

УДК 621.452.3

И. М. ГОРЮНОВ

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ГТД И ЭУ

Рассмотрены методы структурно-параметрического синтеза газотурбинных двигателей и энергетических установок с использованием разработанной системы DVIgwT. *Газотурбинные двигатели; энергетические установки; термогазодинамические расчеты; математическое моделирование*

При разработке, проектировании и создании сложных объектов (ГТД и ЭУ) необходимы знания о количественных и качественных закономерностях, свойственных рассматриваемым системам, эти сведения могут быть получены на базе метода математического моделирования.

Согласно основным положениям моделирования газотурбинных двигателей, энергетических установок и технических объектов [1, 2, 3, 4 и др.], математическая модель дает формализованное и приближенное (с определенной степенью точности) описание реальной картины количественных и логических взаимосвязей и соотношений между основными параметрами рассматриваемого объекта, характеристик его элементов, характеристик внешних связей, систем ограничений и соответствующего критерия эффективности.

Современные газотурбинные двигатели и энергетические установки на их основе представляют собой сложные технические системы, в которых применяются комплексы разнородных узлов и элементов оборудования со сложной схемой технологических связей, тесным взаимодействием различных физико-химических, тепловых, гидравлических и других процессов.

Газотурбинные двигатели и энергетические установки являются предметом системного подхода, так как представляют собой технические системы, которые, с одной стороны, являются частью системы, например, летательного аппарата (ЛА), тепловых электрических станций (ТЭС) или газоперекачивающих станций (ГПС), определяющей цели и ограничительные рамки их создания и функционирования, с другой — сами объекты рассматриваются как совокупность взаимосвязанных подсистем. Кроме того, задачи проек-

тирования и оптимизации ЛА, ТЭС и ГПС совпадают с целью системного подхода — выбрать наилучшие пути адаптации (приспособления) исследуемой системы к постоянно меняющимся и недетерминированным (не вполне определенно заданным) внешним условиям.

Моделирование ГТД и ЭУ состоит из ряда взаимосвязанных этапов, составляющих систему моделирования. Математическое моделирование — это синтез модели (процесс создания абстрактной модели) и анализ (исследования модели с целью получения новых сведений об объекте).

Разработка математической модели состоит в создании расчетной схемы и описаний в виде математических отношений связей между параметрами, характеризующими как элементы, так и всю расчетную схему в процессе функционирования объекта.

При разработке математических моделей и системы моделирования ГТД и ЭУ используются иерархический, объектно-ориентированный, модульный принципы, а также принцип декомпозиции и композиции.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Опыт создания автором программных средств, а также анализ существующих решений позволил разработать структуру системы моделирования авиационных ГТД и ЭУ на их основе, отвечающую поставленным задачам.

Основные элементы структуры системы моделирования (рис. 1) выполняют функции синтеза (препроцессор), анализа (процессор), отображения результатов (постпроцессор).

Для обеспечения функционирования системы создаются банки данных, включающие:

