быть записана также в виде

$$P_j = [a_{j1}(a_{j2}, a_{j3}), \dots, (a_{jk-1}, a_{jk}, \dots, a_{jn}),$$

где скобки охватывают детали, образующие сборочные единицы более низкого уровня, чем рассматриваемая. Последовательность установки элементов  $a_i$  можно представить как перестановку из  $n$  символов устанавливаемых элементов, удовлетворяющую условиям базирования и доступа этих элементов к месту установки. Условия базирования при установке элемента  $a_i$  выполняются, если среди установленных ранее элементов есть такие, которые образуют хотя бы один из возможных составов сборочной базы вида  $B(a_i) = a_{j1} \dots a_{jk}$ . Условия доступа выполняются, если среди установленных ранее элементов нет таких, которые образуют состав элементов, препятствующих установке  $a_i$  вида  $W(a_i) = a_{j1} \dots a_{jk}$ . Формально эти условия можно представить так: установка всех элементов изделия  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  в последовательности  $P_m$  возможна, если выполняются следующие два условия:

$$\forall a_i \in A [ \exists B(a_i) (B(a_i) \subseteq \bar{A}_i), \quad (2.14)$$

$$\forall a_i \in A [ \forall W(a_i) (W(a_i) \not\subseteq \bar{A}_i), \quad (2.15)$$

где  $\bar{A}_i$  - совокупность элементов изделия, установленных до установки  $a_i$ .

Последовательность установки  $P_m$  возможна только в том случае, когда условия (2.14) и (2.15) выполняются одновременно, в противном случае последовательность  $P_m$  не может быть реализована.

Выбор последовательности установки осуществляется в два этапа. На первом этапе формируют весь массив перестановок, возможных по условиям базирования и доступа. На втором этапе проводят поиск последовательности установки элементов, оптимальной по принятому критерию оптимизации.

Выполнение первого этапа рассмотрим на примере сборочной единицы, изображенной на рис. 2.5, а. Логические уравнения состава сборочных баз  $B(a_i)$  и состава элементов, препятствующих доступу  $W(a_i)$  для рассматриваемой сборочной единицы, представлены в табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

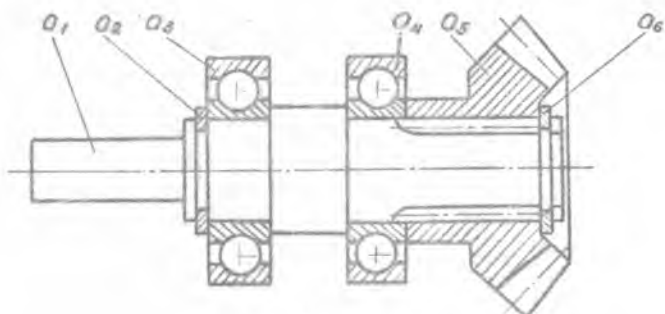
Номер элемента	Наименование элемента	Логические уравнения состава сборочных баз	Логические уравнения состава элементов, препятствующих доступу
$a_1$	Вал	$B(a_1) = 1$	$W(a_1) = 0$
$a_2$	Кольцо стопорное	$B(a_2) = a_1$	$W(a_2) = 0$
$a_3$	Шарикоподшипник	$B(a_3) = a_1$	$W(a_3) = a_2$
$a_4$	Шарикоподшипник	$B(a_4) = a_1$	$W(a_4) = a_3 \wedge a_5$
$a_5$	Колесо зубчатое	$B(a_5) = a_1 \wedge a_4$	$W(a_5) = a_6$
$a_6$	Кольцо стопорное	$B(a_6) = a_1$	$W(a_6) = 0$

На основе данных табл. 2.2 возможные последовательности установки определяются следующим образом.

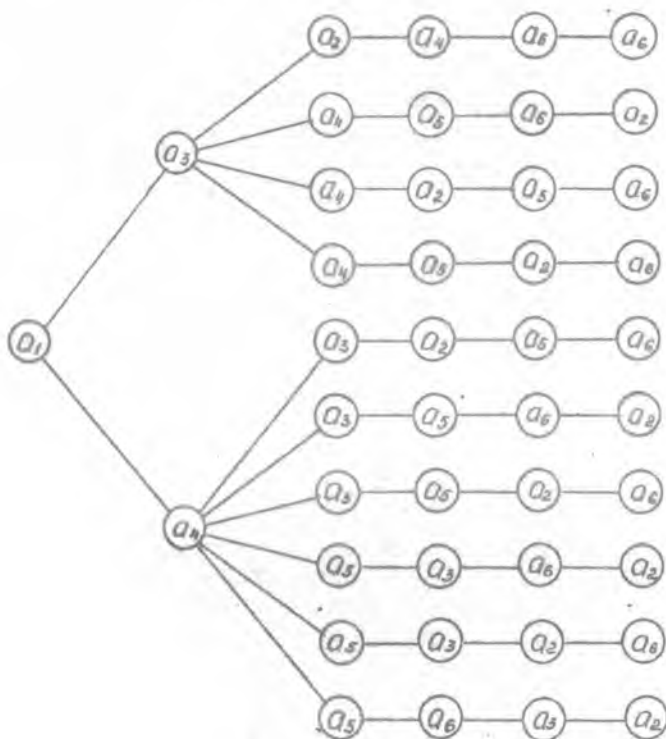
1. Выбираются элементы  $a_i \in A$ , для которых выполняется условие базирования вида  $B(a_i) = 1$ . Каждый такой элемент может устанавливаться первым. Этот элемент принимается за корневую вершину дерева вариантов установки. Для рассматриваемого примера таким элементом является  $a_1$ .

2. Рассматриваются все остальные, кроме корневой вершины, элементы  $a_i$ ; те из них, для которых при наличии корневой вершины  $a_1$  выполняются условия базирования и доступа, могут устанавливаться вторыми. Например, установка деталей на вал в последовательности  $p_i = a_1, a_5, \dots$  невозможна, поскольку не выполняются условия базирования. Возможным является вариант последовательности установки  $p_j = a_1, a_4, \dots$  и другие. Корневая вершина  $a_i$  соединяется дугами с каждой вершиной  $a_j$ , которая может быть второй в последовательности  $p_m$ .

3. Рассматриваются все остальные, кроме корневой  $a_i$  и второй  $a_j$  вершины, элементы  $a_k \in A$ ; те из них, для которых при наличии  $a_i$  и  $a_j$  выполняются условия базирования и доступа, могут



a



б.

Р и с.2.5. Конструктивная схема сборочной единицы (а) и возможные варианты последовательности установки ее элементов (б)

устанавливаться третьими. Вершина  $a_i$  соединяется дугами с каждой вершиной  $a_k$ , которая может быть третьей в последовательности  $P_m$ .

Построение дерева вариантов установки заканчивается, когда получены все висячие вершины, путь для которых от корневой вершины включает все элементы  $a_i \in A$ . Возможная последовательность установки  $P_m$  определяется как путь от корневой до висячей вершины. Очередность установки элемента  $a_i \in A$  определяется порядковым номером вершины  $a_i$  в пути, считая от корневой вершины дерева вариантов установки. Для рассматриваемого примера граф-дерево вариантов последовательности установки  $P_m$  показан на рис. 2.5, б.

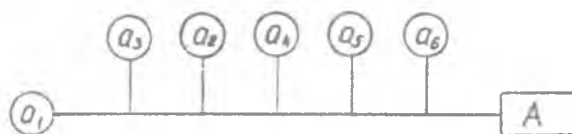
Определение возможных вариантов последовательности установки элементов может осуществляться как вручную, так и с использованием средств вычислительной техники. При использовании ЭВМ алгоритмы вычисления перестановок устанавливаемых элементов, удовлетворяющих условию базирования и доступа, приведены в работе [2].

