

## – Математические модели роторных систем газотурбинных двигателей



### 1. ВВЕДЕНИЕ

Достаточно ограниченное количество коммерческих программ, как российских, так и зарубежных, которые существуют или разрабатываются для решений практических задач роторной динамики, отличаются друг от друга не только платформами, языками программирования, используемой математикой, но и своей архитектурой, часто привязанной к определённому типу объектов, набором функциональности, способами создания математических моделей, способами анализа результатов моделирования и т.д.

Техническая документация, которая сопровождает программу, обычно нацелена на описание отдельных ее функций, и не дает практической информации о том, как должны создаваться математические модели и, в частности, динамические модели газотурбинных двигателей. Вместе с тем процесс их создания трудоемок, занимает большое количество времени. При этом качество модели, которое напрямую зависит от квалификации инженеров, вовлеченных в роторную динамику, не всегда гарантируется.

Рассматриваются общие требования к созданию программных средств анализа роторной динамики, а также общая теория создания математических моделей двигателей на базе многолетнего опыта команды профессионалов, решающих эти задачи. При этом предлагаемый опыт не привязан к конкретным программам, будь это программы создания моделей в одномерной или трехмерной МКЭ классической постановке, и может быть использован инженерами независимо от имеющихся в их распоряжении программ.

Примеры построены на опыте применения программы DYNAMICS R4 для большого количества газотурбинных двигателей. Работа с каждым двигателем давала новые представления о том, как должны выглядеть современные программы, как облегчить работу инженеров при создании моделей, и какие задачи роторной динамики должны решаться коммерческими программами, приближая модели и их свойства к реальным двигателям в различных условиях эксплуатации.

### 2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОЗДАНИЮ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТРДД

Все пункты этого документа могут относиться не только к программному комплексу DYNAMICS R4 (одномерные МКЭ модели), но к любой программе, созданной для анализа динамических свойств вращающихся систем, в том числе программам, построенным на базе 3-D моделей МКЭ. В настоящем документе отсутствуют пункты, связанные с другими типами опор (подшипников скольжения различных типов), на которые опираются роторы. Отсутствуют позиции по подготовке нелинейных моделей роторных систем

## 2.1 Требования к средствам математического моделирования

Отметим особенности современных конструкций ГТД, которые накладывают определенные требования к средствам математического моделирования.

- Авиационные двигатели - многороторные конструкции со связями между роторами.
- Корпусные элементы конструкции ГТД обладают высокой податливостью.
- Роторы современных конструкций ГТД как правило “гибкие”, т.е. рабочие обороты находятся вблизи или выше изгибающей критической частоты вращения.
- Существует высокая осевая несимметрия в упругих и инерционных характеристиках динамической структуры двигателя.
- В двигателе имеется большое количество консольно расположенных рабочих ступеней компрессоров и турбин.
- В опорах роторов широко используются демпфирующие устройства.
- Работают на различных режимах, отличающихся действующими силами и температурами деталей.
- Наличие противовращения роторов в перспективных многокаскадных двигателях
- Имеется высокая нелинейность динамических характеристик отдельных элементов конструкции.
- Имеется наличие многочисленных источников несинхронного возбуждения вибраций в двигателе.
- Существенное влияние технологических особенностей изготовления деталей и их сборки на динамику двигателя и т.д.

*В соответствии со сказанным программный продукт, которым сегодня должен пользоваться конструктор, должен учитывать многообразие особенностей для проектируемого газотурбинного двигателя, позволяя создавать его оптимальную динамическую структуру.*

## 2.2 Требования к двигателю при проектировании роторных систем

Перечислим некоторые основные требования к работам при создании конструкции роторных систем в составе двигателя и к их вибрационным характеристикам.

