

На правах рукописи



АГЕЕВ Георгий Константинович

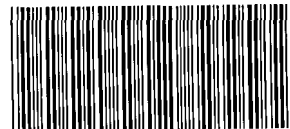
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АГРЕГАТОВ ГТД И
ЭНЕРГОУСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО
НАРАБОТКЕ**

**Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

17 МАЯ 2012

Уфа 2012



005043770

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре авиационных двигателей.

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой авиационных двигателей УГАТУ
Гишваров Анас Сандович

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, доцент
Павлов Виктор Павлович,
Уфимский государственный авиационный технический университет, профессор кафедры сопротивления материалов УГАТУ

канд. техн. наук,
Христолюбов Вячеслав Леонидович
ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение», директор информационных технологий

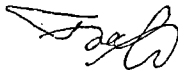
Ведущее предприятие: ОАО «УАП «Гидравлика» (г. Уфа).

Защита состоится «31» мая 2012 г. в 10 час на заседании диссертационного совета Д-212.288.05 при Уфимском государственном авиационном техническом университете (450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12, УГАТУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «28» апреля 2012 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
д-р техн. наук, проф.



Ф.Г. Бакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современный период развития авиационной техники характеризуется высокими требованиями к ее надежности, сжатыми сроками создания и внедрения в эксплуатацию. При этом одной из наиболее острых является проблема ухудшения характеристик агрегатов и энергоустановок в эксплуатации. Обеспечение их стабильного уровня в процессе выработки ресурса и восстановления при ремонте является в равной степени актуальным для двигателей и самолетов как гражданской, так и военной авиации.

Актуальность проблемы обусловлена не только заметным ухудшением технических характеристик газотурбинных двигателей (ГТД) и летательных аппаратов (ЛА), но и экономическими соображениями. Данным вопросам уделяют первостепенное внимание все зарубежные авиадвигателестроительные фирмы и авиакомпания.

В комплексе разнообразных задач, которые приходится решать при создании, производстве и эксплуатации агрегатов ГТД (генераторов, насосов и др.) и энергоустановок ЛА (турбогенераторов ТГ60/2СМ, ТГ17, турбонасосных установок ТНУ, ТНУ-К, лопаточных привод-генераторов и др.), большое место принадлежит моделированию их параметров и характеристик с использованием как априорных статистических эксплуатационных данных, так и результатов специально проводимых экспериментов.

Во многом это объясняется тем, что моделирование позволяет решать такие важные задачи, как оценка ресурса и экономическое обоснование различных показателей агрегатов и энергоустановок на этапе проектирования; разработка количественных требований к надежности агрегатов и энергоустановок; расчет надежности систем, в состав которых входят агрегаты; оценка интенсивности ухудшения характеристик агрегатов, прогнозирование их технического состояния, отработка способов улучшения характеристик агрегатов, находящихся в серийном производстве и эксплуатации; определение оптимальной периодичности и объема профилактических мероприятий; расчет требуемого количества запасных частей и др.

Для решения такого перечня задач необходимо знать зависимость надежности агрегатов и энергоустановок от наработки в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения.

Разработка математических моделей, учитывающих комплексное воздействие эксплуатационных факторов, представляет значительные трудности как в теоретическом, так и в прикладном плане. Сложность решаемой проблемы обусловлена тем, что надежность и ресурс агрегатов определяется совокупностью критериев работоспособности как отдельных элементов узлов, так и агрегатов в целом. При этом ухудшение состояния агрегатов может характеризоваться изно-

сом, длительной статической и циклической прочностью, тепловым старением, эрозией, коррозией и др. Например, для генератора постоянного тока ГТД, используемого для запуска ГТД и обеспечения ЛА постоянным током, критериями работоспособности его коллекторного узла являются: износ щеток, искрение, падение напряжения и др., а критерием отказа является превышение параметрами допустимых значений. Для энергоустановок ЛА (ТНУ-86А, ТНУ-К, ПГЛ и др.), устанавливаемых на ЛА в качестве источника питания гидросистем, критериями работоспособности являются ухудшение свойств рабочей жидкости (кинематической вязкости, кислотного числа, содержания золы и др.), износ элементов, уменьшение КПД.

В настоящее время при моделировании параметров агрегатов по наработке широко используется метод оптимального планирования эксперимента. Практика показывает, что несмотря на ряд положительных свойств, применение данного метода не всегда позволяет эффективно решать задачу моделирования изменения параметров агрегатов по наработке в плане обеспечения требуемой точности формируемых моделей при возможно минимальных материальных и временных затратах. Во многом это обусловлено следующими причинами:

1) в регрессионной модели присутствует фактор времени, что существенно усложняет процедуру планирования эксперимента (ПЭ) (именно поэтому в довольно обширной литературе по теории планирования эксперимента мало публикаций, посвященных планированию фактора времени);

2) при моделировании одновременно нескольких параметров агрегатов по наработке (в данном случае выходной величиной является не скалярная величина, а вектор параметров агрегата) существенно возрастают материальные затраты и длительность эксперимента, что делает нереальным проведение такого исследования и требует иного подхода к планированию эксперимента;

3) по мере увеличения количества независимых факторов в регрессионной модели в существенной мере увеличивается количество требуемых опытов в эксперименте, что делает актуальным решение задачи по снижению размерности регрессионной модели, описывающей изменение параметров агрегатов по наработке;

4) существующая практика планирования эксперимента ориентирована на оптимизацию его спектра и не учитывает эффекта от последовательности реализации опытов плана, от которой зависят затраты на эксперимент;

5) отсутствуют методики и программное обеспечение, учитывающие перечисленные выше недостатки при моделировании изменения параметров агрегатов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения.