Как следует из рассмотренного примера, даже для сравнительно простой сборочной единицы имеется значительное количество возможных вариантов последовательности установки элементов. Поэтому проводится второй этап поиска оптимального варианта последовательности. Здесь следует отметить, что точное решение задачи второго этапа можно выполнить только проектированием технологических процессов сборки, соответствующих разным последовательностям установки. Однако такая оценка всех перестановок даже при использовании ЭВМ нецелесообразна из-за большого количества вариантов. Поэтому при анализе вариантов вводят оценочную функцию. Перестановки с величиной оценочной функции ниже пороговой исключаются из дальнейшего анализа. Таким образом, из всего массива возможных перестановок выделяется узкая область, в которой с достаточной степенью вероятности находят оптимальную последовательность установки.

Рассмотренный ранее пример определения варианта последовательности установки элементов относится к простейшей сборочной единице. Последовательность формирования изделия из отдельных сборочных единиц проводится аналогичным образом. Однако здесь следует иметь в виду, что последовательность формирования изделия во многом зависит от состава сборочных единиц и их иерархической структуры, определяющей характер входимости одних сборочных единиц в другие. Кроме того, последовательность образования изделия во многом определяется закономерностями, существующими в технологическом процессе сборки, то есть определяется порядком технологических действий по обес-

печению технических требований, точности сборочных параметров и технологией выполнения отдельных видов работ.

При проектировании технологического процесса сборки без применения ЭВМ процесс формирования изделия из отдельных сборочных единиц и деталей изображается в виде схемы сборки (рис.2.6).



Р и с. 2.6. Принципиальная схема сборки для сборочной единицы

## 2.4. Формирование маршрута технологического процесса сборки

### 2.4.1. Понятие о технологической системе и ее структуре

Как было показано в разд. I, каждое изделие характеризуется совокупностью конструктивно-технологических свойств (контуров). Состав контуров изделия представляется множеством  $F(A)$ , а состав контуров каждого входящего элемента  $a_i$  множеством  $F(a_i)$ . На логическом уровне моделирования принимается  $F_K(a_i)=1$ , если данный контур соответствует техническим требованиям. В этом случае говорят, что контур  $F_K(a_i)$  реализован, в противном случае  $F_K(a_i)=0$ . Поэтому условие реализации всех контуров  $F_K(a_i)$  можно представить как условие существования элемента  $a_i$ , т.е.  $a_i=1$ , если  $F(a_i) = \bigwedge_{k=1}^n F_k(a_i)=1$ , где  $n$  - общее количество контуров элемента  $a_i$ .

Условие существования изделия (или сборочной единицы) представляется отношением  $A=1$ , если  $F(A) = \bigwedge_{i=1}^m F_i(A)=1$ , где  $m$  - общее количество контуров изделия  $A$ .

Реализация конструктивно-технологических свойств (контуров) изделия осуществляется на стадии выполнения технологического процесса сборки. Спроектировать технологический процесс сборки - это значит найти такое проектное решение, которое определяет содержание и последовательность выполнения операций, а также состав средств техноло-

гического оснащения, реализующих свойства изделия. Таким образом, функцией технологического процесса является качественное и количественное преобразование объекта сборки путем реализации контуров изделия А.

По своей структуре технологический процесс сборки  $T_m$  представляет собой упорядоченное множество взаимосвязанных операторов  $\tau_K$ : этапов, операций, переходов. Каждый технологический оператор  $\tau_K$  есть часть технологического процесса сборки, при реализации которой объект сборки приобретает какие-либо заданные чертежом свойства (контур). Состав операторов описывается либо неупорядоченным множеством  $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_R\}$ , либо упорядоченным множеством  $T = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_R)$ , а состав средств технологического оснащения множеством  $\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_R\}$ . Принимая множества  $T$  и  $\Pi$  в качестве подсистем технологической системы Р, полный состав элементов этой системы можно описать множеством  $P = T \Pi$ .

Технологическая система, как и объект сборки, характеризуется совокупностью контуров  $F(P)$ . К числу таких контуров можно отнести: состав операций и переходов; отношение последовательности выполнения операций; состав оборудования, приспособлений и инструмента. Для установления связи между контурами  $F(A)$  и  $F(P)$  при решении задач технологического проектирования используется единое векторное пространство контуров  $F \cong F(A), F(P)$ .

Технологическая система с составом операторов  $T$  может быть достаточной для изготовления изделия А при условии

$$F(A) \subseteq F(T) \quad (2.16)$$

или на логическом уровне при условии

$$F(A) = F(T) \wedge F(A), \quad (2.17)$$

где  $F(A)$  - состав контуров изделия, подлежащих реализации;  
 $F(T)$  - состав контуров, реализуемых в технологическом процессе сборки.

Взаимосвязь контуров  $F(A)$  и  $F(T)$  может быть представлена как в дизъюнктивной, так и конъюнктивной форме. При дизъюнктивной форме взаимосвязи исходное состояние контура изделия принимается  $F_i(A) = 0$ . Состояние контура технологического оператора, реализующего  $F_i(A)$ , обозначается  $F_i(\tau_K) = 1$ , воздействие оператора на контур



изделия определяется по формуле

$$F(A)_K = F(A)_{K-1} \vee F(\tau_K), \quad (2.18)$$

где  $F(A)_{K-1}$  описывает исходное (перед воздействием оператора) состояние контуров изделия, а  $F(A)_K$  — состояние контуров изделия после воздействия  $\tau_K$ .

В общем случае результат воздействия технологического оператора  $\tau_K$  на объект производства  $A$  представляется как воздействие контуров  $F(\tau_K)$  на исходное состояние  $F(A)_{K-1}$  контуров объекта производства, переводящее эти контуры в последующее состояние  $F(A)_K$ . Состав контуров, реализуемых в технологическом процессе  $T_m$ , определяется отношением

$$F(T_m) = \bigvee_{k=1}^n F(\tau_k). \quad (2.19)$$

Этот состав достаточен для изготовления изделия  $A$  при условии, что

$$F(A) = F(T_m) \wedge F(A). \quad (2.20)$$

Если это условие не выполняется, в дополнение к  $T_m$  можно взять другие совокупности операторов  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ , чтобы общий состав операторов обеспечивал выполнение условия (2.20).

При конъюнктивной форме связи и исходное, и конечное состояние контуров  $F(A)$ , подлежащих реализации, обозначается  $F_i(A) = 1$ ; состояние контура  $F(\tau_k)$ , участвующего в реализации  $F_i(A)$ , также обозначается  $F_i(\tau_k) = 1$ . Воздействие  $\tau_k$  на контур изделия определяется по формуле

$$F(A)_K = F(A) \wedge F(\tau_K). \quad (2.21)$$

Конъюнктивная форма связи применяется в тех случаях, когда нужно описать одновременное участие нескольких операторов или материальных элементов технологической системы в реализации одного контура изделия. Состав контуров, реализуемых в технологическом процессе  $T_m$ , при конъюнктивной форме связи достаточен для изготовления  $A$  при условии (2.20).