- свойства и функции рабочих тел (термодинамические свойства рабочих тел и их

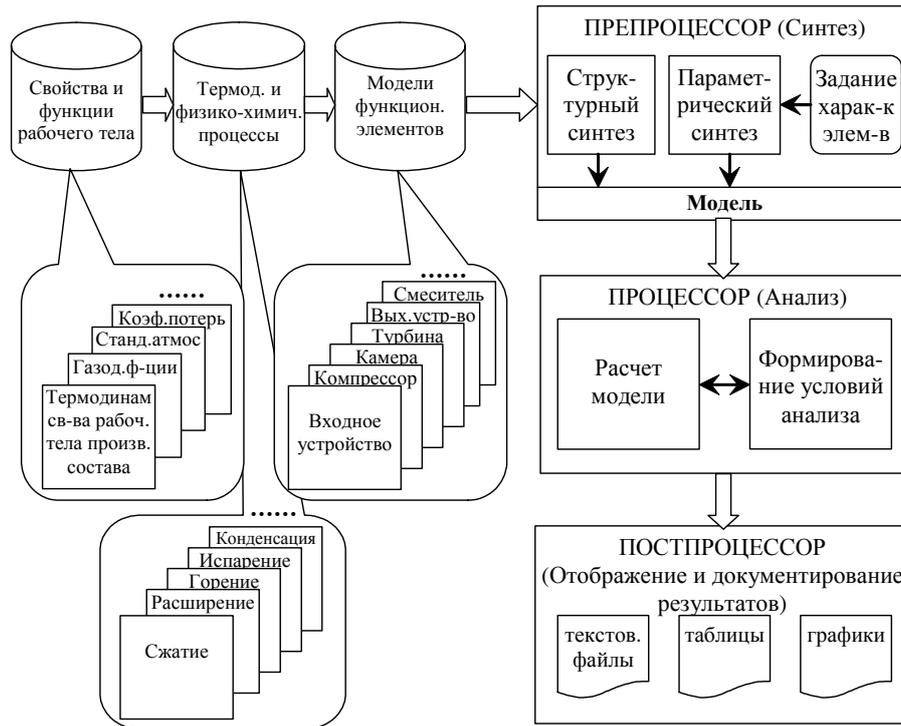


Рис. 1. Структура системы моделирования ГТД и ЭУ

состав, газодинамические функции, стандартная атмосфера, коэффициенты потерь и т. д.);

- термодинамические и физико-химические процессы (сжатие, расширение, горение, испарение, конденсация и др.);

- модели функциональных элементов (входное устройство, компрессор, основная и форсажная камеры сгорания, турбина, смеситель, выходное устройство и др.).

На их основе в препроцессоре производится синтез структурной модели установки из функциональных элементов, связанных между собой информационными потоками. Здесь же осуществляется параметрический синтез с заданием значений параметров и характеристик элементов.

Расчет модели на основе сформированных условий анализа выполняется в блоке «процессор». Применяются математические методы расчета системы нелинейных уравнений.

«Постпроцессор» организует отображение и документирование полученных результатов моделирования в виде текстовых файлов, графиков и таблиц.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ

К типовым задачам моделирования относятся: структурный синтез, структурный анализ, параметрический синтез, параметрический анализ и комбинированные задачи:

структурный синтез и анализ, параметрический синтез и анализ, структурно-параметрический анализ (рис. 2). В общем виде условия, формируемые для решения проектной задачи, определяют тип, количество и порядок выполнения вышеперечисленных типовых задач.

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ СХЕМЫ

Под структурным синтезом понимается процесс создания составной алгоритмической модели объекта, то есть определения набора элементов, из которых состоит составная модель, способов их соединения и взаимодействия.

На данном этапе развития средств автоматизации моделирования и проектирования задача структурного синтеза, как правило, решается вручную, в интерактивном режиме составляется модель технического объекта, по которой в дальнейшем производятся расчеты.

На основе описания конструкции двигателя выделяются функциональные узлы, определяющие его рабочий процесс: входное устройство, компрессор (вентилятор, подпорные ступени, компрессор среднего давления, компрессор высокого давления), разделитель потоков внутреннего и наружного контуров, реактивное сопло наружного контура, воздухо-воздушный радиатор для снижения темпе-

