

УДК 621.452

**И. А. КРИВОШЕЕВ, В. А. ЗРЕЛОВ, М. Е. ПРОДАНОВ, А. Ю. САПОЖНИКОВ,  
А. В. КАРПОВ**

## **ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ СИЛОВОЙ СХЕМЫ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД**

Рассматривается применение обобщенной конструктивно-силовой схемы ГТД в процессе проектирования авиационных двигателей. Проведен анализ силовых схем отечественных ГТД. Описываются возможности применения обобщенной силовой схемы с использованием системы поддержки принятия решений на этапе эскизного проектирования ГТД. Разработаны граф-схемы выбора конструктивных схем узлов ГТД. Представлено информационное поле силовых схем в виде многоуровневой базы данных. *Обобщенная силовая схема; проектирование ГТД*

### **ВВЕДЕНИЕ**

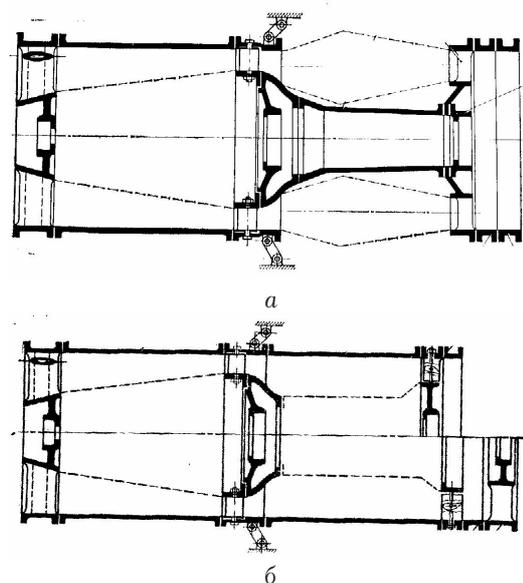
Как показано в работе [4], процесс проектирования ГТД состоит из решения чередующихся задач структурного и параметрического синтеза (и их совместной оптимизации). Тогда как этапы параметрического синтеза и оптимизации поддерживаются средствами СИМ (систем имитационного моделирования), этапы структурного синтеза могут быть поддержаны с использованием СППР (систем поддержки принятия решений). Типичным примером формализации решения задачи структурного синтеза является выбор варианта и формирование силовой схемы ГТД на этапе эскизного проектирования двигателя.

Под силовой системой газотурбинного двигателя понимается система силовых деталей, предназначенных для восприятия нагрузок, действующих на элементы двигателя, и передачи результирующей силы на элементы крепления двигателя к самолету [3]. Силовая система двигателя состоит из силовой системы ротора и силовой системы корпуса (статора). Силовая система ротора включает в себя силовые детали роторов компрессора и турбины, узлы их соединения, приводы агрегатов, а в случае ТВД — и вращающиеся детали редуктора. Силовая система корпуса включает в себя корпуса компрессора, камеры сгорания, турбины, редуктора, подшипников, а в случае ТРДД с камерой смешения и общим реактивным соплом — корпус внешнего контура.

На элементы силовой системы ГТД действуют газодинамические и инерционные на-

грузки. К силовой системе предъявляются следующие основные требования [5]:

- обеспечение прочности и жесткости системы двигателя для предотвращения возникновения недопустимых упругих деформаций и полного исключения появления остаточных деформаций;
- конструкция и соединения силовых деталей должны обеспечивать возможно меньшую массу конструкции двигателя;
- конструкция и соединения деталей должны обеспечивать свободу температурных деформаций для избежания появления температурных напряжений.



