

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра авиационных двигателей

**АННОТАЦИЯ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ**

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

**«ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЙ АВИАСТРОЕНИЯ»**

Уровень подготовки  
высшее образование - магистратура

Направление подготовки (специальность)  
24.04.04 Авиастроение

Направленность подготовки (профиль, специализация)  
Самолето-вертолетостроение

Квалификация (степень) выпускника  
магистр

Форма обучения  
очная

Уфа 2015

Исполнитель:  
Профессор

должность



подпись

А.С. Гишваров  
расшифровка подписи

Заведующий кафедрой  
авиационных двигателей  
наименование кафедры



личная подпись

А.С. Гишваров  
расшифровка подписи

## Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Жизненный цикл изделий авиационного назначения» является дисциплиной по выбору вариативной части и относится к перечню обязательных дисциплин.

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 24.04.04 – «Авиационное» (профиль: «Самолето- и вертолетостроение»), утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от "06" марта 2015 г. № 171.

**Целью освоения дисциплины** является формирование систематизированных знаний основ жизненного цикла изделий авиационного назначения, включая этапы проектирования, доводки, производства и эксплуатации.

### Задачи:

- совершенствование знаний студента в области разработки современных АД и ЭУ с применением моделирования их жизненного цикла.
- изучение особенностей моделирования жизненного цикла сложных технических объектов.
- формирование знаний по повышению эффективности основных этапов жизненного цикла изделий авиационного назначения.
- формирование навыков моделирования жизненного цикла изделий авиационного назначения.

### Входные компетенции:

| № | Компетенция  | Код  | Уровень освоения, определяемый этапом формирования компетенции* | Название дисциплины (модуля), практики, научных исследований сформировавших данную компетенцию |
|---|--|------|---|--|
| 1 | Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских задач, в том числе, в междисциплинарных областях. | УК-1 | Базовый уровень   | Современные проблемы авиационного двигателестроения и энергетического машиностроения           |

### Исходящие компетенции:

| № | Компетенция  | Код   | Уровень освоения, определяемый этапом формирования компетенции | Название дисциплины (модуля), практики, научных исследований для которых данная компетенция является входной |
|---|--|-------|--|--|
| 1 | Наличие представления о системе поддержки жизненного цикла авиационного изделия. | ОПК-2 | Базовый уровень  | Научно-исследовательская работа  |

## Перечень результатов обучения

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов следующих компетенций.

Планируемые результаты обучения по дисциплине

| № | Формируемые компетенции  | Код   | Знания  | Умения  | Владения   |
|---|--|-------|---|---|--|
| 1 | Наличие представления о системе поддержки жизненного цикла авиационного изделия. | ОПК-2 | основных этапов жизненного цикла изделий авиастроения | использовать знания для анализа эффективности основных этапов жизненного цикла изделий авиастроения | навыками проведения исследования и выбора методов повышения эффективности разрабатываемых и эксплуатируемых изделий авиастроения на основных этапах жизненного цикла |

## Содержание и структура дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единиц (144 часа).

Трудоемкость дисциплины по видам работ

| Вид работы   | Трудоемкость, час. |
|--|--------------------|
|  | 1 семестр          |
| Лекции (Л)   | 20                 |
| Практические занятия (ПЗ)  | 12                 |
| Лабораторные работы (ЛР)   | –                  |
| КСР  | 4                  |
| Курсовая проект работа (КР)  | –                  |
| Расчетно - графическая работа (РГР)  | –                  |
| Самостоятельная работа (проработка и повторение лекционного материала и материала учебников и учебных пособий, подготовка к лабораторным и практическим занятиям, коллоквиумам, рубежному контролю и т.д.) | 99                 |
| Подготовка и сдача экзамена  | –                  |
| Подготовка и сдача зачета  | 9                  |
| Вид итогового контроля (зачет, экзамен)  | зачет              |

Содержание разделов и формы текущего контроля

| № | Наименование и содержание раздела  | Количество часов  |    |    |     |     |       | Литература, рекомендуемая студентам | Виды интерактивных образовательных технологий**                    |
|---|--|-------------------|----|----|-----|-----|-------|-------------------------------------|--|
|   |  | Аудиторная работа |    |    |     | СРС | Всего |                                     |  |
|   |  | Л                 | ПЗ | ЛР | КСР |     |       |                                     |  |
| 1 | <p><b>Виды моделирования. Моделирование жизненного цикла авиационных ГТД на основе статистических и аналитических моделей.</b><br/>                     Математические модели. Физические модели. Смешанные модели. Статистические модели. Аналитические модели. Методы моделирования при исследовании систем и процессов. Моделирование жизненного цикла авиационных ГТД на основе статистических и аналитических моделей.</p>        | 2                 | -  | -  | 1   | 14  | 17    | Р 6.1 - № 2                         | лекция-визуализация, проблемное обучение, обучение на основе опыта |
| 2 | <p><b>Особенности имитационного моделирования.</b><br/>                     Особенности имитационного моделирования. Метод статических испытаний и структура исследования систем с применением имитационного моделирования. Общие требования и правилам имитационного моделирования. Основные этапы имитационного моделирования. Структура имитационной модели жизненного цикла двигателя при оптимизации его ресурсных испытаний.</p> | 2                 | -  | -  | 1   | 14  | 17    | Р 6.1 - № 1, №2                     | лекция-визуализация, проблемное обучение, обучение на основе опыта |
| 3 | <p><b>Основные показатели и критерии эффективности жизненного цикла двигателей и энергоустановок.</b><br/>                     Основные понятия эффективности. Собственные показатели и критерии эффективности испытаний двигателя. Несобственные показатели и критерии эффективности, характеризующие</p>   | 2                 | -  | -  | -   | 14  | 16    | Р 6.1 - № 2                         | лекция-визуализация, проблемное обучение, обучение на основе опыта |

|   |  |   |   |   |   |    |    |                  |  |
|---|--|---|---|---|---|----|----|------------------|--|
|   | <p>эксплуатационные издержки, эффективность капитальных вложений и удельные затраты. Несобственные показатели и критерии эффективности, характеризующие прибыль, рентабельность и затраты на эксплуатацию. Несобственные показатели и критерии эффективности, характеризующие годовой экономический эффект от повышения надежности и удельные затраты. Несобственные показатели и критерии эффективности, характеризующие прямые эксплуатационные расходы, амортизацию, надежность и полные затраты за время эксплуатации. Несобственные показатели и критерии эффективности, характеризующие исправление брака в эксплуатации и прибыль изготовителя.</p> |   |   |   |   |    |    |                  |  |
| 4 | <p><b>Опыт применения моделирования жизненного цикла при проектировании и доводке двигателей и энергоустановок.</b><br/>         Применение моделирования при проектировании двигателей фирмой Пратт-Уитни. Применение моделирования при проектировании двигателя тактического истребителя ATAMS. Применение моделирования при оптимизации системы «самолет-двигатель». Проектирование двигателя применением модели DEVSIM. Применение модели двигателя при оптимизации его параметров на этапах проектирования и доводки.</p>   | 2 | - | - | - | 14 | 16 | Р 6.1 - № 2      | лекция-визуализация, проблемное обучение, обучение на основе опыта |
| 5 | <p><b>Применение моделирования жизненного цикла при производстве и испытаниях двигателей и энергоустановок.</b><br/>         Применение моделирования при оптимизации кратковременных и длительных испытаний</p>   | 4 | 2 | - | - | 14 | 20 | Р 6.1 - № 1, № 2 | лекция-визуализация, проблемное обучение, обучение на              |