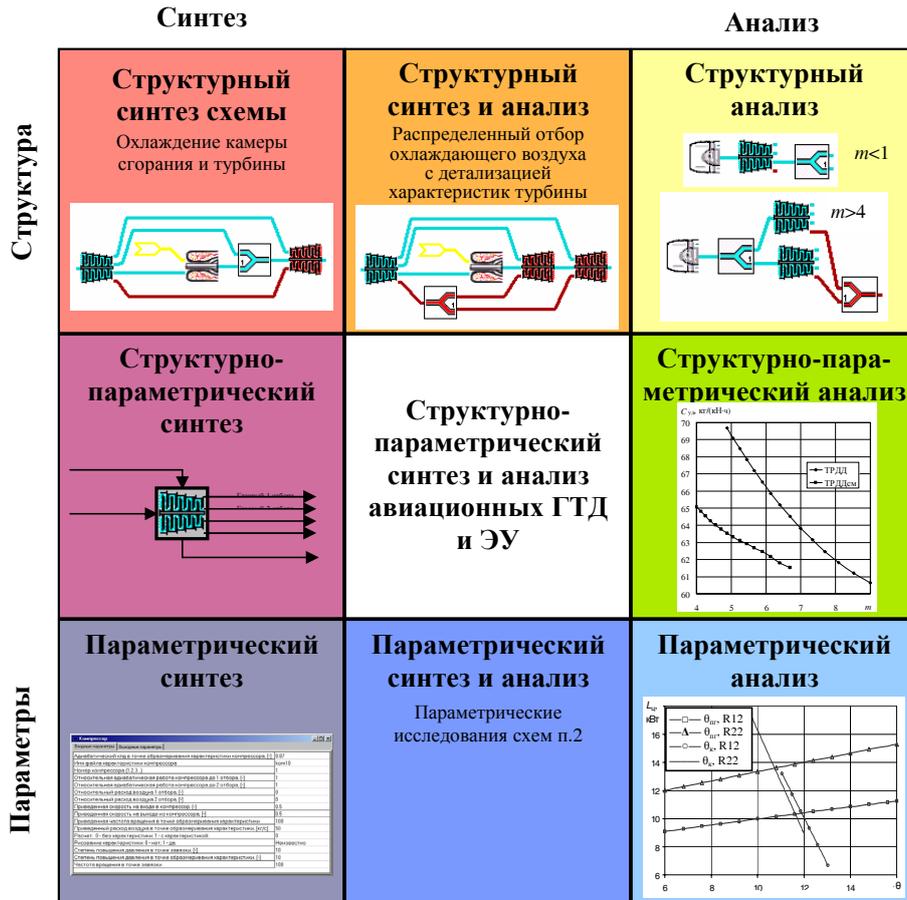


Рис. 2. Структурно-параметрический синтез и анализ

ратуры воздуха, отбираемого в различных сечениях компрессора на охлаждение турбин, основная камера сгорания, подвод вторичного воздуха за камерой сгорания, турбина (турбина высокого давления, турбина среднего давления, турбина низкого давления, свободная турбина), переходный канал между узлами двигателя (наружный контур, переходник между вентилятором и компрессором, диффузор камеры сгорания, затурбинный диффузор, переходный канал перед свободной турбиной), смеситель потоков наружного и внутреннего контуров, форсажная камера, реактивное сопло внутреннего контура или общее, потребитель мощности от ротора турбины. В комбинированных энергетических установках дополнительно выделяются такие узлы, как котел-утилизатор, насос подачи воды, паровая турбина, дроссели рабочего тела, конденсатор водяного пара (поверхностный, смешивающий), подогреватели рабочего тела (поверхностного и смешивающего типов), деаэратор, элементы впрыска рабочего тела (воды, пара, газа) и др. На основе конструктивной схемы (рис. 3) составляется принципиальная схема энергетической установки с ук-

занием функциональных элементов и их связей.

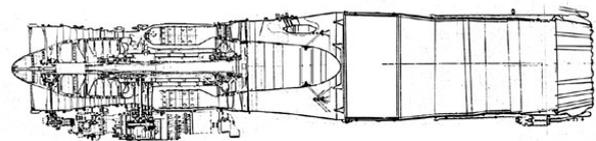


Рис. 3. Схема двухвального ТРДФ

Выполняется идентификация элементов принципиальной схемы энергоустановки с функциональными элементами системы DVIGwT.

Компоновка модели осуществляется из набора функциональных элементов путем выбора их из окна «Доступные типы элементов» и расстановки в нужное место рабочего поля окна «Текущий уровень» в соответствии с принципиальной схемой.

Элементы модели соединяются информационными связями, как показано на рис. 4. Входной информационный поток входит слева, а выходной информационный поток выходит справа от иконки элемента.

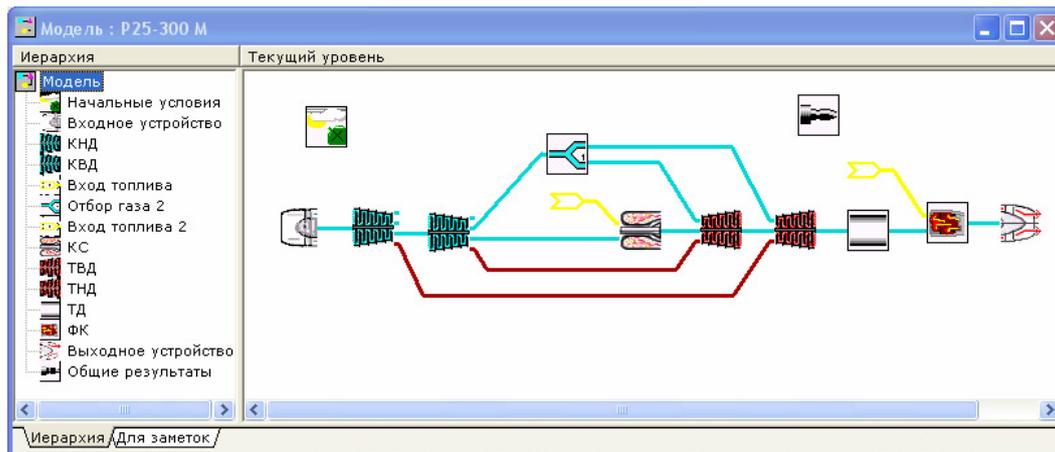


Рис. 4. Структурная схема двухвального ТРДФ

В результате формируется математическая модель исследуемой схемы установки, например, модель двухвального ТРДФ, приведенная на рис. 4.