**Рис. 1.** Схемы силовых корпусов ТРД с одинарной внутренней (а) и внешней (б) связью компрессора и турбины

Таблица 1

**Конструктивно-силовые схемы по типу и расположению опор компрессоров и турбин отечественных авиационных ГТД**

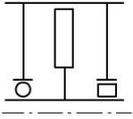
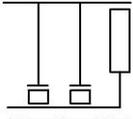
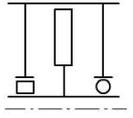
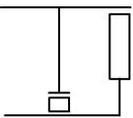
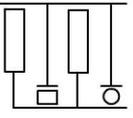
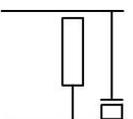
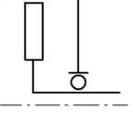
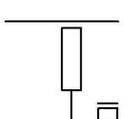
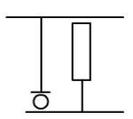
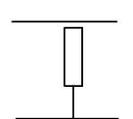
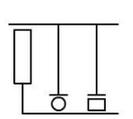
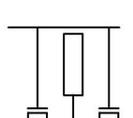
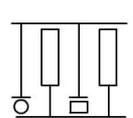
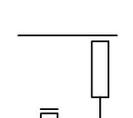
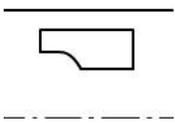
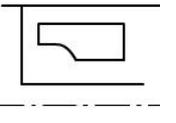
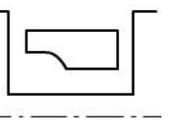
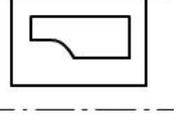
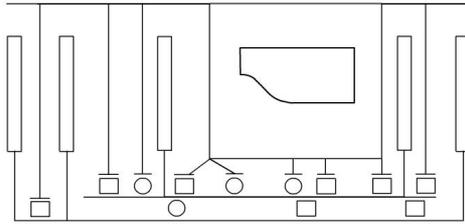
Код схемы компрессора	Схема компрессора	Код схемы турбины	Схема турбины
$X_{11}$		$X_{21}$	
$X_{12}$		$X_{22}$	
$X_{13}$		$X_{23}$	
$X_{14}$		$X_{24}$	
$X_{15}$		$X_{25}$	
$X_{16}$		$X_{26}$	
$X_{17}$		$X_{27}$	

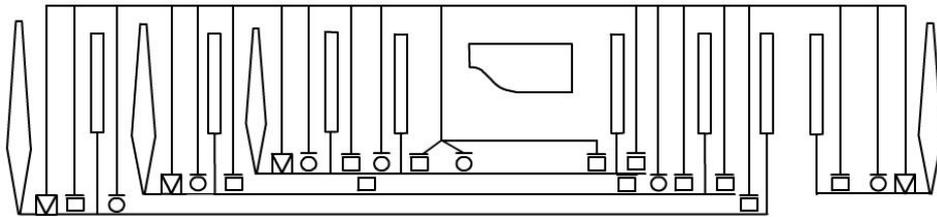
Таблица 2

**Схемы силового замыкания корпусов турбокомпрессоров отечественных ГТД**

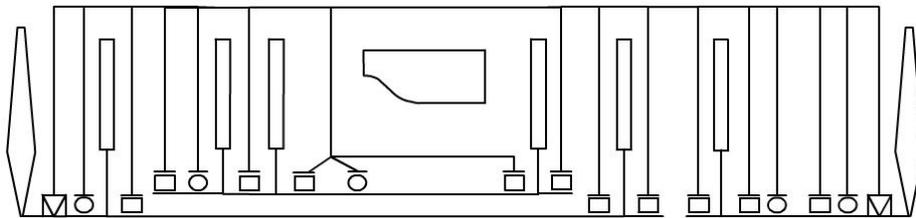
Код схемы	$X_{31}$	$X_{32}$	$X_{33}$	$X_{34}$
Схема замыкания				



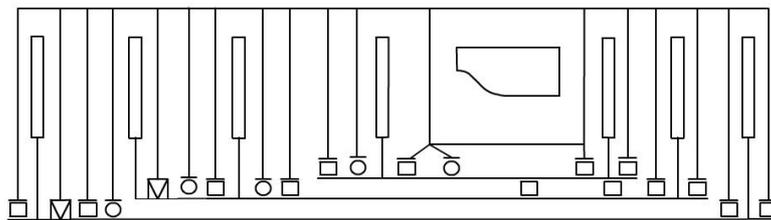
**Рис. 2.** Обобщенная КССТРО отечественных авиационных ТРД(Ф)