Исследования по теме диссертационной работы проводились в рамках федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственные контракты № 16.740.11.0552 от 23.05.2011, № 16.740.11.0263 от 17.09.2010, № 02.740.11.0764 от

12.04.2010) и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 06-08-00759-а (2006-2008).

Актуальность темы исследования отражена в Федеральной целевой Программе «Развитие гражданской авиационной техники России на 2001...2015 годы».

Цель и решаемые в работе задачи

Целью работы является разработка методики моделирования параметров агрегатов ГТД и энергоустановок летательных аппаратов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения, обеспечивающей требуемую точность моделирования при минимальных временных и материальных затратах.

Для достижения данной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Теоретическое обоснование методов повышения эффективности моделирования параметров агрегатов ГТД и энергоустановок летательных аппаратов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения;
2. Исследование методов повышения эффективности моделирования параметров агрегатов, включая:
 - обоснование способа учета фактора времени в регрессионной модели;
 - синтез (совмещение) планов эксперимента при разработке одновременно нескольких регрессионных моделей, описывающих параметры агрегатов по наработке;
 - планирование эксперимента при в критериальной форме подобия;
 - планирование эксперимента оптимизацией как спектра плана, так и последовательности реализации опытов плана.
3. Разработка методики и программного обеспечения оптимального планирования эксперимента при моделировании параметров агрегатов ГТД и энергоустановок летательных аппаратов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения.
4. Экспериментальная проверка эффективности методики на примере моделирования изменения по наработке параметров генератора ГС-12ТО вспомогательного ГТД ТА-6А и турбонасосной установки ТНУ-86А самолета Ил-86.

Научная новизна

1. Обоснованы методы повышения эффективности моделирования параметров агрегатов ГТД и энергоустановок летательных аппаратов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения, включая:
 - способ учета фактора времени в регрессионной модели, обоснованное применение которого позволяет минимизировать объем эксперимента и его длительность;
 - вид целевой функции для синтеза (совмещения) нескольких планов эксперимента в меньшем их числе, что позволяет при меньшем объеме эксперимента получать информацию, достаточную для построения одновременно нескольких регрессионных моделей, описывающих параметры агрегатов по наработке, планы

эксперимента которых могут отличаться как размерностью, так и реализуемыми критериями оптимальности;

- метод планирования эксперимента в критериальной форме подобия, позволяющий полнее использовать преимущества теории ПЭ в плане уменьшения количества опытов при моделировании изменения параметров агрегатов по наработке;
- метод планирования эксперимента, оптимизирующий не только спектр плана эксперимента, но и последовательность реализации опытов, что позволяет дополнительно уменьшить временные и материальные затраты на проведение экспериментального исследования при моделировании изменения параметров агрегатов по наработке.

2. Разработаны методика, алгоритмы и программное обеспечение по моделированию параметров агрегатов ГТД и энергоустановок летательных аппаратов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения.

Практическая значимость

Разработанная методика моделирования параметров агрегатов ГТД и энергоустановок летательных аппаратов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения, позволяет планировать эксперимент, оптимальным образом обеспечивающий уменьшение его объема и длительности за счет решения перечисленных выше задач.

Данный метод моделирования применим для любых технических систем, включая изделия авиационной техники (ЛА, ГТД, турбонасосные установки, генераторы и т.д.). В этом заключается универсальность разработанного метода моделирования.

Методы исследования и аппаратура

Полученные автором результаты базируются на использовании методов теорий: планирования эксперимента, моделирования, прочности, исследования операций, системного анализа, воздушно-реактивных двигателей и др.

В работе использовались стенды ОАО «УАП «Гидравлика», предназначенные для экспериментального исследования авиационных агрегатов (турбогенераторов, турбонасосных установок и др.) и испытательные стенды лабораторно-испытательного комплекса УГАТУ на площадке «Аэропорт».

Исследование эффективности ПЭ проводилось численным методом на основе разработанных алгоритмов и программного обеспечения по оценке показателей эффективности и оптимизации ПЭ.