1. На начальном этапе проектирования разрабатывается математическая модель расчета связанных колебаний роторной системы и проводится ее анализ. Именно на этом этапе отрабатывается конструкция роторов, определяется нагруженность подшипников, необходимость применения упруго-демпферных опор для отстройки от критических резонансных режимов и определяются их характеристики. Соответствие математической модели двигателя реальному должно подтверждаться на всех этапах ее создания, анализа, в том числе с проведением специальных экспериментов, как отдельных деталей и узлов (модальные испытания), так и при проведении стендовых испытаний.
2. Модальные испытания направлены в первую очередь на определение собственных частот узлов двигателя с целью уточнения нелинейных свойств рассматриваемых узлов, локальных податливостей, влияющих на собственные частоты, и использования полученных данных для последующей валидации динамических моделей. Предварительно создаются и рассчитываются частоты и формы колебаний технологических моделей узлов, выбранных для модальных испытаний.

С учетом полученных данных определяется вид и места возбуждения собственных частот.

3. На первых этапах анализа модели определяются критические частоты вращения и формы колебаний отдельных роторов на жестких опорах. Рекомендуется, чтобы ротор был “жестким”, т.е. в диапазоне ниже 1.3 максимальных оборотов роторов не находилась первая критическая частота вращения. В случае наличия первой критической частоты ниже максимальных оборотов (ротор “гибкий”, требуется провести работы по ее выводу из рабочего диапазона применением упруго-демпферных опор. Здесь же определяются и виды балансировки роторов при их производстве.
4. При выборе оптимальных податливостей упруго-демпферных опор должны учитываться податливости опоры ротора, включающей податливости подшипника, и его корпуса, диафрагм и опорных стоек, податливость корпуса двигателя в местах соединения с ним опорных стоек. Весьма важным является требование к существенно большей податливости упруго-демпферной части опоры по отношению к податливости опорных стоек и соединений опоры с корпусом. В этом случае обеспечивается оптимальная работа демпферного устройства. Критерием выбора параметров упруго-демпферных опор являются минимальная виброактивность двигателя по показаниям вибрационных преобразователей – штатных и дополнительных при стендовых испытаниях.
5. Критические частоты вращения и формы колебаний соосных роторов ТВД следует определять в составе полной динамической системы двигателя (роторы - корпуса – подвеска) как для прямого, так и для обратного прецессионного движения. Для двухвальных двигателей в случае роторов с противовращением проводить расчет резонансных режимов от совместного действия дисбалансов роторов (анализ несинхронного возбуждения). Рекомендуется исключить в эксплуатационном диапазоне частот вращения резонансные колебания в виде несинхронной прецессии роторов с повышенной нагруженностью межроторных подшипников.

*Расчетная модель должна быть настроена как минимум на решение этих задач. Экспериментальные работы должны подтвердить правильность принятых решений на основании результатов моделирования.*

### 2.3 Факторы, влияющие на вибрационные характеристики двигателя

Перечислим основные факторы, влияющие на силовые схемы, приводящие к недопустимым высоким вибрациям, или потере стабильности вибрационных характеристик динамической системы двигателя.

*Они определяют набор задач, которые также должны быть учтены при подготовке модели и ее настройки. Часть задач можно решить, используя линеаризованные модели, часть задач требует подготовки нелинейной модели.*

Среди этих факторов:

**Конструктивные** – возможно их моделирование и учет на стадии проработки силовой схемы и рабочего проектирования.

1. Резонансная ситуация на оборотах близких к рабочему режиму.

2. Крутильные колебания, отстройка от резонансных режимов.
3. Взаимодействие корпусных и роторных вибраций.
4. Повышенные вибрации на корпусах в местах расположения (крепления) агрегатов и обвязки статора (проблемы обвязки).
5. Недогруженность подшипников качения – роликовых и шариковых. Удары в зазорах подшипников, хаотическое движение вала в зазоре.
6. Влияние осевой силы, меняющей жесткость подшипника. Проблема перекладки осевой силы – резко снижается жесткость подшипника, снижение собственной частоты ротора.
7. Несинхронное возбуждение колебаний роторов.
8. Биротативная турбина, противовращение роторов. Несинхронное возбуждение колебаний (увеличение количества возбуждаемых резонансных частот).
9. Различное скольжение роторов - влияние на уровень вибраций (на разных режимах разное).
10. Размещение шлицевых соединений, влияние на деформации колец подшипников.
11. Резкое изменение силовой линии в силовых схемах. Снижение жесткости участков конструкции (проверка в МКЭ).
12. Большое количество фланцев в одном соединении. Низкая жесткость соединения (проверка в МКЭ).

