

Применение технологий корпорации MSC.Software при проектировании современных газотурбинных двигателей и энергосиловых установок

Корпорация MSC.Software, с 1963 года работающая в области создания компьютерных технологий инженерного анализа, предлагает широкий спектр интегрированных VPD-систем – компьютерных технологий инженерного анализа и виртуального моделирования. Технологии VPD представляют собой наиболее современный и качественно новый уровень систем инженерного анализа (CAE – Computer Aided Engineering) и предназначены для повышения качества и надежности при значительном сокращении сроков проектирования и производства, а также существенном снижении числа опытных образцов и натурных испытаний. В данной статье описываются некоторые возможности программного продукта корпорации MSC.Software – системы конечноэлементного моделирования и анализа MD Nastran для решения инженерных задач в отраслях, связанных с проектированием и разработкой газотурбинных двигателей и энергосиловых установок (ГТД и ЭУ).

MD Nastran (от MultiDiscipline – многодисциплинарный) комбинирует лучшие в своем классе системы инженерного анализа – MSC Nastran, Marc, Dytran, LS-Dyna в одну полностью интегрированную суперсистему для проведения многодисциплинарного моделирования в масштабах предприятия.

В настоящее время MD Nastran обеспечивает возможности моделирования и анализа линейной и нелинейной статики, сложных контактных взаимодействий, собственных частот и форм колебаний, потери устойчивости в линейной и нелинейной постановках, частотного отклика, отклика на случайное воздействие, спектрального анализа, линейных и нелинейных переходных процессов, процессов теплопередачи (линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных). Кроме того, MD Nastran решает задачи аэроупругости на дозвуковых и сверхзвуковых скоростях, внешней и внутренней виброакустики, роторной динамики, ползучести, анализа разрушения конструкции, быстропотекающих высоконелинейных динамических процессов, в том числе взрывного и ударного характера с использованием Лагранжевых и Эйлеровых элементов.

В MD Nastran можно комбинировать различные виды анализа, частично или полностью передавать нагрузки с предыдущих этапов расчета и использовать их в качестве граничных условий в последующих видах анализа.

Интегрируемость и многодисциплинарность стала необходимым условием в области инженерного анализа ГТД и ЭУ и решения задач роторной динамики, ведь, как известно, высоконагруженные узлы и детали современных ГТД и ЭУ работают при одновременном воздействии температурных, силовых и кинематических нагрузок.

Необходимость постоянного повышения эксплуатационных характеристик, повышения КПД при снижении массы конструкции предъявляет высочайшие требования к проведению инженерных расчетов на всех этапах разработки данного вида изделий. При моделировании каких-либо режимов работы ГТД желательно учитывать максимальное количество внешних и внутренних факторов, влияющих на работу изделия, причем на единой расчетной модели.

Например, моделирование работы высокоскоростной турбомашины без учета распределения температурного поля по узлам статора и ротора и изменения условий контакта между отдельными деталями может привести к некорректным результатам, особенно когда речь идет о сборных конструкциях роторов. С такой проблемой сталкиваются разработчики не только авиационных ГТД, но и высокоскоростных или малых турбомашин – турбодетандеров, турбокомпрессоров, турбогенераторов, высокочастотных бесконтактных электродвигателей. Так, температурный перепад между холодной и горячей частями высокоскоростного турбокомпрессора (частота вращения ротора 100-150 тыс. об./мин) криогенной воздушной турбохолодильной машины может изменяться от 0 до 250°C при продольных размерах ротора 150-200 мм. При этом конструктору необходимо максимально уменьшить зазоры между рабочими колесами и статором в проточных частях изделия, рассчитать необходимый момент затяжки деталей ротора из условия нераскрытия контакта между сопрягаемыми деталями. Если добавить сюда еще необходимость учета нестационарного перехода ротора через критические числа оборотов, скачков давления в воздушном контуре, задача обеспечения эффективной безаварийной работы изделия при приемлемом КПД становится трудноразрешимой.