## 2.4.2. Последовательность формирования маршрута технологического процесса сборки

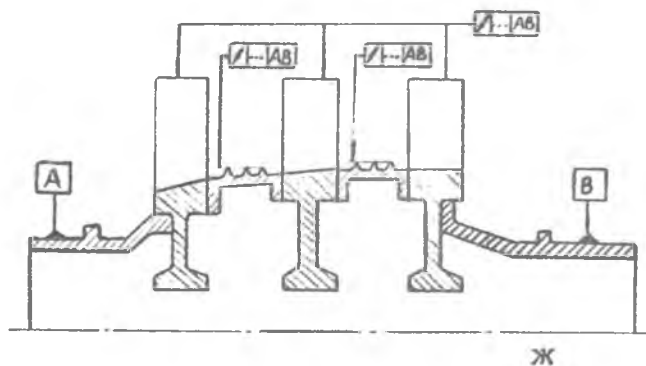
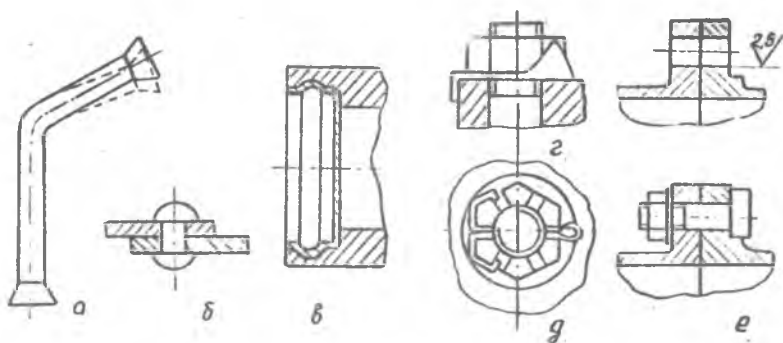
В зависимости от решаемых задач маршрут технологического процесса может быть сформирован на трех различных уровнях. На каждом из этих уровней требуется различная полнота описания технологической системы. С этой целью модель технологической системы имеет трехуровневую структуру и включает уровень этапов, уровень операций и уровень переходов. На каждом из уровней с различной степенью детализации решают задачу выбора оборудования, приспособлений и инструмента. Каждый последующий уровень содержит более подробное описание свойств элементов технологической системы предшествующего уровня.

Первый уровень формирования маршрута технологического процесса ставит своей основной задачей определение состава и последовательности выполнения этапов. Каждый этап обычно включает группу операций. Состав этапов сборки определяется составом функциональных и технологических контуров изделия, подлежащих реализации. Между отдельными этапами технологического процесса существуют определенные отношения последовательности, которые отражаются во взаимосвязанных по составу контуров изделия моделях этапов сборки. Так, первыми выполняются этапы по сварке составных частей, затем пайке, склеиванию, сборке соединений с натягом и т.д.

Второй уровень формирования технологического процесса ставит основной задачей определение состава и последовательности основных и вспомогательных операций.

К основным технологическим операциям относятся операции установки элементов в заданное положение и операции по образованию соединений путем механических и физико-химических воздействий (термических, термомеханических, термоэлектрических и др.), например, запрессовка, затяжка резьбовых соединений, склеивание, паяние и др.

Кроме перечисленных к основным технологическим операциям относятся также формообразующие операции. В производстве ГТД формообразующие операции входят в состав таких работ, как подгибка трубопроводов при сборке (рис.2.7,а), образование заклепочных (рис.2.7,б) и вальцовочных (рис.2.7,в) соединений, контровка резьбовых соединений за счет изгиба лепестков контровочной шайбы или концов шплинта (рис.2.7,г,д), совместная обработка отверстий в сопрягаемых фланцах корпусов после контроля соосности опор (рис.2.7,е), дополнительная обработка уплотнительных поверхностей роторов после их сборки (рис.2.7,ж) и др.



Р и с. 2.7. Конструктивные элементы сборочных единиц, реализуемых с помощью формообразующих операций

Кроме рассмотренных в качестве основных технологических операций в технологическом процессе сборки применяются разнообразные операции, связанные с применением способов герметизации, постановкой различных заполнителей, балансировкой роторов и т.п.

Состав основных технологических операций определяется составом конструктивно-технологических свойств изделия, подлежащих реализации в процессе сборки. Последовательность выполнения операций определяют исходя из следующих закономерностей. Последовательность опе-

раций, связанных с установкой элементов, определяется разработанной ранее принципиальной схемой сборки изделия (или сборочной единицы). Операции по образованию соединения могут выполняться только после выполнения операций установки соединяемых элементов, а последовательность таких операций определяется видом соединения.

Состав и последовательность выполнения формообразующих операций зависят от ряда факторов. Для учета этих факторов проводится анализ кинематических свойств поверхностей обрабатываемых контуров, пространственной взаимосвязи элементов изделия и технологической оснастки в процессе обработки, функциональных, размерных связей между ними. На состав и последовательность выполнения пригоночных операций большое влияние оказывает состав технологических контуров, зависящих от условий поставки деталей на сборку, величины и характера припусков и т.п. Влияние размерных связей на последовательность обработки контуров учитывается с помощью графа размеров, вершинами которого являются поверхности обрабатываемых контуров, а дугами графа являются размеры между этими элементами контуров. Обработку контуров осуществляют в последовательности, соответствующей возможным путям в графе размеров от базовых к другим поверхностям – в этом случае будет соблюден принцип единства баз.

К группе вспомогательных операций относят операции подготовки деталей к сборке (расконсервация, промывка, комплектование), транспортные операции и др. Особую подгруппу составляют операции контроля, назначаемые как для контроля качества изделия, так и для контроля основных технологических операций, оборудования и оснастки. Состав вспомогательных операций определяют, как правило, исходя из состава свойств изделия, реализуемых при сборке. Вспомогательные операции часто вводятся между основными сборочными операциями. Так, операции контроля могут назначаться сразу после выполнения операций установки или образования соединения с учетом условий их реализации.

#### 2.4.3. Формирование маршрута технологического процесса сборки с помощью математических моделей

При сборке ГТД взаимосвязь основных и вспомогательных операций по возможной последовательности их выполнения даже при укрупненном их описании весьма сложна. Поэтому при автоматизированном проектировании технологических процессов сборки изделия или сборочных единиц используются математические (расчетные) модели различных классов в

зависимости от степени детализации процесса. В этих моделях сборочные операции могут рассматриваться на уровне структурных, логических, и количественных отношений. Так, например, на логическом уровне моделирование сводится к представлению связи между исходным состоянием свойств изделия  $F(A)_{K-1}$  перед воздействием технологического оператора  $\tau_K$  и конечным состоянием  $F(A)_K$  после реализации оператора  $\tau_K$ .

Каждая модель содержит данные о множестве операций и множестве проектируемых технологических процессов  $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$  и включает матрицу контуров (или набор матриц), а также описание теоретико-множественных и логических свойств и отношений между элементами и контурами изделий и технологической системы.

Условия вхождения технологических операций в технологический процесс  $T_S$  описываются следующим образом. Обозначим набор операций, при наличии которых рассматриваемая операция  $\tau_K$  может входить в технологический процесс  $T_S$  в виде  $B_i(\tau_K)$ , и набор операций, при наличии которых вхождение  $\tau_K$  в  $T_S$  невозможно в виде  $W_j(\tau_K)$ . Тогда данный состав  $T_S$  технологического процесса возможен, если одновременно выполняются условия

$$\forall \tau_K \in T_S [\exists B_i(\tau_K) (B_i(\tau_K) \subseteq T_S)], \quad (2.21)$$

$$\forall \tau_K \in T_S [\forall W_j(\tau_K) (W_j(\tau_K) \not\subseteq T_S)].$$

Условия, характеризующие последовательность выполнения операций, описываются следующим образом. Состав операций, предшествующих  $\tau_K$ , обозначается как подмножество  $T_K^0 \subset T_S$ . Набор операций, после выполнения которых операция  $\tau_K$  может быть реализована, обозначается  $B_i(\tau_K)$ , а набор операций, после выполнения которых операция  $\tau_K$  не может быть реализована, обозначается  $W_j(\tau_K)$ . Тогда условия существования  $T_S$  как упорядоченного множества, характеризующего последовательность выполнения операций, имеет вид

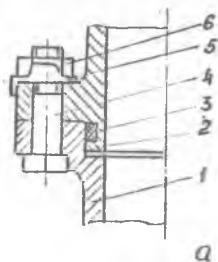
$$\forall \tau_K \in T_S [\exists B_i(\tau_K) (B_i(\tau_K) \subseteq T_K^0)], \quad (2.22)$$

$$\forall \tau_K \in T_S [\forall W_j(\tau_K) (W_j(\tau_K) \not\subseteq T_K^0)].$$

Технологические операции в математических моделях представляются в виде операторов установки деталей (или сборочных единиц), образования соединений, формообразования, доводки, регулировки, балансировки и др.