|   |   |    |    |   |   |    |     |                                 |  |
|---|---|----|----|---|---|----|-----|---------------------------------|--|
|   | двигателя. Краткая характеристика двигателя и основные данные для оптимизации его длительных (периодических)испытаний. Имитационное моделирование производства двигателя. Имитационное моделирование расходования ресурса «критичных» элементов двигателя и моделирование периодических испытаний. Имитационное моделирование эксплуатации двигателя. Оптимизация параметров периодических испытаний двигателя. Сравнительная оценка эффективности серийной и опытной программ испытаний двигателя. |    |    |   |   |    |     |                                 | основе опыта   |
| 6 | <b>Применение моделирования жизненного цикла при оптимизации эксплуатации двигателей и энергоустановок.</b><br>Особенности формирования имитационной модели процесса эксплуатации двигателя. Перечень задач, решаемых с применением имитационного моделирования процесса эксплуатации. Моделирование эксплуатационной повреждаемости двигателей. Применение имитационного моделирования для перспективного планирования в гражданской авиации.  | 4  | 4  | - | - | 14 | 22  | Р 6.1 - № 1, № 2                | лекция-визуализация, проблемное обучение, обучение на основе опыта |
| 7 | <b>Основы имитационного моделирования двигателей и энергоустановок в системе AnyLogic.</b><br>Общие понятия, сведения. Основные средства создания моделей. Эксперименты с моделью. Анимация модели. Графики и слайды в анимации. Доработка модели. Основные концепции.  | 4  | 6  | - | 2 | 15 | 27  | Р 6.1 - № 2<br>Р 6.2 - № 1, № 2 | лекция-визуализация, проблемное обучение, обучение на основе опыта |
|   | <b>Итого</b>  | 20 | 12 | - | 4 | 99 | 135 |                                 |  |

Занятия, проводимые в интерактивной форме, составляют 100% от общего количества аудиторных часов по дисциплине "Моделирование процессов жизненного цикла двигателей и энергоустановок".

## Практические занятия (семинары)

| № занятия | № раздела | Тема  | Кол-во часов |
|-----------|-----------|---|--------------|
| 1         | 7         | Модель двигателя на AnyLogic. Режим выполнения модели.              | 2            |
| 2         | 7         | Работа с окнами. Доработка модели.                                  | 2            |
| 3         | 7         | Средства AnyLogic. Построение модели циклического процесса.         | 2            |
| 4         | 5         | Моделирование качества производства «критичных» элементов двигателя | 2            |
| 5         | 6         | Моделирование процессов расходования ресурса двигателя.             | 2            |
| 6         | 6         | Моделирование эксплуатации двигателя.                               | 2            |

### Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

#### Основная литература

1\*. Сиротин Н.К., Марчуков Е.Ю., Сиротин А.Н., Агульник А.Б. Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе LALS Кн.3: Эксплуатация и надежность ГТД и ЭУ. - М.: Наука, 2012. - 616 с.

2. Гишваров, А. С. Моделирование процессов жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок : [учебное пособие для студентов высших учебных заведений РФ, обучающихся по специальности 160301 "Авиационные двигатели и энергетические установки"] / А. С. Гишваров .— Уфа : УГАТУ, 2008 .— 276 с.

3. Гишваров, А. С. Оптимизация ресурсных испытаний технических систем имитационным моделированием в системе жизненного цикла / А. С. Гишваров ; Академия наук Республики Башкортостан, отделение технических наук .— Уфа : Гилем, 2003 .— 328 с.

\* издание находится на реализующей рабочую программу кафедре.

#### Дополнительная литература

1. Гишваров, А. С. Имитационное моделирование в системе ANYLOGIC. Изучение приемов работы / А. С. Гишваров, М. Н. Давыдов ; Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ), Кафедра авиационных двигателей .— Уфа : УГАТУ, 2008 .— 66 с.

2. Гишваров, А. С. Лабораторный практикум по дисциплине "Моделирование процессов жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок" / А. С. Гишваров ; Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ), Кафедра авиационных двигателей .— Уфа : УГАТУ, 2008 .— 66 с.

#### Интернет-ресурсы (электронные учебно-методические издания, лицензионное программное обеспечение)

На сайте библиотеки УГАТУ <http://library.ugatu.ac.ru/> в разделе «Информационные ресурсы», подраздел «Доступ к БД» размещены ссылки на интернет-ресурсы.

- Операционная система Windows 7;

- Интегрированный пакет Microsoft Office 2007;
- Программное обеспечение "Статистика";
- Программное обеспечение CFX.

### **Методические указания к практическим занятиям**

Учебной программой предусмотрено проведение шести 2-х часовых практических занятий, которые совместно с лекционным материалом (лекция 7: «Основы имитационного моделирования в системе AnyLogic») носит установочный характер. Практические занятия посвящены изучению языка программирования AnyLogic. Изучение проводится по практикуму «Имитационное моделирование в системе AnyLogic. Изучение приемов работы».

Первая часть практикума включает 3 практических занятия и посвящена ознакомлению с основными понятиями имитационного моделирования в среде AnyLogic.

Вторая часть практикума включает 3 занятия и посвящена решению задач.

#### **Занятие 1. Модель двигателя на AnyLogic. Режим выполнения модели.**

Осваивается умение приемов работы в AnyLogic:

- первая модель на AnyLogic (структурная диаграмма; окна свойств объектов модели; окно поведения активного объекта; окно редактора анимации);
- режим выполнения модели (запуск модели, управление скоростью выполнения модели с изображением; автоматическое обновление окна анимации; предварительные эксперименты с моделью).

#### **Занятие 2. Работа с окнами. Доработка модели.**

Осваивается умение приемов работы в AnyLogic:

- работа с окнами;
- доработка модели (изменение цвета оболочки в анимации; введение второй оболочки в модель; произвольные перемещения оболочки).

#### **Занятие 3. Средства AnyLogic.**

Осваивается умение определять:

- основные концепции AnyLogic (две фазы имитационного моделирования; активные объекты, классы и экземпляры активных объектов; средства описания поведения объектов; имитация нескольких параллельно протекающих процессов; модельное и реальное время; анимация поведения модели; интерактивный анализ модели);
- запуск и проигрывание других моделей.

#### **Занятия 4,5,6. Моделирование качества производства, процессов расхода ресурса двигателя и моделирование эксплуатации двигателя.**

Ознакомление с методологией имитационного моделирования в системе AnyLogic является начальным этапом перед проведением лабораторных занятий по моделированию процессов жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок.

В процессе проведения установочной лекции и проведения практического занятия необходимо, студентам пояснить, что программный инструмент AnyLogic – продукт нового поколения для разработки и исследования имитационных моделей. Он является единственным российским профессиональным инструментом имитационного моделирования, успешно конкурирующим на мировом рынке. AnyLogic был разработан недавно на основе новых идей в области информационных технологий, теории параллельных взаимодействующих процессов и теории гибридных систем. Эти новые идеи позволяют строить сложные имитационные модели, сохраняя контроль над

разработкой. AnyLogic является очень удобным, гибким и мощным средством для решения с помощью имитационного моделирования широкого круга проблем для технических систем и процессов самой различной природы. Возможность использования одного инструмента при изучении различных парадигм и стилей моделирования делает этот инструмент незаменимым при изучении в вузе дисциплины “Моделирование процессов жизненного цикла авиационных двигателей и энергоустановок”.

Программный инструмент AnyLogic основан на объектно-ориентированной концепции. Объектно-ориентированный подход к представлению сложных систем является лучшим на сегодняшний день методом управления сложностью информации, эта концепция позволяет простым и естественным образом организовать и представить структуру сложной системы. Таким образом, идеи и методы, направленные на управление сложностью, выработанные в последние десятилетия в области создания программных систем, позволяют разработчикам моделей в среде AnyLogic организовать мышление, структурировать разработку и, в конечном счете, упростить и ускорить создание моделей.