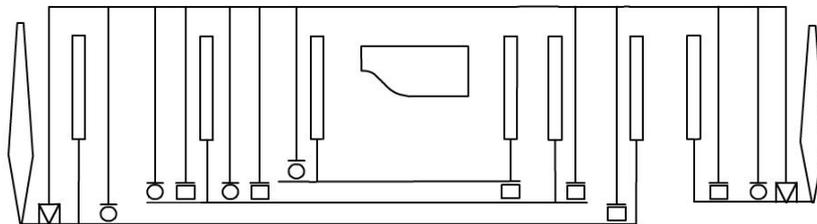
**Рис. 3.** Обобщенная КССТРО отечественных авиационных ТВД



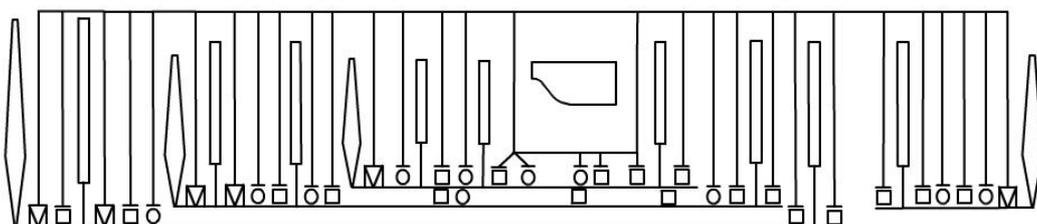
**Рис. 4.** Обобщенная КССТРО отечественных авиационных ТВВД



**Рис. 5.** Обобщенная КССТРО отечественных авиационных ТВВД(Ф)



**Рис. 6.** Обобщенная КССТРО отечественных авиационных ТВВД



**Рис. 7.** Обобщенная КССТРО отечественных авиационных ГТД

Графическим условно-стилизованным изображением силовой системы является силовая схема. Для примера на рис. 1 приведены варианты схем силовых корпусов ГТД с разными типами связей компрессора и турбины.

**ФОРМАЛИЗАЦИЯ  
ФОРМИРОВАНИЯ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ГТД**

Анализ конструкций отечественных ГТД [1,2] позволяет выделить конструктивно-силовые схемы по типу и расположению опор (КССТРО) для компрессоров и турбин, а также схемы силового замыкания корпусов турбокомпрессоров отечественных ГТД (табл. 1, 2) для представления их в информационное поле ГТД.

С использованием условно-стилизованных элементов конструкции на рис. 1–5 представлены в обобщенном виде КССТРО авиационных ГТД различных типов, включая перспективные схемы, такие как ТРДД с редуктором, а также схемы двигателей, находящихся в разработке (ТВаД Д-127) или на стадии испытаний.

Выборанный подход к формализованному представлению силовой схемы ГТД позволяет создать обобщенную (универсальную) КССТРО авиационных ГТД (рис. 6), в которой присутствуют основные элементы реализованных двигателей–прототипов. КССТРО

любого двигателя можно получить из обобщенной схемы, убрав из нее избыточные элементы.

Обобщенная КССТРО авиационных ГТД является, по сути, графическим отображением уровня базы данных (БД) [4], отражающего возможные варианты схем ГТД, рекомендованные к применению после проведения работ на стадии «Исследование и обоснование разработки ГТД» НТЗ.

Следует отметить, что в обобщенной КССТРО не видны подпорный каскад и разделение контуров двухконтурного двигателя, что относится к принятому в схеме упрощению.

Полученная обобщенная КССТРО может применяться на стадии эскизного проекта для выбора оптимальной схемы проектируемого ГТД на основе заданных критериев ТЗ и алгоритмов их использования системы поддержки принятия решений (СППР).

Процесс автоматизированного выбора силовой схемы ГТД представлен на IDEF-диаграмме при декомпозиции блока «Выбор силовой схемы АД» (рис. 7) и описывает стадию эскизного проекта.

