



Бурова Аделя Юрьевна

**МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ РАЗНОТЯГОВОСТИ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ
ДВУХКОНТУРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ
ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО САМОЛЁТА**

Специальность 2.5.15.

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Новичков Вадим Михайлович, кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Ахмедзянов Дмитрий Альбертович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», декан факультета авиационных двигателей, энергетики и транспорта

Грасько Тарас Васильевич, кандидат технических наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», заместитель начальника факультета летательных аппаратов – начальник учебной части

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение»

Защита состоится 21 сентября 2026 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=187741

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.327.06

д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Задача уменьшения разнотяговости двигателей возникла одновременно с появлением в авиации самолётов с количеством двигателей на борту более одного, установленных симметрично относительно оси самолета. Сначала она решалась исключительно с помощью рычагов управления двигателями (РУД).

В современной авиации эта задача решается следующими путями (или их комбинацией): 1) подбором двигателей с минимальной разнотяговостью, 2) компенсацией разнотяговости двигателей (асимметрии тяги) с помощью поверхностей управления самолётом, 3) заданием отличающихся друг от друга режимов работы двигателей с помощью РУД («вилка» РУД).

В первом случае подбор пары двигателей, как правило, производится с учётом частот вращения либо ротора низкого давления (РНД), либо ротора высокого давления (РВД) каждого из турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД).

Во втором случае компенсация асимметрии тяги в полете самолёта производится с помощью руля направления, так как при асимметрии тяги самолёт летит со скольжением, что вызывает увеличение аэродинамического сопротивления самолёта набегающему потоку воздуха и соответствующее ему увеличение расхода топлива.

В третьем случае допускается рассогласование положения РУД в 6° , а превышение этого значения негативно влияет на безопасность полётов и может привести даже к катастрофе. Это связано с тем, что разнотяговость ТРДД силовой установки двухдвигательного самолёта приводит к появлению разворачивающего момента сил, действующих на самолёт в полёте, и снижению запаса его устойчивости и управляемости, что, в свою очередь, увеличивает часовой и километровый расход топлива. По заявлению двигателестроительной фирмы «Pratt & Whitney», уменьшение разнотяговости ТРДД семейства PW-2000, установленных на среднемагистральный самолёт типа Boeing 757-200, позволяет экономить порядка 170 тысяч долларов в год за счёт уменьшения расхода топлива в полёте. А для крупных сверхзвуковых самолётов, таких, как, например, американский В-1В «Лансер», уменьшение разнотяговости их ТРДД в полёте может обеспечить экономию до 12–14% топлива от уровня первоначальной заправки. Анализ исследований показал, что разнотяговость ТРДД может достигать 7–12%.

Уменьшение разнотяговости ТРДД, установленных на самолёт с двухдвигательной силовой установкой, позволит:

- повысить его топливную эффективность за счёт снижения удельного расхода топлива при сохранении требуемой тяги силовой установки в полёте;
- увеличить дальность полёта на одной заправке;
- повысить безопасность полёта;
- снизить выбросы веществ, загрязняющих окружающую среду.

Известные методы и методики уменьшения и компенсации разнотяговости ТРДД многодвигательных реактивных самолётов основаны на подборе двигателей с наиболее близкими параметрами и на компенсации асимметрии тяги с помощью поверхностей управления самолётом. Подбор двигателей для комплектации самолёта обычно производится на основании деления на относительно небольшое количество групп по тяге при стандартных условиях, что приводит к большим ошибкам, особенно в условиях полёта. Для компенсации разнотяговости в полёте в настоящее время не предусмотрено специальных систем автоматического управления тягой, которые бы учитывали индивидуальные особенности каждого двигателя.

Поэтому тема диссертационной работы «Метод уменьшения разнотяговости турбореактивных двухконтурных двигателей силовой установки двухдвигательного самолёта» является актуальной.