Класс используемой модели зависит прежде всего от уровня унификации и типизации проектируемого технологического процесса, степени абстрагирования и детализации данных о процессе сборки. Наибольшее распространение получили табличные, сетевые и перестановочные модели.

Табличные модели используются, когда технологические процессы не предусматривают других возможных вариантов выполнения тех или иных операций. В табличной модели порядок операторов соответствует порядку строк в матрице свойств. Пример табличной модели для технологического процесса сборки трубопровода с корпусом клапана показан на рис.2.8. Проектирование технологического процесса по табличной моде-

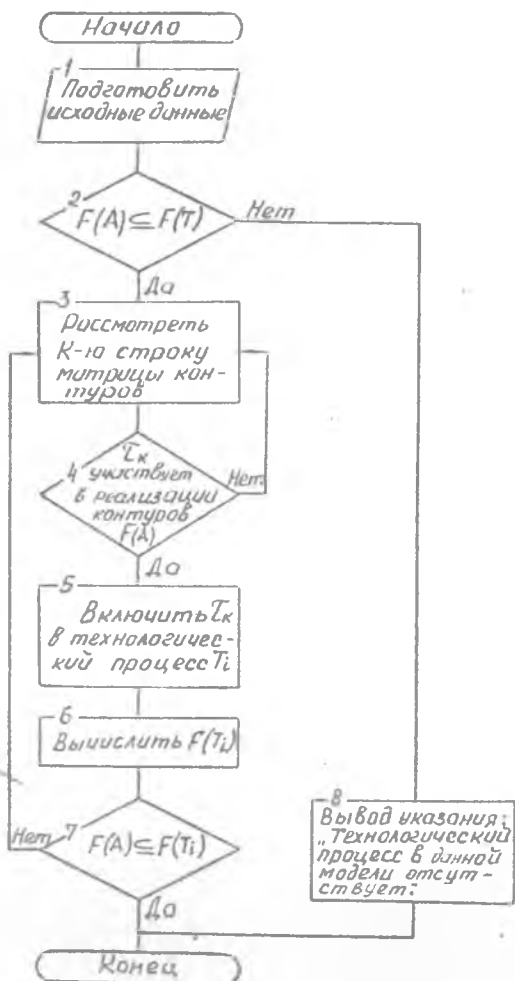


	Контур положения кольца уплотнит	Контур положения трубопровода	Контур положения болта	Контур положения шайбы	Контур положения гайки	Контур силового действия для по гайки (затяжка)	Контур формы иле стас сборки кон- трубопрово
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>

Установка уплотнительного кольца в канавку трубопровода	T <sub>1</sub>	o					
Установка трубопровода на корпус	T <sub>2</sub>		o				
Установка болтов в отверстия	T <sub>3</sub>			o			
Установка шайб на болты.	T <sub>4</sub>				o		
Навертывание гаек на болты до упора	T <sub>5</sub>					o	
Затяжка гаек ключом.	T <sub>6</sub>						o
Отгибка лепестка шайбы контрольной	T <sub>7</sub>						o

Рис.2.8.Табличная модель операторов сборки трубопровода с корпусом клапана: а - конструктивная схема сборочной единицы (1 - корпус; 2 - трубопровод; 3 - кольцо уплотнительное; 4 - болт; 5 - шайба контрольная; 6 - гайка); б - матрица контуров

ли производится в соответствии с алгоритмом, показанным на рис.2.9 в следующей последовательности:



Р и с. 2.9. Алгоритм проектирования технологического процесса сборки по дизъюнктивной табличной модели

1. Подготавливают исходные данные о составе контуров  $F(A)$  изделия, подлежащих реализации в данной модели (блок 2). Исходное состояние всех контуров  $F_j \in F(A)$  равно нулю.

2. Проверяют достаточность состава контуров  $F(\tau)$  модели для изготовления данного изделия по формуле (2.16) (блок 3). Если это условие не выполняется, то технологический процесс в данной модели отсутствует, а если выполняется, то определяется состав технологического процесса.

3. Рассматривают очередную  $k$ -ю строку матрицы контуров

$$[\tau_k F(\tau)].$$

4. По формуле (2.18) проверяют, участвует ли операция  $\tau_k$ , соответствующая  $k$ -й строке, в реализации контуров изделия. Если  $F(A)_{k \neq 0}$ , то переходят к п.5, если  $F(A)_{k = 0}$ , то  $\tau_k$  не участвует в реализации контуров изделия, и тогда возвращается к п.3.

5. Операцию  $\tau_k$  включают в технологический процесс  $T_m$ , очередность реализации  $\tau_k$  в технологическом процессе определяется очередностью включения  $\tau_k$  в  $T_m$ .

6. По формуле (2.19) вычисляют состав контуров, которые могут быть реализованы набором  $T_m$  операций.

7. По формуле (2.16) проверяют достаточность состава контуров  $F(T_m)$  для реализации контуров  $F(A)$  изделия. Если это условие выполняется, проектирование технологического процесса завершено, если нет - возвращаются к пункту 3.

Сетевые модели используют, когда могут быть предложены различные варианты построения технологических процессов, но все варианты технологических процессов унифицированы по очередности реализации операций. В сетевой модели последовательность выполнения операторов соответствует последовательности вершин в пути, определяемой по графу  $G = (T, C)$ . Пример сетевой модели для технологического процесса сборки трубопровода с корпусом клапана показан на рис. 2.10. Модель включает матрицу контуров и граф смежности операторов. Проектирование технологического процесса по сетевой модели производится в соответствии с алгоритмом, показанным на рис. 2.11, в следующей последовательности:

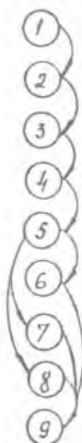
1. Подготавливают исходные данные о составе контуров  $F(A)$  изделия, подлежащих реализации в данной модели. Исходное состояние всех контуров  $F_j \in F(A)$  равно нулю.

2. Проверяют достаточность состава контуров  $F(\tau)$  модели для изготовления данного изделия по формуле (2.16). Если это условие не выполняется, то технологический процесс в данной модели отсутствует, а если выполняется, то процесс проектирования продолжается.



		Контур положе- ние уплатни- тель- ного кольца	Контур положе- ние трубапро- вода	Контур положе- ние болта	Контур положе- ние шайбы	Контур положе- ние гайки	Контур силового провода	Контур силового провода	Контур силового провода
		$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$	
Установка уплатнительного кольца в канавку трубапровода	$T_1$	o							
Установка трубапровода на корпус	$T_2$		o						
Установка болтов в отвер- стия	$T_3$			o					
Установка шайб на болты	$T_4$				o				
Навертывание гаек на болты до упора	$T_5$					o			
Затяжка гаек последователь- но ключом.	$T_6$						o		
Затяжка гаек последова- тельно гайковертом	$T_7$							o	
Затяжка гаек одновремен- но гайковертом	$T_8$								o
Отгибка лепестка шайбы контрольной	$T_9$								o

