# Математические модели ГТД

Мухамедов Р. Р.

Введение

Создание и эксплуатация сложных технических систем на современном уровне предполагает обязательное применение их математических моделей, которые можно определить как математическое «изображение существенных сторон реальной системы или ее конструкции в удобной форме, отражающее информацию о системе» [1].

Применительно к газотурбинному двигателю (ГТД), который является сложной технической системой, при его создании и эксплуатации разрабатывается большое количество математических моделей различного типа, как двигателя в целом, так и его отдельных узлов. Это модели напряженно-деформированного, теплового состояния лопаток, дисков, роторов и других элементов компрессоров и турбин, камер сгорания, сопла и т.д.; термогазодинамические модели, описывающие рабочий процесс в элементах двигателя, т.е. связь между давлением, температурой, расходом воздуха и газа в различных точках тракта двигателя, и другие модели.

Значение математических моделей ГТД как объекта регулирования в процессах разработки, создания и доводки двигателей постоянно возрастает. Это определяется целым рядом объективных факторов, основными из которых являются следующие:

усложнение схем, конструкций и технологии производства двигателей, повышение стоимости материалов конструкции и, как следствие, очень высокая стоимость натурных испытаний. При этом практически невозможно осуществить натурные испытания во всех условиях эксплуатации, характерных для многорежимных двигателей;

возможность создания высокоточных и достаточно быстродействующих математических моделей двигателей, адекватно описывающих их рабочий процесс в различных условиях полета, на различных режимах работы двигателя, в том числе и на переходных, и в различных условиях эксплуатации. Это связано с практически неограниченными возможностями современных вычислительных машин (ЦВМ), а также с более чем 50-летним опытом разработки и эксплуатации газотурбинных двигателей. Создание, доводка и эксплуатация современных ГТД сопровождались широким и высокоэффективным применением их моделей как объектов управления. Получение существенно более высоких характеристик этих двигателей, по сравнению с характеристиками двигателей предыдущего поколения, во многом определяется применением таких моделей.

Все это позволило выделить разработку математических моделей ГТД как объекта управления в самостоятельное направление в области создания двигателей и их САУ. Математические модели двигателя, в том числе и как объекты управления, являются самостоятельным и обязательным продуктом, используемым при разработке, сертификации и эксплуатации современных и перспективных ГТД.

Целью работы является описание математических моделей ГТД, их преимущества особенности и т.д.

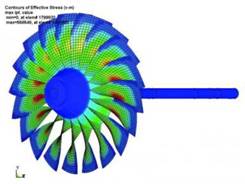


Рис.1. Модель напряженного состояния лопаток компрессора

Примеры применения математических моделей

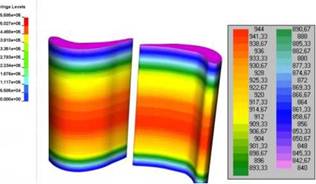


Рис.2. Трехмерная математическая модель теплового состояния лопаток

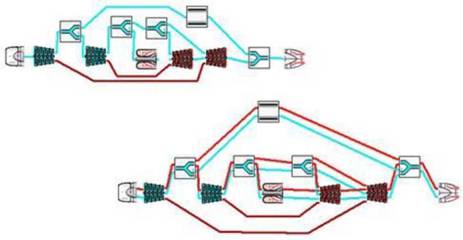


Рис.3. Математическая модель ГТД Применение математических моделей ГТД как объектов управления

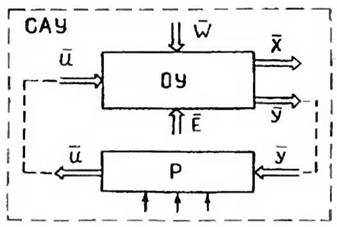


Рис.4. Газотурбинный двигатель как объект управления

Газотурбинный двигатель как объект управления формально представить в виде, изображенном на рис.1.

