

вышает вероятность возникновения проблем, связанных с касанием роторных и статорных деталей на некоторых режимах работы двигателя. Для исключения задевания лопаток о жёсткий корпус на внутреннюю часть корпуса обычно наносят прирабатываемое покрытие, но даже при касании об это покрытие в лопатках может возникнуть высокий уровень вибрационных напряжений с возможным последующим усталостным разрушением.

Для решения проблемы предотвращения разрушений лопаток ГТД от многоциклового усталости при касании был выполнен анализ экспериментальных данных, полученных в процессе проведения специальных стендовых испытаний компрессоров. Испытания проводились при атмосферных условиях на стационарных режимах работы компрессоров. Влияние нестационарных тепловых режимов работы на изменение радиальных зазоров в настоящей работе не рассматривается, а предполагается, что они могут быть определены расчётными методами.

Проведённый анализ результатов исследований показал, что колебания рабочих лопаток при их касании о прирабатываемое покрытие имеют много общего с вынужденными колебаниями от входной окружной неравномерности потока. В результате спектрального анализа сигналов с тензометров установлено, что спектральные составляющие с максимальными амплитудными значениями имеют частоты, кратные частоте вращения ротора компрессора. Обработка сигнала во временной области позволила выявить существенные отличия в характере колебаний. При резонансных колебаниях лопаток от окружной неравномерности потока

сигнал с тензодатчика на лопатке имеет синусоидальную форму с постоянной амплитудой, а при касании лопаток форма сигнала обычно имеет вид затухающей синусоиды на интервале от одного момента касания до следующего касания.

Проведённое исследование показало, что в определённых случаях отдельные лопатки испытывают сильное вибрационное возбуждение при их касании о прирабатываемое покрытие. С течением времени амплитуда вибрационных напряжений может возрастать. Данное увеличение уровня вибрационных напряжений обусловлено тем, что при постоянной частоте вращения периодическое воздействие на лопатку от её касания о покрытие синфазно с колебательным движением самой лопатки, что, в конечном счёте, и обеспечивает постоянное увеличение амплитуды колебаний после каждого оборота ротора. Очевидно, что приведённый случай демонстрирует опасность касания лопаток о прирабатываемое покрытие, так как за очень короткий промежуток времени уровень вибрационных напряжений может достигнуть пределов усталости, что приведёт к поломке лопатки.

В результате проведённых исследований механизмов возникновения колебаний лопаток выявлены диагностические признаки касания лопаток о прирабатываемое покрытие при испытаниях компрессоров. Для предотвращения разрушений лопаток ГТД предложены рекомендации по обеспечению вибрационной прочности лопаток при их касании о прирабатываемое покрытие в процессе проведения стендовых испытаний.

УДК 621.431

ОПЫТ "ОКБ ИМ. А. ЛЮЛЬКИ" ПО РАЗРАБОТКЕ СОВРЕМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАНЕВРЕННОЙ АВИАЦИИ

©2016 Е.Ю. Марчуков, И.Н. Егоров

Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки (филиал ОАО «УМПО»), г. Москва

THE EXPERIENCE OF "LYULKA DESIGN BUREAU" ON THE DEVELOPMENT OF MODERN MANEUVERABLE AIRCRAFT ENGINES

Marchukov E.Yu., Egorov I.N. (Lyulka Design Bureau, Moscow, Russian Federation)

The present level of engine development includes the active use of modern computing technologies that are in varying degrees integrated into the technological process of modern GTE creation. The central role in the development the engine of 5-th generation is the problem of his appearance form. In this traditional approach, propulsion design

Bureau for the development of GTE proposes a kind of table – a set of regimes that are not entirely consistent with the modern approach of modern engine forming. It is advisable to carry out a study of the motor as an element of a higher level (the principle of hierarchy of the analysis object). This allows providing the maximum achievable efficiency of the object as a whole, seeing it as one of the elements of this unified system of LA. At the present stage of designing engines the necessary key is the integrated use of concepts, included into a single whole of system analysis techniques, multidimensional optimization and the principle of hierarchy of object modeling. The basic idea of this approach is the virtual cyclic support to the development and refinement of modern engine, which is to clarify the project as the implementation of its elements on the basis of additional (clarifying) information about the individual elements and systems of the engine.