а

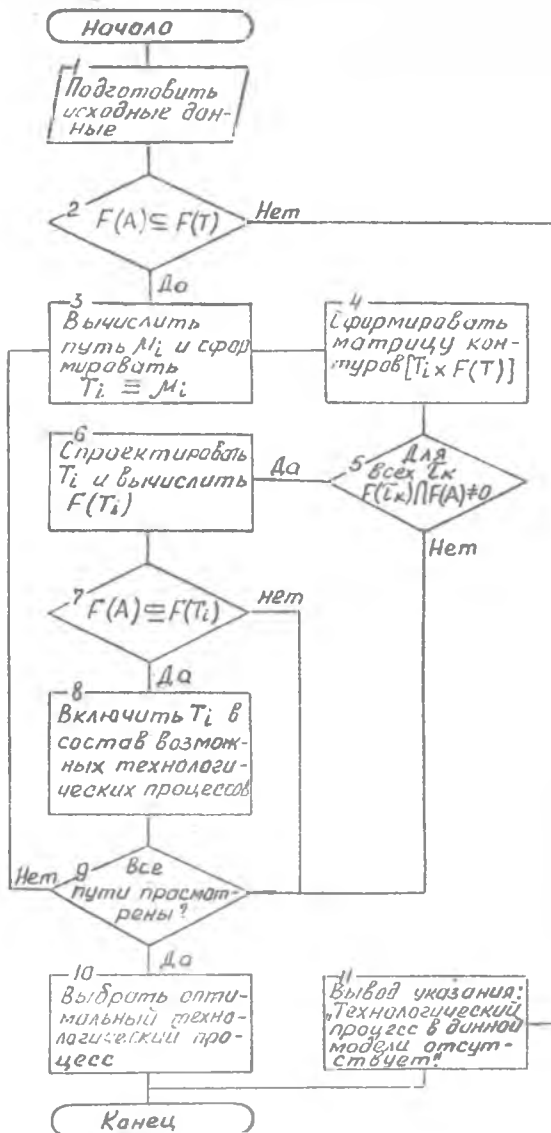


б

Р и с. 2.10. Сетевая модель операторов сборки трубапровода с корпусом клапана: а - матрица контуров модели; б - граф взаимосвязи операторов

3. По графу взаимосвязи операторов вычисляют вариант пути  $M_i$  из числа возможных. Так например, для графа, показанного на рис. 2.10, б, возможны три варианта пути  $M_i$  операторов:  $M_1 = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9$ ;  $M_2 = 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9$ ;  $M_3 = 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9$ . Далее формируют вариант последовательности операторов  $T_i$  для выбранного варианта пути, то есть  $T_i \in M_i$ . Например, для варианта пути  $M_1$  последовательность операторов будет следующей:  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_9$ .

4. Формируют матрицу контуров  $[T_i \times P(T_i)]$  для выбранного варианта последовательности  $T_i$ , то есть формируют набор строк, соответствующих вершинам пути  $M_i$ . Этот набор рассматривается в даль-



Р и с. 2.11. Алгоритм проектирования технологического процесса сборки по сетевой модели

нейшем как табличная модель операций, по которой проектируется технологический процесс  $T_i$ .

5. Проверяют, для всех ли операций  $T_k$  выполняется условие  $F(T_k) \cap F(A) \neq \emptyset$ . Если это условие выполняется, то технологический процесс может быть спроектирован, а если не выполняется, то проверяют, все ли пути рассмотрены.

6. Проектируют технологический процесс  $T_i$  и вычисляют  $F(T_i)$  аналогично табличной модели:

а) рассматривают очередную  $k$ -ю строку сформированной (по п.4) матрицы контуров  $[T_k F(T_k)]$ ;

б) по формуле (2.18) проверяют, участвует ли операция  $T_k$ , соответствующая  $k$ -й строке, в реализации контуров изделия. Если  $F(A)_k \neq 0$ , то переходят к выполнению п.6,в, если  $F(A)_k = 0$ , то  $T_k$  не участвует в реализации контуров изделия, и возвращаются к п.6,а;

в) операцию  $T_k$  включают в технологический процесс  $T_i$ ; очередность реализации  $T_k$  в технологическом процессе определяется очередностью включения  $T_k$  в  $T_i$ ;

г) по формуле (2.19) вычисляют состав контуров, которые могут быть реализованы набором  $T_i$  операций.

7. По формуле (2.16) проверяют достаточность состава контуров  $F(T_i)$  для реализации контуров  $F(A)$  изделия.

8. Если условие по п.7 выполняется, то рассмотренный технологический процесс  $T_i$  включается в состав возможных технологических процессов.

9. Проверяют, все ли возможные пути  $\mu_i$  рассмотрены. Если это условие не выполняется, то возвращаются к п.3 и определяют следующий путь  $\mu_i$  и т.д., пока не будут просмотрены все пути в графе  $G = (T, C)$ . Если условие выполняется, то производится оптимизация технологических процессов из числа сформированных с учетом логических условий ограничений или заданного критерия оптимальности. Вариант проектного решения является оптимальным, если он удовлетворяет условиям системы ограничений и имеет экстремальное значение принятого критерия оптимальности. Для осуществления оптимизации того или иного проектного решения разрабатывается система ограничений, функция цели и оптимизационный алгоритм.

Задача оптимизации состоит в отыскании в области допустимых решений такого варианта технологического процесса, для которого выбранный критерий оптимальности имеет экстремальное значение, например, минимум приведенных затрат или минимум трудоемкости.

Перестановочные модели используются в тех случаях, когда нужно представить технологические процессы, в которых могут изменяться как состав, так и последовательность выполнения операций в зависимости от конструктивных особенностей (свойств) собираемых изделий или условий их производства. Перестановочная модель часто используется и в тех случаях, когда имеются возможные варианты последовательности установки элементов при сборке изделия. Модель включает матрицу контуров  $[T \times F(T)]$ , аналогичную матрице контуров табличной модели, и наборы отношений, отражающих влияние условий базирования, доступа, размерных связей и т.п.

Проектирование технологического процесса по перестановочной модели производится в соответствии с алгоритмом, показанным на рис. 2.12. Часть операторов этого алгоритма имеет содержание, аналогичное табличным и сетевым моделям. Остальные операторы этого алгоритма служат для генерации перестановок, их проверки и выбора оптимального варианта технологического процесса.

Обычно проектирование технологического процесса начинают с помощью типовых технологических решений по табличной модели и лишь при отсутствии таких решений переходят к сетевым или перестановочным моделям.

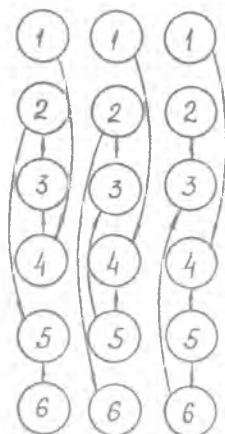
Для авиационных ГТД наибольшего уровня унификации и типизации достигли конструкции соединений: сварных, болтовых, прессовых и др. Состав и последовательность выполнения операций по установке деталей и образованию соединений зависят в основном от конструктивно-технологических свойств соединения. Состав этих свойств (контуров) отличается довольно большим разнообразием и имеет весьма сложную структуру, зависящую прежде всего от вида соединения: болтовые, винтовые, клепаные, клеевые, сварные и др. Основными свойствами — контурами соединения каждого вида являются:

состав элементов, входящих в конструкцию соединения, и основная характеристика (состав пакета деталей, толщина пакета, форма сопрягаемых поверхностей и др.);