Здесь U - вектор регулирующих факторов, являющихся независимыми переменными для объекта управления (ОУ). Напомним, что САУ — это замкнутая система, включающая объект управления и регуляторы (Р). К регулирующим факторам относятся расход топлива Gt в основной и G-гф в форсажной камерах сгорания, площадь F^ сопла и т.д. Входными независимыми переменными также являются параметры внешней среды, задаваемые вектором , включающим в себя высоту полета Н, температуру Тн и давление Рн, влажность и другие параметры атмосферного воздуха (если они отличаются от стандартных) и скорость полета (число М) самолета, где установлен ГТД. Вектором обозначены дополнительные эксплуатационные факторы, которые отличаются от принятых за номинальные и учет которых приводит к изменению свойств ГТД как объекта регулирования. К ним относятся параметры, характеризующие состояние потока воздуха и газа на входе в двигатель (турбулентность атмосферы, влажность, число Rе и т.д.); величины отбираемых от двигателя мощности и расхода воздуха на самолетные и другие, внешние по отношению к ГТД, нужды; степень износа элементов конструкции, возможные повреждения и т.п. Обратимся теперь к выходным параметрам. Вектор Y включает в себя параметры регулирования, являющиеся входными для регулятора, такие как частота вращения роторов, давление воздуха, газа РК за компрессором, давление газа РТ за турбиной и температура ТТ газа за турбиной и т.д. Вектор X - это вектор параметров ГТД, изменение которых характеризует его эффективность и зависит от характеристик управления. К ним относятся параметры, непосредственно влияющие на летнотехнические характеристики. Определяемом, например, временем приемистости t , удельный расход топлива; запасы газодинамической устойчивости компрессоров ДКув, ДКук , уровень и время превышения («забросы») параметров пв , пк, Тт над заданными максимальными величинами, определяющие ресурс двигателя и его надежность и др.

Таким образом, математическую модель ГТД как объекта регулирования формально можно определить в виде следующих соотношений:

= ( , , , ),

Y=Y(U, W, Е, х).

Поскольку выходные параметры и являются параметрами рабочего процесса или определяются через них, рассматриваемая нами модель является моделью рабочего процесса.

Основные требования предъявляемые к математическим моделям ГТД

Поскольку математическая модель ГТД как объекта регулирования применяется для имитации процессов управления, она должна быть динамической. Последнее подразумевает возможность воспроизводить изменение параметров и на переходных режимах, т.е. изменение по времени, вызванное произвольно заданным изменением входных параметров и . Следовательно, такая модель должна описывать свойства ГТД, определяющие нестационарность рабочих процессов (инерционность вращающихся масс, нестационарность процессов в газовых и воздушных объемах и т.п.) Математически это означает, что дополнительной независимой переменной в уравнениях модели является время г, функциями от которого являются все параметры, входящие в уравнение (1.1), а в состав уравнений модели должны входить' дифференциальные уравнения с производными от параметров и по времени.

Структура математической модели ГТД как объекта управления должна обеспечить практическую возможность ее функционирования в комплексе с другими математическими моделями системы управления, элементом которой является ГТД. К таким моделям относятся модели регуляторов двигателя, модели других элементов силовой установки, движения самолета, их систем управления и т.п. В ряде случаев математическая модель ГТД как объекта управления должна работать с реальными регуляторами в качестве имитатора двигателя на специальных замкнутых стендах, называемых полунатурными и используемых для отработки реальных агрегатов систем управления двигателем или самолетом. Такая модель должна обеспечивать расчет

процессов в двигателе в натуральном масштабе времени. Вышесказанное накладывает ограничения на время и объем вычислений программы расчета для ЦВМ, реализующей рассматриваемую математическую модель.