Основные результаты исследования, выносимые на защиту

1. Теоретически обоснованный метод моделирования параметров агрегатов ГТД и энергетических установок летательных аппаратов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения.
2. Результаты исследования методов повышения эффективности моделирования параметров агрегатов и энергоустановок, включая:
 - способ учета фактора времени в регрессионной модели;

- вид целевой функции, используемой для синтеза нескольких планов эксперимента;

- планирование эксперимента с использованием критериальной формы представления независимых факторов модели в виде параметров подобия;

- планирование эксперимента с учетом последовательности реализации опытов плана.

3. Методика моделирования изменения параметров агрегатов и энергоустановок по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения.

4. Результаты экспериментального исследования по моделированию износа щеток генератора ГС-12ТО вспомогательного ГТД ТА-6А и изменения по наработке параметров рабочей жидкости АМГ-10 турбонасосной установки ТНУ-86А самолета Ил-86.

Обоснованность и достоверность результатов исследования

Достоверность проведенных в работе исследований подтверждена использованием при разработке методики выбора оптимальных планов эксперимента, апробированных на практике методов и алгоритмов матричного исчисления, регрессионного анализа, а также совпадением результатов моделирования с экспериментом. Результаты работы прошли апробацию на Международных и Всероссийских научно-технических конференциях и опубликованы в печати.

Внедрение

Результаты работы внедрены в виде методики моделирования изменения параметров авиационных агрегатов и энергоустановок по наработке в ОАО «УАП Гидравлика» и в учебный процесс УГАТУ.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на МНТК "Проблемы и перспективы развития двигателестроения", Самара, СГАУ, 2008; ВНТК «Мавлютовские чтения», Уфа, УГАТУ, 2010; ВНТК Актуальные проблемы в науке и технике. Уфа, УГАТУ, 2011 и др.

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 10 печатных работ в ведущих рецензируемых изданиях, из них 5 статей, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и списка литературы (113 наименований).

Основная часть работы содержит 150 страниц, 31 иллюстрацию, 41 таблицу.

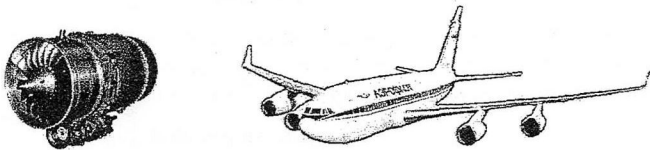
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются ее задачи, отмечаются новизна и практическая значимость результатов.

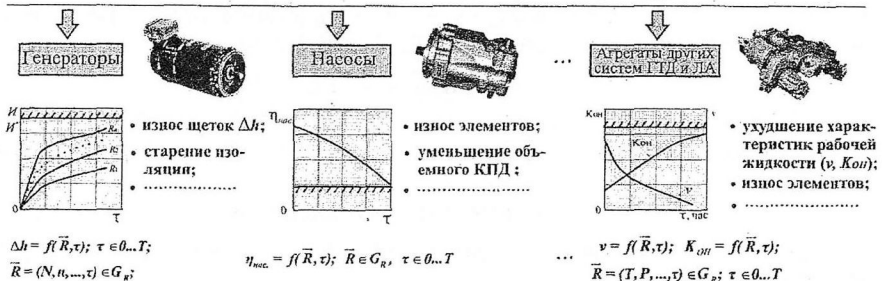
Первая глава диссертации посвящена анализу состояния проблемы моделирования параметров агрегатов ГТД энергоустановок летательных аппаратов (ЛА) по наработке при различных условиях эксплуатации и режимах нагружения (рисунок 1). Рассматривается регрессионное моделирование на основе априорных статистических данных из эксплуатации и результатов планированного эксперимента (ПЭ)

Отмечены преимущества метода планированного эксперимента по сравнению с традиционными методами проведения экспериментальных исследований по моделированию.

Показано, что наличие математических моделей, описывающих параметры агрегатов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения, позволяет решать широкий круг задач по оценке, прогнозированию и оптимизации параметров и характеристик агрегатов ГТД при проектировании, производстве и эксплуатации.



Моделирование параметров агрегатов ГТД и энергоустановок ЛА по наработке τ в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения $\bar{R}$



$\bar{R}$ – вектор параметров, характеризующих условия эксплуатации и режимы нагружения агрегатов; τ – наработка агрегата в интервале $0...T$; G_R – область реализации условий эксплуатации и режимов нагружения $\bar{R}$; N – мощность загрузки генератора; $\nu, K_{\text{он}}$ – кинематическая вязкость и кислотное число рабочей жидкости турбонасосной установки летательного аппарата

Рисунок 1

Определены основные задачи повышения эффективности моделирования параметров агрегатов ГТД и энергоустановок ЛА по наработке, среди которых в качестве основных выделены следующие:

- обоснование способа учета фактора времени в регрессионной модели, описывающей изменение параметров агрегатов по наработке;
- выбор целевой функции для оптимального синтеза (совмещения) нескольких планов эксперимента в меньшем их числе, применение которых позволяет получать информацию, достаточную для определения констант одновременного нескольких регрессионных моделей изменения параметров агрегатов ГТД и энергоустановок ЛА по наработке, планы эксперимента которых могут отличаться как размерностью, так и реализуемыми критериями оптимальности;
- моделирование параметров агрегатов по наработке с применением планирования эксперимента, обеспечивающего дополнительный эффект в плане сокращения временных и материальных затрат путем оптимизации последовательности реализации опытов плана;
- обоснование метода планирования эксперимента для случая, когда регрессионная модель, описывающая изменение параметров агрегатов по наработке, содержит большое количество независимых факторов, что существенно усложняет или делает невозможным проведение эксперимента. В работе уменьшение размерности регрессионной модели достигается объединением методов теории оптимального планирования эксперимента и теории подобия, что позволяет уменьшить количество требуемых опытов и сделать реальным проведение экспериментального исследования агрегатов.