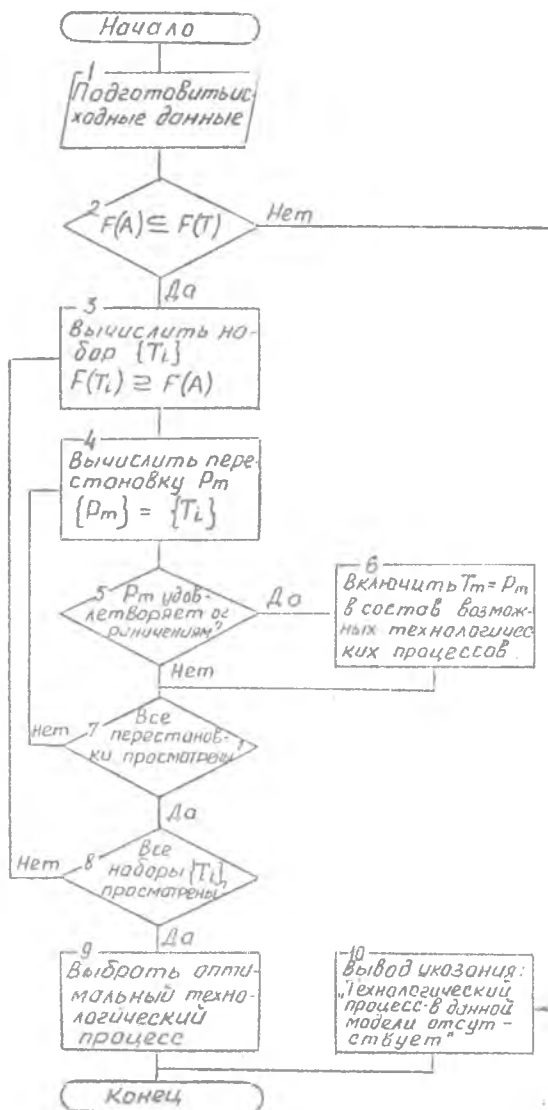
характеристика соединительного шва: форма шва, количество рядов соединительных элементов, наличие отверстий и гнезд под болты, винты или заклепки, наличие кромок под сварку и т.п.;

характеристика соединительного элемента, выражающая свойства болта, винта, заклепки, сварной точки и т.п.

Технологический процесс сборки соединения каждого вида в большинстве случаев вполне четко разделяется на группы упорядоченных



а



б

Р и с.2.12. Варианты графа взаимосвязи операторов (а) и алгоритм проектирования технологического процесса по перестановочной модели (б)

операций, для математического моделирования которых используются табличные и сетевые модели операций, объединенные в многоуровневую модель операций сборки соединения. На верхнем уровне с помощью табличных и сетевых моделей моделируются укрупненный состав и взаимосвязь операций при различных видах соединений. Так, например, на рис. 2.13 показана обобщенная сетевая модель верхнего уровня для сборки соединений трех видов: болтовых, заклепочных, клеевых. На последующих уровнях моделируется более подробный состав операций в зависимости от особенностей и параметров соединения конкретного вида. Так, на рис. 2.14, 2.15, 2.16 показаны сетевые модели отдельно для сборки болтового, заклепочного и клеевого соединений. Графы взаимосвязи операций в моделях низшего уровня являются результатом развертки графов взаимосвязи операций в моделях высшего уровня.

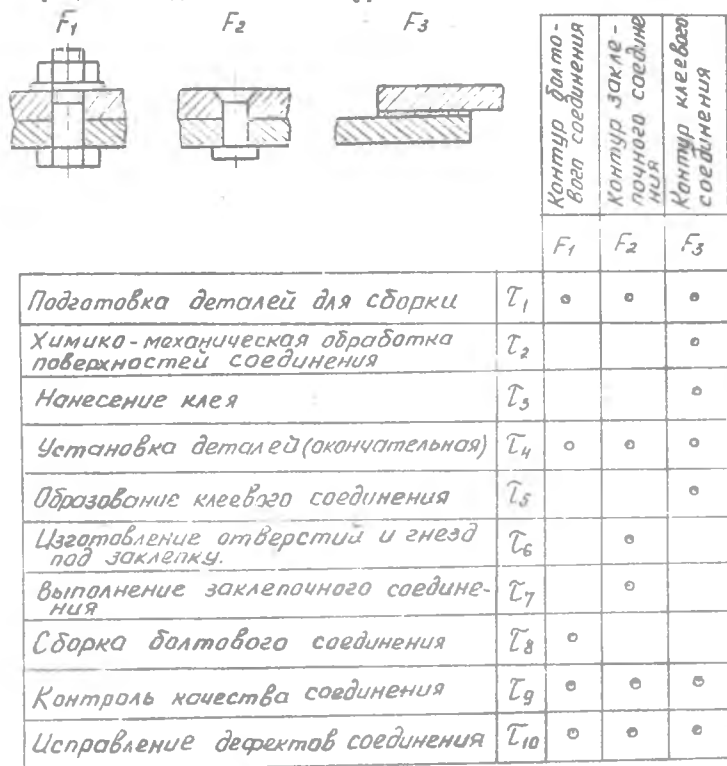
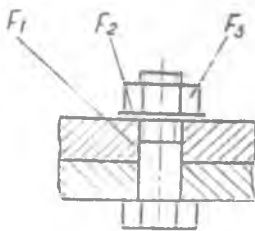


Рис. 2.13. Обобщенная сетевая модель операторов сборки соединений различных видов: а - матрица контуров; б - граф взаимосвязи операторов



Контур положение болта	Контур положение шайбы	Контур положение гайки	Контур силового воздействия на гайку (затяжка)	Контур формы лепестка шайбы
------------------------	------------------------	------------------------	--	-----------------------------

	$F_1$	$F_2$	$F_2$	$F_4$	$F_5$
Исходный оператор	$\tau_0$	•	•	•	•
Установка болта	$\tau_1$	•			
Установка шайбы	$\tau_2$		•		
Навертывание гайки	$\tau_3$			•	
Затяжка гайки	$\tau_4$				•
Контровка гайки кернцем	$\tau_5$			•	
Контровка гайки отгибкой лепестка шайбы	$\tau_6$				•
Конечный оператор	$\tau_7$	•	•	•	•



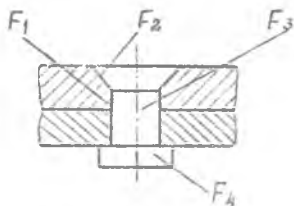
Исходный оператор	$\tau_0$	•	•	•	•
Установка болта	$\tau_1$	•			
Установка шайбы	$\tau_2$		•		
Навертывание гайки	$\tau_3$			•	
Затяжка гайки	$\tau_4$				•
Контровка гайки кернцем	$\tau_5$			•	
Контровка гайки отгибкой лепестка шайбы	$\tau_6$				•
Конечный оператор	$\tau_7$	•	•	•	•

а

б

Р и с. 2.14. Сетевая модель операторов сборки болтового соединения: а - матрица контуров; б - граф взаимосвязи операторов

Участие операторов и материальных элементов технологической системы в реализации свойств изделия можно выразить в виде модели с дизъюнктивной и конъюнктивной формами связи. Для моделирования состава и взаимосвязи элементов подсистемы материальных объектов при проектировании технологических процессов сборки соединения используются табличные и сетевые модели. Сетевые модели применяются в тех случаях, когда операции, участвующие при сборке соединения, реализуют одинаковые свойства (контур), но различаются по составу применяемого оборудования, приспособлений или инструмента (рис. 2.17). Сетевая модель такого вида является моделью технологической системы, описывающей состав и взаимосвязь технологических операторов  $\tau_k$  и соответствующего им



Контур отвёр- стия в пакете	Контур гнезда под заклепку	Контур поло- жеций заклепки в пакете	Контур формы закрывающей головки
--------------------------------	-------------------------------	--	--

$F_1$     $F_2$     $F_3$     $F_4$

Исходный оператор	$\tau_0$	○	○	○	○
Сверление отверстий в пакете деталей предварительное	$\tau_1$	○			
Сверление отверстий в пакете деталей окончательное	$\tau_2$	○			
Зенкерование гнезда под головку заклепки	$\tau_3$		○		
Установка заклепки	$\tau_4$			○	
Образование замыкающей головки	$\tau_5$				○
Конечный оператор	$\tau_6$	○	○	○	○



а

б

Р и с. 2.15. Табличная модель операторов выполнения заклепочного соединения: а - матрица контуров; б - граф взаимосвязи операторов

оборудования, приспособлений и инструмента -  $\pi_K$ . Что касается последовательности реализации операций, то она определяется по моделям, показанным на рис. 2.14, 2.15, 2.16.