Математическая модель может удовлетворить этим требованиям «простоты» только в том случае, если в ней учитываются только те факторы, которые обеспечивают адекватное решение поставленной задачи. Иными словами, модель не должна быть физически и математически перегружена. В этом состоит одно из важнейших требований, предъявляемых к математическим моделям сложных систем, — математическая модель создается под решаемую задачу. В рассматриваемом случае такой задачей является решение вопросов управления ГТД. Следовательно, нет необходимости учета факторов, не оказывающих практического влияния на процессы регулирования, например таких, как колебания элементов конструкций, трехмерность распределения температуры и давления в потоке газа, динамические факторы, вызывающие изменение параметров рабочего процесса с частотами более 100 Гц и т.п. Кроме этого, «простота» модели достигается и чисто математическими методами, обеспечивающими быстрое решение комплекса уравнений модели.

3. Математическая модель ГТД как объекта регулирования должна адекватно имитировать влияние переходных режимов на основные характеристики двигателя, определяющие эффективность его применения в составе силовой установки и самолета. Это свойство определяется тем обстоятельством, что динамические характеристики двигателя наряду с дроссельными и высотно-скоростньши характеристиками являются одними из важнейших, определяющими эффективность применения двигателя в составе самолета. Для перевода двигателя из одного установившегося режима на другой, с более высоким уровнем параметров, т.е. для осуществления переходного процесса, требуется подвести избыточную энергию, по сравнению с той, которая необходима для поддержания соответствующих промежуточных установившихся режимов. Избыточная мощность, расходуемая на создание ускорений роторов для преодоления инерционных сил, создается за счет повышенного (избыточного) расхода топлива и может приводить к перерегулированию, т.е. к временному превышению параметрами двигателя их значений на конечном установившемся режиме («забросу»).

В общей постановке задача расчета ГТД на неустановившихся режимах работы чрезвычайно сложна и не нашла до сих пор в теории газотурбинных двигателей исчерпывающего решения.

Одной из важнейших характеристик двигателей таких самолетов является время приемистости — время изменения тяги от ее значения на режиме малого газа до значения, близкого к значениям МАХ или Пф на режимах МАХ или ПФ при быстром переводе РУД из положения МГ в положение МАХ или ПФ. Это связано с тем, что время изменения тяги, время приемистости, определяет характеристики маневренности самолета. Так, повышение динамических характеристик двигателя, приводящее к уменьшению времени приемистости на 1...2с, приводит к повышению эффективности применения маневренного самолета примерно на 20%.

Таким образом, адекватная имитация динамических характеристик двигателя, во многом определяющих характеристики двигателя по ресурсу, по его газодинамической устойчивости, влиянию на ЛТХ самолета и др. также является одним из основных требований, предъявляемых к математической модели ГТД как объекта управления.

Результаты анализа существующих математических моделей

Большинство отечественных программ для термодинамических расчётов ГТД (такие, как программы ЦИАМ, ГРАД, АСТРА, ОГРА, DVIGwT и др.) основаны на ряде единых методических допущений, упрощающих моделирование реальных процессов, протекающих в ГТД:

- изобарная теплоёмкость рабочего тела зависит только от температуры, при этом термическая диссоциация и рекомбинация продуктов сгорания не учитывается;

рабочие тела (окислитель, продукты сгорания) подчиняются уравнению состояния идеального газа;

реальный пространственный поток в проточной части двигателя заменяется осреднённым одномерным потоком (используются среднемассовые параметры), неравномерность поля и пульсации потока не влияют на рабочий процесс;

подобие режимов сохраняется при неизменных значениях чисел М(в окружном и осевом направлении) (или X ) и Re; изменение основных параметров узлов при нарушении автомодельности по Re учитывается введением эмпирических поправок (последнее не всегда реализуется из-за отсутствия соответствующих данных);

геометрическое подобие сохраняется во всех условиях эксплуатации;

влияние двухконтурности на характеристики вентилятора, подпорных ступеней и компрессора не учитывается;

модель камеры смешения - цилиндрическая, с полным смешением потоков на срезе смесителя;

отборы (подводы) рабочего тела не оказывают влияния на характеристики компрессора и турбины;