**Производственные и технологические** – должны быть учтены при рабочем проектировании и технологическом анализе конструкции.

1. Недостаточная затяжка фланцевых соединений роторов. Потеря жесткости валов, хаотически меняющаяся амплитуда по режимам.
2. Недозатяжка соединения вала компрессора и турбины. Жесткость шлицевых соединений валов.
3. Деформации деталей, стягиваемых центральной гайкой - неконтролируемый дисбаланс.
4. Нарушение технологии балансировки и сборки - повышенные эксплуатационные дисбалансы, повышенные вибрации
5. Погрешности изготовления шлиц, ведущие к неравномерному распределению сил от крутящего момента, закусываниям, перекосам обойм подшипников.
6. Косые (неправильно нарезанные) шлицы - оборотная составляющая с частотой ротора.
7. Биение торцовых стыков – деформации деталей при сборке, потеря жесткости соединения, снижение стабильности вибрационного поведения, отсутствие возможности балансировки на низких оборотах.
8. Взаимный перекося радиально-упорных подшипников, повышенные нагрузки в подшипниках.
9. Несосоосность опор роторов КНД и ТНД. В сочетании с зазорами появление вторых и третьих роторных гармоник.
10. Отрицательный зазор в подшипниках.

**Режимные** – исследования должны быть предусмотрены в планах доводки.

1. Раззазоривание фланцевых соединений, посадочных мест, за счет температуры. Уменьшение или потеря натягов (проверка в МКЭ).
2. Термический дисбаланс – запуски неостывшего изделия.
3. Изменение демпфирующих характеристик демпфера из-за температурных явлений.

4. Трение в соединениях может вызывать дестабилизирующий эффект и скачки вибраций (реализуется на отдельной модели соединения).
5. Прогрев деталей конструкции, ведущий к изменению податливости опор роторов.
6. Вытяжка дисков - коробление стягивающих шпилек, болтов. Снижение жесткости соединений в роторах компрессора и турбины.
7. Кинематическое возбуждение со стороны крыла самолета.
8. Переменный дисбаланс – перемещение деталей ротора в работе.
9. Аэродинамическое возбуждение. Появление составляющей вибраций с частотой равной первой собственной частоте вентилятора.

*Задачи исследования влияния перечисленных факторов на виброактивность и стабильность вибрационных характеристик двигателя должны быть стандартными для создаваемой расчетной модели при проектировании динамической структуры двигателя.*

*Расчетная модель должна быть подготовлена к решению основных задач из вышеприведенных списков как в линейной постановке, так и в нестационарной нелинейной. Программная система DYNAMICS R4 позволяет это сделать.*

*Прочие задачи, связанные с различного рода экстремальными ситуациями - обрывы лопаток, касания роторов о статорные части конструкции, отсутствие масла в демпферах, попадание масла в барабаны компрессоров, трещины валов и т.д. являются продолжением исследований после создания базовой модели двигателя и ее валидации.*

### **3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СОЗДАНИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММЫ DYNAMICS R4**

#### **3.1 Последовательность в создании моделей**

1. Разработка общей архитектуры модели двигателя - выделение отдельных подсистем, установление связей между ними.
2. Создание модели ротора вентилятора с опорными ступенями.
3. Создание модели ротора турбины НД.
4. Создание модели промежуточного корпуса с обвязкой.
5. Создание модели ротора КВД.
6. Создание модели ротора ВД.
7. Создание модели статора газогенератора с обвязкой.
8. Создание модели подвески и пилона двигателя.
9. Создание модели реактивного сопла.
10. Объединение моделей в общую модель двигателя.

*Представленная последовательность относится к двухвальному турбовентиляторному двигателю. Для двигателей наземного или судового применения его архитектура и набор моделей могут отличаться*

## 3.2 Архитектура модели

В процессе разработки архитектуры модели (общей структуры) решается задача разбиения конструкции на функциональные узлы (будущие подсистемы модели) и установления связей между ними.

