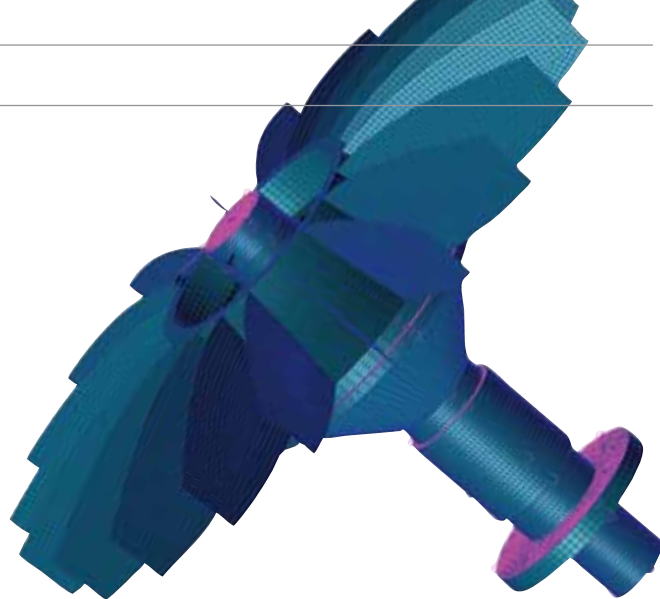


Применение программных продуктов корпорации MSC.Software



ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РОТОРНЫХ СИСТЕМ



Корпорация MSC.Software (Санта-Ана, Калифорния, США), с 1963 года работающая в области создания компьютерных технологий инженерного анализа, пред-

лагает широкий спектр интегрированных VPD-систем – компьютерных технологий инженерного анализа и виртуального моделирования. Технологии VPD являются самым высоким, наиболее современным, качественно новым уровнем 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.

Программные продукты корпорации MSC.Software успешно применяются в самых различных отраслях промышленности – авиационной, ракетно-космической, автомобильной, железнодорожной, в машиностроении, кораблестроении, нефтегазовом секторе, гражданском строительстве, биомедицине, а также в отраслях, связанных с разработкой и производством энергетических установок, двигателей внутреннего сгорания и т.п.

В этой статье речь пойдет о возможностях лишь некоторых программных продуктов корпорации MSC.Software (**Patran**, **MSC.Nastran** и **MD Nastran**) в области решения задач, связанных с динамикой роторных систем.

Patran

Patran является препроцессором, с помощью которого создается конечно-элементная модель объекта, моделируются нагрузки и граничные условия, осуществляется управление расчетом и интерпретация полученных результатов. В Patran можно импортировать данные из CAD-программ (**CATIA**, **Euclid 3**, **Pro-**

Engineer, **Unigraphics**, **SolidWorks**, **AutoCAD**, **КОМПАС 3D**) и других моделирующих CAE-пакетов.

Процесс моделирования и расчета с использованием систем **MSC-MD Nastran** и препроцессора **Patran** показан на рисунке.

При использовании системы **Patran** в качестве препроцессора для решения задач роторной динамики включение вращающихся компонентов модели в расчет и учет гироскопических эффектов происходит автоматически с помощью **Rotordynamics Tools**.

Это приложение системы **Patran**, имеющее понятный и удобный интерфейс, с помощью которого без лишних усилий и затрат времени можно указать количество роторов в модели и определить их важ-

нейшие параметры, такие как направления и скорости вращения, величины дисбаланса, демпфирование и т.д.

Все эти условия будут автоматически переданы во входной файл **MSC.Nastran**.

Совместное применение **Rotordynamics Tools** и модуля **Rotordynamics** позволяет создавать модели двигательных установок с включением всех роторов, опор, корпусов и узлов подвески, входящих в состав изделия.

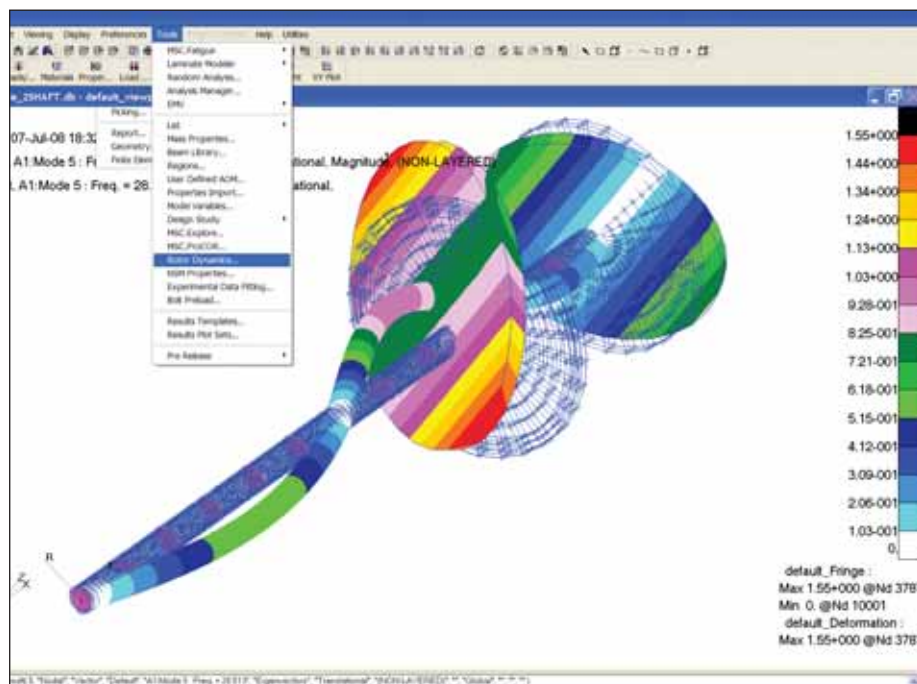
Более того, при использовании **Patran** в качестве постпроцессора пользователь получает уникальные возможности графического представления результатов расчета. По завершении расчета в **MSC.Nastran** результаты могут быть автоматически загружены в постпроцессор **Patran** с целью их последующего отображения на экране монитора в различных видах.

Это построение амплитудно-частотных характеристик, диаграмм Кэмпбелла (резонансных диаграмм), графиков сигналов во временной области, графиков спектральной плотности мощности и энергии, среднеквадратичного отклонения случайной величины и т.п. При расчете переходных процессов возможно построение траекторий движения узлов модели в различных плоскостях.

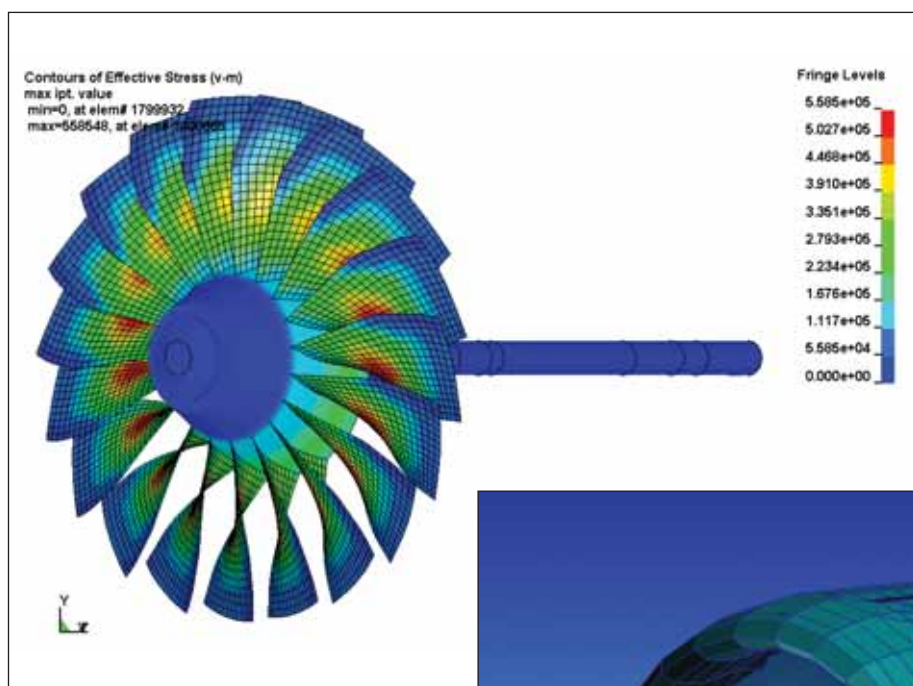
Использование возможностей графического отображения результатов уже на ранних этапах анализа дает наглядное представление особенностей поведения



Последовательность решения инженерной задачи с помощью **MSC-MD Nastran** и **Patran**



Графическое представление результатов расчета критических чисел оборотов двухвальной соосной роторной системы в Patran (тестовая задача)



Преднагруженное состояние лопаток первой ступени компрессора двигателя ГТД

роторных систем при различных условиях динамического нагружения, а также позволяет безошибочно разделить частоты прямой и обратной прецессии, соответствующие определенной форме колебаний, определить критические скорости вращения и т.д.