Анализ быстропотекающих процессов ударного характера (попадание птицы, заклинивание ротора, обрыв лопатки ГТД) должен вестись с учетом преднагруженного состояния элементов конструкции, что особенно актуаль-

но для газотурбинных двигателей с высокой степенью двухконтурности. Тяжелые широкохордные лопатки компрессора, используемые в ступенях низкого давления двигателей нового поколения с большой степенью двухконтурности, усложняют моделирование высоконелинейного процесса обрыва лопатки компрессора, так как их преднагруженное напряженно-деформированное состояние уже само по себе подразумевает высокую степень нелинейности. Зачастую бывает также сложно без специальных алгоритмов передачи данных адекватно передать динамические и силовые факторы, возникающие при обрыве лопатки или кратковременном заклинивании ротора ГТД, на конечно-элементную модель меньшей размерности для анализа роторной динамики неявными методами на более длительном временном интервале. Динамический анализ современного авиационного ГТД должен учитывать податливость корпусных деталей статора, изменение жесткости и демпфирующих характеристик опор, которое, в свою очередь, может быть связано с изменением температуры или давления в масляном демпфере. Кроме всего прочего на динамические характеристики роторной группы оказывают сильное воздействие нагрузки, возникающие при маневрировании летательного аппарата.

Поэтому для решения подобных задач в комплексной постановке нужны более продвинутые специальные системы компьютерного моделирования, пригодные для проведения многодисциплинарных расчетов, охватывающих различную физическую природу исследуемых явлений и использующих различные математические модели для описания работы таких сложных высокоэнергетических объектов, каким является газотурбинный двигатель.

Очень часто инженерные расчеты ограничиваются решением отдельных, не связанных между собой задач. При расчете отдельных элементов ГТД и ЭУ можно обойтись прочностным анализом в линейной и нелинейной постановках, расчетом собственных частот, определением критических чисел оборотов, определением поля температур, расчетом нестационарного теплообмена и т.п. Но такой локальный подход неприемлем для моделирования совместной работы узлов и агрегатов в составе ГТД и ЭУ.

MD Nastran – это инструмент инженерного анализа нового поколения для компаний, перед которыми стоит задача системного подхода к моделированию. Это особенно важно для производителей авиационной техники, которым необходимо иметь достоверные полноразмерные КЭ модели планера самолета, двигателей установок и т.п.