Другой базовой концепцией AnyLogic является представление модели как набора взаимодействующих параллельно функционирующих активностей. Такой подход к моделированию интуитивно очень понятен и естественен во многих приложениях, поскольку системы реальной жизни состоят из совокупности активностей, взаимодействующих с другими объектами. Активный объект в AnyLogic – это объект со своим собственным функционированием, взаимодействующий с окружением. Он может включать в себя любое количество экземпляров других активных объектов. Активные объекты могут динамически порождаться и исчезать в соответствии с законами функционирования системы. Так могут моделироваться транспортные системы и т. п.

Графическая среда моделирования AnyLogic поддерживает проектирование, разработку, документирование модели, выполнение компьютерных экспериментов с моделью, включая различные виды анализа – от анализа чувствительности до оптимизации параметров модели относительно некоторого критерия.

В результате AnyLogic не ограничивает пользователя одной-единственной парадигмой моделирования, что является характерным фактически для всех инструментов моделирования, существующих сегодня на рынке. В AnyLogic разработчик может гибко использовать различные уровни абстрагирования, различные стили и концепции, строить модели в рамках той или иной парадигмы и смешивать их при создании одной и той же модели, использовать ранее разработанные модули, собранные в библиотеки, дополнять и строить свои собственные библиотеки модулей. При разработке модели на AnyLogic можно использовать концепции и средства из нескольких "классических" областей моделирования, например, в агентной модели использовать методы системной динамики для представления изменений состояния среды или в непрерывной модели динамической системы учесть дискретные события. Например, анализ ИТ-инфраструктуры компании (анализ производительности серверов, узких мест локальной сети и т. п.), который легко производится с помощью методов дискретного событийного моделирования, имеет немного пользы, если в модели не отражено влияние возможных изменений параметров этой инфраструктуры на бизнес-процессы и, в конечном счете, на прибыль компании, а такая связь в модели не может быть реализована только средствами дискретно-событийного моделирования. В AnyLogic легко строятся подобные модели с требуемым уровнем адекватности, позволяющие ответить на многие вопросы, интересующие исследователя. Богатые возможности анимации и визуального представления результатов в процессе работы модели позволяют понять суть процессов, происходящих в моделируемой системе, упростить отладку модели.

Удобный интерфейс и многочисленные средства поддержки разработки моделей в AnyLogic делают не только использование, но и создание компьютерных имитационных моделей в этой среде моделирования доступными даже для начинающих.

## Методические указания к практическим занятиям 4,5,6

Занятия проводятся с использованием лабораторного практикума «Моделирование процессов жизненного цикла авиационных двигателей и энергоустановок»

Данный практикум предназначен для проведения лабораторных занятий по моделированию, исследованию и оптимизации авиационных двигателей и энергоустановок с применением имитационного моделирования жизненного цикла.

Учитывая наличие у студентов опыта по моделированию двигателей на этапе проектирования, который они приобрели при изучении таких дисциплин как «Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок», «Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок», «Системы автоматизированного проектирования авиационных двигателей и энергетических установок» и др., в практикуме основное внимание уделено моделированию задач с имитацией таких этапов жизненного цикла как «производство – испытания – эксплуатация».

Моделирование проводится в системе ANYLOGIC, ознакомление с которой проводится студентами по лабораторному практикуму «Имитационное моделирование в системе ANYLOGIC. Изучение приемов работы».

Объектом моделирования является авиационный вспомогательный ГТД (ВГТД) ТА-6А.

Имитационная модель ГТД является авторской разработкой, не имеет аналогов и разработана по реальным данным ВГТД ТА-6А.

Вспомогательный газотурбинный двигатель ТА-6А устанавливается на самолетах Ту-154, Ту-154М, Ил-62 и др. Данный двигатель производится в ФГУП УАП «Гидравлика» (г. Уфа), разработчик – КБ машиностроения (г. Ступино, Московская обл.). Имитационная модель двигателя включает «критичные» элементы двигателя, т.е. элементы с наименьшей несущей способностью по основным факторам разрушения (длительной прочности, малоцикловой прочности, контактной прочности, тепловому старению):

- рабочей лопатки 1-й ступени турбины;
- радиально-упорного подшипника ротора;
- ведущей шестерни редуктора;
- подшипника вентилятора;
- изоляции генераторов переменного и постоянного токов.

Условия и режим нагружения двигателя задаются:

- температурой воздуха на входе в двигатель  $t_n$ , °С;
- относительной частотой вращения ротора  $n$ , %;
- количеством воздуха, отбираемого за компрессором  $G_{отб}$ , кг/с;
- расходом охлаждающего воздуха через вентилятор  $G_{вент}$ , кг/с;
- загрузкой генераторов переменного и постоянного токов  $N_{г1}$  (кВт) и  $N_{г2}$  (кВА).

Область реализации режима нагружения двигателя:

$$80 \leq n \leq 102\%; \quad 0 \leq t_n \leq 50 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad 0,7 \leq G_{отб} \leq 1,4 \text{ кг/с};$$
$$0 \leq N_{г1} \leq 16 \text{ кВт}; \quad 0 \leq N_{г2} \leq 100 \text{ кВА}; \quad 0,5 \leq G_{вент} \leq 1,0 \text{ кг/с}.$$

Ресурс двигателя – 2000 ч и 3000 запусков.

Имитационная модель жизненного цикла двигателя формировалась с учетом данных предприятия-разработчика «КБ машиностроения» (г. Ступино, Московская обл.),

ГосНИИ ГА (г. Москва), предприятия-изготовителя - ФГУП УАП «Гидравлика» (г. Уфа) и ОКБ «Гидромеханика» (г. Уфа).

Укрупненная структура имитационной модели, реализующей этапы жизненного цикла «производство – испытания – эксплуатация» включает:

- модель производства, имитирующая параметры качества изготовления  $P_{0ij} = [p_{01}, \dots, p_{0v}]^T_{ij}$  «критичных» элементов двигателя;
- модель периодических испытаний, имитирующая испытания двигателя в режимах  $R_n(\tau_n)$  длительностью  $\tau_n$ . Результатом моделирования является конечное состояние испытанного двигателя и принимаемое решение о браковке или отгрузке  $N_{отгр,i}$  двигателей в эксплуатацию;
- модель эксплуатации, имитирующая выработку ресурса двигателей в режимах  $R_{эk}(\tau_{эk})$  длительностью  $\tau_{эk}$  ( $k = \overline{1, N_{э}}$ ).

Моделирование жизненного цикла возможно для двух случаев эксплуатации двигателей:

- по фиксированному ресурсу;
- по техническому состоянию.

#### **Практическое занятие №4 «Моделирование качества производства «критичных» элементов двигателя»**

В системе жизненного цикла двигателя этап производства предшествует этапу его сборки и испытания.

Технология изготовления, сборки и контроля двигателя является одним из основных факторов, позволяющих с максимальной производительностью и наименьшими затратами обеспечивать его качество и, как следствие, высокие показатели надежности (ресурс, вероятность безотказной работы и др.). При этом качество изделия, как правило, оценивается не одним, а несколькими показателями, задаваемыми в виде вектора параметров качества  $P_0 = [p_{01}, \dots, p_{0v}]^T$ . Часть параметров вектора  $P_0$  позволяет расчетным методом прогнозировать надежность и ресурс деталей двигателя в эксплуатации.

##### **Цель занятия:**

1. Ознакомление с основными параметрами, характеризующими качество производства «критичных» элементов двигателя.
2. Приобретение навыков имитационного моделирования качества производства «критичных» элементов двигателя при формировании имитационной модели его жизненного цикла.