Постпроцессор Patran обеспечивает возможность графического отображения напряженно-деформированного состояния конструкции в любой точке пространства в любой момент времени.

Пользователь может формировать

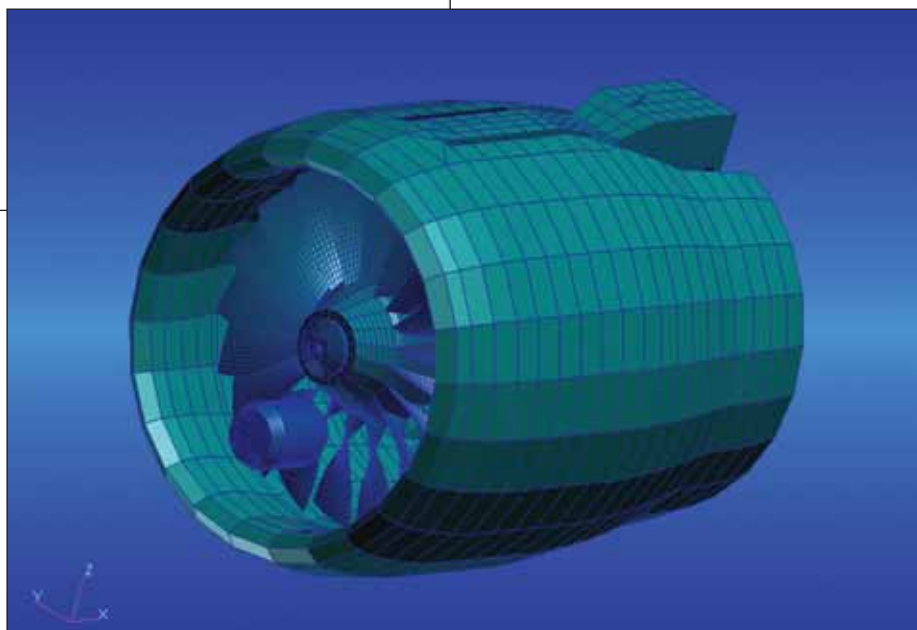
для себя различные наборы исходных данных и результатов в зависимости от поставленной задачи. Результаты могут быть представлены в виде сил, перемещений, фаз, скоростей, ускорений, моментов, распределения потенциальной и кинетической энергии по элементам конструкции.

При использовании объемных конечно-элементных моделей роторных систем возможен вывод массово-инерционных характеристик каждого из роторов, входящих в состав изделия.

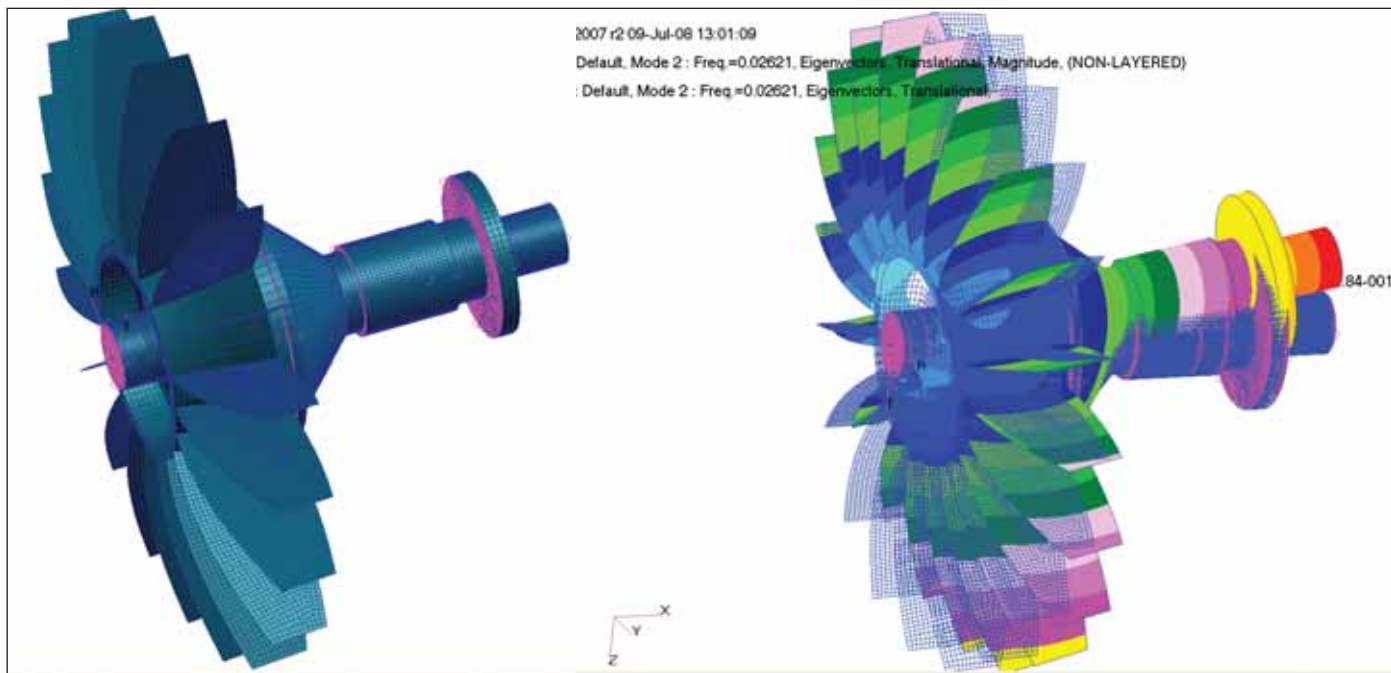
MSC.Nastran

Вот уже более сорока лет расчетный программный комплекс MSC.Nastran от компании MSC.Software является лидером на рынке программного обеспечения, предназначенного для увеличения производительности и ускорения процессов виртуальной разработки изделий (VPD).

В MSC.Nastran вошли все новейшие достижения корпорации MSC.Software в области конечно-элементного анализа прочности, собственных частот и форм колебаний, устойчивости, теплопередачи, установившихся и неустойчивых динамических процессов, нелинейных статических и переходных процессов, оптимизации конструкции, автоматической идентификации расчетной модели и эксперимента, анализа акустики, аэроупругости, расчета критических частот и вибраций роторных машин, анализа частотных характеристик при воздействии случайных нагрузок, спектрального анализа, планирования эксперимента и оценки полученных экспериментальных данных. MSC.Nastran — гибкая, постоянно развивающаяся сис-



Модель воздушно-реактивного двигателя для исследования явления обрыва лопатки и расчета динамических характеристик



Решение задачи на нахождение комплексных собственных значений (формы колебаний, критические скорости вращения, частоты прямой и обратной прецессии) с использованием Patran и модуля

тема, реагирующая на всё возрастающие требования, предъявляемые к системам инженерного моделирования, и учитывающая вектор развития инновационных технологий.

Все эти особенности MSC.Nastran позволяют сделать виртуальный прототип будущего изделия столь же функциональным, как и само изделие.

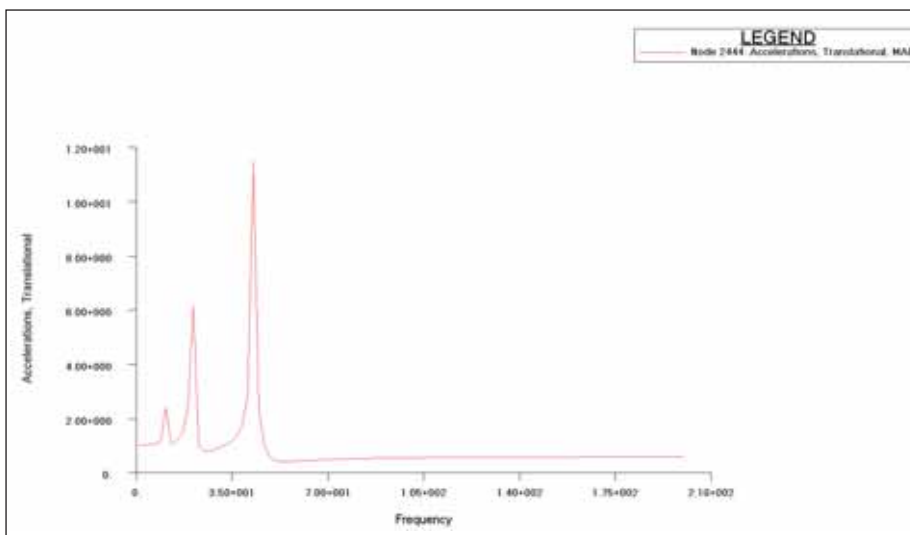
Роторная динамика в MSC.Nastran

Появление расчетного модуля "Роторная динамика" (Rotordynamics) в MSC.Nastran существенно расширяет возможности моделирования и расчета газотурбинных двигателей и энергетических установок, содержащих роторы и компоненты роторных систем.