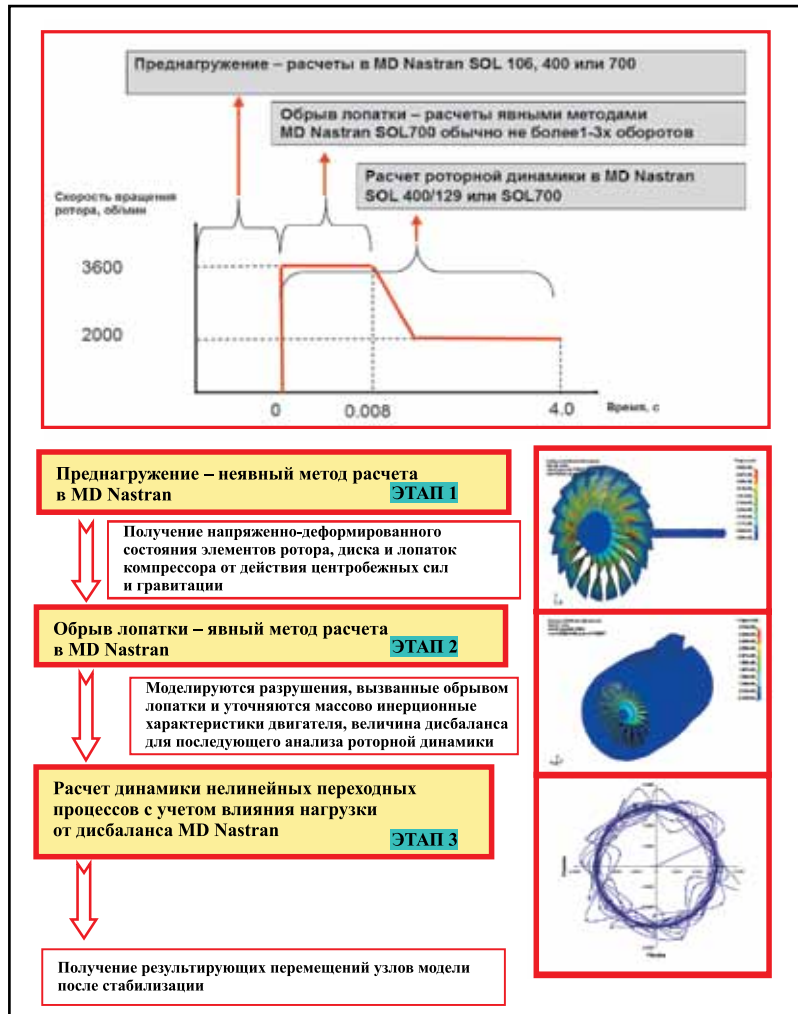


Рис. 1. Многодисциплинарный интегрированный подход, реализованный в MD Nastran для решения задачи в комплексной постановке: Преднапряжение + Обрыв лопатки (попадание птицы) + Роторная динамика

Использование явных и неявных методов расчета в MD Nastran или стандартных последовательностей решения динамической задачи (SOL 700 – задачи ударного взаимодействия, SOL 400 – линейные и нелинейные переходные процессы + роторная динамика) существенно облегчает решение множества задач и выводит технологии виртуального моделирования на качественно новый уровень представления таких явлений, как, например, обрыв лопатки одной из ступеней компрессора воздушно-реактивного двигателя, попадание птицы в двигатель и т.д.

При исследовании процесса обрыва лопатки (Fan Blade Out Simulation, FBO) с использованием MD Nastran реализуется последовательность расчета, представленная на рис. 1. Нагрузки и напряженно-деформированное состояние элементов конструкции, полученные с предыдущих этапов, автоматически учитываются при проведении каждого следующего этапа расчета. Неоспоримым преимуществом такого сквозного типа анализа является и то, что компании, проектирующие двигатели, и те, которые занимаются разработкой планера, имеют доступ к единой расчетной модели. В данном комплексном исследовании может участвовать не одна, а две и более организации. Например, первые два этапа могли бы быть проведены

изготовителем авиационного двигателя, а третий – самолетостроительной компанией. Применение такого подхода существенно повысит точность расчета, сократит время и стоимость моделирования двигательной установки и смежных конструкций крыла в целом, а также обеспечит надежную защиту конфиденциальной информации предприятий, занимающихся разработкой авиационной техники.

Еще одной особенностью MD Nastran является возможность использования метода суперэлементов, что значительно ускоряет время расчета при работе с большими моделями (от сотен тысяч до нескольких миллионов степеней свободы). Данный метод был с успехом применен специалистами НТЦ “Сатурн” им. А. Льюльки для определения критических частот вращения связанной системы роторов полноразмерной модели авиационного ГТД на примере изделия 117С, представляющего собой глубокую тягово-ресурсную модернизацию двигателя АЛ-31ФП, предназначенного для нового многофункционального истребителя СУ-35 поколения 4++ (рис. 2).