Выбор количества подсистем обусловлен следующими факторами:

1. Типом двигателя (одноконтурный, двухконтурный, однокаскадный двух или трех каскадный), конструктивными особенностями статоров и роторов;
2. Необходимостью учета жесткостных характеристик различных соединений узлов и деталей между собой;
3. Необходимостью проведения валидации отдельных моделей по характеристикам, полученных в результате проведения специальных экспериментов соответствующих узлов двигателя.

Подсистемы моделей соединяются связями, моделирующими жесткостные характеристики фланцевых соединений, силовых стоек, корпусов опор, упруго-демпферных опор, подшипников и т.д.

К основным конструктивным факторам, приводящим к необходимости учета в расчетных моделях пространственных и анизотропных свойств конструкции, относятся:

1. Пространственное расположение стоек и учет подмоторной рамы для стационарных турбин
2. Подвеска авиационных ГТД на пилоне к крылу самолета
3. Внутренние опорные узлы (силовые стойки)
4. Вынос МИХ агрегатов на точки крепления к корпусу
5. Радиально-упорные подшипники качения, скольжения
6. Демпферы в опорных узлах
7. Пространственное положение датчиков вибрации
8. Прочие

## 3.3 Создание моделей корпусов

### 3.3.1 Возможности DYNAMICS R4

1. Возможность моделирования многосвязных пространственных упруго-инерционных систем корпусов
2. Неограниченное количество подсистем для моделирования составных корпусов
3. Неограниченное количество связей для моделирования соединений корпусов
4. Оценка локальных податливостей фланцевых соединений корпусов между собой
5. Использование оболочечных элементов для описания тонкостенных корпусов
6. Возможность включения в модель жесткостных характеристик не стержневых элементов конструкции, полученных в МКЭ расчетах
7. Возможность включения в модель безынерционных участков
8. Учет жесткостной не симметрии конструкции – пространственной и несимметричной подвески, пилона
9. Выделение не моделируемых жесткостными характеристиками инерционных узлов - камеры сгорания, реактивного сопла, агрегатов с заданием масс и моментов инерции в центрах тяжести выделенных объектов.
10. Возможность моделирования пространственного расположения вибрационных преобразователей датчиков вибраций на корпусе с любым направлением измерения сигнала

### 3.4 Создание моделей роторов вентилятора, компрессора, турбины

#### 3.4.1 Возможности DYNAMICS R4

1. Возможность моделирования консольных участков роторов
2. Использование цилиндрических и конических балочных элементов любой протяженности
3. Включение связей, моделирующих жесткостные свойства соединений
4. Включение связей, моделирующих участки роторов большой конусности матрицами жесткости, полученных в МКЭ
5. Включение связей с оценкой локальных податливостей фланцевых соединений матрицами жесткости, полученных в МКЭ
6. Использование шарнирных связей для моделирования шлицевых соединений

### 3.5 Модели опорных улов

#### 3.5.1 Возможности DYNAMICS R4

1. Подшипники радиально-упорные и радиальные
2. Подшипники двухточечные и трехточечные
3. Учет всех видов зазоров – монтажных, зазоров в подшипнике...
4. Моделирование жесткостных свойств подшипников в линейной и нелинейной постановке
5. Учет влияния осевой силы на жесткость подшипника
6. Определение жесткостных и демпфирующих характеристик демпферов различных типов центрированных, нецентрированных в линейной и нелинейной постановке
7. Моделирование опор роторов с разделением на силовую и упругую часть с демпфером

*Модели опорных узлов должны с высокой точностью описывать процессы в них происходящие, так как именно с ними связано создание оптимальной динамической структуры двигателя, обладающего низкой виброактивностью и стабильностью характеристик*

### 3.6 Основные требования к создаваемой расчетной модели

1. Возможность решения вышеперечисленных практических задач роторной динамики
2. Возможность предоставить информацию по массово-инерционным характеристикам выделенных узлов и их центрам масс, в том числе двигателя в целом
3. Возможность предоставить информацию по относительным перемещениям узлов двигателя
4. Возможность решать задачи упругих деформаций при статических нагрузках
5. Возможность проводить любые вариантные расчеты быстрой заменой жесткостных, демпфирующих, инерционных характеристик