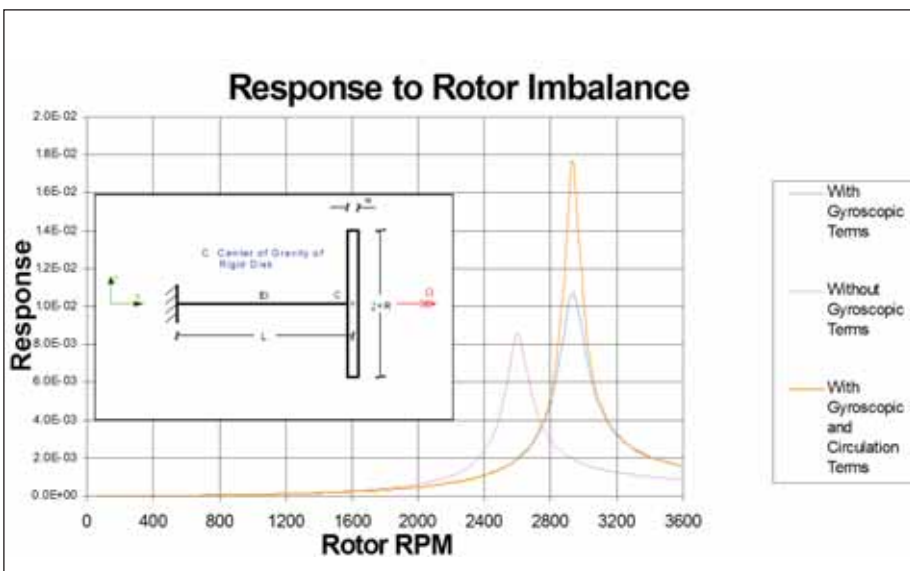
Следует отметить, что если раньше компании использовали собственные внутренние программы и предварительно настраивали последовательности решений для задач роторной динамики, то в последних версиях MSC.Nastran необходимость в такой настройке, а также в подключении специальных альтеров (подпрограмм) для учета гироскопических эффектов отпала.

Модуль Rotordynamics предназначен для расчета конструкций с вращающимися компонентами и является неотъемлемой частью последовательности решений динамических задач. Его подключение осуществляется набором соответствующих команд в секции *case control* и *bulk data* входного файла MSC.Nastran.

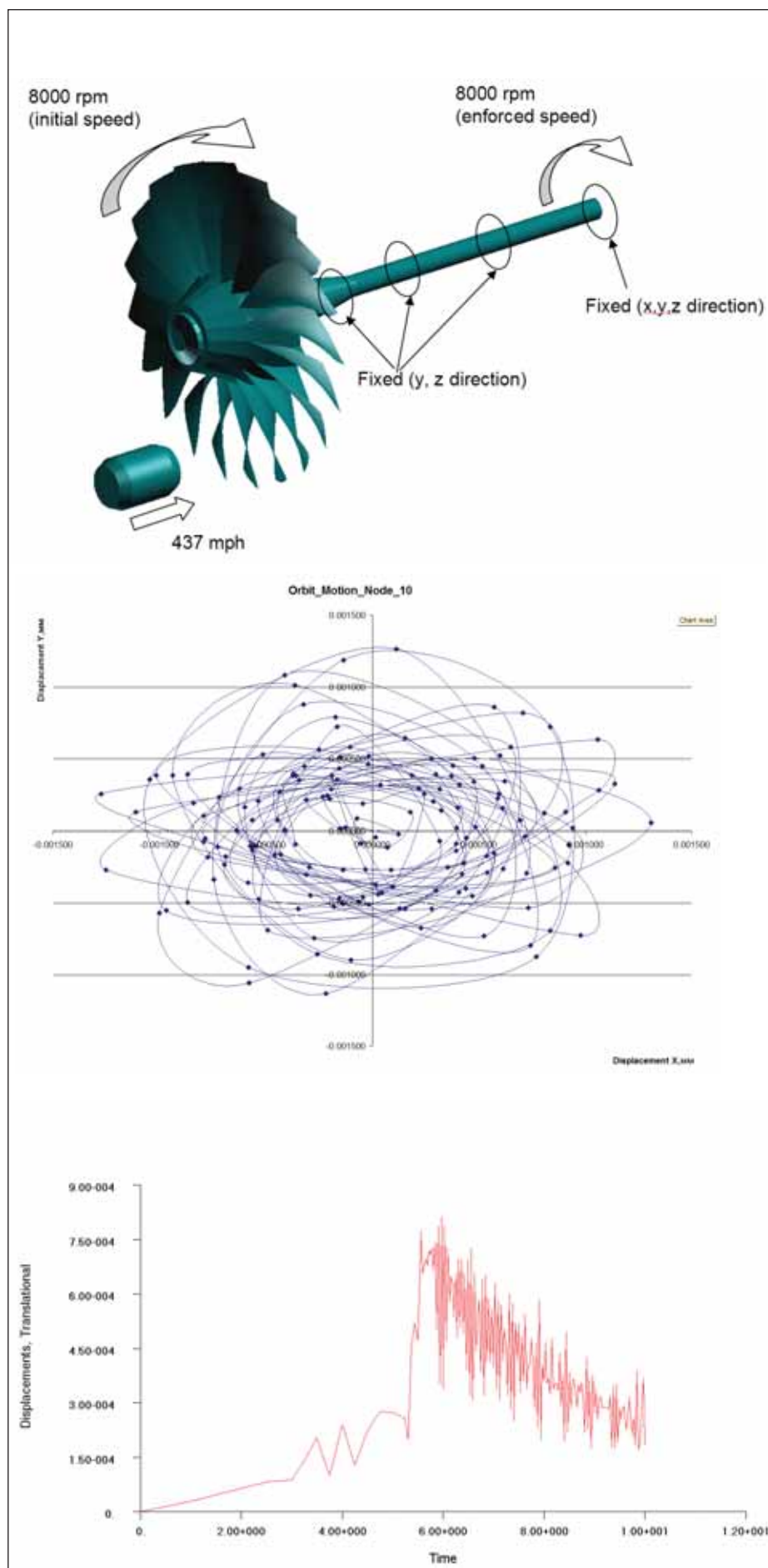
Использование Rotordynamics существенно упрощает и ускоряет обмен данными внутри отдельной компании или между внешними поставщиками.



Результат расчета частотного отклика системы на произвольное возбуждение



Результат расчета частотного отклика системы с учетом влияния дисбаланса



Орбитальные перемещения узлов модели и амплитуды колебаний до и после стабилизации

Кроме того, стало возможным включение в расчет неограниченного числа роторов и корпусов. Роторы могут вращаться с различными угловыми скоростями и располагаться под произвольными углами по отношению друг к другу.