В первую очередь из обобщенной КССТРО выделяется схема базового газогенератора, рекомендованного к эскизному проектированию после проведения НИР и ТП. Затем определяется область возможных схем

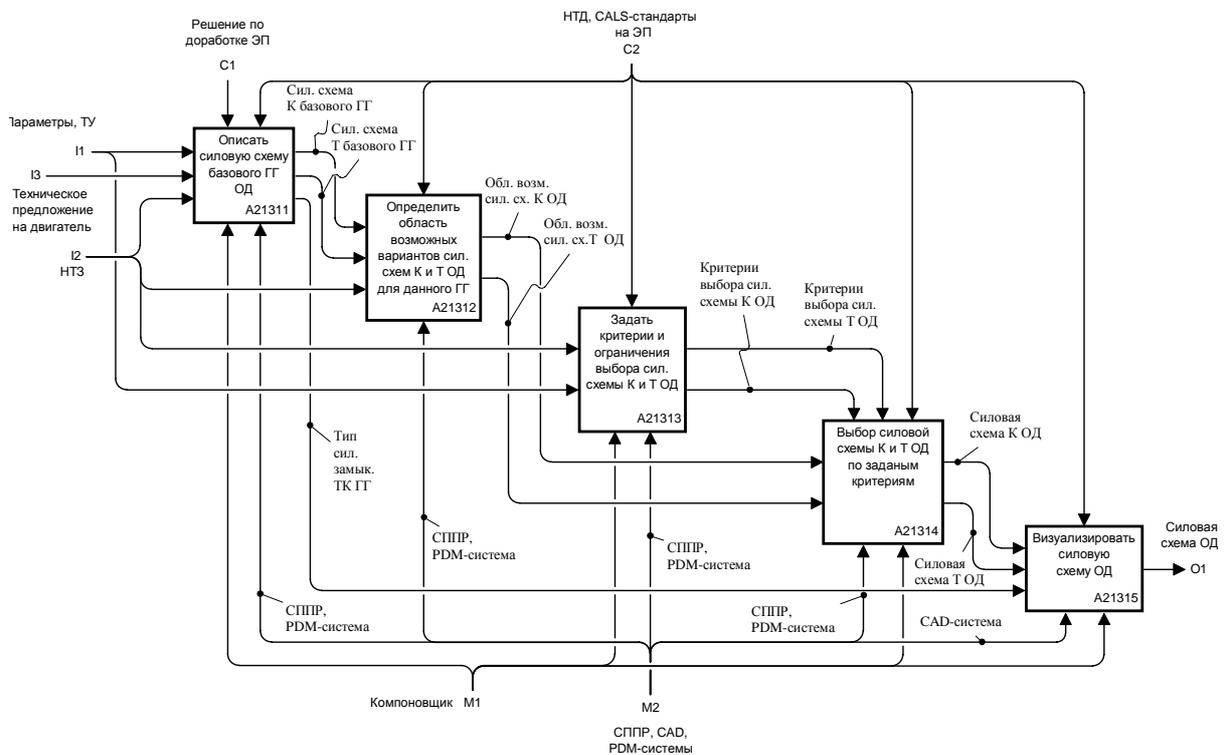


Рис. 8. IDEF-диаграмма «Выбор КССТРО авиационного ГТД» (6-й уровень декомпозиции)

ных решений, из которых на основе заданных критериев ТЗ производится выбор оптимальной КССТРО.

Множество альтернативных вариантов, составляющих область возможных решений, можно отобразить в виде графа, вершины которого соответствуют определенному узлу (компрессору или турбине) или схеме силового замыкания. Ребра графа пронумерованы. Каждое ребро вместе с номером вершины идентифицирует определенную конструктивную схему компрессора, турбины или тип силового замыкания (табл. 1 и 2).

С точки зрения проектирования графы альтернативных вариантов конструкции удобно рассматривать без группирования ГТД по их типу в зависимости от числа роторов ( $N$ ) двигателя. На рис. 8 отображен граф существующих вариантов структуры турбокомпрессора газогенератора. Информационное поле реализованных на сегодняшний день схем турбокомпрессоров газогенераторов отечественных ГТД представлено в табл. 3. В БД схема каждого газогенератора имеет свое обозначение —  $A_i$  (рис. 8, табл. 3).