6. Возможность проводить расчеты от различных распределений неуравновешенных сил
7. Возможность решать задачи динамики с учетом эволюционных нагрузок от ЛА

*Следует отметить, что ряд задач по исследованию влияния различных факторов на вибрационное поведение модели двигателя, может потребовать создания новой модели, хотя и с использованием некоторой базовой. В этом случае надо говорить именно о другой модели двигателя*

*Базовая расчетная модель, создаваемая для конкретного типа двигателя, дает некие усредненные характеристики для двигателя, находящегося в стабильном тепловом состоянии. Сегодня существует задача создания цифровой модели двигателя с конкретным номером, в котором его динамические характеристики могут существенно отличаться от базовой модели вследствие различного рода отклонений от номинальных размеров при изготовлении деталей, узлов и последующей сборке. Подготовка такой модели должна проводиться на основе некоего вибрационного паспорта конкретного двигателя, хотя бы на первом этапе, полученного при стендовых испытаниях двигателя.*

### **3.7 Требованиям к расчетным моделям и экспериментам с учетом необходимости дальнейшей верификации**

Требования диктуются необходимостью проведения валидации отдельных моделей по характеристикам, полученных в результате проведения специальных экспериментов. Модели, выделяемые для возможной верификации, показаны ранее в разделе 3.1.

Перечислим возможные экспериментальные работы, необходимые для валидации моделей двигателей. Эти же эксперименты необходимы для проверки стабильности производства узлов двигателя.

**За каждым экспериментом стоит необходимость создания методик проведения экспериментов, а также программы испытаний**

#### *3.7.1 Статические эксперименты*

1. Определение массово-инерционных характеристик моделируемых узлов (возможно через частичное взвешивание деталей и определение моментов инерции)
2. Определение упругих линий роторов, установленных на жесткие опоры, при действии поперечных нагрузок (определение влияющих на упругие свойства ротора соединений).
3. Определение податливости силовых стоек опор роторов (проверка МКЭ расчетов)
4. Определение податливости упругих элементов демпферных опор по двум направлениям (вертикальному и горизонтальному)
5. Определение центра массы двигателя (возможно использовать расчеты для проведения такелажных работ)
6. Определение податливости подвески двигателя



### 3.7.2 Динамические испытания без учета вращения роторов– модальные испытания.

1. Определение частот собственных колебаний валов роторов (возможно на балансировочном станке компании SCHENK)
2. Определение частот собственных колебаний и логарифмических декрементов сборок роторов (компрессора высокого давления, вентилятора) без опор
3. Определение частот собственных колебаний и логарифмических декрементов отдельныхборок статора
4. Определение собственных частот и форм колебаний всей корпусной катушки двигателя со стендовой подвеской без роторов с центральным дисбалансным возбуждением со стороны вентилятора и со стороны турбины

*Последняя позиция по динамическим экспериментам, несколько затратная по времени, и с учетом необходимости изготовления некоторой оснастки, даст максимально полную информацию о корпусе двигателя с выделением его “слабых мест”, а также в рамках сегодняшних требований по созданию цифровых двойников двигателей.*

### 3.7.3 Стендовые испытания двигателей

1. Проверка резонансных режимов по дроссельным характеристикам на разгоне и выбеге
2. Оценка резонансных режимов на выбеге роторов
3. Набор статистики по многим двигателям

## **3.8 Необходимость настройки расчетных моделей для двигателей с конкретным номером**

Эта задача становится необходимой с учетом того, что в практике каждый двигатель имеет уникальные динамические характеристики, связанные с производством. На сегодняшний день все расчетные модели создаются для типа двигателя и фактически являются осредненными с точки зрения его вибрационного состояния. Вместе с тем отклонение результатов измерений на стендах и в большей степени в эксплуатации, получаемых характеристик является достаточно существенным.