Таким образом, корпорация MSC.Software предлагает мощный полнофункциональный программный комплекс, включающий расчетные системы MSC.Nastran, MD Nastran, модуль Rotordynamics, а также препостпроцессор Patran, для решения широкого спектра задач динамики роторных систем, к которым относятся:

Задачи анализа линейных динамических процессов

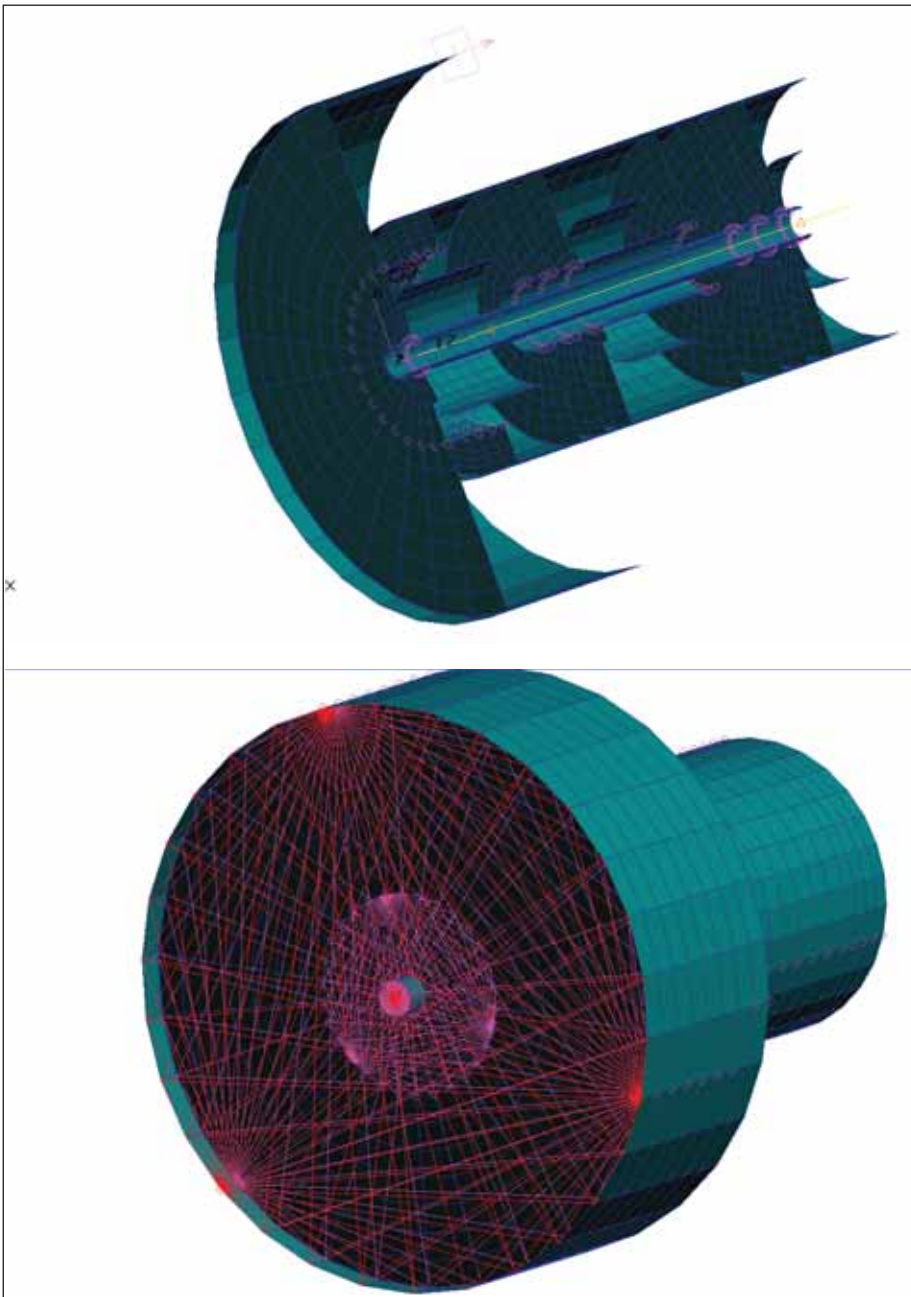
- Определение критических скоростей, частот и видов прецессии с учетом скольжения роторов для многовальных роторных систем, а также внешнего и внутреннего демпфирования, нелинейности опор и т.д.
- Расчет собственных значений с учетом предварительного нагружения и демпфирования.
- Расчет частотного отклика с учетом влияния дисбаланса, демпфирования и других конструктивных факторов.
- Анализ линейных динамических переходных процессов.

Задачи анализа нелинейных динамических процессов

- Расчет динамических характеристик роторных систем с зазорами — полное либо частичное касание ротора о статор, потеря устойчивости, явление потери несущей способности опор, заклинивание ротора и т.п.
- Расчет динамических процессов при обрыве лопатки, а также с учетом преднагружения и напряженно-деформированного состояния компонентов роторных систем, дисбаланса и т.п.
- Динамика роторов с демпферами различных типов.
- Расчеты с опорами скольжения различных типов и нелинейными подшипниками качения.
- Анализ нелинейных динамических переходных процессов при различных скоростных режимах, различных условиях нагружения и т.д.

Задачи расчета отклика конструкции на случайные динамические воздействия

- Вычисление комплексных собственных значений (критических частот).
- Анализ частотного отклика (получение комплексной передаточной функции).
- Расчет распределения мощности или энергии по диапазону частот и накопленного среднеквадратичного отклонения случайной величины.



Оболочечная конечно-элементная модель ГТД с использованием MPC-связей и суперэлементов

В рамках существующих стандартных последовательностей решений (Solution Sequence – SOL), встроенных в MSC.Nastran, существуют возможности для следующих видов расчета в области динамики роторных систем:

Расчет комплексных собственных значений (SOL 107, 110)

- Определение частот, форм и характера прецессионного вращения роторов.
- Определение критических скоростей.

Расчет частотного отклика (SOL 108, 111)

- Частотный отклик на произвольное возбуждение.
- Частотный отклик на синхронное возбуждение, дисбаланс.

Расчет динамики переходных процессов (SOL 109, 129)

- Различные скоростные режимы.
- Обрыв лопатки, дисбаланс.

Статический расчет (SOL 101)

- Возможность приложения к вращающимся роторам статических нагрузок, возникающих при маневрировании летательного аппарата.
- Учет осевых сил.

Кроме того, роторная жесткость, масса и влияние величины демпфирования могут быть учтены при решении задачи **оптимизации SOL 200**. Гироскопические эффекты могут учитываться при расчете **аэроупругого отклика SOL 146**. Есть возможность включать в расчет

опоры типа **Squeeze-Film Damper**, с помощью которых моделируются гидродинамические и гидростатические подшипники.

Комбинирование и совместное использование стандартных последовательностей решений динамических задач в MSC.Nastran и модуле Rotordynamics обеспечивают пользователям систем MSC.Software прекрасные возможности для устранения большинства проблем, связанных с динамикой роторных систем, неизбежно возникающих при проектировании и доводке изделий.

Суперэлементы в роторной динамике

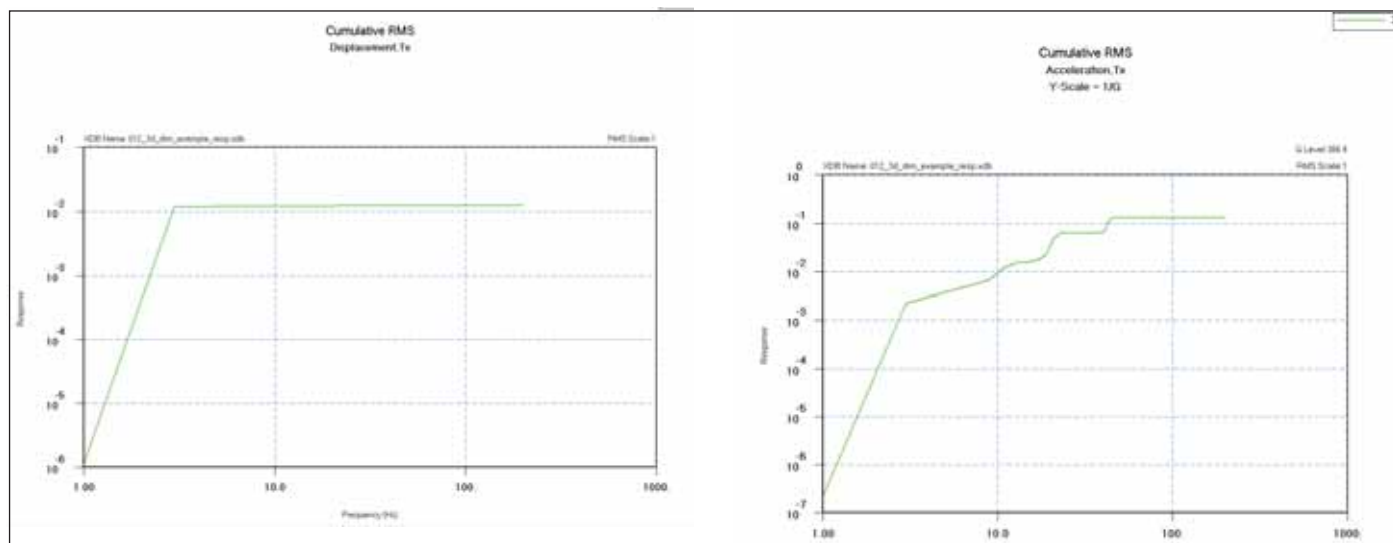
Использование суперэлементов в MSC.Nastran обеспечивает точный расчет сложных полноразмерных роторных систем с учетом их конструктивных особенностей и условий эксперимента. Определение моментов инерции, центров масс и приведение геометрии роторной системы к эквивалентной конечно-элементной модели – это достаточно сложный и трудоемкий процесс, в котором всегда присутствует вероятность ошибки.