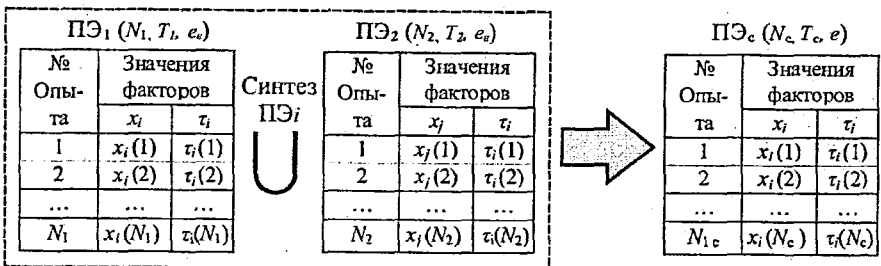
Во второй главе проведено исследование перечисленных в первой главе методов повышения эффективности моделирования параметров агрегатов и энергоустановок по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения. Отмечено, что фактор времени τ в регрессионной модели $F(y, \bar{x}, \tau) = 0$ (где y – выходной параметр агрегата; $\bar{x}$ – вектор параметров, характеризующий условия эксплуатации и режимы нагружения агрегата; τ – наработка агрегата), описывающей изменение параметра агрегата y по наработке τ в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения, характеризуемых вектором $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, может учитываться двумя способами: 1) когда время включено в регрессионную модель в качестве отдельного фактора и принимает различные значения $\tau_{opt,i}$ в разных опытах плана эксперимента; 2) когда время включено в

левую часть регрессионной модели, т.е. в качестве выходного параметра агрегата рассматривается скорость изменения его параметра, являющаяся функцией независимых факторов $x_1, x_2, \dots, x_n$.

В работе проведено исследование и показано, что моделирование износа щеток генератора ГС-12ТО целесообразно проводить в виде зависимости «скорость износа» как функция факторов нагрузки. При этом по сравнению со случаем, когда время включено в регрессионную модель существенно уменьшается количество опытов (с 27 до 9).

Далее в работе отмечено, что при моделировании процессов изменения параметров агрегатов и энергоустановок по наработке, может наблюдаться автокорреляция, под которой понимается корреляция между наблюдаемыми показателями, упорядоченными во времени и (или) в пространстве. Это ведет к снижению достоверности оценки коэффициентов регрессионной модели. Приведены методы обнаружения и способы устранения автокорреляции.

С целью сокращения материальных и временных затрат на проведение ПЭ, в работе решена задача оптимального синтеза (совмещения) нескольких ПЭ в меньшем их числе (в пределе в одном ПЭ), что позволяет получать информацию, достаточную для оценки констант одновременно нескольких регрессионных моделей, планы экспериментов которых могут отличаться как размерностью, так и реализуемыми критериями оптимальности (рисунок 2).



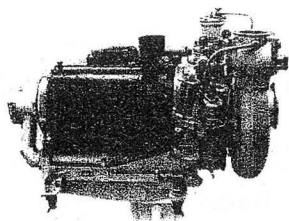
$T \in \min_i T_i \dots \max_i T_i$; $i = \overline{1, n}$, где n – количество синтезируемых (совмещаемых) ПЭ.

Рисунок 2 – Упрощенная схема синтеза (совмещения) двух ПЭ (ПЭ₁ и ПЭ₂) в одном ПЭс:

e_e – ε -й показатель оптимальности ПЭ ($A, D, G, \dots$)

$$\begin{cases} T_c, N_c \rightarrow \min; \\ e_e \in G_e; T_c \in G_T; N_c \in G_N; x_i \in G_x, \end{cases} \quad (1)$$

где G_e – область значений критериев эффективности e , где ПЭ являются оптимальными; G_T, G_N, G_x – области определения параметров τ, N и x .



В работе, с учетом наиболее часто используемых на практике критериев оптимальности ПЭ (A -, D - и G -opt), проведено исследование по выбору наиболее эффективной целевой функции (анализировались 8 видов целевой функции аддитивного вида) для синтеза планов эксперимента 6-ти регрессионных

моделей, описывающих зависимость параметров нагруженности элементов турбогенератора ТГ60/2СМ, устанавливаемого на ЛА в качестве источника переменного тока, от режима его функционирования.