При детальном анализе любой технологической операции  $\tau_K$  с учетом состава средств оснащения эта операция может быть представлена состоящей из набора операций  $\tau_{Kl} \in \tau_K$  низшего уровня, связанных с определенными элементами оснащения. В этом случае связь операции  $\tau_K$  с  $\tau_{Kl}$  и с элементами оснащения производства описывается формулой

$$\tau_K = \bigwedge_l^m (\tau_{Kl} \wedge \pi_{Kl}),$$

(2.23)





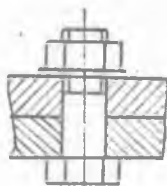
		Контур сопряжения деталей	Контур физико-хим. состояния сопряг. поверхностей	Контур покрытия сопряг. поверхностей	Контур клеевого слоя	Контур силового и теплового воздействия на клеевое соеди- нение	Контур характеристик и свойств соеди- нения
		$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$
Исходный оператор	$\tau_0$	○	○	○	○	○	○
Подготовка деталей к сборке	$\tau_1$	○					
Предварительная уста- новка деталей	$\tau_2$	○					
Химическая очистка поверхностей	$\tau_3$		○				
Нанесение покрытий	$\tau_4$			○			
Нанесение клея	$\tau_5$				○		
Окончательная уста- новка деталей	$\tau_6$	○					
Образование клеевого соединения при $T_0 = 20^\circ\text{C}$	$\tau_7$					○	
Образование клеевого соединения при нагреве	$\tau_8$					○	
Контроль качества соединения	$\tau_9$						○
Устранение дефектов соединения	$\tau_{10}$						○
Конечный оператор	$\tau_{11}$	○	○	○	○	○	○

а



б

Р и с. 2.15. Сетевая модель операторов сборки клеевого соединения:  
а - матрица контуров; б - граф взаимосвязи операторов



Контур положен- ия болта	Контур положен- ия шайбы	Контур положен- ия гайки	Контур шайбы контровочной на болту (затяжка)	Контур формы пестика...
$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$

Исходный оператор	$T_0$	•	•	•	•	•
Установка болта	$T_1$	•				
Установка шайбы	$T_2$		•			
Навертывание гайки	$T_3$			•		
Затяжка гайки	$T_4$				•	
Контровка гайки кернением	$T_5$				•	
Контровка гайки отгибкой лепестка шайбы	$T_6$					•
Приспособление для установки болтов с натягом.	$\Pi_7$	•				
Слесарный инструмент	$\Pi_8$				•	
Пневмогайковерт РПГ-44-16	$T_9$				•	
Пневмокернер КП-09М	$T_{10}$				•	
Щипцы для отгибки лепестка шайбы контровочной	$T_{11}$					•
Конечный оператор	$T_{12}$	•	•	•	•	•



а

б

Р и с. 2.17. Сетевая модель технологической системы сборки болтового соединения  $a \ll I_6$ : а - матрица контуров; б - граф смежности операторов и элементов технологической системы ( $T_i$  - операторы;  $\Pi_i$  - элементы технологического оснащения)

где  $T_{ki}$  - элемент технологической операции  $T_k$  ;  
 $\Pi_{ki}$  - набор соответствующих  $T_{ki}$  элементов технологического оснащения;  
 $m$  - общее число элементов  $T_{ki}$  - составных частей операции  $T_k$  .

При использовании типовых математических моделей на вход модели технологической системы  $P$  поступают данные о свойствах сборочной единицы  $A_i$  в виде множества контуров  $F(A_i)$  , подлежащих реализации. На выходе модели получают набор  $F(A_i)_P = F(P_i)$  реализуемых контуров изделия и состав  $P_i$  элементов технологической системы, участвующих в реализации этих контуров.

Возможность выбора средств механизации и автоматизации операций при установке элементов сборочной единицы и образовании соединения непосредственно зависит не только от вида соединения, но и от геометрических свойств поверхностей, на которых расположены соединительные элементы, а также формы самих соединительных швов. Эти свойства контура соединения определяют требуемые кинематические свойства рабочих органов для выполнения соединения - форму траекторий движений рабочих органов, область существования траекторий, состав и взаимосвязь возможных перемещений и т.д.

## 2.5. Проектирование типовых технологических процессов сборки ГТД

При автоматизированном проектировании технологических процессов сборки изделий разработчики САПР-ТП стремятся по возможности использовать более простые алгоритмы проектирования. Для тех ГТД, где имеет место преемственность конструкций и унификация конструктивных решений, используется способ проектирования технологического процесса на основе типизации. Все существующие методики типизации технологических процессов базируются на классификации изделия или входящих в него сборочных единиц по типам. Сборочная единица, отнесенная к одному типу, характеризуется общностью процесса сборки. В этом случае на типовую сборочную единицу, обладающую наибольшим количеством характерных признаков, можно заранее разработать либо комплексный типовой технологический процесс, либо несколько вариантов типовых технологических процессов. При автоматизированном проектировании на основе анализа конструктивно-технологических свойств конкретного изделия ЭВМ выбирает оптимальный вариант технологического процесса.

Использование способа типизации технологических процессов позволяет резко сократить трудоемкость проектирования технологического процесса и улучшить его качество, а также сократить время на разработку алгоритмов и программы.

При данном способе проектирования технологических процессов математическая модель изделия описывается следующим образом. Вся информация об изделии делится на качественную и количественную. Примером количественной информации служат геометрические характеристики сборочных соединений (предельные значения зазоров, натягов), номинальные размеры и допуски на координатные размеры, количество крепежных деталей и т.п. Количественная информация описывается в цифровом виде, и ввод ее в ЭВМ не вызывает затруднений. Качественная информация используется для формального описания ряда конструктивно-технологических свойств собираемого изделия или сборочной единицы. При описании таких свойств необходимо прежде всего достигнуть однозначности понятий.

Процесс формализации качественной информации осуществляется системой кодирования, которая определяет порядок и правила превращения словесной информации в цифровую. В качестве кодированных таблиц обычно используют классификаторы. Так, например, основные сборочные единицы ГТД могли бы классифицироваться по следующим признакам, в наибольшей мере влияющим на структуру и содержание технологического процесса сборки: функциональное назначение сборочной единицы (компрессор, турбина и т.д.); конструктивные особенности ротора (межопорный, консольный, одноступенчатый, многоступенчатый и др.); конструктивные особенности статора (с продольным или поперечным разрезами и др.); другие специфические характеристики сборочной единицы.

На основе классификации сборочных единиц по конструктивно-технологическим признакам формируется соответствующий цифровой код, который, по существу, является носителем качественной информации о конструкции сборочной единицы, используемой для решения тех или иных технологических задач.

Существенное значение имеет и правильная классификация деталей, которая осуществляется по их функциональному назначению. Для каждой группы однородных деталей составляется классификатор и присваивается цифровой код, например: 01. - корпусы; 02. - валы; 03. - зубчатые колеса; ...26. - винты и т.д.

При проектировании технологического процесса на основе типизации математическая модель технологической системы описывается следующими основными элементами.

Сводный перечень технологических операций. Технологические процессы сборки определенного класса изделий или сборочных единиц можно описать конечным числом операций, количество и содержание которых зависит от степени детализации технологического процесса, объема производства и метода сборки. Перечень операций, с помощью которого можно описать технологический процесс сборки любой сборочной единицы рассматриваемого класса при заданных производственных условиях, называется "Сводный перечень технологических операций (СПТО)". Этот перечень оформляется в виде табл. 2.3

Т а б л и ц а 2.3

Шифр операции	Наименование операции	Инструмент	Шифр профессии	Разряд работы
3002	Установка корпуса изделия на приспособление	Набор №2	1415	4
.....				

Каждой операции, входящей в СПТО, однозначно соответствует определенный набор ручного инструмента, профессия исполнителя, разряд работы, которые выражаются соответствующим шифром. Название операции записывается в краткой форме и включает лишь комплекс действий, которые необходимо выполнить исполнителю при их реализации. При разработке массива нормативно-справочной информации адресом каждой операции в массиве является цифровой код (шифр).