Суперэлементный подход позволяет избежать этих недостатков, сократить продолжительность расчета в десятки и даже сотни раз, а также существенно повысить точность благодаря корректной передаче всех прочностных и массово-инерционных характеристик узлов и элементов на вход решателя.

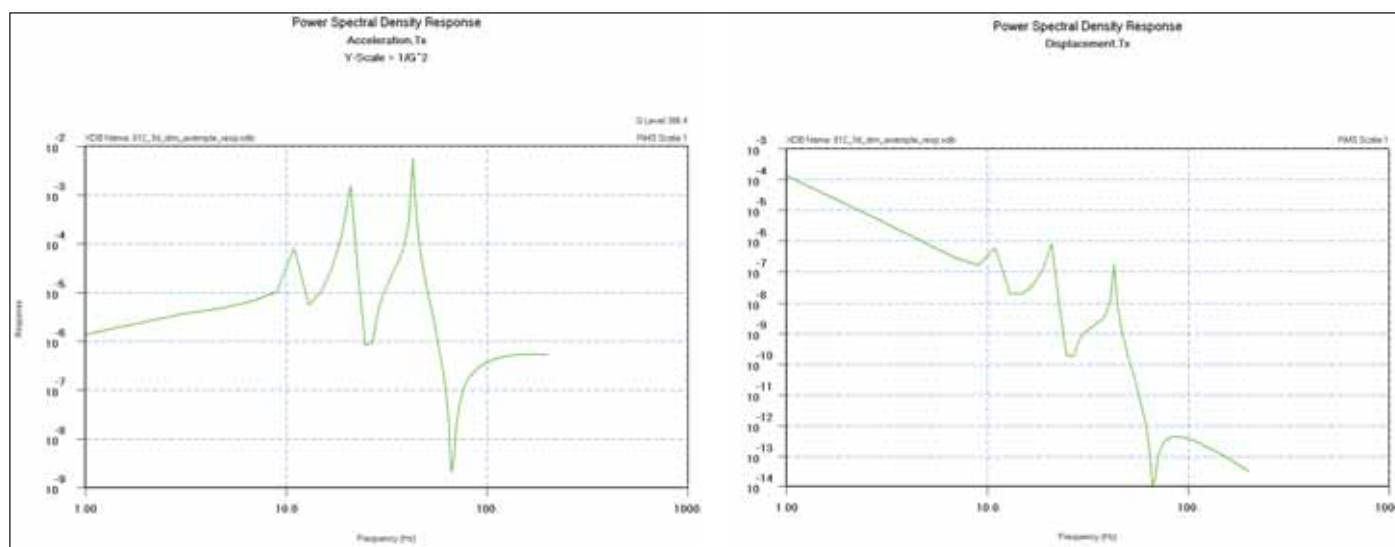
В MSC.Nastran при решении задач роторной динамики используются специальные карты записи для суперэлементов – **ROTORSE**, **SEDAMP**, **RSDAMP**. Пользователю нет необходимости формировать эти карты вручную – Patran автоматически генерирует входной файл для MSC.Nastran, уже содержащий эти карты записи с необходимыми наборами данных.

Кроме того, в последних версиях препроцессора Patran появилась возможность определения иерархии и последовательности подключения суперэлементов в модели – **Superelement Tree Definition**, и специалист, используя удобный графический интерфейс системы Patran, без особых усилий может строить сложные многоуровневые модели с использованием суперэлементов.

Это незаменимый инструмент для моделирования как отдельных сборок, так и полноразмерных моделей двигателей, содержащих множество и неподвижных, и вращающихся компонентов, зачастую имеющих довольно сложную геометрию, разные условия сопряжения, характеристики материалов и т.д.



Накопленное среднеквадратичное отклонение случайной величины



Графики спектральной плотности энергии (ускорения, перемещения)

Расчет случайного динамического воздействия

Уникальной особенностью MSC.Nastran при решении задач роторной динамики является возможность проведения расчета на случайное динамическое воздействие.

Такого рода задачи успешно решались специалистами московского представительства MSC.Software. При этом использовались стандартные последовательности решений динамических задач SOL 107, 108, модуль Rotordynamics в MSC.Nastran и приложение **Random Analysis** в системе Patran.

Вероятностные методы расчета прочности и нагрузок широко применяются, например, в аэрокосмической отрасли (расчеты вибрационной и акустической прочности), автомобильной промышленности (определение воздействия профиля дороги и задачи акустики), при строительстве зданий и сооружений в сейсмоопасных районах. Приложение

Random Analysis позволяет применять такие методы для расчета прочности сложных конструкций, которые дают возможность учитывать реальные внешние воздействия.

Для роторных машин такие методы расчета особо актуальны, так как, например, превышение определенного порога амплитуды колебаний часто приводит к функциональному отказу и даже механическому разрушению всей системы.

Результаты расчета с использованием Random Analysis позволяют получать распределение мощности или энергии по диапазону частот, а также вычислять среднеквадратичное отклонение случайной величины как на выбранном интервале, так и на всем исследуемом диапазоне частот.

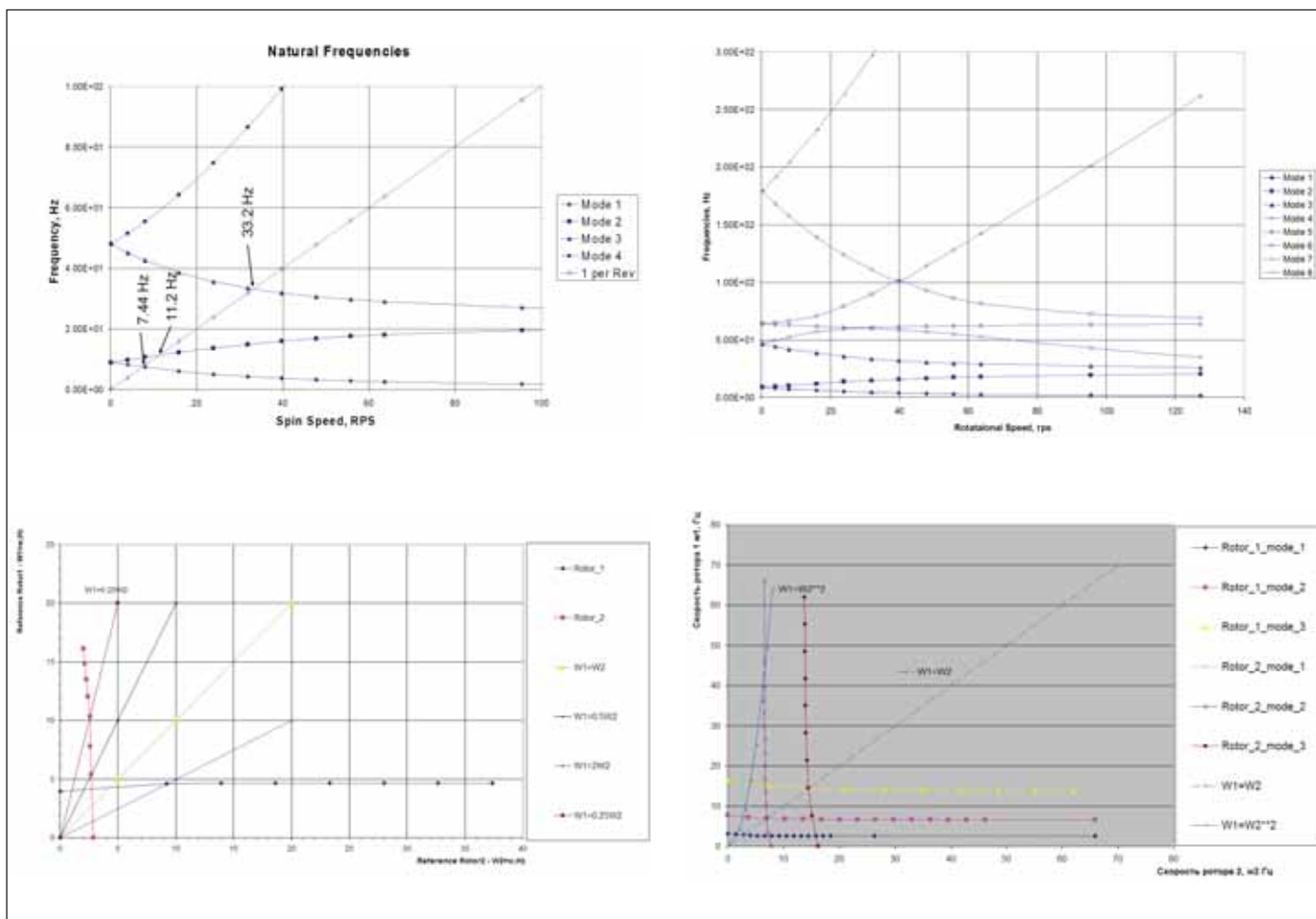
Весьма актуальной является задача расчета собственных частот и критических скоростей многовальных систем роторов, содержащих опоры различных типов, а также межроторные связи. При

определении динамических характеристик возможен учет скольжения роторов.