Исследование 729-ти возможных вариантов сочетания ПЭ для рассматриваемого агрегата показало, что наиболее эффективной является целевая функция

аддитивного вида $\Phi = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (1 - e_{ij})^{1/2}$ (где m_i – число совмещаемых ПЭ; n_i – чис-

ло критериев оптимальности, которым удовлетворяет j -й ПЭ; e_{ij} – нормированное значение j -го критерия оптимальности i -го ПЭ), как в наибольшей степени обеспечивающая близость совмещаемых планов к оптимальным.

Результаты исследования позволили при регрессионном моделировании износа щеток генератора ГС-12ТО ГТД получить план эксперимента, являющийся в пределах допуска оптимальным одновременно по D - и G - критериям, а при регрессионном моделировании турбонасосной установки ТНУ-86А получить один план эксперимента, позволяющий определить константы двух нелинейных моделей: изменения по наработке кислотного числа K_{OH} и кинематической вязкости ν рабочей жидкости АМГ-10 турбонасосной установки ТНУ-86А самолета Ил-86. При этом потребное количество опытов уменьшилось в 2 раза.

Далее в работе проведено исследование по повышению эффективности моделирования параметров агрегатов по наработке за счет планирования эксперимента, обеспечивающего дополнительное уменьшение затрат путем оптимизации последовательности реализации опытов плана. Критериями эффективности ПЭ в данном случае являются минимизация показателей суммарных (общих) временных $T_{\text{пол.}\Sigma}$ и материальных $C_{\text{пол.}\Sigma}$ затрат на подготовку к проведению опытов ПЭ:

$$T_{\text{под.}\Sigma} = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta \tau_{ij} = \min; \quad (i \neq j); \quad C_{\text{под.}\Sigma} = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta c_{ij} = \min; \quad (i \neq j);$$

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_{\text{опт}}; \quad N = N_{\text{опт}}; \quad x \in G_x. \quad (2)$$

где $\Delta \tau_{ij}$, Δc_{ij} – временные и материальные затраты на подготовку к проведению опытов ПЭ при переходе от i -го к j -му опыту; $\varepsilon(x)$ – оптимальный план, содержащий N опытов. Рассмотрены несколько методов оптимизации ПЭ в данной постановке, из которых выбран метод Парето. Область Парето-оптимальных решений формируется многократной минимизацией нормированных значений показателей $T_{\text{под.}\Sigma}$ и $C_{\text{под.}\Sigma}$ по целевой функции вида:

$$\Phi = \alpha \cdot T_{\text{под.т}}^{\text{норм.}} + \beta \cdot C_{\text{под.}\Sigma}^{\text{норм.}} = \min; \quad \alpha + \beta = 1, \quad (3)$$

где $T_{\text{под.т}}^{\text{норм.}}$ и $C_{\text{под.}\Sigma}^{\text{норм.}}$ – нормированные значения показателей $T_{\text{под.т}}$ и $C_{\text{под.}\Sigma}$.

Окончательный вариант ПЭ выбирается, исходя из каких либо дополнительных требований к ПЭ, например, обеспечения более высокой точности оценки коэффициентов регрессионной модели и др. Применение предлагаемого метода ПЭ при моделировании изменения параметров по наработке турбонасосной установки ТНУ-86А самолета Ил-86 позволило на 5,5 % уменьшить материальные затраты на проведение экспериментального исследования.

В третьей главе проведено исследование метода планирования эксперимента для случая, когда число независимых факторов в регрессионной модели значительно, что ведет к существенному увеличению объема эксперимента (например, при моделировании с применением ПФЭ с числом независимых факторов $k=10$ требуется проведение 1024 опытов). Решением проблемы является переход на планирование эксперимента в критериальной форме подобия. Объединение метода теории планирования эксперимента и метода подобия теории позволяет полнее использовать преимущества теории планирования эксперимента – дополнительно уменьшить число исследуемых независимых факторов в ПЭ. В данном случае физический процесс изменения параметров агрегата, описываемый регрессионной моделью:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (4)$$

(где b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} – оценки коэффициентов регрессии), представляется согласно второй теореме подобия с помощью анализа размерностей или преобразованием подобия, в критериальной форме:

$$y = \varphi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n_\pi}) = b'_0 + \sum_{i=1}^{n_\pi} b'_i \pi_i + \sum_{i,j=1}^{n_\pi} b'_{ij} \pi_i \pi_j + \sum_{i=1}^{n_\pi} b'_{ii} \pi_i^2 + \dots, \quad (5)$$

где y – рассматриваемый параметр агрегата; $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n_k}$ – критериальные комплексы, включающие независимые факторы $x_1, x_2, \dots, x_n$, определяющие исследуемый процесс ($n_k = n - k$). При этом число переменных сокращается с n до $(n - k)$ критериальных комплексов.

При таком планировании регистрируются не отдельные факторы, а значения критериев подобия. Уровни факторов определяются по результатам непосредственного их измерения в условиях эксплуатации или путем пересчета с помощью коэффициентов подобия.