Каждый двигатель должен уходить со стенда не только с конкретным термодинамическим паспортом, но и с вибрационным паспортом (его форма и содержание отличается от содержания обычных протоколов испытаний двигателя), который в дальнейшем можно использовать, чтобы отслеживать изменения в вибрационном состоянии и в процессе эксплуатации.

## **4. СОЗДАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММЕ DYNAMICS R4 И ТРЕБОВАНИЯ К ЕЕ ПРОВЕРКЕ**

### **4.1 Моделирование роторной системы**

Моделирование важнейший этап в процессе инженерного анализа физической системы. Достаточно большое количество проверок должно быть проведено в процессе моделирования, чтобы предоставить конструктору модель, аккуратно рассчитывающую динамическое поведение конструкции. Если модель недостаточно точно моделирует

предложенную конструкцию, проведенный анализ и оценка по нему свойств конструкции не даст удовлетворительных результатов.

## 4.2 Основные этапы при подготовке расчетных моделей

Здесь приводятся основные этапы при проведении расчетных работ без сопровождения (верификации) получаемых результатов экспериментальными испытаниями (проводимых только при наличии и выделения для этих испытаний материальной части). Возможные испытания представлены в пункте 3.7

### 4.2.1 Этапы подготовки и уточнения статической модели двигателя

1. Подготовить упруго-инерционную модель всей сборки двигателя
2. Проверить распределение массовых и инерционных характеристик по двигателю с обязательной проверкой центров масс отдельных частей модели
3. Рассчитать жесткостные свойства подшипников качения – желательно с использованием пяти-степенных моделей подшипников. Для радиально упорных подшипников учесть действие осевой силы. Расчеты провести для всех основных режимов
4. Рассчитать статические реакции в подшипниковых узлах (включая статические нагрузки от силы веса, перекосов, гироскопических сил и т.д.) для всех режимов
5. Рассчитать упругие и демпфирующие свойства для упруго-демпферных сборок, используемых в опорах роторов (для всех основных режимов)
6. Рассчитать полные матрицы коэффициентов жесткости, не моделируемых стержневыми элементами (силовых частей корпусов опор роторов, силовых стоек, прочих конструкций). Учесть локальные податливости основных фланцевых и шлицевых соединений
7. Уточнить модель с учетом полученных результатов

### 4.2.2 Этапы подготовки динамической модели двигателя (расчет базисных наборов собственных частот и форм колебаний)

1. Определение недемпфированных частот собственных колебаний расчетной модели отдельных роторов, проверка ортогональности полученных форм колебаний.
2. Определение недемпфированных частот собственных колебаний расчетной модели отдельных корпусов, проверка ортогональности полученных форм колебаний.
3. Объединение моделей роторов и корпусов, расчет недемпфированных частот и форм собственных колебаний (без вращения роторов), проверка ортогональности форм колебаний

### 4.2.3 Этапы подготовки динамической модели двигателя (расчет критических частот и форм колебаний)

1. Определение скольжения роторов по режимам
2. Подготовка Кемпбелл диаграммы (диаграммы частот собственных колебаний)
3. Определение спектров критических частот вращения роторов
4. Определение “потерянных” форм колебаний при расчете критических частот вращения (от инерционных элементов малой массы между связями)

5. Определение распределений потенциальной энергии деформации и кинетической энергии по формам колебаний роторов, проведение анализа по положению изгибных форм колебаний, определение свойств ротора (“гибкий” или “жесткий”)
6. Через анализ распределения энергий оценить степень возбуждения форм колебаний, а также оценить наиболее влияющие элементы модели на положение критических частот вращения в общем спектре частот
7. Прочие варианты расчетов, оптимизирующие динамическую структуру двигателя, в том числе параметрический анализ

#### 4.2.4 Подготовка модели для расчета вынужденных колебаний

1. Анализ конструкторской документации с целью подготовки распределений начальных и сборочных дисбалансов, определение класса точности балансировки роторов
2. Определение остаточных дисбалансов, расстановка дисбалансов по длине роторов с учетом к каким классам роторов относятся исследуемые ротора
3. Расчет вынужденных колебаний от заданного распределения дисбалансов, анализ полученных результатов
4. Расчет в нестационарной постановке с целью учета от несинхронного возбуждения конструкции различными роторами, в том числе с учетом противовращения.