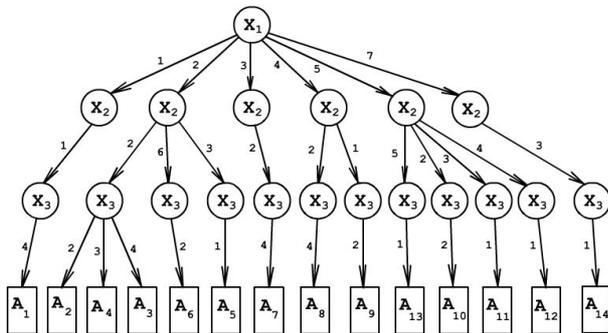


Рис. 9. Граф выбора КССТРО турбокомпрессора газогенератора ГТД

Множество КССТРО компрессоров двухроторных и трехроторных отечественных ГТД представлено в виде граф-схем на рис. 9 и 10 соответственно.

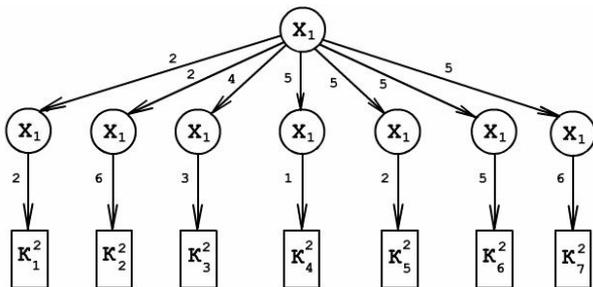


Рис. 10. Граф выбора КССТРО компрессора двухроторного ГТД

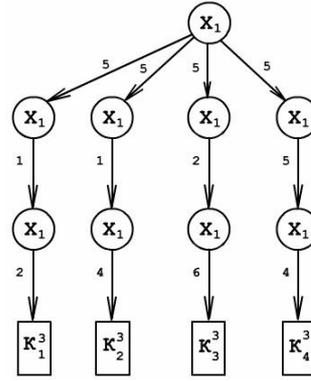


Рис. 11. Граф выбора КССТРО компрессора трехроторного ГТД

В табл. 4, 5 представлено информационное поле конструктивных схем компрессоров двух- и трехроторных отечественных двигателей.

Аналогично схемам газогенераторов каждая схема компрессора в БД имеет свое обозначение —  $K_i^N$ , (см. рис. 9, 10, табл. 4, 5), где верхний индекс показывает количество валов ГТД, а нижний индекс — порядковый номер схемы компрессора в БД.

КССТРО турбин двухроторных и трехроторных отечественных двигателей представлены в виде графов на рис. 11, 12. Информационное поле КССТРО турбин двухроторных и трехроторных двигателей представлено в табл. 6 и 7 соответственно.

Аналогично схемам компрессоров каждая схема турбины в БД имеет свое обозначение  $T_i^N$  (рис. 11, 12, табл. 6, 7), где верхний индекс показывает количество роторов ГТД, а нижний индекс — порядковый номер схемы турбины в БД. Таким образом, СППР, оперируя схемами газогенераторов, компрессоров и турбин, имеющимися в БД, на основе заложенных критериев и алгоритмов сравнения КССТРО, а также заданными требованиями и ограничениями ТЗ, предлагает компоновку оптимизированную КССТРО для проектируемого двигателя.

Кодирование отдельных узлов двигателя, а также КССТРО двигателя в целом (ротор и статор), например, как предложено в [3], позволяет облегчить поиск схем двигателей-прототипов, их узлов и связанной с ними информации в БД средствами PDM-системы.

#### КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ГТД

На основе полученной формализации формирования силовых схем авиационных

Таблица 3

**Информационное поле реализованных КССТРО турбокомпрессоров газогенераторов отечественных ГТД**

$X_1$							$X_2$							$X_3$				$A_i$	Реализация схем в ГТД
$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$	$X_{25}$	$X_{26}$	$X_{27}$	$X_{31}$	$X_{32}$	$X_{33}$	$X_{34}$		
1							1										1	$A_1$	ТР-1, ТР-3, АЛ-5, 003С, РД-10
	1							1							1			$A_2$	ВД-5, ВД-7, ВД-19, 012Б, РД36-41, ВК-2, АИ-20, АИ-24, ТВ-022, Д-19, Д-25В
									1								1	$A_3$	АЛ-7, АМ-3, АМ-5, РД-36, РД-9Б, Д-20П, Д-30, Д-30КУ(КП), ПС-90, Д-100
										1							1	$A_4$	ВК-1, РД-45
											1				1			$A_5$	АЛ-21Ф, РД-36-51А, НК-4, ТВД-10Б, ТВД-20, ТРД-3Ф, ТВ2-117, ТВ3-117
												1						$A_6$	НК-12
		1							1								1	$A_7$	РУ19-300, Р15Б-300
			1						1								1	$A_8$	Р11-300, Р13-300, Р25-300, Р95Ш, Р195, Р28В-300, Р29Б-300
				1						1						1		$A_9$	Р125-300
					1						1					1		$A_{10}$	РД-36-35, РД-38, АИ-25, Р130-300, АИ-9
						1						1					1	$A_{11}$	НК-123ВР, НК-62, ТВД-1500, ТВД-20В, ТРДД-50М, Д-18Т, Д-36, Д-136, Д-136, ТВ-0-100, АИ-450, РД-600, ГТД-400
													1					$A_{12}$	Д-27, Д-127, АИ-22, НК-6, НК-8, НК-22, НК-144
																	1	$A_{13}$	АЛ-31Ф, РД-1700, РД-33, НК-56, НК-62, НК-64, НК-25, НК-93, Р79В-300
						1											1	$A_{14}$	ТВ7-117

Таблица 4

**Информационное поле реализованных КССТРО компрессоров отечественных двухроторных ГТД**

$N_1$							$N_2$							$K_i^N$	Реализация схем компрессоров в отечественных двухроторных ГТД
$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$		
	1								1					$K_1^2$	Д-20П, Д-30, Д-30КУ(КП)
													1	$K_2^2$	ПС-90(А), Д-100
			1							1				$K_3^2$	Р28В-300, Р-95Ш, Р-195, Р11-300, Р13-300, Р25-300, Р29Б-300
				1							1			$K_4^2$	Д-127
					1							1		$K_5^2$	АЛ-31Ф, РД-33, НК-110, НК-8-2У, НК-6, НК-22, НК-144(В)
						1							1	$K_6^2$	Д-136
													1	$K_7^2$	АИ-25, ДВ-2, АИ-22, ТРДД-50, РД-1700

Таблица 5

**Информационное поле реализованных КССТРО компрессоров отечественных трехроторных ГТД**

$N_1$							$N_2$							$N_3$							$K_i^N$	Реализация схем компрессоров в отечественных трехроторных ГТД	
$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$			
					1											1						$K_1^3$	НК-62, НК-25
						1												1				$K_2^3$	Д-27
																				1		$K_3^3$	НК-93, НК-44
																					1	$K_4^3$	Д-36, Д-18Т, Д-436Т1(Т2)

Таблица 6

**Информационное поле реализованных КССТРО турбин отечественных двухроторных ГТД**

$N_1$							$N_2$							$T_i^N$	Реализация схем турбин в отечественных двухроторных ГТД
$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$	$X_{25}$	$X_{26}$	$X_{27}$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$	$X_{25}$	$X_{26}$	$X_{27}$		
	1												1	$T_1^2$	Р28В-300, Р 95Ш, Р195, Р11-300, Р13-300, Р25-300, Р29Б-300, Д-20П
										1				$T_2^2$	АИ-25, Д-30, Д30КУ(КП), ПС-90, Д-100
			1								1			$T_3^2$	Д-136, АИ-450, ТРДД-50(М), ТВ-0-100, ГТД-400
				1								1		$T_4^2$	ДВ-2, АИ-22, Д-127, РД-1700, НК-8-2У, НК-144(В), НК-86, НК-6, НК-22
					1								1	$T_5^2$	АЛ-31Ф, РД-33, НК-110

Таблица 7

Информационное поле реализованных КССТРО турбин отечественных трехроторных ГТД

$N_1$							$N_2$							$N_3$							$T_i^N$	Реализация схем турбин в отечественных трехроторных ГТД	
$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$	$X_{25}$	$X_{26}$	$X_{27}$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$	$X_{25}$	$X_{26}$	$X_{27}$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$	$X_{25}$	$X_{26}$	$X_{27}$			
	1							1								1						$T_1^3$	Д-36, Д-18Т, Д-436Т1(Т2)
		1							1						1							$T_2^3$	Д-27
			1							1						1						$T_3^3$	НК-25, НК-44, НК-93, НК-62