Перечень вариантов последовательности установки элементов изделия. Последовательность установки деталей при сборке изделия зависит от конструктивных особенностей изделия (схемы базирования, состава элементов, препятствующих доступу и т.п.), а также принятого метода сборки. Поэтому для каждого типа изделия или сборочной единицы составляется несколько типовых последовательностей, которые представляются в виде перечня условных операторов ( $a_i$ ). Перечень типовых последовательностей составляет массив вариантов последовательностей установки элементов при сборке и оформляется в виде табл. 2.4.

Т а б л и ц а 2.4

Шифр варианта	Вариант последовательности установки элементов
01	$a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_{06}, a_{08}, a_{11}, a_{12}, a_{09}, a_{10}, a_{17}, a_{14}, a_{15}$

Цифра при каждом операторе определяет цифровой код группы деталей согласно классификатору.

Перечень сборочного оборудования. При сборке изделий определенного класса применяется определенный состав сборочного оборудования. Для решения задачи выбора оптимальной номенклатуры оборудования необходима определенная технико-экономическая информация, в состав которой для каждой модели входят стоимость оборудования, группа его ремонтной сложности, занимаемая производственная площадь, расход электроэнергии (или сжатого воздуха) и т.п. Все эти сведения образуют массив нормативно-справочной информации об оборудовании. Этот массив оформляется в виде табл. 2.5.

Т а б л и ц а 25

Модель оборудования	Стоимость, тыс.р	Группа ремонт. сложности	Производственная площадь, м <sup>2</sup>	Расход электроэнергии, кВт/ч	Формулы для расчета при работе на данном оборудовании
ШП-204М	1,08	4	1,35	0,6	
.....	.....	.....	.....	.....	.....

Перечень формул для расчета норм штучного времени. Для нормирования операций технологического процесса сборки применяются отраслевые нормативы времени, которые задаются в виде большого количества таблиц, сложных по своей структуре. Это обстоятельство не позволяет их использовать как первичные документы для формирования нормативно-справочной информации при решении задач нормирования. Поэтому в системе САПР-ТП используется метод представления табличных значений в виде аппроксимирующих степенных функций вида

$$T = \varphi \varphi_1^{K_1} \varphi_2^{K_2} \dots \varphi_i^{K_i},$$

где  $\varphi$  - аппроксимирующий коэффициент;  
 $\varphi_i$  - факторы, от которых зависит норма времени;  
 $K_i$  - показатель степени.

Для примера приведем расчетную зависимость нормы времени при установке детали (втулки) на шлицевой вал:

$$T = 0,00627 D^{0,29} L^{0,22} K^{0,21} P^{0,27},$$

где  $D$  - диаметр шлицевого вала, мм;  
 $L$  - длина шлиц, мм;  
 $K$  - количество шлиц;  
 $P$  - масса устанавливаемой детали, кг.

При автоматизированном проектировании типовых технологических процессов обычно устанавливается следующая последовательность этапов:

1. Выбор варианта последовательности установки элементов при сборке изделия (сборочной единицы). На этом этапе в зависимости от конструктивно-технологических свойств изделия и объема производства реализуется одна из типовых последовательностей, перечень которых приведен в табл. (см. табл. 2.4).

2. Выбор состава и последовательности операций технологического процесса сборки из числа операций, входящих в СПТО (см. табл. 2.3). Этап выполняется на основе принятого варианта последовательности установки элементов изделия и его конструктивно-технологических свойств.

3. Определение оптимальной номенклатуры сборочного оборудования. Вначале определяется состав оборудования, на котором может быть собрано рассматриваемое изделие. Затем осуществляется оптимизация его номенклатуры по целевой функции

$$P_{np} \rightarrow P_{np \min},$$

где  $P_{np}$  - приведенные затраты;  
 $P_{np \min}$  - минимальные приведенные затраты.

4. Расчет норм штучного времени для всех операций технологического процесса.

5. Печать выходной информации в виде заполненных карт технологического процесса сборки, комплектовочной ведомости деталей и ведомости технологического оборудования.

#### Библиографический список

1. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1989: 368 с.
2. Павлов В.В. Основы автоматизации проектирования технологических процессов сборки летательных аппаратов. М.: 1975. 98 с.
3. Павлов В.В., Соколов В.П., Самсонов О.С. Проектирование технологического процесса сборки на ЭМ. М.: МАТИ, 1978. 32 с.

4. П а в л о в В.В. Диалоговое проектирование технологических процессов сборки //Диалоговое проектирование технологических процессов: Сб.науч.тр. М.:Машиностроение, 1983. 255 с.

5. П а в л о в В.В. Моделирование технологических систем и проектирование сборочных процессов //Проектирование оптимальных технологических систем машин: Сб.науч.тр. М.: Машиностроение, 1989. 344 с.

6. П а в л о в В.В., Я н о в с к и й Г.А. Технологичность конструкции сборочной единицы // Технологичность конструкции изделия:Справочник. М.: Машиностроение, 1990. 768 с.

7. Ч е л и щ е в Б.Е., Б о б р о в а И.В., Г о н с а л е с-С о б а т е р А. Автоматизация проектирования технологии машиностроения. М.:Машиностроение, 1987. 264 с.

8. Д а в ы г о р а В.И., Я р м о ш А.Г. Алгоритмизация проектирования технологических процессов сборки, осуществляемых с помощью робототехнических комплексов //Технология и автоматизация машиностроения: Республ.межвед.науч.-техн.сб. Киев: Техника, 1984. Вып.33. С.65-68.



## СО Д Е Р Ж А Н И Е

В в е д е н и е .....	3
I. Изделие и его свойства.....	5
I.1. Краткие сведения о конструктивных типах авиационных газотурбинных двигателей.....	5
I.2. Способы представления информации о конструкции изделия и его элементах.....	7
I.3. Структура изделия, подлежащего сборке.....	9
I.4. Конструктивно-технологические свойства изделия и отражение их в математических моделях..	12
I.4.1. Свойства (контуры), характеризующие механическую взаимосвязь элементов изделия.....	18
I.4.2. Свойства (контуры), характеризующие пространственную взаимосвязь элементов изделия.....	26
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ...	41
2.1. Общие положения.....	41
2.2. Последовательность проектирования технологического процесса сборки.....	42
2.3. Формирование принципиальной схемы сборки.....	44
2.3.1. Выявление конструктивно-технологических свойств изделия.....	45
2.3.2. Выбор оптимальной схемы технологического членения.....	46
2.3.3. Выбор схем базирования и состава оснащения сборки.....	52
2.3.4. Определение состава элементов, ограничивающих доступ устанавливаемому элементу при выполнении операции установки.....	58

2.3.5. Определение последовательности формирования сборочных единиц и изделия в целом...	58
2.4. Формирование маршрута технологического процесса сборки.....	63
2.4.1. Понятие о технологической системе и ее структуре.....	63
2.4.2. Последовательность формирования маршрута технологического процесса сборки.....	66
2.4.3. Формирование маршрута технологического процесса сборки с помощью математических моделей.....	68
2.5. Проектирование типовых технологических процессов сборки ГТД.....	84
Библиографический список.....	88

З а х а р о в Василий Андреевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ГТД**

Редактор Т.К.К р е т и н и н а  
Техн.редактор Г.А.У с а ч е в а  
корректор Е.Д.А н т о н о в а

Подписано в печать 15.01.93. Формат 60x84<sup>I</sup>/16.  
Бумага оберточная. Печать офсетная. Усл.печ.л. 5,34.  
Усл.кр.-отт. 5,46. Уч.-изд.л. 5,21. Тираж 200 экз.  
Заказ № 5. Арт. С - 9/93.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Участок оперативной полиграфии Самарского  
государственного аэрокосмического университета.  
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.