Расчет многовальных роторных систем в MSC.Nastran обеспечивает прогнозирование поведения роторов в составе двигательной установки для любого закона изменения скоростей. Это особенно ценно при выявлении наиболее опасных резонансных режимов для компонентов роторных групп и двигательной установки в целом.

Таким образом MSC.Nastran дает своим пользователям неоспоримые преимущества при решении задач роторной динамики. А именно:

- эффективный алгоритм включения гироскопических моментов в расчетную модель ротора;
- использование единого конечно-элементного подхода при анализе прочности турбомашин;
- точное моделирование конструктивных особенностей роторных и статорных элементов (лопаток, замков,



Диаграммы Кэмпбелла для определения критических частот вращения многовальных роторных систем с учетом скольжения роторов

дисков турбин, элементов стяжных соединений и т.д.);

- расчет динамических характеристик полноразмерных 3D-моделей турбомашин с применением суперэлементов и алгоритмов редукции динамических моделей в MSC.Nastran.

В качестве примера применения программных продуктов корпорации MSC.Software для решения задач динамики роторных систем можно привести результат успешного сотрудничества MSC.Software с крупнейшими производителями авиационной техники.

Более 10 лет компании Boeing Commercial Airplanes, GE Aviation, MSC.Software в сотрудничестве с ведущими международными предприятиями-изготовителями авиационных двигателей и NASA совместно работают над проблемой виртуального моделирования процесса обрыва лопатки компрессора и последующим расчетом динамических характеристик роторной группы двигателя. Тяжелые широкие лопатки компрессора, используемые в ступенях низкого давления двигателей нового поколения с большой степенью двухконтурности, усложняют моделирование высоконелинейного явления обрыва лопатки компрессора в целом, так

как их преднагруженное напряженно-деформированное состояние уже само по себе подразумевает высокую степень нелинейности. Применение таких лопаток обусловлено необходимостью обеспечить возрастающий спрос самолетостроительных компаний на двигатели повышенной тяги с улучшенными рабочими характеристиками и оптимальным весом.

Крупнейшие производители и разработчики авиационной техники уже давно и успешно используют технологии виртуального компьютерного моделирования для проведения комплексных расчетов для двигательных установок и смежных конструкций планера в целом.

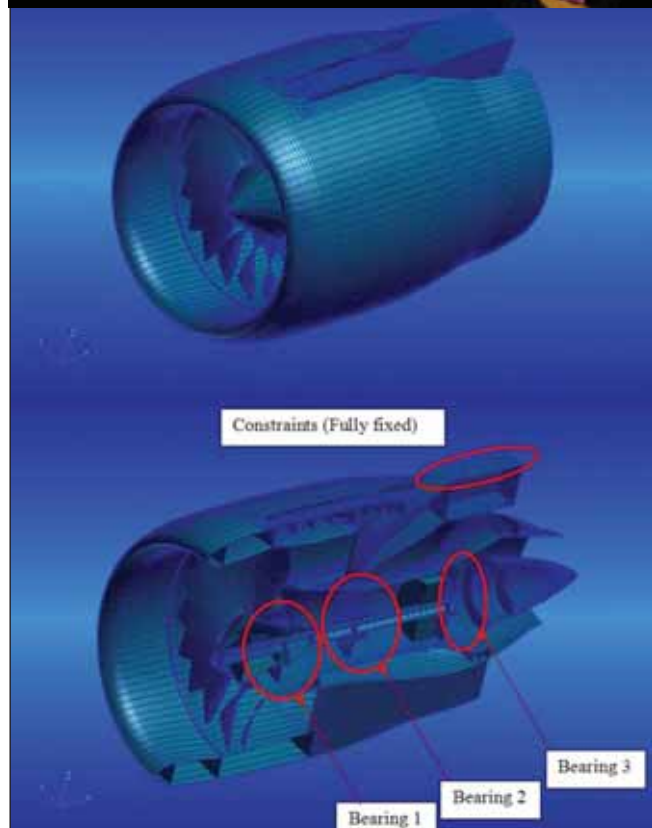
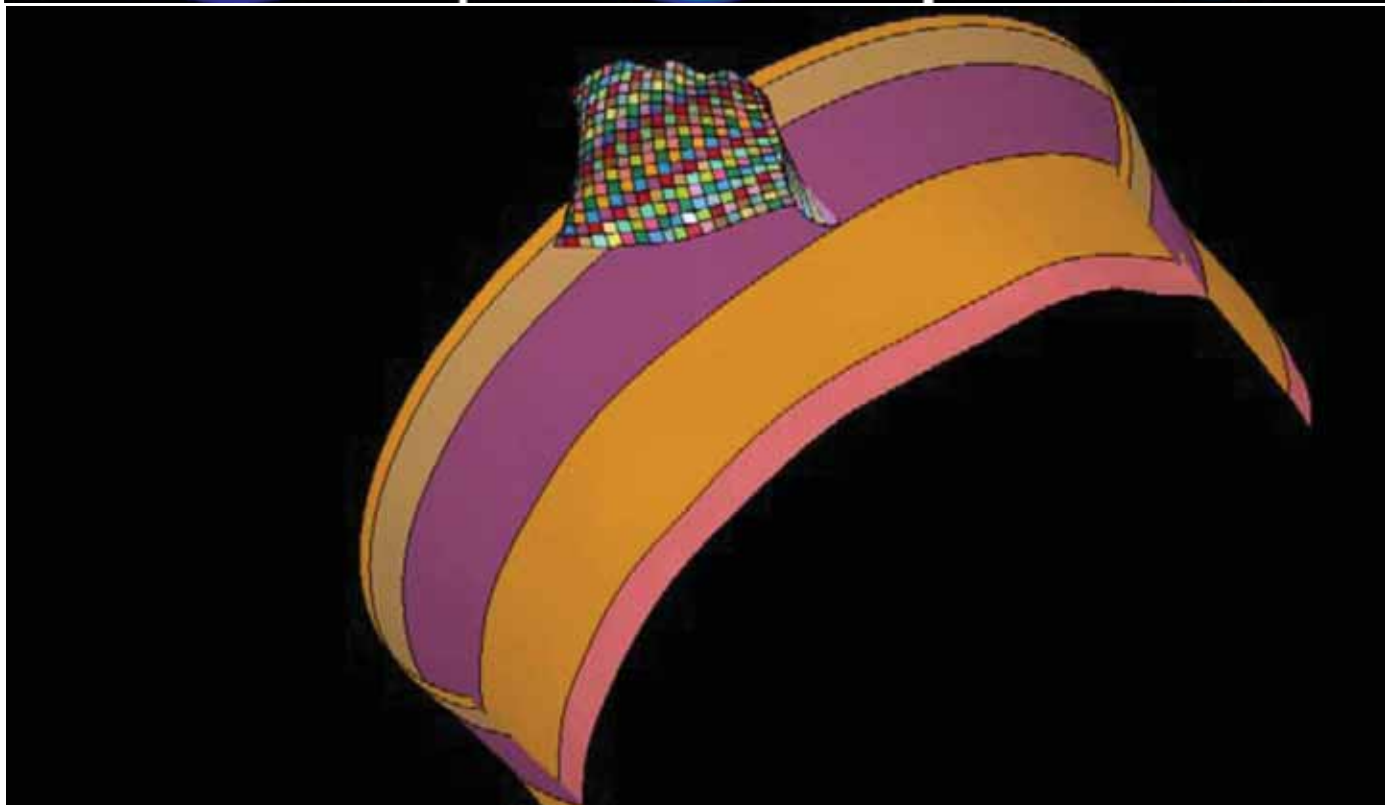
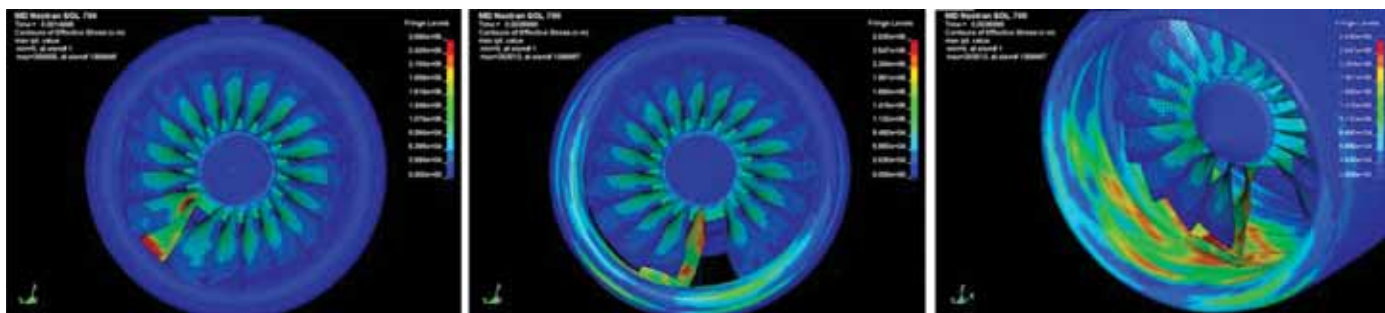
До недавнего времени исследование явлений, связанных с динамикой роторных систем, проводилось как последовательность решения отдельных локальных задач в рамках специализированного программного обеспечения. Это задачи моделирования преднагруженного состояния лопаток компрессора, исследования процесса обрыва лопатки, расчеты динамических характеристик ротора в составе двигательной установки с учетом изменения тяги двигателя, явления потери несущей способности опор, касания частей ротора о статор и т.п.