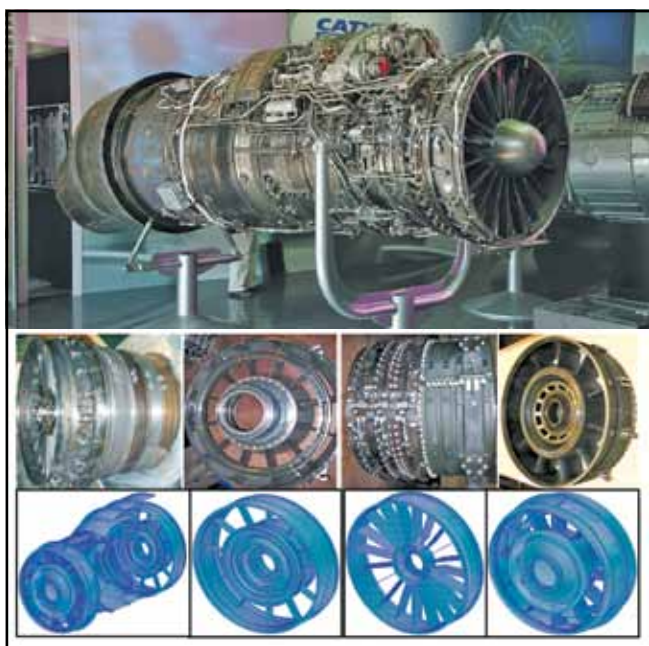


Рис. 2. Газотурбинный двигатель АЛ-31ФП НПО “Сатурн”

Роторы, или валы, являются главными элементами газотурбинных установок, в том числе авиационных ГТД. Расчет критических частот вращения роторов является одной из основных задач при проектировании двигателей. В рассматриваемом примере был проведен динамический анализ с целью определения критических

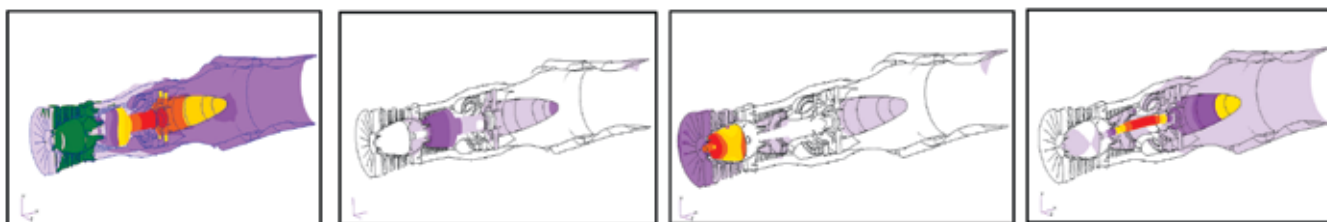


Рис. 4. Формы колебаний связанной системы роторов, соответствующие первой, второй, третьей и четвертой критической скорости вращения (слева-направо)

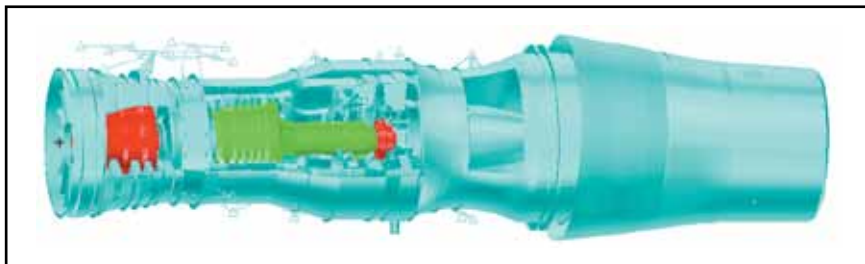


Рис. 3. Конечноэлементная полноразмерная модель ГТД для проведения динамического анализа и расчета нелинейных переходных процессов

частот вращения связанной системы роторов в составе двигательной установки. Предварительно была создана полноразмерная конечноэлементная модель ротора высокого давления, ротора низкого давления, а также полностью смоделированы все основные силовые элементы статора.

Созданная конечноэлементная модель (рис.3) была оптимизирована по массе – расхождение с чертежной массой двигателя не превышало 1%. По жесткости опор полученные величины сходились с экспериментальными исследованиями, проведенными на изделии-прототипе. Расположение центра масс расчетной модели соответствовало чертежным допускам.

Динамическая модель двигателя состояла более чем из 500 000 объемных конечных элементов и включала более трех миллионов степеней свободы. При расчете учитывались такие особенности, как присутствие гироскопических сил и моментов, изменяемая жесткость опор, демпфирование, а также скольжение роторов при работе двухвальной роторной системы. Немаловажно и то, что модель включала в себя подробно смоделированную статорную часть, присутствие которой неизбежно влияет на податливость опор и как следствие изменяет значения критических скоростей. Результаты расчета представлены на рис. 4.