#### 4.2.5 Прочие задачи в соответствии с требованиями специалистов предприятия

1. Расчет динамических коэффициентов влияния (ДКВ) для подготовки процедур балансировки отдельных роторов
2. Подготовка технологических моделей для проведения верификации методами МКЭ и экспериментальными методами
3. Оценка устойчивости ротора: определение логарифмических декрементов или коэффициентов относительного демпфирования для всех форм колебаний в рабочем диапазоне скоростей; определение логарифмических декрементов для роторов, нагруженных аэродинамической возбуждающей силой, оцененной по формулам Алфорда, Вочела. Построение диаграммы устойчивости и оценка устойчивости роторов двигателя
4. Расчет крутильных колебаний: создание моделей для расчетов крутильных колебаний связанных систем роторов двигателя, оценка возможных источников возбуждений, построения диаграммы Кэмпбелла для крутильных колебаний, оценка форм и собственных частот крутильных колебаний. Для конвертированных двигателей наземного применения, работающих на генератор – моделирование аварийных ситуаций от короткого замыкания
5. Определение максимальных перемещений роторов двигателей от приложенных инерционных нагрузок, связанных с эволюциями самолета

Последовательность решаемых задач, перечисленных в разделе 4.2. может меняться в зависимости от получаемых результатов на каждой процедуре

Все технические особенности построения локальных моделей и связей между ними приведены в документации к программному комплексу DYNAMICS R4 (см. список источников)

## 5. СОЗДАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММЕ DYNAMICS R4 И ТРЕБОВАНИЯ К ЕЕ ПРОВЕРКЕ

Линейные модели важны, но всего лишь первый большой шаг к решению полной задачи о динамических свойствах реальной машины. Переход к нелинейной модели – следующий обязательный шаг, требующий не только наличия соответствующих возможностей используемой программы, но и высокой квалификации инженера - исследователя общей динамики двигателя. Только в этом случае можно достичь поставленной цели.

### 5.1 Общие требования архитектуре нелинейной модели

1. Первым безусловным этапом является создание линейной модели двигателя (рассмотрено выше) и замена в них линейных связей нелинейными.
2. Линейная модель изначально должна быть настроена на возможность решения задач в нестационарной постановке с нелинейными элементами.
3. С учетом сказанного требуется выделение в динамической структуре двигателя и его модели нелинейных элементов, оказывающих критическое влияние на вибрационные характеристики. Среди них – подшипники качения, гидродинамические демпферы, подшипники скольжения, газодинамические подшипники, перекосы роторов, касания ротора о статор и т.д.
4. Большинство элементов должны описываться упругими связями, имеющими нелинейные жесткостные и демпфирующие характеристики, которые зависят от режимов работы двигателя (частоты вращения роторов)
5. Использование частных нелинейных моделей элементов предполагает расчеты в нестационарной постановке с непосредственным интегрированием дифференциальных уравнений, описывающих движение системы. Такой анализ сопровождается большим временем расчетов.
6. В программе должна иметься возможность переходить к квазилинейной постановке решения задачи через линеаризацию параметров. В последнем случае используется линейная модель с дискретно изменяемыми по времени характеристиками.
7. Характеристики элементов могут рассчитываться либо в теле основной программы (если они там присутствуют как элементы, чаще в специализированных программах по типу DYNAMICS R4) либо в отдельных от программы (внешних) калькуляторах. Последний вариант обычно использует передачу полученных от калькуляторов данных в программу “ручным способом” с большими потерями времени.

### 5.2 Требования к функциям проверки нелинейной модели

1. Временные характеристики, полученные в нестационарных расчетах, должны обрабатываться и иметь функции по аналогии с анализаторами временных сигналов, используемых при измерении вибраций – как во временной области, так и в частотной.
8. Получаемые спектральные характеристики модели (частоты собственных колебаний) для выделенных режимов желательно согласовывать с аналогичными спектрами, полученными в экспериментальных исследованиях – то есть проводить валидацию модели, хотя бы по основным частотам собственных колебаний).