Задание шага варьирования критериев проводится двумя способами:

- 1) статистическим моделированием факторов в области их изменения;
- 2) заданием шага варьирования факторов и соответственно определением интервалов варьирования критериев подобия.

Критерии подобия определяются с помощью анализа уравнений или с помощью анализа размерности определяющих факторов. Определение критериев подобия на основе уравнений позволяет получить более обоснованные результаты. Метод анализа размерностей используют при исследовании достаточно сложных систем, не имеющих математического описания. При физическом моделировании часто применяют оба метода.

Рассмотрен пример определения критериев подобия методом анализа размерности при регрессионном моделировании износа детали агрегата, который рассматривался как функция от 8-ми факторов (нагрузки x_1 , площади контакта x_2 , твердости материала x_3 , относительного износа материала детали x_4 , истирающей способности контактирующего с деталью материала x_5 , удельной теплоты рабочей среды x_6 , амплитуды вибрации x_7 , частоты вибраций x_8): $y = f(x_1, x_2, \dots, x_8)$.

Критериальной обработкой функциональной модели выделены 3 критерия подобия: $\pi_1 = (x_4/x_5)$, где x_4 и x_5 характеризуют свойства конструкционных материалов; $\pi_2 = x_1/(x_2 \cdot x_3)$, где x_1, x_2 и x_3 характеризуют конструктивно-технологические особенности детали; $\pi_3 = x_7 \cdot x_8 / x_6^{0.5}$, где x_6, x_7 и x_8 характеризуют воздействующие в процессе эксплуатации детали нагрузки. Таким образом, осуществляется переход к регрессионному моделированию вида:

$$y = \Phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = b'_0 + \sum_{i=1}^3 b'_i \pi_i + \sum_{i,j=1, j \neq i}^3 b'_{ij} \pi_i \pi_j + \sum_{i=1}^3 b'_{ii} \pi_i^2 =$$

$$= b'_0 + b'_1 \left(\frac{x_4}{x_5} \right) + b'_2 \left(\frac{x_1}{x_2 x_3} \right) + b'_3 \left(\frac{x_7 x_8}{\sqrt{x_6}} \right) + \dots + b'_{33} \left(\frac{x_7 x_8}{\sqrt{x_6}} \right)^2. \quad (6)$$

В работе показано, что при моделировании скорости износа щеток генератора ГС-12ТО с учетом трех независимых факторов, влияющих на износ (усилие прижатия щеток (P), площадь контакта щеток с якорем (S) и мощность электрической загрузки (N)), два фактора (P и S) могут быть учтены в регрессионной модели в виде одного критерия подобия $\pi = P / S$, характеризующего удельное давление щеток в контакте. В этом случае регрессионная модель рассматривается в виде $dy/d\tau = f(\pi, N)$. При этом число потребных опытов в трехуровневом полном факторном эксперименте (ПФЭ) уменьшается с 27 до 9 опытов.

В четвертой главе рассмотрена методика моделирования параметров агрегатов ГТД и энергоустановок летательных аппаратов по наработке.

Рассмотрены особенности оценки констант нелинейных моделей с применением ПЭ и априорных статистических данных. Отмечено, что ПЭ возможно только при заданных начальных значениях констант модели, что обусловлено ее нелинейностью по параметрам. Значения констант задаются: исходя из теоретических соображений; по аналогии с агрегатами подобного типа; исходя из измеренных значений.

Оценка эффективности методики проведена на примере моделирования по наработке:

- износа щеток генератора ГС-12ТО вспомогательного ГТД ТА-6А при различных режимах нагружения;
- изменения кинематической вязкости ν и кислотного числа $K_{\text{ОН}}$ рабочей жидкости АМГ-10 турбонасосной установки ТНУ-86А самолета Ил-86 при различных условиях теплового нагружения.

Основные отличия разработанной методики моделирования от существующих сводятся к следующему:

- обосновывается способ учета фактора времени в регрессионной модели, позволяющей уменьшить затраты на эксперимент;
- планирование эксперимента проводится оптимизацией не только спектра плана (как это делается обычно), но и оптимизацией последовательности реализации опытов плана, что позволяет дополнительно уменьшить материальные и временные затраты на эксперимент;
- при моделировании изменения одновременно нескольких параметров агрегатов по наработке, проводится синтез (совмещение) их планов экспериментов в меньшем числе (в пределе в одном ПЭ), что позволяет проводить оценку констант регрессионных моделей при меньших временных и материальных затратах. При этом оптимизация ПЭ проводится по предложенной в работе целевой функции аддитивного вида;

• при большом количестве независимых факторов в регрессионной модели, затрудняющим или делающим невозможным проведение экспериментального исследования, осуществляется переход к ПЭ в критериальной форме подобия, тем самым уменьшается количество потребных опытов в эксперименте.