Современный уровень разработки двигателей включает активное использование современных вычислительных технологий, которые в той или иной степени интегрируются в технологический процесс создания современных газотурбинных двигателей (ГТД). Центральное место при создании двигателя 5-го поколения занимает проблема формирования его облика. При этом традиционный подход, когда двигателю ОКБ для разработки ГТД предлагается некая таблица – совокупность режимов, не совсем соответствует современному подходу по формированию облика двигателя. Целесообразно осуществлять исследование двигателя как элемента системы более высокого уровня (принцип иерархичности анализа объекта). Это позволяет обеспечить предельно достижимую эффективность объекта в целом, рассматривая его как один из элементов этой единой системы - ЛА. На современном этапе создания двигателей ключевым и необходимым является комплексное использование концепции, интегрирующей в единое целое технологии системного анализа, многомерной оптимизации и принципа иерархичности моделирования объекта.

Основная идея данного подхода заключается в виртуальном циклическом сопровождении процесса разработки и доводки современного двигателя, которое состоит в уточнении проекта по мере реализации его элементов на базе получения дополнительной (уточняющей) информации об отдельных элементах и системах двигателя. При этом на каждом этапе уточнения необходимо осуществлять жёсткий контроль соответствия показателей эффективности двигателя требованиям ТЗ, а также подтверждение основных возможностей его функционирования в системе более высокого уровня – в системе ЛА. Такое виртуальное управление и сопровождение разработкой перспективного двигателя возможно только при использовании совокупности современных технологий вычисли-

тельного инструментария, которые позволяют осуществлять моделирование как на разных уровнях сложности (1D, 2D и 3D модели), так и улучшать адекватность моделирования двигателя по мере получения дополнительных знаний об объекте и его элементах путём решения задачи идентификации математических моделей (в том числе и в векторной постановке).

Ключевое место при реализации технологии виртуального моделирования двигателя занимает, во-первых, возможность использования различного уровня сложности моделирования объекта. Во-вторых, чрезвычайно важным для практики являются требования по обеспечению необходимого уровня адекватности моделирования как отдельных элементов, так и в целом двигателя. Отсутствие одной из этих двух составляющих может привести к снижению значимости прилагаемых усилий при разработке двигателя, а также значительно повышает технический риск реализации проекта.

Необходимость использования различных уровней моделирования элементов двигателя диктуется требованием обеспечения баланса между достигаемой эффективностью показателей двигателя и сжатыми сроками достижения результата – разработкой перспективного ГТД.

Другим ключевым моментом является адекватность моделирования процессов. При неудовлетворительном уровне данного показателя вообще теряется смысл использования вычислительного инструментария при разработке перспективных двигателей. В этом случае оказывается также неэффективным и использование современных технологий оптимизации, т.к. эти средства поиска путей повышения эффективности объектов являются лишь абстрактным инструментарием, который фактически может достоверно определять предельно достижимые показатели двигателя лишь при достаточно адекватном описании объекта.

Представляется целесообразным использование вычислительных технологий только для тех элементов двигателя, которые могут быть достаточно адекватно описаны с помощью математического моделирования. К примеру, известен факт, что достаточно сложным является адекватное математическое моделирование камеры сгорания двигателя. Поэтому представляется целесообразным осуществлять анализ эффективности данного элемента с помощью экспериментальных исследований, интегрированных в общую процедуру разработки двигателя. В данном случае реализуется концепция гибридной структуры моделирования объекта (интеграция расчётных и экспериментальных исследований в единый цикл анализа объекта). Это позволяет обеспечить как высокий уровень анализа элементов двигателя (вплоть до 3D моделей), так и обеспечить адекватность анализа показателей эффективности двигателя в целом. Результатом такого подхода является реализация системного подхода для анализа, оптимизации и иерархичности моделирования двигателя в условиях, когда отсутствуют вычислительные технологии, которые адекватно могут описывать один из элементов двигателя (в данном случае камеру сгорания).

Следующим ключевым инструментом является концепция многоуровневого моделирования двигателя - по сути это интегрированная цепочка анализа объекта в виде 1D -> 2D -> 3D -> эксперимент. Это может существенно расширить возможности поиска и достижения предельно допустимой эффективности перспективных двигателей. Как показал практический опыт, данный подход позволяет сократить время, потребное для исследований на 4 и более порядков. В дополнение к данным возможностям применение современных технологий оптимизации и интеграция их с процессом разработки и доводки перспективных двигателей позволяет существенно расширить инструментальные возможности для постановки и решения важных практических проблем. В частности, разработанная технология параллельной оптимизации двигателя и его элементов на базе технологии IOSO, интегрированная с возможностями параллелизации вычисли-

тельных технологий анализа двигателя, позволяет ставить и решать на практике беспрецедентно сложные задачи, некоторые из которых не имеют аналогов в мире. Например, такой двойной уровень параллелизации (как вычислительных технологий анализа, так и процесса оптимизации) позволяет сегодня в течении 10-15 дней решать задачи оптимального проектирования многоступенчатых компрессоров в трёхмерной постановке. Эти кординально расширяет возможности виртуального моделирования двигателя в технологическом цикле разработки и доводки объекта. Данный компонент, пожалуй, является ключевым вычислительным инструментом, который позволяет достичь предельно достижимую эффективность двигателя последующих поколений.