Специалистами MSC.Software в тесном сотрудничестве с ведущими самолетостроительными и двигателестроительными компаниями был разработан комплексный подход к моделированию обрыва лопатки компрессора и последующему динамическому анализу роторов в составе двигательной установки, основанный на явных и неявных методах интегрирования. Этот подход реализован в комплексе MD Nastran.

Применение MD Nastran обеспечивает уникальную возможность проведения многодисциплинарного анализа, включающего в себя все задачи, упомянутые выше, что значительно упрощает моделирование процесса обрыва лопатки в целом.



MD Nastran (MD — Multi-Disciplinary) — инструмент инженерного анализа нового поколения для компаний, решающих задачу системного подхода к моделированию. Это особенно



Оболочечная конечно-элементная модель ГТД с использованием MPC-связей и суперэлементов

Модель компрессора ГТД
(схема расположения опор)

важно для производителей авиационной техники, которым необходимы достоверные полноразмерные конечно-элементные модели планера самолета, двигательных установок и т.п.

MD Nastran оптимизирован для наиболее быстрого и качественного проведения сложных комплексных расчетов, аккумулирующих в себе множество дисциплин. MD Nastran комбинирует лучшие в своем классе системы компьютерного инженерного анализа, включая MSC.Nastran, Marc, Dytran и LS-Dyna в одну полностью интегрированную суперсистему для проведения многодисциплинарного моделирования в масштабах предприятия.

Применение явных и неявных методов интегрирования в MD Nastran (SOL 700 и SOL 400) к задачам динамики роторных систем существенно упрощает решение множества задач и выводит технологии виртуального моделирования на качественно новый уровень представления таких явлений, как, например, обрыв

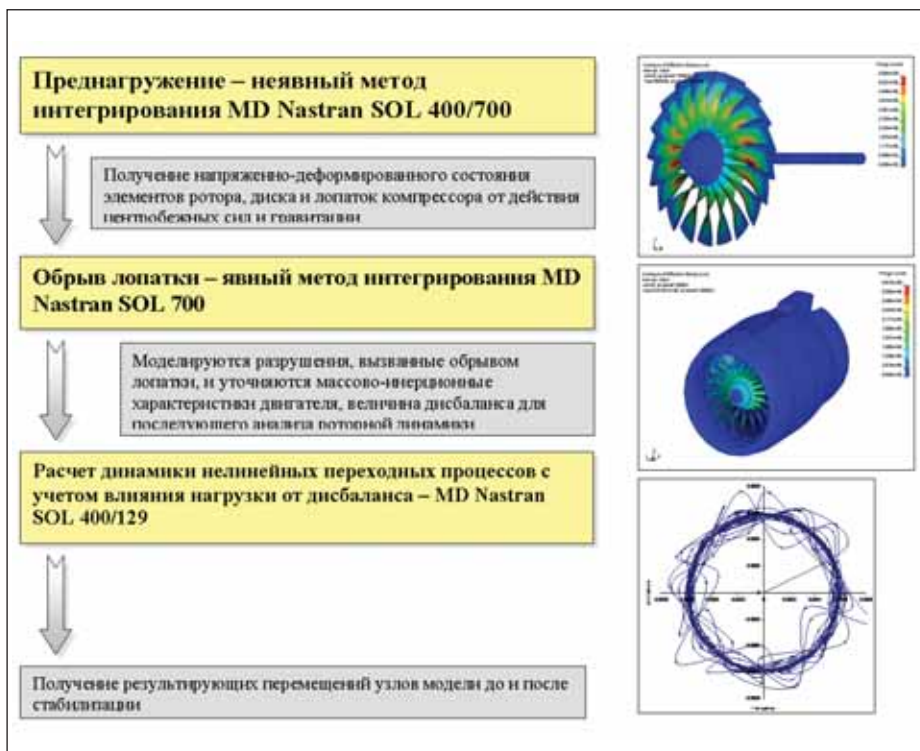
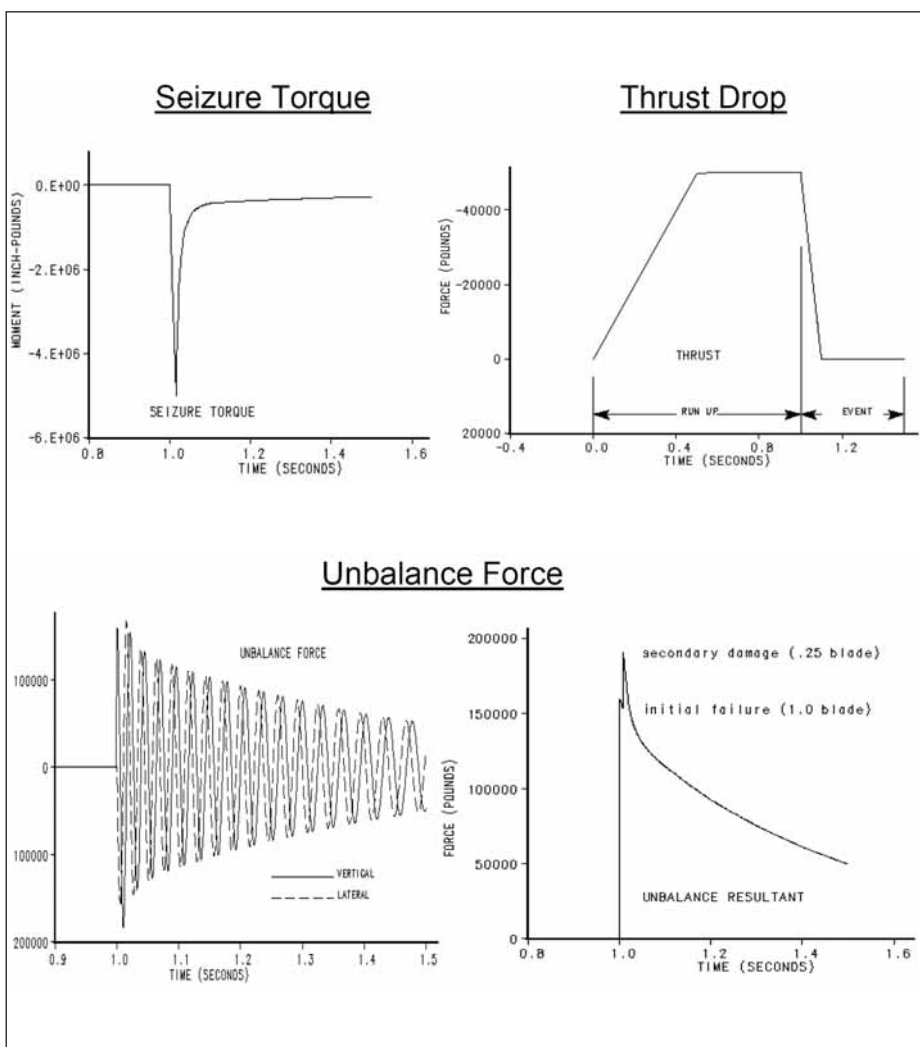


Схема комплексного решения задачи обрыва лопатки компрессора ГТД в MD Nastran



Оболочечная конечно-элементная модель ГТД с использованием MPC-связей и суперэлементов

лопатки одной из ступеней компрессора воздушно-реактивного двигателя (ВРД), попадание птицы в двигатель и т.д.