##### **Теоретическая часть**

Моделирование качества производства «критичных» элементов двигателя ТА-6А проводится следующим образом.

Моделируемыми являются средние значения и допуски параметров:

- константы  $A$  и  $B$  уравнения длительной прочности материала ЖС6-К рабочей лопатки турбины;
- константы  $C$  и  $k$  уравнения малоциклового прочности материала рабочей лопатки турбины;
- площадь сечения  $S$  рабочей лопатки 1-й ступени турбины;
- начальный радиальный зазор  $e_{01}$  радиально-упорного подшипника ротора;
- динамическая грузоподъемность  $C_{B1}$  радиально-упорного подшипника ротора;
- посадочный диаметр вала под подшипник  $D_{B1}$ ;
- ширина зубьев  $b_w$  ведущей шестерни редуктора;
- шероховатость поверхности зуба  $R_Z$  шестерни редуктора;
- предел контактной выносливости  $\sigma_{HE}$  материала шестерни редуктора;
- начальный радиальный зазор  $e_{02}$  подшипника вентилятора;

- динамическая грузоподъемность  $C_{B2}$  подшипника вентилятора;
- посадочный диаметр вала вентилятора  $D_{B2}$  под подшипник;
- дисбаланс ротора вентилятора  $G_r$ ;
- показатель степени термостойкости  $m$  материала обмоток генераторов переменного и постоянного токов.

Подогрев воздуха в вентиляторе  $\Delta T_v$  определялся расчетом по его рабочей характеристике.

Моделируемыми величинами также являются:

- объем партии выпускаемых двигателей  $N$ , в зачет которой проводятся периодические испытания;
- порядковый номер двигателя  $i$  ( $i = \overline{1, N}$ ).

#### **Задания**

Необходимо с использованием системы Anylogic 5 выполнить моделирование качества производства «критичных» элементов двигателя ТА-6А.

*Примечание:* студенты получают задания, выдаваемые преподавателем и отличающиеся: «критичным» элемент(ами) двигателя, номинальными значениями параметров качества производства, а также интервалом допустимых значений.

#### **Методика выполнения задания:**

1. В системе Anylogic 5 формируется программа моделирования качества производства «критичных» элементов двигателя с использованием датчиков случайных чисел, распределенных по нормальному и равномерному законам распределения.

2. Индивидуального для каждого студента преподавателем задаются:

- номинальные значения параметров качества производства «критичных» элементов двигателя;
- интервал допустимых значений параметров;
- закон распределения параметра и объём выборки ( $M=50; 100; 200; 300; 400; 500$ ).

3. С использованием программы, разработанной в п.1, моделируется процесс качества производства элементов двигателя с выводом на экран монитора или на печать гистограммы распределений параметров качества производства элементов двигателя, а также оценки параметров (математическое ожидание; дисперсия; стандартное и среднее отклонения; коэффициенты асимметрии, эксцесса и вариации).

#### **Требования к содержанию и оформлению результатов занятия.**

Отчёт по работе оформляется письменно в произвольной форме с обязательным включением:

- наименования и цели работы;
- кратко изложенной теоретической части;
- результатов моделирования в виде гистограммы и оценок параметров качества производства «критичных» элементов двигателя;
- рекомендаций по повышению качества «критичных» элементов двигателя.

#### **Практическое занятие №5 «Моделирование процессов расходования ресурса двигателя»**

Моделирование процессов расходования ресурса производится имитацией накопления повреждаемости «критичными» элементами двигателя в зависимости от качества их изготовления, условий окружающей среды и условий нагружения в испытаниях (эксплуатации).

#### **Цель занятия:**

1. Ознакомление с последовательностью расчётной оценки расходуемого ресурса рабочей лопатки турбины и радиально-упорного подшипника ротора двигателя.
2. Приобретение навыков по имитационному моделированию процессов расходования ресурса двигателя.

### **Теоретическая часть**

Параметрами исходного состояния, влияющими на повреждаемость рабочей лопатки турбины, являются предел длительной прочности  $[\sigma_r^T]$  и площадь сечения лопатки  $S$ , соответствующая максимальному напряжению  $\sigma_{\max}$ .

Параметрами ротора исходного состояния, влияющими на повреждаемость радиально-упорного подшипника, являются:

- динамическая грузоподъёмность  $S_v$ , распределенная в интервале 3968...4064 Н по равномерному закону с номинальным значением  $\bar{S}_v = 4016$  Н;
- исходный радиальный зазор  $e_0$ , распределенный в интервале 10...29 мкм по нормальному закону с номинальным значением  $\bar{e}_0 = 18$  мкм;
- посадочный диаметр вала  $d$ , распределенный в интервале 55,011...55,019 мм по нормальному закону с номинальным значением  $\bar{d} = 55$  мм;
- посадочный диаметр корпуса  $D$ , распределенный в интервале 100...100,08 мм по нормальному закону с номинальным значением  $\bar{D} = 100$  мм.

### **Задания:**

Каждое задание состоит из двух частей:

- 1) требуется сформировать имитационную модель расходования ресурса двигателя в системе Anylogic 5;
- 2) провести моделирование расходования ресурса двигателя с применением разработанной имитационной модели расходования ресурса двигателя.

*Примечание:* студенты получают варианты заданий, выдаваемые преподавателем.

### **Методика выполнения задания**

Порядок выполнения задания следующий:

- 1) ознакомление с методикой моделирования расходования ресурса рабочей лопатки турбины и радиально-упорного подшипника ротора двигателя;
- 2) построение в среде Anylogic модели расходования ресурса лопатки и подшипника;
- 3) оценка моделированием в соответствии с выданном вариантом задания;
- 4) построение по результатам моделирования графиков зависимости выработки ресурса лопатки и подшипника от режима нагружения и качества их изготовления;
- 5) решение задачи по оптимизации расходования ресурса (в пределах заданных интервалов по режиму нагружения и качеству изготовления деталей). Определение минимального и максимального значений выработанного ресурса лопатки и подшипника.

### **Требования к содержанию и оформлению результатов занятия.**

Отчёт по работе оформляется в произвольной форме с обязательным включением:

- наименования и цели работы;
- кратко изложенной теоретической части;
- результатов моделирования расходования ресурса лопатки и подшипника для заданных режимов эксплуатации и исходного состояния, сформированного в процессе их производства;
- рекомендаций по оптимизации расходования ресурса лопатки и подшипника в эксплуатации.

### **Практическое занятие №6 «Моделирование эксплуатации двигателя»**

Имитационное моделирование процесса эксплуатации и авиационных двигателей применяется:

- для оценки стоимости их жизненного цикла;
- для обоснования стратегии эксплуатации;
- при выборе путей реализации требований по обеспечению безопасной эксплуатации;
- при решении организационных вопросов по поставке и прогнозированию потребностей.

В данном случае разработка имитационной модели предполагает решение следующих задач:

- идентификацию процессов в системе эксплуатации летательных аппаратов (ЛА) и авиационных двигателей (АД), анализ и характеристику элементов, включенных в эти процессы, их структур и взаимосвязей;
- формализацию, т.е. построение математической модели исследуемого процесса;
- реализацию разработанной модели на ЭВМ.

Разработка модели базируется на принципах:

- системного подхода;
- обеспечения необходимого разнообразия модели, т.е. обеспечения того, чтобы полнота воспроизведения исследуемой системы в модели соответствовала требованиям, вытекающим из цели проводимого исследования;
- декомпозиции системы на отдельные подсистемы вплоть до уровня элементов;
- отслеживания “жизни” каждого элемента системы.