Время расчета критических частот каждого из роторов (с учетом использования суперэлементов) составило менее 20 минут. Расчет был проведен на обычной рабочей станции с процессором AMD 64 и 4 Гб оперативной памяти. Здесь следует отметить, что расчет без использования метода суперэлементов на модели меньшей размерности (менее 500 000 элементов) проводился с использованием значительно более мощных вычислительных ресурсов (процессор AMD Opteron 64 и 8 Гб оперативной памяти) и занял более трех суток.

Поэтому использование метода суперэлементов в MD Nastran не только существенно (в десятки и сотни раз) сокращает время расчета, но и освобождает предприятия от необходимости приобретения дорогих вычислительных систем для решения инженерных задач

большой размерности. Кроме того, применение суперэлементов позволяет реализовать гибкость расчетной КЭ модели – изменение любого элемента конструкции возможно в рамках уже существующей модели. Такая подробная трехмерная конечно-элементная модель пригодна, в том числе, и для проведения расчетов на птицестойкость, обрыв лопатки, заклинивание ротора и для моделирования потери несущей способности опор. Моделирование высоконелинейных быстропротекающих процессов явными методами расчета в таких программных комплексах, как MSC Dytran, MD Nastran, LS-Dyna, требует создания подробных конечноэлементных моделей большой размерности.

К сожалению, до сих пор многие предприятия и компании используют слишком упрощенный подход к динамическому анализу ГТД и ЭУ, используя на начальных стадиях проектирования аналитические методы или, в лучшем случае, программные комплексы, основанные на методе начальных параметров. Такой подход применим для расчета жестких монолитных роторов, но для получения достоверных результатов при расчете сложных конструкций, какой является газотурбинная силовая установка, он непригоден. Современный авиационный ГТД является сложной многовальной конструкцией, обладающей развитой несимметричной статорной частью, несущей множество навесных элементов и снабженной механизацией, поэтому моделирование с использованием аналитических методов расчета либо методом начальных параметров допустимо лишь на начальных этапах эскизного проектирования для весьма ограниченного круга инженерных задач.

Аналитические методы, как и программные комплексы, основанные на методах начальных параметров, не позволяют точно моделировать статорные части конструкции, в особенности авиационных ГТД. Как следствие, недостатком таких методов является невозможность оценки взаимного влияния колеблющихся роторов на статор, так как модели статора непосредственно в расчете не участвуют, либо же они смоделированы достаточно условно (осесимметричные тела вращения). Существует возможность уточнить такие модели посредством эксперимента, но это возможно только на этапе доводки ГТД.

При использовании программного комплекса MD Nastran, основанного на методе конечных элементов, необходимость в дополнительных экспериментах и расчетах отпадает. Более того, работая с 3D-моделями в MD Nastran, инженер имеет возможность сразу получить и нагрузки в модели, и напряженно-деформированное состояние конструкции (рис. 5).

Другим несомненным достоинством программных продуктов компании MSC.Software является возможность решения сверхбольших задач (несколько миллионов степеней свободы и более) за достаточно короткий период времени. Это особенно актуально как для разработчиков авиационных двигателей и энергосиловых установок, так и для предприятий космической, судостроительной, автомобильной, нефтегазовой промышленности, а также отрасли гражданского строительства. В современной конкурент-



Рис. 5. Современный подход к анализу динамики ГТД и ЭУ

ной среде разработчиков и производителей время расчета и проектирования изделия давно уже стало ключевым фактором успеха наряду со снижением финансовых затрат и рисков.