расчёт неустановившихся режимов осуществляется с учётом только инерционности роторов;

не учитывается разность потенциальных энергий газа для любых произвольных сечений;

различные виды потерь учитываются эмпирическими коэффициентами и зависимостями (характеристиками);

при смешении охлаждающего воздуха с основным потоком газа учитывается только уравнение энергии;

не учитывается нестационарность тепловых процессов; энергообмен с внешней средой через стенки корпуса двигателя отсутствует;

при расчёте турбины учитывается работа части охлаждающего воздуха, поступающего на пленочное охлаждение первого соплового аппарата, с учётом снижения температуры и без потерь полного давления;

тепловые потери полного давления в форсажной камере определяются в предположении о постоянном сечении камеры.

Этот основной набор допущений является общепринятым для отечественных программ. Направления совершенствования современной математической модели заключаются в приближении вышеперечисленных допущений к реальным процессам [2]. Обобщённый анализ возможностей современных математических моделей выполнен по критериям области применения и решаемых задач, формам представления исходных данных, функциональности, комплексности и другим ключевым критериям.

Результат итогового анализа наиболее распространённых и функциональных, с точки зрения проведения проектных термодинамических расчётов, современных математических моделей представлен в таблице 1.

Необходимо отметить, что особенности, указанные в таблице 1, частично учтены в программах, разработанных силами отраслевых КБ для использования в рамках задач этих КБ. Это программы, разработанные и применяемые, например, в ОАО «НПО «Сатурн», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «Климов», ОАО «Кузнецов». Программы эти предназначены, как правило, для расчёта одной фиксированной схемы ГТД и наиболее полно учитывают особенности работы узлов в составе рассматриваемой схемы, методический и экспериментальный опыт КБ в данной области. В данной работе они не рассматривались ввиду отсутствия описаний и документации в открытом доступе.

Таблица 1.