#### **Цель занятия:**

1. Ознакомление с методами моделирования эксплуатации двигателей.
2. Приобретение навыков моделирования эксплуатации двигателя в системе AnyLogic 5 и решение практических задач с применением разработанной модели.

#### **Теоретическая часть:**

Моделирование эксплуатации основано на оценке аргумента, характеризующего эксплуатационную повреждаемость элементов двигателя. Значения этого аргумента зависят от особенностей эксплуатации рассматриваемого двигателя. В общем случае, эксплуатация определенной партии (парка) изделий протекает в некоторой допустимой области режимов нагружения изделия и внешних условий, т.е.  $\tilde{\Pi}_{\Xi ij} [R_{\Xi}(\tau_{\Xi}), \tau_{\Xi}]$ . Поэтому при оптимизации ресурсных испытаний необходимо вначале уточнить принятое правило оценки повреждаемости. В частности, для авиационных ГТД возможны 9 методов моделирования эксплуатационной повреждаемости.

Окончательный выбор метода моделирования эксплуатации зависит от особенностей применения двигателя на объекте, объема имеющейся информации, требований к достоверности оценки надежности и ресурса изделия и других факторов.

#### **Задания:**

1. Формирование имитационной модели эксплуатации двигателя.
2. Моделирование эксплуатации двигателя с применением сформированной модели.

#### **Методика выполнения задания**

Моделирование проводится с учётом эксплуатационной повреждаемости рабочей лопатки турбины двигателя.

Параметрами модели являются:

- объем парка эксплуатируемых двигателей  $N_{\Xi}$ ;
- ресурс двигателя по наработке  $\tau_{рес}$  и количеству запусков  $Z$ ;
- критическое значение повреждаемости  $\Pi_i^*$  ( $i = \overline{1, n}$ );

- затраты на устранение отказов двигателя в эксплуатации  $Z_{отк.i}$  ( $i = \overline{1, n}$ );
- удельный доход от часа эксплуатации двигателя  $D_{ч}$  ( $D_{ч} = 400$  тыс. у.е);
- себестоимость часа работы двигателя в эксплуатации  $C_{ч}$ .

Переменными величинами модели являются:

- порядковый номер двигателя  $i$  ( $i = \overline{1, N_{э}}$ );
- порядковый номер запуска  $j$  ( $i = \overline{1, Z}$ );
- температура окружающего воздуха  $t_{н}$  (принята постоянной);
- наработка в режиме кондиционирования воздуха  $\tau_{СКВ}$ ;
- режимная наработка на один запуск  $\tau_j$ ;
- суммарная наработка двигателя в эксплуатации  $\tau_{\Sigma}$ ;
- повреждаемость элементов двигателя за  $j$ -й запуск  $\Pi_j$  и за все время эксплуатации  $\Pi_i$ ;
- затраты на  $j$ -й запуск двигателя в эксплуатации  $Z_j$  (принято  $Z_j=0$ );
- доход от эксплуатации двигателя ( $j$ -й запуск)  $D_j$ ;
- затраты  $Z_{эi}$  и доход  $D_i$  на весь цикл эксплуатации  $i$ -го двигателя;
- суммарные затраты  $Z_{\Sigma}$  и доход  $D_{\Sigma}$  на эксплуатацию парка двигателей.

### **Требования к содержанию и оформлению результатов занятия.**

Отчёт по работе оформляется письменно в произвольной форме с обязательным включением:

- наименование и цели работы;
- кратко изложенной теоретической части;
- результатов моделирования эксплуатации двигателя по исходными данным, задаваемых преподавателем для каждого студента отдельно

### **Образовательные технологии**

При реализации дисциплины применяются классические образовательные технологии. При реализации дисциплины применяются интерактивные формы проведения практических и лабораторных занятий в виде проблемного обучения.

В частности, предусмотрено использование следующих образовательных технологий:

1. Классическая лекция, предусматривающая систематическое, последовательное, монологическое изложение учебного материала.
2. Проблемная лекция, стимулирующая творчество, осуществляемая с подготовленной аудиторией.
3. Лекция-визуализация – передача информации посредством схем, таблиц, рисунков, видеоматериалов, проводится по ключевым темам с комментариями.
4. Проблемное обучение, стимулирующее аспирантов к самостоятельному приобретению знаний, необходимых для решения конкретной проблемы, в форме письменных эссе различной тематики с их последующей защитой и обсуждением на семинарских занятиях.
5. Контекстное обучение – мотивация магистрантов к усвоению знаний путем выявления связей между конкретным знанием и его применением.
6. Обучение на основе опыта – активизация познавательной деятельности магистранта за счет ассоциации и собственного опыта с предметом изучения.

При реализации настоящей рабочей программы предусматриваются интерактивные и активные формы проведения занятий, дискуссии по темам исследования и поставленным научным проблемам.

## **Методические указания по освоению дисциплины**

### **Раздел 1. Виды моделирования. Моделирование жизненного цикла авиационных ГТД на основе статистических и аналитических моделей.**

Лекций – 2 ч., КСР – 1 ч., СРС – 14 ч.

В первой лекции излагаются основные виды моделирования. Лекционный материал включает такие разделы как: математические модели; физические модели; смешанные модели; статистические модели; аналитические модели; методы моделирования при исследовании систем и процессов; моделирование жизненного цикла авиационных ГТД на основе статистических и аналитических моделей.

Для студентов важно представить все виды моделирования в виде единой комплексной схемы с указанием их взаимосвязи. Для этого необходимо воспользоваться рисунком, приведенном в разделе «Введение» учебного пособия «Моделирование процессов жизненного цикла авиационного двигателя и энергетических установок».

Важно подчеркнуть, что процесс разработки авиационного ГТД является достаточно неопределённым, и поэтому моделирование как самого процесса, так и его технико-экономических показателей представляет известные трудности. Точность моделирования ЖЦ во многом зависит от точности моделирования его основных этапов: стоимости затрат на разработку, производство и эксплуатацию двигателя.

Необходимо обратить внимание студентов на возможность моделирования отдельных этапов ЖЦ с применением статистических моделей.

Необходимо также акцентировать внимание студентов на следующих обстоятельствах:

1) В условиях крайне сложного положения для отечественного двигателестроения последнего десятилетия прогнозирование стоимостных показателей процессов разработки и производства двигателей с применением статистических моделей стало практически невозможным. Из всех перечисленных статистических моделей только модели цен на двигатели в условиях мирового рынка (ввиду его достаточной стабильности) могут использоваться для прогнозирования. Единственно возможным в этот период является использование аналого-сопоставительных методов и методов прямого счета, которые плохо формализуются и во многом имеют субъективный характер.

2) Для сравнительной оценки влияния на эксплуатационные затраты ресурса и уровня безотказности ГТД на этапе проектирования двигателя, когда сведения о многих особенностях, характеризующих эксплуатацию двигателя, не известны или приближительны, весьма эффективным является применение аналитических методов. Несмотря на простоту счета и приближенность, они позволяют учитывать влияние основных факторов на объем выпуска и число ремонтов двигателей.

3) Когда применение аналитических моделей дает слишком приближенные результаты, затруднено или вообще невозможно, то наиболее эффективными в таких случаях являются методы прогнозирования потребности в двигателях, основанные на моделировании на ЭВМ процессов эксплуатации и воспроизводства парков летательных аппаратов и двигателей с помощью имитационных моделей.

В целом, лекционный материал должен позволить студенту ответить на следующие вопросы:

1. От точности моделирования каких этапов зависит в основном точность моделирования жизненного цикла двигателя ?

2. Возможно ли применение статических моделей при моделировании отдельных этапов жизненного цикла двигателя ?