Функциональным элементам присваиваются наименования в соответствии с принципиальной схемой, модели — наименование двигателя или энергетической установки. Структурный синтез заканчивается идентификацией типа установки (ГТД, ГТУ, ПГУ, ПТУ, ТНУ) в элементе «Общие результаты».

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ

Детализируется структурная схема модели. Например, распределенный подвод охлаждающего воздуха с детализацией характеристик турбины.

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Определение варианта структурной схемы модели, отражающей особенности моделируемого объекта.

Особенности параметров двигателей требуют решения вопроса их структурного отображения. В качестве примера можно назвать задачу представления вентилятора в математической модели при большой степени двухконтурности. В этом случае в качестве решения в системе DVIGwT предлагается метод представления характеристики такого вентилятора в виде двух характеристик: характеристики для наружного контура и характеристики для внутреннего контура.

Для отображения отбора и подвода газа и механической мощности в системе DVIGwT предложены элементы, которые можно назвать разделителями и сумматорами. С применением такого типа средств выполнен ана-

лиз параметров ТРДД — оптимизация распределения энергии между контурами.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ

Распределенный отбор воздуха на охлаждение двигателя требует синтеза схемы отбора с указанием параметров отбираемого воздуха. Например, в компрессоре отбор воздуха из-за промежуточных ступеней моделируется заданием величин относительной работы компрессора до отбора и относительного расхода отбираемого воздуха.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Имея некоторый критерий оптимальности параметров объекта $F_{ц}$, решаем задачу отыскания оптимальной структуры моделируемого объекта среди возможных, то есть рассматриваем возможные решения задачи структурного синтеза и выбираем из них наиболее соответствующее критерию оптимальности. Таким образом, задача структурно-параметрического анализа формулируется

$$\min_{X \in D} F_{ц}(\vec{X}),$$

где $F_{ц}$ — целевая функция, D — дискретное множество возможных решений задачи структурного синтеза.

Для решения подобных задач в комбинаторике существуют соответствующие методы, например, метод ветвей и границ [3], хотя их применение на практике и встречается с определенными трудностями.

Хотя решений этой задачи может быть множество, эксперт-проектировщик выбирает лишь одно из них, полагаясь на свой опыт и знание предметной области.

Входные параметры	Выходные параметры
Адиабатический (политропный) КПД в точке образмеривания хар-ки компрессора, [-]	0.77
Имя файла зависимости коэффициента влияния Kkpd	Неизвестно
Имя файла зависимости коэффициента влияния Kpi	Неизвестно
Имя файла характеристики компрессора	KND25AG
Номер компрессора (1,2,3...)	1
Окружная скорость, [м/с]	Неизвестно
Относительная адиабатическая работа компрессора до 1 отбора, [-]	1
Относительная адиабатическая работа компрессора до 2 отбора, [-]	1
Относительный расход воздуха 1 отбора, [-]	0
Относительный расход воздуха 2 отбора, [-]	0
Приведенная скорость на входе в компрессор, [-]	0.7197
Приведенная скорость на выходе из компрессора, [-]	0.5656
Приведенная частота вращения в точке образмеривания характеристики	100.5
Приведенный расход воздуха в точке образмеривания характеристики, [кг/с]	67.1
Расчет компрессора: 0 - стандартного; 1 - дожимного.	0
Расчет: 0-без поправок, 1-с поправками на Пик и КПД от влажности	0
Расчет: 0-без хар-ки, 1-со станд. хар-кой, 2-с АВНА, 3-КПД политропный.	1
Рисование характеристики: 0 - нет; 1 - да.	1
Степень повышения давления в рабочей точке, [-]	3.3658
Степень повышения давления в точке образмеривания характеристики, [-]	3.4
Теоретический напор	Неизвестно
Угол установки ВНА в рабочей точке, [град]	Неизвестно
Угол установки ВНА в точке образмеривания характеристики компрессора, [град]	Неизвестно
Частота вращения в точке завязки	11212

Рис. 5. Задание входных параметров компрессора

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ

При параметрическом синтезе задаются параметры и характеристики элементов модели, учет дополнительных факторов обеспечивается заданием соответствующих признаков. Параметрический синтез иллюстрируется на примере функционального элемента «Компрессор». Номенклатура входных параметров приведена в окне «Компрессор» на рис. 5.