Сравнительный анализ возможностей современных математических моделей для

термодинамических расчётов ГТД

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Программа | Программны  й  комплекс  ЦИАМ | ГРАД версии 16.2001, КАИ | DVIGwT,  УГАТУ | Uni MM, САТУРН | GasTurbv.11, J. Kurzke | GSP,  NLR |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Принцип  построения  схемы | Набор  готовых  схем | Модульная  декомпозиция | Модульная  декомпозиция | Набор готовых схем | Набор готовых схем | Модульная  декомпозиция |
| Область применения | Авиационные  ГТД | Авиационные ГТД, наземные ГТУ | Авиационные ГТД, ГТУ сложных схем | Авиационные  ГТД | Авиационны  е  ГТД, ГТУ | Авиационные ГТД |
| Метод  нахождения  решения | Совместное  решение  системы  нелинейных  уравнений  методом  Ньютона | Формирование  системы  уравнений  невязок,  совместное  решение  уравнений  методом  Ньютона -  Рафсона | Формирование системы невязок, совместное решение уравнений методом Ньютона | Совместное решение системы нелинейных уравнений методом Ньютона | Совместное решение системы нелинейных уравнений методом Ньютона | Совместное решение системы нелинейных уравнений методом Ньютона |
| Применяемые  топлива | Керосин,  метан | Углеводородные  произвольного  состава,  водород | Углеводородные  произвольного  состава | Углеводородны е произвольного состава | Керосин, дизельное, природный газ, водород | Углеводородные  произвольного  состава |
| Представление характеристик компрессора и турбины | Аппроксима- А ция табличных т характеристик р с возможностью перераз- п меривания н | ппроксимация А абличных ха- т актеристик с р юзможностью ереразмерива- п ия н | ппроксимация абличных ха- актеристик с озможностью ереразмерива- ия | Аппроксимация табличных характеристик с возможностью переразмерива- ния | Типовые и произвольные характристики узла с возможностью переразмери- вания | Типовые и произвольные характристик и  узла |
| Расчёт характеристик ГТД | Дроссельные, высотноскоростные с любыми программами регулирования | Дроссельные, высотоскоростные, нагрузочные с любыми программами регулирования | Дроссельные, высотоскоростные, нагрузочные с любыми программами регулирования | Дроссельные, высотоскоростные, нагрузочные с любыми программами регулирования, визуальная идентификация | Дроссельные, Д высотно- в скоростные, нагрузочные, климатические | россельные,  ысот-  носкоростные |
| Расчёт  переходных  режимов  Визуальное  формирование  проточной части,  оценка массы и  габаритных  размеров | Есть в квази- стационарной постановке Есть в виде отдельной программы | сть в квази- Е тационарной остановке Оценка массы и габаритов | сть в квази- тационарной юстановке нет | Есть в квази- стационарной постановке нет | Есть в квази- ;тационарной постановке нет | Есть в квази- стационарной постановке нет |
| Оценка  показателей  напряжённости  основных  узлов и  выработки  ресурса | нет | нет | нет | нет | нет | нет |
| Учёт  термической  диссоциации | нет | нет | нет | Есть в виде добавочной методики | нет | нет |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Учёт влияния неравномерности и нестаци- онарности потока за вентилятором | нет | Есть в виде поправок к величинам температуры и давления | Есть в виде поправок к величинам температуры и давления | Есть в виде поправок к величинам температуры и давления | есть | есть |
| Возможность  использования  разных  характеристик для внутреннего и  наружного  контуров | нет | Есть при условии разбивки вентилятора на два контура | Есть при  условии  разбивки  вентилятора  на  два контура | есть |  | есть |
| Учёт влияния еравномерности и 1естационарности ютока по тракту вигателя | нет | нет | нет | нет | нет | нет |
| Учёт влияния числа Re | Есть в виде  эмпирических  зависимостей | Есть в виде  эмпирических  зависимостей | Есть в виде  эмпирических  зависимостей | Есть в виде  эмпирических  зависимостей | есть |  |
| Расчёт много - ступенчатых охлаждаемых турбин с промежуточным охлаждением ступеней | нет | Возможен при  повенцовом  описании  ступеней  турбины | Возможен  при  повенцовом  описании  ступеней  турбины | нет | нет | нет |
| Расчёт компрессора с отбором охлаждения из промежуточных ступеней | нет | Возможен при  повенцовом  описании  ступеней  компрессора | Есть в виде учёта доли работы компрессора до каждого отбора | Есть в виде учёта доли работы компрессора до каждого отбора | есть | нет |
| асчёт коротких ецилиндриче- ;ких камер смешения | нет | Возможен при описании методики Заказчика | Возможен  при  описании  методики  Заказчика | Возможен  при  описании  методики  Заказчика | нет | нет |
| Расчёт  характеристик в составе силовой установки ЛА | нет | По дополнительным зависимостям | По дополнительным зависимостям | По дополнительным зависимостям | есть | нет |
| Вычисление дополнительных зависимостей, расширяющих функциональность модели | нет | Вычисление по дополнительны м формулам с возможностью использования в программе регулирования | есть | есть | есть | нет |
| Возможность работы с базами данных проекта | нет | Возможность импорта в формате Excel | С помощью дополнительны х программ | есть | нет | есть |
| Возможность  создания  пользовательски  х модулей,  расширяющих  возможности  программы | нет | Есть в виде  возможности  создания  оперативного  модуля | Есть при условии обращения с разработчику | Есть при условии обращения к разработчику | нет | нет |
| Возможность работы в «пакетном» режиме | есть | есть | есть | есть | нет | нет |
| Возможность создания передаточных моделей | нет | нет | нет | есть | нет | нет |
| Возможность  автоматизации  'иловых  ычислительных  шераций | нет | нет | нет | есть | нет | нет |
| Операционная  система | MS DOS | MS DOS,  MS Windows | MS Windows | MS Windows | MS Windows | MS Windows |