Методика была использована при моделировании изменения параметров генератора постоянного тока ГС-12ТО ГТД ТА-6А и турбонасосной установки ТНУ-86А самолета Ил-86 по наработке. По результатам спланированного эксперимента были получены регрессионные модели, адекватно отражающие изменение параметров агрегатов по наработке.

В первом случае получена линейная регрессионная модель, в кодированных значениях факторов N_r и π имеющая вид:

$$\Delta h/\tau = 0,04 - 0,0145 \cdot \pi + 0,0078 \cdot N + 0,055 \cdot N^2; \quad (7)$$

$$-1 \leq N \leq 1; \quad -1 \leq \pi \leq 1; \quad (n = \text{idem}).$$

В натуральных значениях факторов N и π модель регрессии имеет вид:

$$\Delta h/\tau = 0,0444 + 0,0008N - 0,0012\pi + 0,0002N^2; \quad (8)$$

$$6 \text{ кВт} \leq N \leq 12 \text{ кВт}; \quad 8 \leq \pi \leq 20 \text{ г/мм}^2; \quad (n = \text{idem}).$$

где π – удельное давление щеток в контакте, г/мм²; τ – длительность работы генератора ГС-12ТО, час.; N – нагрузка генератора, кВт; n – частота вращения ротора.

Погрешность моделирования оценивалась по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta h_s - \Delta h_p}{\Delta h_s} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где Δh_s – экспериментальное значение скорости износа щеток, мм/ч; Δh_p – расчетное значение скорости износа щеток, определенное по регрессионной модели, мм/ч.

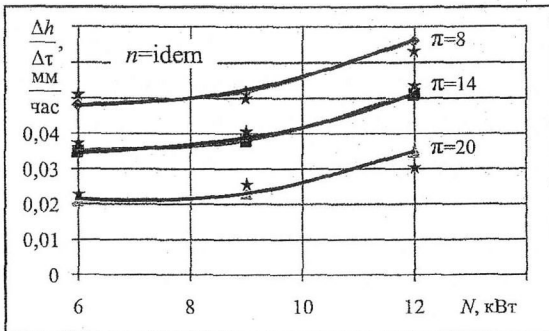
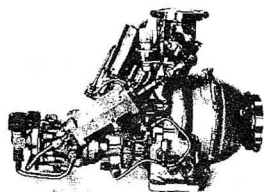


Рисунок 3 – ● – расчетные значения $\Delta h/\tau$; ★ – экспериментальные значения $\Delta h/\tau$

Проверка модели по критерию Фишера подтвердила ее адекватность. Погрешность моделирования составила 12 %. При этом за счет обоснованного учета фактора в регрессионной модели (в качестве выходного параметра генератора рассматривалась скорость износа щеток) количество опытов в эксперименте уменьшилось с 27 до 9, т.е. в 3 раза.

Во втором случае процесс изменения параметров агрегата (кинематической вязкости и кислотного числа рабочей жидкости АМГ-10) описывался нелинейными моделями. Отмечено, что изменение по наработке вязкости и кислотного числа масла АМГ-10 в турбонасосной установке имеет свои особенности, например, в отличие от масла МК-8, используемого в ГТД (где вязкость по наработке возрастает) в ТНУ она падает, что обусловлено особенностями условий работы жидкости: высокое давление (до 210 кг/см²); пульсации давления; фракционный состав рабочей жидкости; резкое изменение термоокислительной стабильности рабочей жидкости при повышении температуры; образование отложений и др..



В натуральных значениях факторов T и τ модели изменения K_{OH} и ν по наработке имеют вид:

$$K_{OH} = (K_{OH})_0 \exp[6,3795 \cdot \tau \cdot \exp(-17179 / RT)]; \quad (10)$$

$$\nu = \nu_0 \exp[-0,89\tau \cdot \exp(9854 / RT)]; \quad (11)$$

$$T \in 323...423 \text{ K}, \tau \in 0...70 \text{ час.}$$

где $(K_{OH})_0$, ν_0 – исходные (до проведения ПЭ) значения кислотного числа и кинематической вязкости рабочей жидкости; R – универсальная постоянная; T – температура (К); τ – длительность наработки турбонасосной установки (час).

Погрешность моделирования составила 14 % (рисунок 4). При этом за счет синтеза (совмещения) планов объем и длительность эксперимента уменьшились в 2 раза.

Рассмотрены примеры решения различных задач с применением регрессионных моделей.

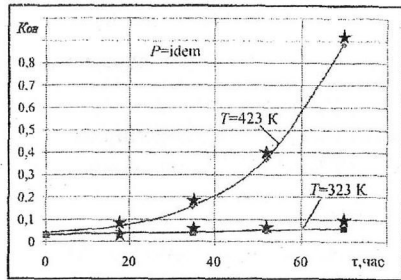
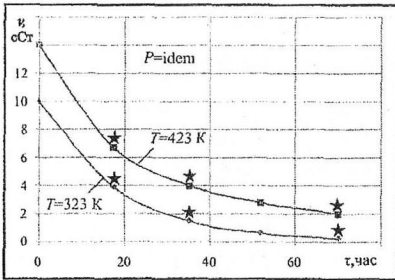


Рисунок 4 — ● — расчетные значения ν и $K_{ОН}$; ★ — экспериментальные значения ν и $K_{ОН}$

Основные результаты работы и выводы

1. Проведено теоретическое обоснование метода моделирования изменения параметров агрегатов ГТД и энергоустановок летательных аппаратов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения, позволяющего уменьшить временные и материальные затраты на проведение экспериментального исследования.