Программные комплексы компании MSC – MD Nastran, Marc, Dytran специально оптимизируются для обеспечения возможности решения таких задач, для чего в них внедрены мощные алгоритмы параллелизации SMP и DMP, а также совершенно новый алгоритм MDACMS – Matrix Domain Automated Component Modal Synthesis. Все эти методы ориентированы на использование многопроцессорных вычислительных систем (кластеров). Использование кластерных технологий в сочетании со специальными версиями программ-решателей дает возможность предприятиям, располагающим широкодоступной вычислительной техникой, задействовать в своем проектном процессе вычислительные мощности, которые еще совсем недавно могли обеспечить только сверхдорогие суперкомпьютеры.

Для исследования возможностей программных продуктов MSC.Software по решению задач большой размерности специалистами московского офиса компании был проведен ряд тестов производительности различных последовательностей решений в MD Nastran на базе аппаратной платформы компании DEPO Computers.

Одним из таких тестов для оценки производительности кластера и эффективности использования MD Nastran стал комплексный расчет на птицестойкость компрессора первой ступени газотурбинного двигателя.

Анализ обрыва лопатки или попадания постороннего объекта (птицы) в двигатель – это задачи, которые характеризуются высокой нелинейностью поведения конструкции (вследствие сопутствующих разрушений и больших пластических деформаций), коротким временем воздействия с большой интенсивностью нагружения (процессы ударного характера).

MD Nastran используют для расчетов ГТД на птицестойкость такие ведущие мировые двигателестроительные фирмы, как Boeing, General Electric, MTU, Pratt&Whitney, Snecma, Rolls-Royce, Embraer, Honeywell, располагающие очень подробными конечноэлементными моделями – от нескольких сотен тысяч степеней свободы до нескольких миллионов. Шаг интегрирова-

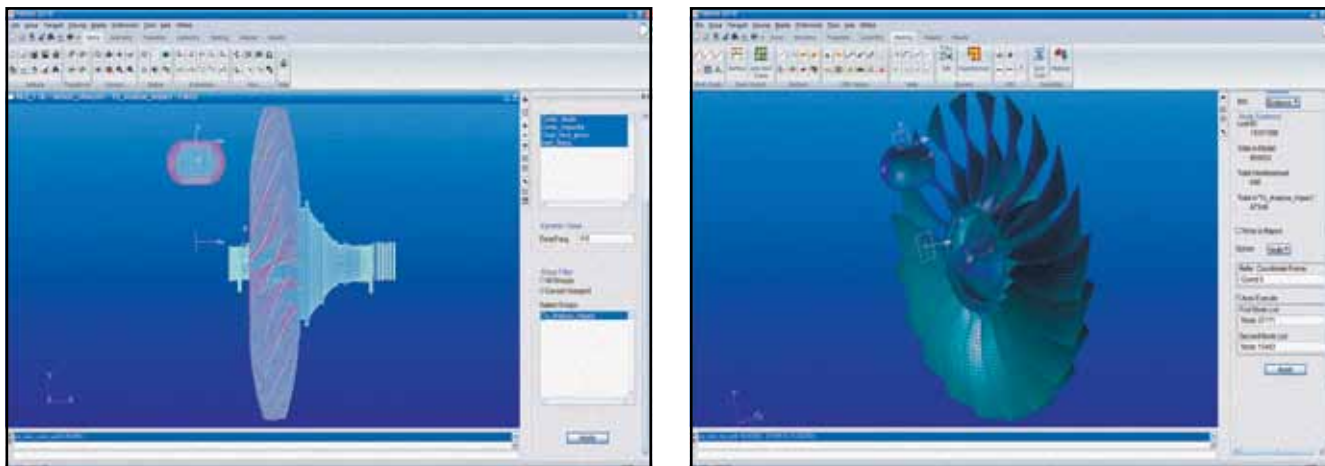


Рис. 6. Конечноэлементная модель компрессора ГТД для расчета на птицестойкость

ния по времени при решении подобных задач обычно меняется в диапазоне от 1×10^{-7} до 1×10^{-10} сек. Из всего этого неизбежно вытекает проблема времени счета для больших моделей, и, как правило, такие расчеты требуют значительного объема памяти и вычислительных ресурсов. Кроме того, комплексная задача моделирования обрыва лопатки, подразумевает еще и получение результирующих перемещений узлов модели (третий этап расчета – решение задачи роторной динамики, рис. 1). Получение динамических характеристик роторов на третьем этапе (после прекращения внешнего воздействия) требует исследования работы двигательной установки на достаточно длительном отрезке времени. Такой интегрированный сквозной инженерный расчет без использования высокопроизводительных кластерных решений может занимать несколько суток рабочего времени и более.