3. Какие факторы включает статистическая модель, характеризующая затраты на опытно – конструкторские работы при создании ГТД ?
4. Какие факторы включает статистическая модель, характеризующая сроки проведения опытно-конструкторских работ при создании ГТД ?
5. Как влияют параметры G<sub>вн</sub> и TГ на сроки проведения ОКР ?
6. Какой метод применяется при моделировании динамики себестоимости производства двигателей ?
7. В каком виде представляется модель себестоимости двигателя ?
8. В каких случаях используется аналитический метод моделирования ?
9. Насколько снижается себестоимость двигателя при удвоении выпуска производства для среднеотраслевой динамики себестоимости ?
10. Какие используются допущения при разработке аналитических моделей ?

Магистрант должен иметь представление о математических, физических, смешанных, статистических и аналитических моделях. Магистрант должен иметь понятие о методах моделирования при исследовании систем и процессов. Магистрант должен иметь представление о моделировании жизненного цикла авиационных ГТД на основе статистических и аналитических моделей.

## **Раздел 2. Особенности имитационного моделирования.**

Лекций –2 ч., КСР – 1 ч., СРС – 14 ч.

Во второй лекции рассматриваются особенности имитационного моделирования, включая такие разделы как: особенности имитационного моделирования; метод статических испытаний и структура исследования систем с применением имитационного моделирования; общие требования и правила имитационного моделирования; основные принципы имитационного моделирования; основные этапы имитационного моделирования; структура имитационной модели жизненного цикла двигателя при оптимизации его ресурсных испытаний.

Здесь важно, чтобы студенты имели четкое представление о том, что в основе имитационного моделирования лежит численный метод (метод Монте-Карло), именуемый также методом статистических испытаний. В данном случае процесс имитируется с помощью арифметических и логических операций в той последовательности элементарных актов, которая характерна для моделируемого процесса. При этом в качестве математической модели функционирования системы выступает моделирующий алгоритм, в соответствии с которым в ЭВМ вырабатывается информация, описывающая элементарные явления исследуемого процесса с учетом их взаимного влияния.

Необходимо также показать, что в отличие от аналитических методов метод Монте-Карло позволяет решать задачи, не сформулированные в виде уравнений или формул. Задачи решаются на конкретных числах, при этом результат получается не в виде аналитических формул, а в виде числовых характеристик случайных процессов.

Не менее важным является вывод о том, что наиболее рациональным является совместное применение упрощенных аналитических методов (позволяющих выбрать сравнительно узкую область исследования, оценить влияние различных факторов, упростить модель за счет отбрасывания второстепенных факторов) и метода Монте-Карло (позволяющего произвести оценку более точную, но в более ограниченной области).

Именно сочетание аналитических методов и метода Монте-Карло является наиболее эффективным для исследования сложных систем и процессов.

Необходимо обратить внимание студентов и на недостатки метода имитационного моделирования, являющиеся продолжением его достоинств. Это, прежде всего, сложность организации и относительно высокая стоимость проведения имитационных экспериментов (особенно если эксперимент является имитационной игрой), возможность просмотреть и сравнить лишь небольшое число заранее отобранных вариантов управлений, интуитивный характер оценок, касающихся рационального управления

процессом. Имитация предъявляет также весьма часто трудновыполнимые требования к информационному обеспечению модели, причем, чем подробнее и точнее модель, тем труднее получить для нее необходимую информацию.

Необходимо также показать, что в настоящее время имитационные модели считают альтернативой методам математического программирования и аналитическим методам исследования. Считается, что для применения имитации должны быть достаточные основания, смысл которых сводится к следующему:

- не существует законченной математической постановки данной задачи, либо еще не разработаны методы математического программирования или аналитические методы решения сформулированной математической задачи;
- методы имеются, но они столь сложны, что имитационное моделирование дает более простой способ решения задачи;
- методы математического программирования или аналитические методы существуют, но их реализация невозможна вследствие недостаточной подготовленности лиц, принимающих решения.

Студенты должны ясно представлять общие требования и правила моделирования, которые приведены в п. 2.3 «Общие требования и правила имитационного моделирования» и основные шесть принципов, изложенные в п. 2.4 учебного пособия «Моделирование процессов жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок».

Завершить лекцию целесообразно рассмотрением общей структуры имитационной модели жизненного цикла авиационного двигателя вида «производство – испытания – эксплуатация».

В целом, лекционный материал должен помочь студенту ответить на следующие вопросы:

1. В чем заключается смысл двух подходов, используемых для изучения сложных систем и управляемых процессов математическими методами ?
2. Что понимается под имитационным экспериментом ?
3. В чем заключается смысл метода статистических испытаний (метод Монте-Карло)?
4. Сочетание каких методов моделирования является наиболее эффективным при исследовании сложных систем и процессов ?
5. Чем обосновывается применение имитационного метода моделирования ?
6. Перечислите основные этапы имитационного моделирования.
7. Дайте определение математической модели и моделирующего алгоритма.
8. Каким образом проводится оценка адекватности имитационной модели ?
9. В какой последовательности расположены методы исследования систем по показателю относительной ценности ?
10. Перечислите общие требования и правила имитационного моделирования.
11. Какие требования при имитационном моделировании являются наиболее трудносовместимыми ?
12. В чем заключается смысл принципа информационной достаточности ?
13. В чем заключается смысл принципа параметризации ?
14. Поясните суть принципа агрегирования.
15. В чем заключается смысл принципа осуществимости ?
16. Что предполагает использование при моделировании принципа рационального использования факторного пространства ?
17. Для каких целей используется принцип множественности моделей ?
18. На каких моделях нижнего уровня основано формирование модели эксплуатации двигателя ?
19. Какой вид имитационной модели необходимо рассматривать при проектировании двигателя ? При опытной доводке ? При серийной эксплуатации ?

20. От каких факторов зависит уровень детализации имитационной модели производства двигателей ?

21. Какие параметры являются исходными и какие результирующими при моделировании производства двигателей ?

22. Что является результатом моделирования эксплуатации двигателей ?

Магистрант должен иметь представление об особенностях имитационного моделирования. Методе статистических испытаний и структуре исследования систем с применением имитационного моделирования. Магистрант должен иметь понятие об общих требованиях и правилах имитационного моделирования. Основных этапах имитационного моделирования. Магистрант должен иметь представление о структуре имитационной модели жизненного цикла двигателя при оптимизации его ресурсных испытаний.

### **Раздел 3. Основные показатели и критерии эффективности жизненного цикла двигателей и энергоустановок.**

Лекций – 2 ч., СРС – 14 ч.

Лекция №3 посвящена показателям и критериям эффективности технических систем, включая такие вопросы как: основные понятия эффективности; собственные показатели и критерии эффективности испытаний двигателя; несобственные показатели и критерии эффективности, характеризующие эксплуатационные издержки, эффективность капитальных вложений и удельные затраты; несобственные показатели и критерии эффективности, характеризующие прибыль, рентабельность и затраты на эксплуатацию; несобственные показатели и критерии эффективности, характеризующие годовой экономический эффект от повышения надежности и удельные затраты; несобственные показатели и критерии эффективности, характеризующие прямые эксплуатационные расходы, амортизацию, надежность и полные затраты за время эксплуатации; несобственные показатели и критерии эффективности, характеризующие исправление брака в эксплуатации и прибыль изготовителя.

Важно показать студентам, что эффективность является одним из фундаментальных свойств любой системы, характеризующих результат ее применения и функционирования.

В теории эффективности различают понятия функциональной и экономической эффективности. Функциональная эффективность характеризуется прямым эффектом, получаемым в процессе функционирования системы. Экономическая эффективность отражает такие свойства системы, как доходность, рентабельность и др.