2. При моделировании изменения одновременно нескольких параметров агрегата по наработке показана возможность уменьшения затрат на эксперимент путем перехода на синтез (совмещение) нескольких планов эксперимента в их меньшем числе (в пределах в одном плане эксперимента).

3. При большом количестве независимых факторов в регрессионной модели, существенно усложняющих процесс моделирования или делающих его невозможным, планирование эксперимента проводится в критериальной форме подобия, что позволяет уменьшить количество требуемых опытов. В рассмотренном примере для модели, содержащей 8 независимых факторов, переход к 3 независимым критериям подобия, позволил уменьшить количество требуемых опытов в 32 раза.

4. Разработана методика и программное обеспечение по моделированию изменения параметров агрегатов ГТД и энергоустановок летательных аппаратов по наработке в различных условиях эксплуатации и режимах нагружения, позволяющие уменьшить временные и материальные затраты на экспериментальное исследование.

5. Разработанная методика позволила построить линейную модель износа щеток генератора ГС-12ТО ГТД ТА-6А и нелинейные модели изменения по наработке кислотного числа и кинематической вязкости рабочей жидкости АМГ-10 турбокомпрессорной установки ТНУ-86А самолета Ил-86.

Проверка моделей подтвердила их адекватность. При этом затраты на эксперимент по времени уменьшились: за счет совмещения планов эксперимента — в 2 раза; за счет обоснованного учета фактора времени в регрессионной модели — в 3 раза; за счет оптимизации последовательности реализации опытов в ПЭ — на 5,5 %.

Основные публикации по теме диссертации

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Планирование многофакторных экспериментов при исследовании динамических процессов авиационных ГТД. / А.С. Гишваров, А.В. Зырянов, Г.К. Агеев // Вестник СГАУ: науч. журн. Самарский гос. аэрокосмич. ун-та 2006. С. 127-130.
2. Выбор вида регрессионной модели при экспериментальном исследовании динамических процессов авиационных ГТД. / Г.К. Агеев // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2009. Т. 12, № 2(31). С. 14-18.
3. Обоснование вида целевой функции выбора совмещенных планов эксперимента при моделировании процессов расходования ресурса изделий. / Г.К. Агеев // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2011. Т. 15, № 3(43). С. 25-27.
4. Оптимизация моментов измерения параметров ГТД при прогнозировании его состояния. / Г.К. Агеев // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2011. Т. 15, № 4(44). С. 10-14.
5. Повышение эффективности прогнозирования надежности двигателей на основе планированного эксперимента. / Г.К. Агеев, М.Н. Давыдов, А.Р. Фатыхова // Вестник ВГТУ: науч. журн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2011. Т. 7. №4. С. 62-66.

В других изданиях

6. Оптимизация многофакторного исследования динамических процессов авиационной техники. / Г.К. Агеев, А.В. Зырянов, Е.А. Могильницкий // Современные проблемы расчета и проектирования авиационно-ракетной техники: матер. Всерос. науч.-техн. конф.. Уфа: УГАТУ, 2006. С. 105-111.
7. Прогнозирование параметров энергетических установок с изменяющимися во времени характеристиками / Г.К. Агеев, А.С. Гишваров, В.С. Жернаков // Проблемы машиноведения и критических технологий в машиностроительном комплексе РБ: матер. Всерос. науч.-техн. конф.. Уфа: УГАТУ, 2006. С. 55-66.
8. Методы оптимизации экспериментального исследования ГТД / А.В. Зырянов, Г.К. Агеев, А.С. Гишваров // Аэрокосмическая техника и высокие технологии-2007: матер. Всерос. науч.-техн. конф.. Пермь: ПГТУ, 2007. С. 11-14.
9. Индивидуальное прогнозирование параметров ГТД в эксплуатации/ А.С. Гишваров, Г.К. Агеев, Х.С. Гумеров // Аэрокосмическая техника и высокие технологии-2007: матер. Всерос. науч.-техн. конф.. Пермь: ПГТУ, 2007. С. 14-17.
10. Технология моделирования процессов авиационных ГТД с применением метода интегрального планирования эксперимента/ А.В. Зырянов, Г.К. Агеев, А.С. Гишваров // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: матер. Всерос. науч.-техн. конф.. Казань: КГТУ, 2007. С. 25-27.

АГЕЕВ Георгий Константинович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АГРЕГАТОВ ГТД И
ЭНЕРГОУСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО НАРАБОТКЕ

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 28.04.2012 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 734.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12