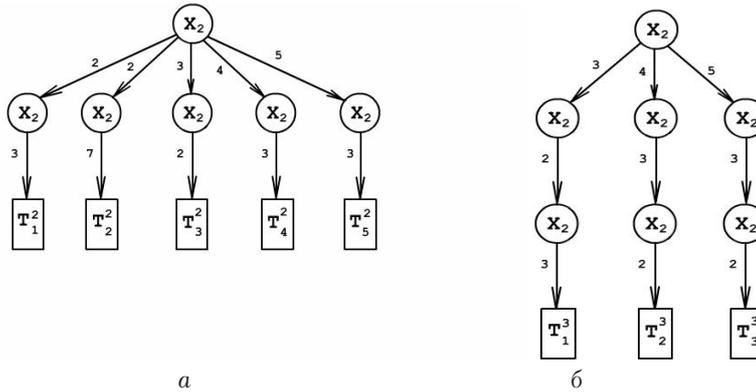


Рис. 12. Графы выбора КССТРО турбины двухроторного (а) и трехроторного (б) ГТД

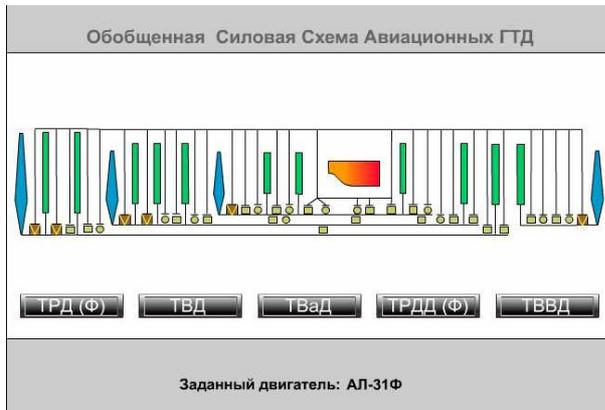


Рис. 13. Обобщенная силовая схема авиационных ГТД в программе «Силовые схемы ГТД»

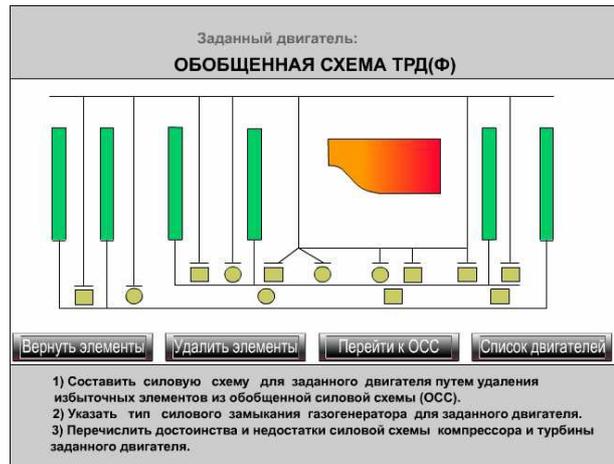


Рис. 14. Обобщенная силовая схема ТРД(Ф) в программе «Силовые схемы ГТД»

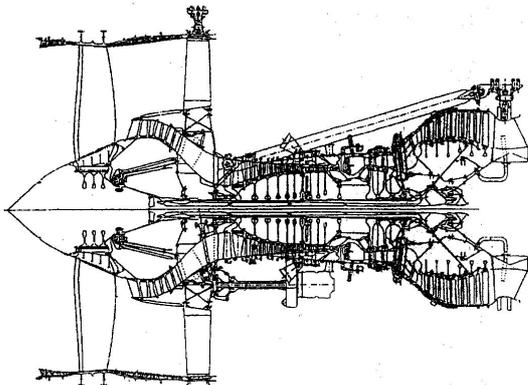


Рис. 15. Схематический разрез двигателя GE90-85В

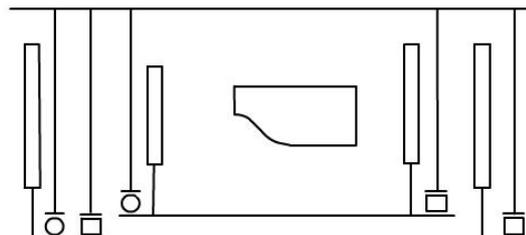


Рис. 16. Силовая схема двигателя GE90-85В

ГТД разработан программный комплекс OSS\_GTD (рис. 13), который успешно применяется в подготовке специалистов УГАТУ и СГАУ по авиационным двигателям и наземным энергоустановкам.