Характеристика компрессора подключается указанием имени путем активизации поля «Имя файла характеристики компрессора», в результате чего откроется папка «DATA» со списком всех имеющихся в библиотеке характеристик компрессоров, подготовленных для использования в программе CharEdit. Характеристики компрессоров, как правило, хранятся в безразмерном виде. Для использования в расчете необходимо характеристику образмерить по всем параметрам:

- адиабатический (политропный) КПД в точке образмеривания характеристики;
- приведенная частота вращения в точке образмеривания характеристики;
- приведенный расход воздуха в точке образмеривания характеристики;

- степень повышения давления в точке образмеривания характеристики.

В расчетной точке параметры компрессора могут быть заданы константами (по признаку «Расчет: 0 — без характеристики; 1 — со станд. хар-кой, 2 — с АВНА, 3 — КПД политропный») при этом задаются «Степень повышения давления в точке завязки» и «Частота вращения в точке завязки».

При числе компрессоров больше одного задается их порядковый номер. Относительная адиабатическая работа компрессора при отборе из-за промежуточной ступени должна быть меньше единицы. Относительный расход отбираемого воздуха задается в долях от общего расхода через компрессор.

Дополнительные факторы учитываются заданием значений параметров:

- имя файла зависимости коэффициента влияния Kkpd,
- имя файла зависимости коэффициента влияния Kpi,
- окружная скорость, [м/с],
- расчет компрессора: 0 — стандартного; 1 — дожимного,
- расчет: 0 — без поправок, 1 — с поправками на Пик и КПД от влажности,
- теоретический напор,

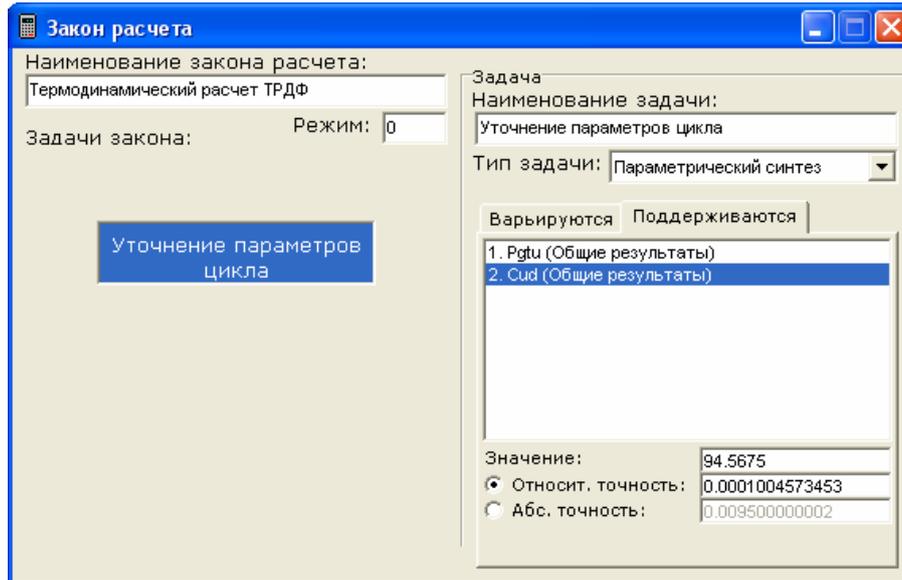


Рис. 6. Задание поддерживаемых параметров

- угол установки ВНА в рабочей точке, [град],
- угол установки ВНА в точке образмеривания характеристики компрессора, [град].

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ

Параметрические исследования структурной схемы объекта, синтез характеристик элементов по заданным выходным параметрам и внешним условиям. Например, решение задачи уточнения параметров цикла двухвального ТРДФ, когда требуется выполнение заданных условий. После выполнения простого термогазодинамического расчета анализируются выходные параметры модели.

Если значения выходных параметров не удовлетворяют соответствующим требованиям, то необходимо выполнить расчет с коррекцией параметров цикла или закона регулирования для нерасчетных режимов или уточнить схему. Например, требуется получить тягу $P_{\text{зад}}$ и удельный расход топлива $C_{\text{уд зад}}$ за счет уточнения основных термодинамических параметров цикла ($\pi_{\text{кнд}}^*$, $\pi_{\text{квд}}^*$, $T_{\text{кс}}^*$, $G_{\text{впр}}^*$ и др.). Для выполнения двух условий $P_{\text{зад}} - P_{\text{расч}} = 0$ и $C_{\text{уд зад}} - C_{\text{уд расч}} = 0$ в качестве уточняемых параметров достаточно назначить любую пару параметров цикла, например, температуру газа на выходе из камеры сгорания $T_{\text{кс}}^*$ и степень повышения давления в компрессоре $\pi_{\text{кнд}}^*$. Условия записываются как поддерживаемые параметры (рис. 6), а уточняемые параметры — как варьируемые (рис. 7).