Дальнейшее развитие данных подходов может быть достигнуто путём использования возможностей многоуровневого и смешанного (расчётные и экспериментальные исследования) моделирования, а также использования концепции суррогатного моделирования объекта. Фактически это позволяет обеспечить качественно новые возможности анализа двигателя и достичь значимые дополнительные резервы при использовании возможностей системного анализа, оптимизации и степени иерархичности моделирования ГТД. В частности, как показала практика предприятия, сегодня имеется реальная возможность анализа двигателя как элемента системы «ЛА + СУ + Лётчик + Функционирование объекта». Виртуальное моделирование такой системы наиболее объективно отражает достоверность предельно достижимых возможностей двигателя и обеспечивает его наилучшую интеграцию с ЛА.

Таким образом, реализация концепции виртуального стенда для разработки и доводки перспективных двигателей предоставляет новые возможности: во-первых, формализовать непосредственно процесс разработки объекта путём использования вычислительного инструментария высокого уровня в рамках единой информационной вычислительной среды, обеспечивающей виртуализацию процесса системного анализа, многомерной оптимизации и иерархич-

ности моделирования с использованием современных верифицированных численных технологий. Во-вторых, существенно упрощается и формализуется процедура мониторинга и оперативного управления технологическим циклом разработки и доводки современного двигателя. В-третьих, это позволяет оперативно получить ясное и достоверное понимание имеющихся проблемных вопросов в текущий момент времени разработки двигателя, наличия узких мест на всех этапах разработки и доводки объекта в реальном масштабе времени. В-четвертых, имеется возможность интенсифицировать и повысить продуктивность самого процесса разработки двигателя путём конвейерного распараллеливания работы отдельных подразделений ОКБ с одной стороны, а с другой - обеспечить жёсткую централизацию и интеграцию текущих результатов разработки двигателя по отдельным элементам в едином информационном пространстве. В дополнение к этому, использование современных концепций мультимедиа, компьютерных технологий наглядного отображения информации в реальном масштабе времени, включение элементов структуры виртуального ситуационного прогноза разработки двигателя в технологическом цикле и использование режимов автоматизированной «виртуальной подсказки» совокупности возможных альтернативных оптимальных технических решений в текущий момент разработки двигателя, может существенно изменить вообще стиль технологического процесса разработки и доводки современных двигателей в ОКБ. В конечном счёте, это позволит значительно уменьшить сроки и стоимость разработки двигателя, а также снизить технический риск разработки объекта, одновременно повысив его качество.

Важным компонентом виртуального стенда для разработки и доводки современных двигателей является высокоэффективная технология оптимизации. В настоящее время в «ОКБ им. А.Люльки» качестве такого инструментария широко используется известная технология оптимизации IOSO. Выбор основан на многолетнем опыте прак-

тического применения данной технологии оптимизации для разработки и доводки отечественных современных двигателей. В настоящее время данная технология нашла широкое применение в отечественном двигателестроении, в частности на таких предприятиях как ОКБ им. «А. Люльки», НПО «Сатурн», АО «Авиадвигатель», ПАО «Кузнецов», ОАО «Климов», ЛМЗ и др., а также в SNECMA, RR, PW, Siemens и др.

Таким образом, для достижения гарантированного успеха при разработке и доводки двигателей пятого и последующих поколений является виртуализация технологического цикла создания данного наукоёмкого и высокоинтеллектуального объекта. Ключевыми компонентами виртуального стенда для разработки и доводки перспективных двигателей являются:

- современные технологии вычислительного анализа, позволяющие с высокой степенью адекватности описывать физические процессы, отражающие работу и функционирование объекта;

- современные средства поиска предельно достижимой эффективности объекта путём его многомерной многокритериальной оптимизации;

- вычислительный инструментарий с процедурами, реализующими многоуровневый принцип параллелизма - как процесса моделирования двигателя, так и процедуры его оптимизации, интегрированной с концепцией многоуровневого моделирования ГТД и его элементов.

Библиографический список

1. Martchukov E.Yu. Webster, P.F. Design of a 4 ½ stage turbine with a stage loading factor of 4.66 and high specific work output, NASA CR-2659. – Washington, 1976. 138 p.

2. Egorov I.N., Kretinin G.V., Leshchenko I.A., Kuptzov S.V. Use of the IOSO NM Software for Complex Optimization Problems. 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Portsmouth, Virginia, USA, 6-8 September, 2006. Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Miami, Florida, USA, 16-18 April, 2007.