В тестовой задаче моделировалось явление столкновения прямолинейно летящего объекта (птицы) с элементами конструкции компрессора первой ступени авиационного ГТД при учете преднагруженного состояния лопаток компрессора (на рис. 1 это первый и второй

этапы расчета). Подробная конечноэлементная модель (рис. 6) была построена с использованием объемных конечных элементов в пре-постпроцессоре Patran и насчитывала более 275 000 степеней свободы. Материал ротора и лопаток – титановый сплав. Масса объекта (птицы) – 1,6 кг. Скорость вращения ротора – 4000 об./мин, линейная скорость сближения объекта (птицы) с лопатками компрессора составила 360 км/ч. Был проведен анализ динамики переходного процесса в MD Nastran SOL700 в диапазоне 0 – 0,01 сек. За это время ротор ГТД успел совершить около 0,65 оборота. Расчет проводился на вычислительном кластере DEPO Cluster MSC.

Результаты тестирования показали, что MD Nastran позволяет эффективно решать задачи с использованием параллелизации как по ядрам ЦПУ, так и по узлам кластерной системы. Так, использование восьми узлов кластера позволило снизить время расчета практически в 5 раз: с 4 часов 13 минут (один узел кластера) до 53 минут (восемь узлов кластера).

Результаты решения поставленной задачи представлены на рис. 7 и 8.

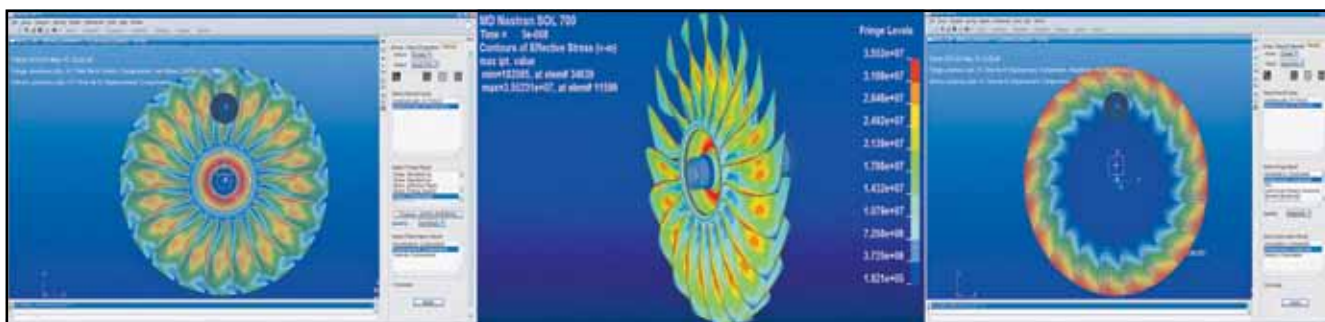


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние лопаток и диска компрессора (первый этап расчета – преднагружение)



Рис. 8. Напряженно-деформированное состояние и изолинии внутреннего давления (справа) элементов компрессора (второй этап расчета – столкновение с птицей), $t=0,001-0,060$ сек

В заключение нельзя не упомянуть еще об одном несомненном достоинстве MD Nastran при моделировании и расчете современных ГТД и ЭУ. Этот программный комплекс предоставляет пользователю практически неограниченные возможности для моделирования опор газотурбинных двигателей и энергосиловых установок. В MD Nastran можно моделировать не только стандартные упруго-демпферные опоры, но и подшипники любой конфигурации и типа, включая гидродинамические, гидростатические, газостатические и газодинамические подшипники лепесткового типа.