9. Этап валидации нелинейной модели достаточно трудоемок и требует проведения исследовательских и аналитических работ по определению нелинейных характеристик выделенных в двигателе узлов

*Проведение модальных испытаний узлов двигателя, специальных экспериментальных работ по определению динамических характеристик узлов и двигателя на стендах, либо на специально подготовленных экспериментальных установках – является неотъемлемой частью работ конструкторских бюро при создании и доводке машин новых поколений*

### **5.3 Основные этапы подготовки нелинейных элементов, для включения в модели**

1. Нелинейная модель, как уже было отмечено, строится на базе линейной модели, осредненной после ее валидации с учетом статистической информации по некоторому парку двигателей.
2. В программном продукте должна существовать библиотека элементов, построенные специально для нелинейных расчетов – подшипников различных типов (качения, гидродинамических, газодинамических, активных магнитных), гидродинамических демпферов (центрированных, нецентрированных), демпферов сухого трения, шлицевых соединений, зубчатых зацеплений и т.д.
3. Как правило, расчеты с применением таких элементов должны сопровождаться намерением инженера использовать полученные результаты для перехода к квазилинейной постановке задачи.
4. Проверка правильности построенной квазилинейной модели проводится по результатам отдельных расчетов в нелинейной постановке
5. Переход к квазилинейной модели отдельных узлов (получение жесткостных и демпфирующих матриц) и их передача в модель роторной системы должен проводиться в автоматическом режиме для исключений “ручной” работы, часто страдающей ошибками передачи и большим временем.
6. В нелинейной постановке результатом являются временные характеристики, которые должны обрабатываться (ранее было сказано) теми же методами, которые инженеры используют в анализе экспериментально полученных данных. Отсюда и требования к инструментарию программ
7. Квазилинейная постановка дает возможность, уточняя характеристики нелинейных опорных узлов, проводить анализ в стационарной постановке. Например, получать частоты и формы собственных колебаний, меняющихся по режимам. Проводить углубленный параметрический анализ.

*Конечно, данный материал можно дополнять и развивать с учетом того, что практическая сторона решаемых задач роторной динамики неисчерпаема. Но авторы надеются, что их многолетний опыт даже в этом малом изложении может понадобиться как молодым инженерам, так и достаточно квалифицированным в роторной динамике вращающихся машин.*

## **6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Представлена общая стратегия подготовки динамических моделей газотурбинных двигателей для анализа общих вибраций независимо от того в каком программном продукте работает инженер

2. Программный продукт, которым сегодня должен пользоваться конструктор, должен позволять создавать модели для учета многообразия особенностей конструкции газотурбинного двигателя, позволяя реализовывать его реальную динамическую структуру.
3. Расчетная модель должна быть валидирована перед ее использованием и, как минимум, подготовлена к решению стандартных задач, встречающихся в практике, как в линейной постановке, так и нелинейной.
4. Модели опорных узлов роторов должны с высокой точностью описывать вибрационные процессы в них происходящие, так как именно с ними связано создание оптимальной динамической структуры двигателя, обладающего низкой виброактивностью и стабильностью характеристик

## **7. СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Программная система для решения задач роторной динамики «DYNAMICS R4». Общество с ограниченной ответственностью "Альфа-Транзит", Роспатент. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018614888 от 19.04.2018 г.
2. Руководство пользователя, ООО "Альфа-Транзит", 2021 г - С. 260.
3. Методические указания по подготовке расчетных моделей в DYNAMICS R4, ООО "Альфа-Транзит", 2021 г – С. 97.
4. Учебное пособие. ООО "Альфа-Транзит", 2021 г - 153 стр.
5. API Standard Paragraphs Rotordynamic Tutorial: Lateral Critical Speeds, Unbalance Response, Stability, Train Torsionals, and Rotor Balancing. API RECOMMENDED PRACTICE 684. SECOND EDITION, AUGUST 2005