Тип решаемых задач отражен в окнах: «Термодинамический расчет ТРДФ», «Уточнение параметров цикла» и «Параметрический синтез», выбираемых из стека типа задачи.

В качестве поддерживаемых параметров можно задавать не только термодинамические параметры, но и геометрические размеры проточной части двигателя и параметры системы регулирования (законы регулирования), особые условия согласования элементов двигателя, например, задание соотношения частот вращения каскадов.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Выполняется одновариантный либо многовариантный параметрический анализ. Например, параметрический анализ рабочего цикла с различными рабочими телами.

Типовой задачей параметрического анализа является расчет характеристик (высотно-скоростных, дроссельных, климатических и пр.) двигателя на установившихся режимах работы.

На базе уже созданной модели двухвального ТРДФ и данных термогазодинамического расчета на расчетном режиме рассмотрим последовательность действий при расчете высотно-скоростных характеристик с программой регулирования: $n_{\text{кнд}} = \text{const}$, $F_{\text{С кр}} = \text{const}$.

В соответствии с поставленной задачей поддерживаемыми параметрами являются геометрические размеры проточной части и программа регулирования двигателя (рис. 8):

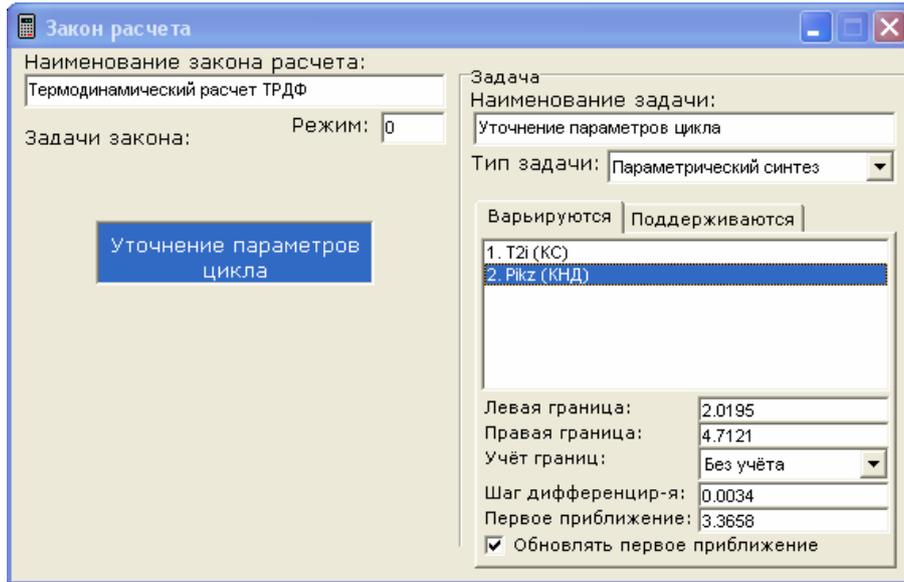


Рис. 7. Задание варьируемых параметров

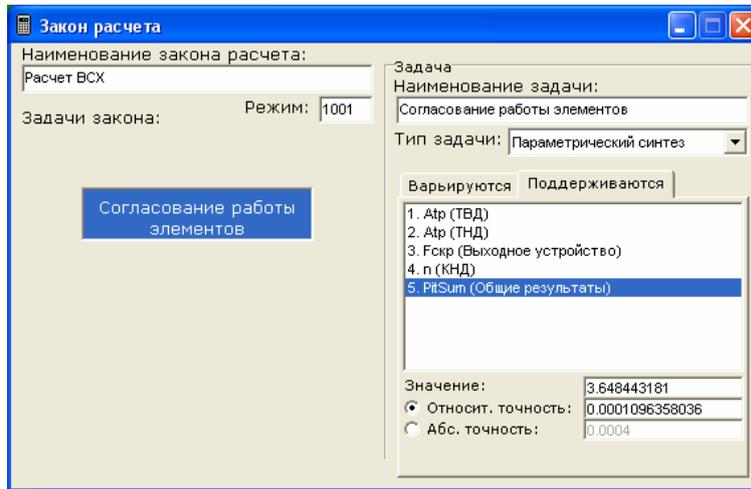


Рис. 8. Задание поддерживаемых параметров

$A_{ТВД}$ — пропускная способность турбины ВД (расчетная), при расчете без характеристики турбины, или $\bar{A}_{ТВД}$ — относительная пропускная способность турбины, равная единице, при использовании характеристики турбины;

$A_{ТНД}$ — пропускная способность ТНД;

$F_{Скр}$ — площадь критического сечения сопла;

$n_{КНД}$ — частота вращения ротора НД;

π_{Σ}^* — суммарная степень понижения давления в турбине.