Эти возможности обеспечиваются не только широким набором стандартных упруго- и вязкодемпфирующих элементов, но и внедренной в MD Nastran SCA-технологии (Service Component Architecture), позволяющей пользователю напрямую общаться с программой-решателем с помощью сервисов или служб. SCA обеспечивает унифицированный независимый от платформы, ОС и языка программирования способ внедрения пользовательских подпрограмм. Более того, SCA-интерфейс позволяет инженеру, производящему различные виды анализа, непосредственно «вмешиваться» в процесс численного решения задачи без знания каких-либо языков программирования. Можно напрямую, в текстовом виде, создавать математические функции или формулы, описывающие физико-механические свойства того или иного элемента конструкции, и основная программа-решатель MD Nastran будет автоматически использовать эти пользовательские функции во время решения динамической задачи, например для вычисления жесткости или силы в упруго-демпферной опоре на каждом шаге интегрирования по времени.

Таким образом, можно учесть дополнительные внутренние или внешние факторы, возникающие при работе изделия, и тем самым существенно повысить качество проводимых расчетов. На рынке CAE-продуктов на сегодняшний день SCA-технология внедрена только в программные продукты компании MSC.Software. Французская двигателестроительная корпорация Snecma успешно использует SCA-

интерфейс в MD Nastran при моделировании опор ГТД. В частности, SCA-технология была использована при моделировании упруго-демпферных опор типа «белые колесо». Опоры такого типа – достаточно сложные с точки зрения инженерных расчетов устройства: вязкоупругие характеристики масляных демпферов на различных режимах работы двигателя могут зависеть не только от геометрии устройства, вязкости и давления масла, но и от множества других факторов, которые не учитываются современными конечноэлементными системами моделирования и анализа.

Ведущие корпорации, фирмы аэрокосмической отрасли, а также университеты, такие как NASA, Boeing, General Electric, MTU, Pratt&Whitney, Snecma, Rolls-Royce, Embraer, Honeywell, University of Virginia, специально для нужд двигателестроительной индустрии создали совместный проект – Rotordynamics Consortium, целью которого является объединение усилий по изучению проблем в области расчета ГТД и ЭУ. Эти компании активно сотрудничают со специалистами MSC.Software по данной теме. Результатом такого сотрудничества стало появление расчетного модуля Rotordynamics в MSC Nastran, новых типов конечных элементов для проведения динамического анализа. В MD Nastran постоянно внедряются новые алгоритмы и технологии, обеспечивающие решение последовательных связанных прочностных, контактных, тепловых задач, задач ударного взаимодействия и роторной динамики. Такие сложные комплексные расчеты в настоящее время необходимы на всех этапах проектирования и доводки ГТД и ЭУ. Ведущие российские предприятия – ФГУП «ММПП «Салют», НТЦ им. А. Люльки ОАО НПО «Сатурн», ОАО «Криогенмаш», ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова» на протяжении многих лет также используют программные продукты MSC.Software для решения проблем, связанных с расчетом газотурбинных силовых установок.

**Валерий Ширококов, технический эксперт,
компания MSC.Software**



AHConferences
www.ahconferences.com

ЗОЛОТОЙ
СПОНСОР:

CITRIX



СЕРЕБРЯНЫЕ
СПОНСОРЫ:

EMC²
where information lives

KASPERSKY

17 ноября 2010 г.,
Москва, отель
«Марriott Тверская»

Конференция призвана объединить экспертов отрасли для обсуждения тенденций информатизации, презентации инновационных IT-решений и успешных IT-проектов. В мероприятии примут участие руководители, директора по IT и телекоммуникациям предприятий ТЭК, представители компаний разработчиков и интеграторов IT-решений.

**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ И РЕГИСТРАЦИЯ
НА МЕРОПРИЯТИЕ:** Тел./факс: +7 (495) 790-7815
e-mail: it@ahconferences.com • www.ahconferences.com

При информационной поддержке:

**Rational Enterprise
Management**

CIO

i-Manager

itnews

ICTONLINE

SPBITRU