Специалистами корпорации Boeing и компании MSC.Software было исследовано явление обрыва лопатки компрессора ВРД и рассчитаны динамические характеристики роторной группы в составе двигательной установки.

Упрощенная модель воздушно-реактивного двигателя была предоставлена компанией Boeing Commercial Airplanes. Специалисты компании MSC.Software обеспечили возможность включения в модель 3D-лопаток компрессора, ротора, трех опор, а также других узлов и компонентов. Как правило, полноразмерная модель для исследования процесса обрыва лопатки имеет миллионы элементов и степеней свободы для наиболее реалистичного представления реактивного двигателя.

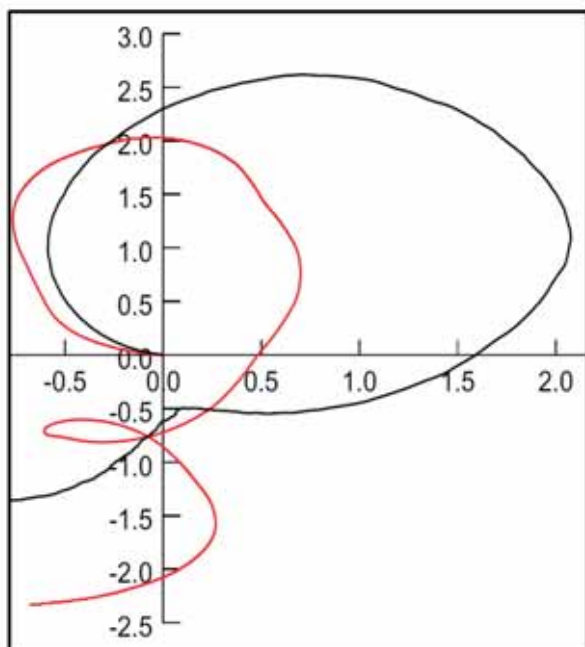
В этом расчете была продемонстрирована вся простота моделирования и расчета явления обрыва лопатки, даже с учетом того, что модель для явных методов анализа строилась с очень подробной конечно-элементной сеткой, намного более подробной, чем КЭ модели, традиционно используемые разработчиками при исследовании процессов, связанных непосредственно с динамикой роторных систем.

Модель имела 8256 оболочечных элементов и была достаточно детализирована, чтобы охватить всю физику процесса и вычислить нагрузки ударного характера, а также нагрузки, вызванные силами трения.

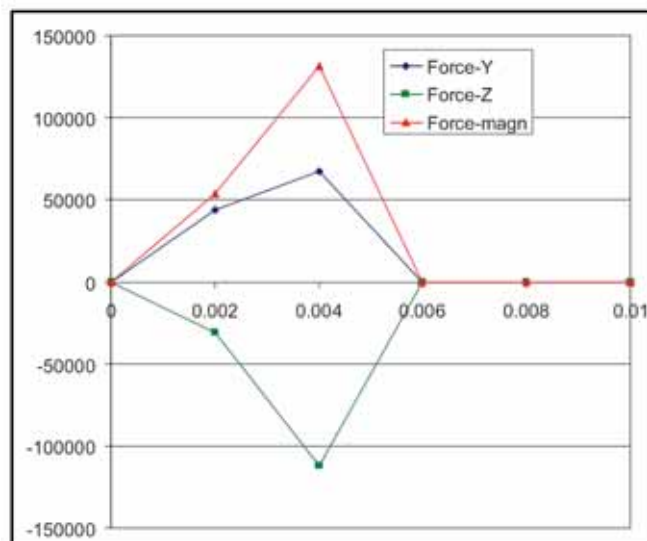
Лопатки компрессора были построены оболочечными элементами различной толщины по заданному профилю. Ротор представлял собой полый стержень с варьируемыми геометрическими характеристиками поперечных сечений по длине вала. Максимальная скорость вращения – 4500 оборотов в минуту. Материал ротора и лопаток компрессора – титановый сплав. Подшипники моделировались в виде двух концентрических колец с определенными жесткостными свойствами и возможностью контакта друг с другом. Фланцы на подшипниках предотвращали неконтролируемое осевое перемещение ротора в процессе обрыва лопатки компрессора.

Модели подшипников и их свойства очень важны для исследования процесса потери несущей способности опор ротора, вызванного обрывом лопатки.

Потеря несущей способности опор при расчете процессов ударного характера явными методами интегрирования представляется как процесс, при котором подшипник или другой опорный элемент выходит из строя из-за чрезмерно высоких



Перемещения узлов на конце вала ротора в осях X-Y, полученные с использованием MD Nastran (SOL 700 и SOL 400)



Максимальные нагрузки в узле передней опоры ротора SOL 400

нагрузок. При этом жесткость конечных элементов, составляющих упругие компоненты опор, принималась равной.

На первом этапе расчета была использована SOL 400 (стандартная последовательность решения, использующая неявные методы интегрирования для решения задач нелинейной статики и расчета динамики переходных процессов). Полученное напряженно-деформированное состояние элементов ротора, диска, лопаток компрессора служило исходными данными для расчета динамических нагрузок, вычисляемых на втором этапе с использованием SOL 700 (стандартная последовательность решения, использующая явные методы интегрирования для расчета высокочастотных процессов ударного характера).

Затем был проведен расчет вибрационных характеристик модели с уже измененными массово-инерционными и прочностными характеристиками с помощью SOL 129/400 (стандартные последовательности решения для исследования нелинейных динамических процессов). Схема комплексного исследования явления обрыва лопатки (**Fan Blade Out Simulation – FBO**) с использованием MD Nastran представлена на рисунке.

Типовые нагрузки для исследования нелинейных динамических переходных процессов были получены в результате расчета явными методами интегрирования с использованием SOL 700. Это силы от дисбаланса (Unbalance Force), крутящий момент, вызванный силами трения ротора о статор вследствие обрыва лопатки (Seizure Torque). Момент зада-

вался в виде сил, направленных по касательным к лопаткам компрессора. В дополнение ко всему были заданы осевые силы на валу ротора, связанные с изменением тяги двигателя (Thrust Drop).

Такой расчет в MD Nastran, с учетом роторной динамики, позволил определить роторный дисбаланс, вызванный внешним воздействием, построить орбиты движения прецессирующего вала, определить время, при котором нагрузка в опорных элементах ротора достигает максимального значения, и, наконец, определить критические допуски для изготовления узлов и деталей двигательной установки.

Пользователи программных продуктов MSC.Software получают уникальную возможность использовать единую расчетную среду для моделирования и анализа множества явлений, имеющих место в газотурбинных двигателях и энергетических установках, таких как преднагруженное состояние элементов ротора, лопаток компрессора, ударные взаимодействия между подвижными и неподвижными частями конструкции двигателя (обрыв лопатки, касание ротора о статор, заклинивание ротора, частичное либо полное разрушение корпуса двигателя), потеря несущей способности опор, динамика ротора на стационарных и переходных режимах с учетом влияния различных силовых и кинематических нагрузок, нагрузок от дисбаланса и т.п.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что ни одна CAE-система, существующая в настоящее время, а также системы, использующие другие методы и формы математического представле-

ния, не обладают такими широкими возможностями в области виртуального моделирования динамических процессов и оценки работоспособности роторных систем, как MSC.Nastran или MD Nastran.

Заключение

Ведущие мировые агентства и корпорации, такие как NASA, Boeing, General Electric, MTU, Pratt&Whitney, Snecma, Rolls-Royce, Embraer, Honeywell, а также Вирджинский университет создали совместный проект – **Rotordynamics Consortium**, целью которого является объединение усилий по изучению проблем в области динамики роторных систем. Эти компании и организации активно сотрудничают по данной теме со специалистами MSC.Software. Результатом сотрудничества стало появление расчетного модуля Rotordynamics в MSC.Nastran и эффективные, отлаженные методики решения сложных задач с применением MSC.Nastran и MD Nastran.

Ведущие российские предприятия авиационной, космической и других отраслей – ФГУП ММПП "САЛЮТ", ОАО "НПО "Сатурн" НТЦ им. А.Льюльки, ОАО КРИОГЕНМАШ, ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова – на протяжении многих лет также успешно используют программные продукты MSC.Software для решения проблем, связанных с динамикой роторных систем.

Валерий Ширококов,
технический эксперт

московского представительства

MSC.Software Corporation

Тел.: (495) 363-0683, 254-5710; доб. 3102

E-mail:

Valeriy.Shirobokov@mscsoftware.com