По результатам предварительного выбора параметров, формирования схемы двигателя, его проточной части, проектировщик определяет тип двигателя и с использованием меню под ОСС переходит к обобщенной схеме двигателей данного типа (рис. 14).

При этом имеется возможность получить силовую схему заданного двигателя путем удаления лишних элементов из обобщенной избыточной схемы. В случае существования нескольких вариантов, реализующих схему данного двигателя, рекомендуется выбирать тот вариант, элементы которого расположены ближе к газогенератору и камере сгорания.

#### ПРИМЕР АНАЛИЗА СИЛОВОЙ СХЕМЫ ВЫПОЛНЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В качестве примера показана силовая схема ТРДД GE90-85B, совместно созданного фирмами «General Electric», «SNECMA» и «ИИ» (рис. 15) для самолета Boeing 777.

Анализ с использованием предложенной формализации и разработанного программного комплекса ОСС позволяет получить следующие данные. Двигатель GE90-85B — двухвальный, имеет три силовых пояса. Ротор НД опирается на три опоры, ротор ВД — на две опоры.

Ротор НД состоит из ротора одноступенчатого вентилятора с тремя подпорными ступенями и ротора 6-ступенчатой турбины НД. Передняя опора ротора НД включает упорный шарикоподшипник, размещенный за рабочим колесом вентилятора, и роликподшипник, размещенный в промежуточном корпусе. Роликподшипник задней опоры ротора НД размещен на силовой стойке за турбиной НД.

Ротор ВД состоит из 10-ступенчатого компрессора ВД, барабанно-дисковой конструкции, и ротора 2-ступенчатой турбины ВД. Пе-

редняя опора ротора ВД с упорным шарикоподшипником размещена в промежуточном корпусе. Задняя опора с роликподшипником размещена за турбиной ВД, на силовой стойке, проходящей через переходный канал между турбиной ВД и турбиной НД.

Схема силового корпуса двигателя относится к схеме с одинарной внешней силовой связью компрессора и турбины (рис. 16). Соединение корпусов компрессора и турбины осуществляется внешней связью с помощью корпуса камеры сгорания.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная обобщенная КССТРО является связующим звеном между термогазодинамической моделью двигателя и его конструкцией в проектировании ГТД с использованием автоматизированных средств. Проведенный анализ авиационных ГТД и его узлов позволяет представить информационное поле КССТРО в виде многоуровневой базы данных. Полученная база данных служит основой при использовании различных программных средств (СППР, САД/САМ/САЕ/PDM-систем), обеспечивающих повышение качества проектирования ГТД с использованием ИПИ/CALS-технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зрелов, В. А.** Отечественные ГТД. Основные параметры и конструктивные схемы : учеб. пособие. Ч. 1 / А. В. Зрелов. Самара : СГАУ, 2002. 210 с.
2. **Зрелов, В. А.** Отечественные ГТД. Основные параметры и конструктивные схемы : учеб. пособие. Ч. 2 / А. В. Зрелов. Самара : СГАУ, 2002. 250 с.
3. **Филекин, В. П.** Атлас конструктивных и силовых схем авиационных ГТД / В. П. Филекин. Куйбышев : КуАИ, 1984. 102 с.
4. **Кривошеев, И. А.** Организация базы данных для системного проектирования авиационных ГТД на этапе эскизного проекта / И. А. Кривошеев, А. Ю. Сапожников, А. В. Карпов // Авиационная техника. 2004. № 1. С. 69–71.
5. **Скубачевский, Г. С.** Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / Г. С. Скубачевский. М. : Машиностроение, 1981. 550 с.