Необходимо подчеркнуть, что при исследовании эффективности любой системы возникают прямая и обратная задачи:

- прямая задача (задача анализа) состоит в оценке результата функционирования системы при заданных ее свойствах и условиях применения. При этом вычисляются и анализируются показатели эффективности;
- обратная задача (задача синтеза) связана с определением свойств, характеристик и условий применения системы, при которых эффективность системы будет оптимальной (требуемой или оптимальной) в смысле выбранного критерия.

Как в прямой, так и в обратной задачах неотъемлемыми этапами исследования эффективности являются уточнение целей функционирования системы, обоснование и выбор критериев и показателей эффективности, составление математической модели системы и ее функционирования, оценка показателей эффективности, анализ результатов.

Студенту часто трудно уяснить, что показатель эффективности может быть задан в форме неравенства, а также что они разделяются на собственные и несобственные. Долг преподавателя устранить данный пробел.

В целом, материал данной лекции должен помочь студенту ответить на следующие вопросы:

1. Что понимается под эффективностью системы ?
2. В чем отличие функциональной эффективности от экономической ?
3. Для каких целей используются показатели и критерии эффективности ?
4. В чем заключается смысл прямой и обратной задач при исследовании эффективности системы ?
5. Чем отличаются собственные показатели эффективности от несобственных ?
6. Какими показателями оценивается внешняя эффективность системы ?
7. Какой показатель эффективности связан с надежностью двигателя ?
8. От каких параметров зависит абсолютный показатель эффективности капитальных вложений ?
9. Из чего складываются затраты ЖЦ двигателя ?
10. По какой формуле определяются затраты на эксплуатацию, обусловленные надежностью двигателя, оцениваемой наработкой на отказ ?
11. Каким образом оценивается годовой экономический эффект от повышения надежности двигателя ?
12. Для каких целей используется показатель удельных затрат ?
13. Для каких целей используется показатель эксплуатационных расходов, затрат на амортизацию и техническое обслуживание двигателя ?
14. Каким образом оцениваются показатели, характеризующие недостаточную надежность и изменение надежности двигателя в эксплуатации ?
15. С применением каких критериев проводится оценка эффективности одинаковых двигателя, находящихся в различных условиях эксплуатации или используемых в различных вариантах применения ?
16. Какие внешние (несобственные) показатели наиболее приемлемы для оптимизации ресурсных испытаний двигателя в системе его жизненного цикла ?

Магистрант должен иметь представление об основных понятиях эффективности. Магистрант должен иметь понятие о собственных показателях и критериях эффективности испытаний двигателя. Несобственных показателях и критериях эффективности, характеризующих эксплуатационные издержки, эффективность капитальных вложений и удельные затраты. Несобственных показателях и критериях эффективности, характеризующих прибыль, рентабельность и затраты на эксплуатацию. Несобственных показателях и критериях эффективности, характеризующих годовой экономический эффект от повышения надежности и удельные затраты. Несобственных показателях и критериях эффективности, характеризующих прямые эксплуатационные расходы, амортизацию, надежность и полные затраты за время эксплуатации. Несобственных показателях и критериях эффективности, характеризующих исправление брака в эксплуатации и прибыль изготовителя.

#### **Раздел 4. Опыт применения моделирования жизненного цикла при проектировании и доводке двигателей и энергоустановок.**

Лекций – 2 ч., СРС – 14 ч.

Лекция №4 посвящена рассмотрению примеров применения моделирования при проектировании и доводке двигателей и включает разделы: применение моделирования при проектировании двигателей фирмой Пратт-Уитни; применение моделирования при проектировании двигателя тактического истребителя АТАМС; применение моделирования при оптимизации системы “самолет – двигатель”; проектирование двигателя применением модели DEVSIM; применение модели двигателя при оптимизации его параметров на этапах проектирования и доводки.

Необходимо подчеркнуть, что в качестве основных расчетных показателей двигателя, оказывающих влияние на стоимость жизненного цикла (СЖЦ) системы вооружения, рассматривались тяга, удельный расход топлива, масса, диаметр, длина, а

также затраты на исследование, разработку, испытания двигателей и оценку полученных результатов, затраты на приобретение, эксплуатацию и обслуживание двигателя.

Важно, чтобы студенты могли качественно охарактеризовать влияние:

- показателей эксплуатационных свойств на стоимость жизненного цикла двигателя;
- показателей надежности двигателя на стоимость жизненного цикла системы;
- на интенсивности отказов наработки.

В целом, материала данной лекции должно быть достаточно для того, чтобы студент мог ответить на следующие вопросы:

1. По какому критерию проводится выбор показателей двигателя ?
2. Между какими параметрами определяется баланс при проектировании двигателя ?
3. Опишите схему исследования влияния эксплуатационных свойств силовой установки на СЖЦ системы вооружения ?
4. Почему стоимость жизненного цикла является важным показателем качества ?
5. Какие параметры рассматриваются в качестве основных расчётных показателей двигателя, оказывающих влияние на стоимость жизненного цикла ?
6. Как определяется закупочная стоимость базовых двигателей ?
7. По каким зависимостям оцениваются затраты на разработку и испытания двигателей, а также затраты на модернизацию элементов двигателя ?
8. Каким методом оцениваются затраты на эксплуатацию двигателей ?
9. Как влияет на СЖЦ ресурс холодной части двигателя ?
10. Как влияют на СЖЦ показатели надежности двигателя ?
11. Из каких частей состоит модель определения габаритных размеров и стоимости самолёта и двигателя ?
12. Какие варианты создания самолёта могут рассматриваться при оптимизации системы «самолёт-двигатель» ?
13. Какие программы и подпрограммы включает в себя модель стоимости жизненного цикла ?
14. Какой метод используется при исследовании различных стратегий создания и доводки двигателя ?
15. Какие работы выполняются при анализе процесса эксплуатации двигателя ?
16. В зависимости от изменения каких параметров проводится корректировка составляющих в модели стоимости жизненного цикла двигателя ?
17. Каков порядок эффекта (снижение стоимости жизненного цикла двигателя) от реализации перспективных технических решений и оптимизации параметров рабочего цикла двигателя ?
18. Какие подходы к организации процесса создания двигателя вам известны ?
19. Какова зависимость стоимости жизненного цикла двигателя от объёма работ, выполняемых при его разработке ?
20. Как влияет на стоимость жизненного цикла двигателя объём стендовых испытаний ?

Магистрант должен иметь представление о применении моделирования при проектировании двигателей фирмой Пратт-Уитни. Магистрант должен иметь понятие о применении моделирования при проектировании двигателя тактического истребителя АТАМС. Применении моделирования при оптимизации системы «самолёт-двигатель». Проектировании двигателя с применением модели DEVSIM. Магистрант должен иметь представление о применении модели двигателя при оптимизации его параметров на этапах проектирования и доводки.

## **Раздел 5. Применение моделирования жизненного цикла при производстве и испытаниях двигателей и энергоустановок.**

Лекций – 4 ч., практическое занятие – 2 ч., СРС – 14 ч.

В лекции рассматривается применение моделирования при производстве и испытаниях двигателя, включая разделы: применение моделирования при оптимизации кратковременных и длительных испытаний двигателя; применение моделирования при оптимизации кратковременных и длительных испытаний двигателя; краткая характеристика двигателя и основные данные для оптимизации его длительных (периодических) испытаний; имитационное моделирование производства двигателя; имитационное моделирование расходования ресурса «критичных» элементов двигателя и моделирование периодических испытаний; имитационное моделирование эксплуатации двигателя; оптимизация параметров периодических испытаний двигателя; сравнительная оценка эффективности серийной и опытной программ испытаний двигателя.