Современное состояние проблемы

Программы ЦИАМ [4] и КАИ [6] - наиболее известные и широко применяемые в практике работ КБ. Реализованные в них математические модели рабочих процессов ГТД авиационного применения основаны на единых теоретических положениях и допущениях, которые были сформулированы ещё в конце 1960-х гг. Фактически эти программы являются определяющими в отечественной практике термодинамических расчётов. К настоящему времени накоплен исчерпывающий опыт эксплуатации этих программ, выявлены их достоинства, особенности и недостатки. В современных условиях новые проекты ГТД разрабатываются при значительно более высоких уровнях температур и давлений, расширилась номенклатура схемных решений в связи с разработкой на базе ГТД энергетических и других установок. Также опубликованы обновлённые сведения по термодинамическим свойствам горючих и окислителей различных составов и индивидуальных веществ.

В этом заключаются основные причины, определяющие необходимость уточнения ранее принятых теоретических положений и допущений как основы для создания современной базовой математической модели рабочего процесса ГТД.

В тоже время на практике наряду с рассмотренными применяются математические модели, разработанные силами самих КБ и включающие в себя методические разработки, полученные в результате опыта расчётно-экспериментальной доводки, многие из которых являются уникальными. Такие методики необходимо объединить в рамках единой базовой математической модели. Одним из негативных следствий использования различных расчётных систем является наблюдаемое разночтение в оценке основных параметров ГТД, необходимость выполнения поверочных расчётов и согласования математических моделей. Необходимо в принципе исключить подобные нестыковки, что качественно повысит эффективность процесса проектирования. Вышесказанное не исключает возможности дальнейших модификаций и развития такой математической модели, но для совместного проектирования двигателей она должна оставаться единой.

Выводы

В настоящее время не существует математической модели, используемой всеми КБ в качестве базовой. С другой стороны, очевидно, что для группы КБ, входящих в состав отрасли как составных частей единой структуры, такая базовая модель должна существовать. Это позволит исключить затраты на проведение сравнительных расчётов по различным математическим моделям, перевод исходных данных из одной программы в другую и разночтение оценок параметров ТРДД и ТРДДФ, что наблюдается в существующей практике.

Таким образом, вновь разработанная математическая модель, учитывающая вышеуказанные особенности, должна быть своевременной и востребованной в практике термодинамических расчётов в отечественных КБ.

В перечень функций новой математической модели должны войти функции, корректирующие или выводящие на качественно новый уровень возможностей перечисленные методические и программные допущения и ограничения, а также

сформированные в виде проекта технического задания требования к современной базовой универсальной математической модели [3]. Единая для предприятий базовая математическая модель должна применяться для расчётов при совместном проектировании, выпуске технических предложений, эскизных и конкурсных проектов, что позволит устранить существующие, обусловленные методическими особенностями различия в результатах расчётов и объективно оценивать варианты предлагаемых решений.

Программная реализация единой базовой математической модели должна иметь средства адаптации к задачам, возникающим в процессе рабочего проектирования и доводки.

Необходимо обеспечить пользователям возможность включения дополнительных алгоритмов, учитывающих особенности схемных решений, характеристик узлов, систем и агрегатов регулирования, опыта конкретного КБ и влияние на процесс дополнительных факторов, выявленных при доводке.

Список литературы

Гольберг Ф. Д. Математические модели авиационных газотурбинных двигателей как объект управления /. Гольберг Ф. Д., Батенин А. В. - Москва: издательство МАИ, 1999 - 82c.

Горюнов И. М. Направления развития современных математических моделей рабочих процессов газотурбинных двигателей / Горюнов И. М., Болдырев О. И. - Уфа: УДК 621.452.32.

Тунаков А. П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. / Тунаков А. П. - М.: Машиностроение, 1979 - 184c.

Ахмедзянов Д. А. Термогазодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGw / Ахмедзянов Д. А., Горюнов И.М., Кривошеев И. А. - Уфа: УГАТУ, 2003. - 162 с.