Варьируемые параметры определяются из числа входных параметров (рис. 9):

$T_{КС}^*$ — температура газа на выходе из камеры сгорания;

T_{Φ}^* — температура газа на выходе из форсажной камеры сгорания;

$G_{впр}$ — приведенный расход воздуха на входе ВУ;

$\pi_{КВД}^*$ — степень повышения давления в рабочей точке КВД;

$\pi_{КНД}^*$ — степень повышения давления в рабочей точке КНД.

Равенство числа варьируемых и поддерживаемых параметров обеспечивает согласование работы всех элементов двигателя.

Задача параметрического анализа дополняет задачу параметрического синтеза. При активной закладке типа задачи «Параметрический анализ» формулируется название задачи «Табулирование М, Н», в которой в качестве табулируемых параметров указываются число M и N полета с заданием начального, конечного значения и шага табулирова-

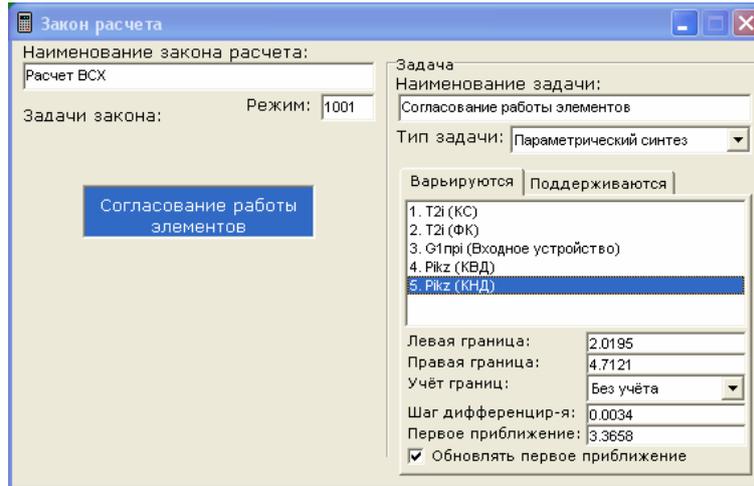


Рис. 9. Задание варьируемых параметров

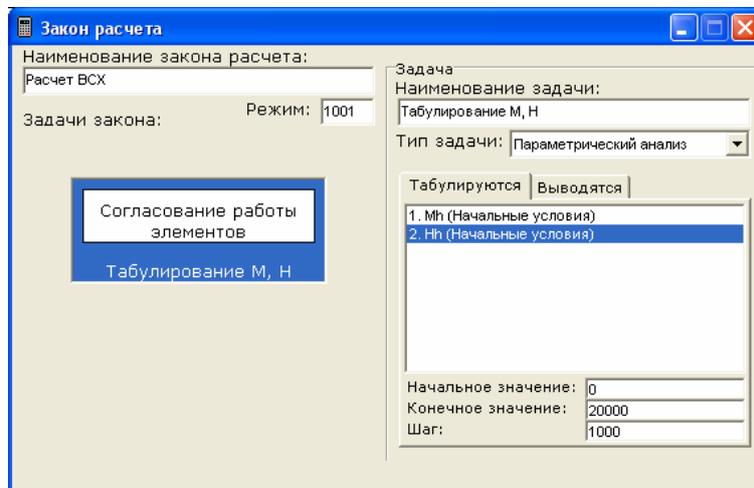


Рис. 10. Задание табулируемых параметров

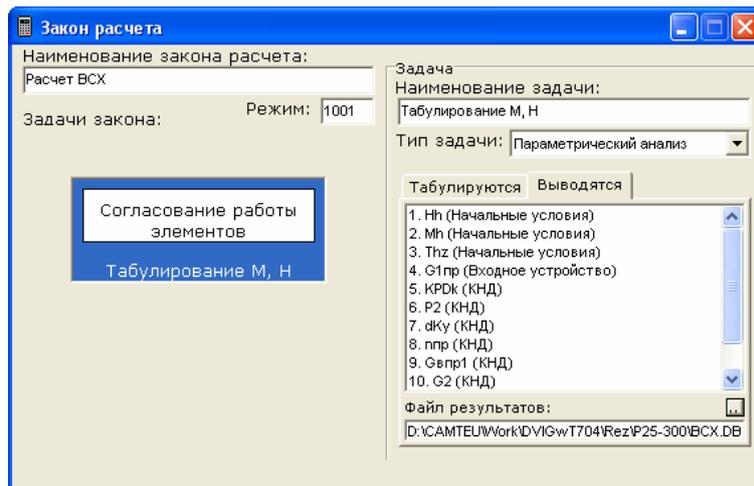


Рис. 11. Задание выводимых параметров

ния (рис. 10). Задается перечень параметров, необходимых для анализа ВСХ (рис. 11).