Тема лекции рассматривает два аспекта применения моделирования: при оптимизации кратковременных и длительных испытаний.

Здесь необходимо подчеркнуть, что при наблюдающейся тенденции увеличения стоимости материальных ресурсов, необходимых для проведения экспериментов, и одновременном снижении стоимости вычислительной техники целесообразным является перенос части экспериментальных работ в область вычислительного эксперимента на основе использования математических и имитационных моделей. Данный подход позволяет перенести эксперимент из физического пространства в модельное.

Важно отметить, что испытания в первом случае реализуются в два этапа:

- контроль по предельным параметрам непосредственно после сборки;
- контроль в диапазоне эксплуатационных режимов на испытательной станции.

Второй аспект лекции посвящен моделированию ВГТД ТА-6А и является информационно более насыщенным по сравнению с моделированием кратковременных испытаний. Рассматривается пример, в котором целью испытаний является подтверждение годности партии из 200 двигателей к эксплуатации на самолетах Ил-62, Ту-154 и Ил-76.

Здесь важно, чтобы студенты еще раз поняли суть определения: «критичные» элементы двигателя и могли более подробно пояснить на примере данного двигателя.

При изложении лекционного материала следует подробно остановиться на последовательности имитационного моделирования:

- производства «критичных» элементов двигателя;
- расходования ресурсов этих элементов;
- периодических испытаний двигателя.

Целесообразно также более подробно рассмотреть методологию оптимизации периодических испытаний двигателя: вид целевой функции, используемый метод поиска экстремуму функции и т.д.

В целом, материал данной лекции ориентирован на следующий перечень вопросов для самоконтроля студентов:

1. Какова структура автоматизированного техпроцесса кратковременных испытаний двигателя в условиях серийного производства ?
2. Что означает термин “критический элемент двигателя” ?
3. Какие элементы двигателя вспомогательной силовой установки ТА-6А являются “критичными” ?
4. Какими параметрами характеризуется цикл нагружения двигателя ТА-6А в испытаниях?
5. Какой их вариантов эксплуатации двигателя на самолёте ТУ-154 является наиболее нагруженным ?
6. Каким образом проводится имитационное моделирование этапа производства двигателя?
7. Каким образом проводится имитационное моделирование расходования ресурса ?

8. Каким образом проводится имитационное моделирование периодических испытаний двигателя ?
9. Каким образом проводится имитационное моделирование эксплуатации двигателя ?
10. Какие параметры периодических испытаний оптимизируются ?
11. Проведите сравнения эффективности серийной и опытной программ испытаний двигателя.
12. Проведите сравнения эффективности серийной и опытной программ эквивалентно-циклических испытаний двигателя.

Магистрант должен иметь представление о применении моделирования при оптимизации кратковременных и длительных испытаний двигателя. Краткой характеристике двигателя и основных данных для оптимизации его длительных (периодических) испытаний. Магистрант должен иметь понятие об имитационном моделировании производства двигателя. Имитационное моделирование расхода ресурса «критичных» элементов двигателя и моделировании периодических испытаний. Имитационное моделирование эксплуатации двигателя. Магистрант должен иметь представление об оптимизации параметров периодических испытаний двигателя. Сравнительной оценке эффективности серийной и опытной программ испытаний двигателя.

#### **Раздел 6. Применение моделирования жизненного цикла при оптимизации эксплуатации двигателей и энергоустановок.**

Лекций – 4 ч., практических занятий – 4 ч., СРС – 14 ч.

Лекция №6 посвящена применению моделирования при оптимизации эксплуатации двигателей и включает разделы: особенности формирования имитационной модели процесса эксплуатации двигателя; перечень задач, решаемых с применением имитационного моделирования процесса эксплуатации; моделирование эксплуатационной повреждаемости двигателей; применение имитационного моделирования для перспективного планирования в гражданской авиации.

Для студентов убедительны будут примеры, поэтому целесообразно рассмотреть постановку задачи по определению объема производства и ремонта АД: известна программа производства самолетов конкретного типа, показатели межремонтного и назначенного ресурса планера (с учетом динамики их изменения по годам), динамика среднегодового налета на самолет, цикл ремонта самолета, а также планируемые показатели безотказной работы двигателей, длительность цикла ремонта и возможности ремонтного производства, требования к уровню запасов двигателей в эксплуатации. Необходимо определить потребный объем производства и ремонта АД за срок службы самолетного парка.

Применение имитационного моделирования также является эффективным при решении задач по оптимизации программ технического обслуживания и ремонта систем и узлов летательных аппаратов. Так, применение имитационного моделирования для системы кондиционирования воздуха самолета позволило сократить эксплуатационные затраты в 1,7 раза, трудовые - в 1,72 раза.

Отдельного рассмотрения требует вопрос моделирования эксплуатационной повреждаемости двигателей. Здесь необходимо пояснить, что окончательный выбор метода моделирования эксплуатации зависит от особенностей применения двигателя на объекте, объема имеющейся информации, требований к достоверности оценки надежности и ресурса изделия и других факторов.

В целом, материал данной лекции должен позволить студенту ответить на следующие вопросы:

1. Для каких целей применяется имитационное моделирование процесса эксплуатации летательных аппаратов и двигателей ?

2. Какие задачи необходимо решить при разработке имитационной модели эксплуатации ?
3. Какие два подхода используются при моделировании отказов ?
4. Какие исходные данные необходимы для определения потребного объёма производства и ремонта двигателей за срок службы самолётного парка ?
- 5.. Возможно ли прогнозирование объёмов производства и поставок двигателей модульной конструкции с применением аналитических моделей ?
6. Какого эффективность применения имитационного моделирования при решении задач по оптимизации программ технического обслуживания и ремонта систем и узлов летательных аппаратов ?
7. Какой из девяти методов моделирования эксплуатации двигателей является наиболее эффективным и почему ?
8. Какими параметрами определяется повреждаемость элементов узлов двигателя ?
9. От каких факторов зависит окончательный выбор метода моделирования эксплуатации двигателя ?
10. Какие задачи позволяет решать применение имитационного моделирования в гражданской авиации ?

Магистрант должен иметь представление об особенностях формирования имитационной модели процесса эксплуатации двигателя. Перечне задач, решаемых с применением имитационного моделирования процесса эксплуатации. Моделировании эксплуатационной повреждаемости двигателей. Применении имитационного моделирования для перспективного планирования в гражданской авиации.

### **Раздел 7. Основы имитационного моделирования двигателей и энергоустановок в системе Anylogic.**

Лекций—4 ч., практических занятий—6 ч., КСР—2 ч., СРС—15ч.

Магистрант должен иметь представление об общих понятиях, сведениях. Основных средствах создания моделей. Магистрант должен иметь представление об экспериментах с моделью. Анимации модели. Графиках и слайдах в анимации. Доработке модели. Основных концепциях.

### **Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- лекционные аудитории с современными средствами демонстрации 2-501,2-503, 2-507, 2-509.

- кафедральные лаборатории, обеспечивающие реализацию ОПОП ВО: 2-507, 2-510 с доступом к указанным программным средствам в сети Интернет.

Технические средства обучения:

1. Проектор.
2. Наборы слайдов (компьютерные презентации к лекциям).

### **Адаптация рабочей программы для лиц с ОВЗ**

Адаптированная программа разрабатывается при наличии заявления со стороны обучающегося (родителей, законных представителей) и медицинских показаний (рекомендациями психолого-медико-педагогической комиссии). Для инвалидов адаптированная образовательная программа разрабатывается в соответствии с индивидуальной программой реабилитации.