Выполняется расчет характеристик, в процессе которого качество и его результат контролируются в активном режиме путем про-

смотрa в реальном времени характеристик и рабочей линии критического в каком-либо смысле узла. Результаты расчета ВСХ выводятся в виде графиков или таблицы (рис. 13 и 14). Для примера в качестве функции для

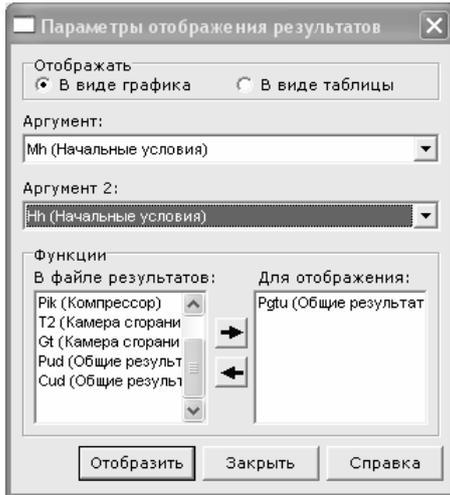


Рис. 12. Параметры отображения результатов

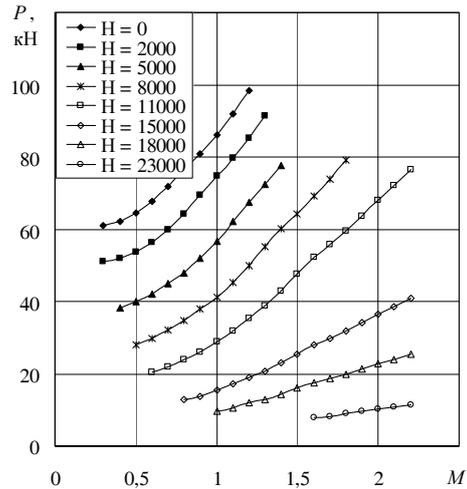


Рис. 13. Высотно-скоростная характеристика ТРДФ

Mh (Нач)	Hh (Нач)	n (Компрессор)	P2 (Компрессор)	dKy (Компрессор)	T2 (Компрессор)	nпр (Компрессор 2)
0.3	0	11212.8	360.315	14.3995	447.838	9050.74
0.4	0	11212	375.821	14.6518	452.118	9024.23
0.5	0	11212	396.472	14.9674	457.655	8990.9
0.6	0	11212	422.786	15.3377	464.443	8950.49
0.7	0	11212	455.43	15.7479	472.494	8902.63
0.8	0	11212	493.596	16.2431	481.483	8849.1
0.9	0	11212	534.814	16.9383	490.764	8794.51
1	0	11212	583.276	17.7192	501.049	8734.9
1.1	0	11212	639.801	18.6403	512.301	8671.8
1.2	0	11212.2	703.823	19.6442	525.155	8602.01

Рис. 14. Таблица результатов расчета

отображения выбрана тяга двигателя, а аргументами являются число M и H полета (рис. 12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для использования возможностей системы DVIGWT разработаны методы выполнения структурно-параметрического синтеза и анализа рабочих процессов авиационных ГТД и энергетических установок на их основе, включающие, в том числе, способ описания рекурсивных связей функциональных элементов и задания граничных условий расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ахмедзянов, А. М.** Проектирование авиационных ГТД : Учеб. пособие / А. М. Ахмедзянов. Уфа : УАИ, 1987. 227 с.
2. **Зарубин, В. С.** Математическое моделирование в технике : Учеб. для вузов / В. С. Зарубин. М. : МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. 496 с.

3. **Норенков, И. П.** Системы автоматизированного проектирования. Кн. 1. Принципы построения и структура. / И. П. Норенков. М. : Высшая школа, 1986. 127 с.
4. **Тунаков, А. П.** Применение методов оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей / А. П. Тунаков. М. : Машиностроение, 1979. 184 с.

ОБ АВТОРЕ



Горюнов Иван Михайлович, проф. каф. авиац. двигателей, зав. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1974). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. автоматизации проектирования, доводки, изготовления и эксплуатации ГТД и ЭУ.