Степень разработанности темы

В Российской Федерации (РФ) задачи уменьшения и компенсации разнотяговости двигателей многодвигательных реактивных самолётов решали Ю.Г. Борисенко, М.Л. Галлай, В.В. Дворниченко, В.А. Донцов, А.А. Иноземцев, А.С. Лесовский, С.Ю. Скрипниченко и другие. Также, направлению совершенствования характеристик ТРДД и авиационных силовых установок посвящены труды таких учёных, как А.Б. Агульник, В.А. Афанасьев, В.И. Бакулев, В.А. Голубев, Е.П. Мышелов, В.М. Новичков и др.

В частности, В.В. Дворниченко разрабатывал вероятностно-статистические модели ТРДД с использованием представительных статистических выборок двигателей для минимизации разнотяговости ТРДД. А.С. Лесовский исследовал влияние асимметрии тяги в полёте на пилотирование самолёта, безопасность полётов, увеличение трудности пилотирования в неустановившихся режимах полёта и увеличение часового и километрового расхода топлива. С.Ю. Скрипниченко исследовал влияние несимметрии тяги ТРДД на приrost лобового сопротивления самолёта. А.А. Иноземцев с соавторами разработали способ автоматического управления силовой установкой самолёта с двумя газотурбинными двигателями.

Цель работы – разработка метода уменьшения разнотяговости ТРДД (асимметрии тяги) силовой установки двухдвигательного самолёта для повышения безопасности полёта самолёта в крейсерском режиме и снижения расхода топлива.

Объект исследования – тяговые характеристики силовой установки двухдвигательного самолёта с ТРДД, подготавливаемыми к установке на самолёт в заводских условиях.

Предмет исследования – явление разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта, обусловленное естественным разбросом значений параметров двигателей одной серии,

выявленных в результате стендовых испытаний и определённых в крейсерском режиме полёта.

Задачи исследования:

1. Анализ современного состояния проблемы разнотяговости авиационных двигателей и выявление основных недостатков известных методов уменьшения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта.

2. Разработка способа и алгоритма отбора пар ТРДД одной серии с минимальными отклонениями высотно-скоростных и дроссельных характеристик, определяемых по результатам стендовых испытаний.

3. Разработка алгоритма определения оценочных значений силы тяги ТРДД по его измеряемым параметрам и параметрам самолёта в полёте, использующего индивидуальные характеристики каждого ТРДД, определяемые по результатам стендовых испытаний с возможностью учёта изменения коэффициентов полезного действия (КПД) агрегатов и узлов ТРДД при его эксплуатации.

4. Разработка структуры и алгоритма работы системы автоматической коррекции тяги ТРДД двухдвигательного самолёта для компенсации разнотяговости его двигателей в крейсерском режиме полёта.

5. Разработка метода уменьшения разнотяговости ТРДД силовой установки двухдвигательного самолёта в крейсерском режиме полёта за счёт улучшения балансировки тяг двигателей.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем.

1. Разработан метод уменьшения разнотяговости ТРДД силовой установки двухдвигательного самолёта, включающий два этапа: селективный отбор пар ТРДД одной серии для их установки на самолет (Этап 1) и коррекцию тяги двигателей в полете (Этап 2).

2. Разработаны способ и алгоритм отбора ТРДД одной серии для комплектации двухдвигательной силовой установки самолёта, отличающиеся от существующих применением метода иерархического кластерного анализа, позволяющего разделить двигатели одной серии на пары с минимальными отклонениями высотно-скоростных и дроссельных характеристик, а также расширенным набором параметров, косвенно характеризующих тягу, что снижает разнотяговость между двигателями в парах.

3. Разработан алгоритм определения оценочных значений силы тяги ТРДД по измеренным значениям рабочих параметров этого двигателя и параметров крейсерского полёта, отличающийся от существующих применением табличной формы представления результатов математического моделирования рабочих процессов в двигателе при различных условиях полёта в крейсерском режиме и позволяющий учесть индивидуальные параметры двигателя и изменение

КПД его агрегатов и узлов.

4. Разработаны способ и алгоритм уменьшения разнотяговости ТРДД двухдвигательной силовой установки самолёта в крейсерском режиме полёта, отличающиеся от существующих тем, что разнотяговость уменьшается за счет целенаправленного изменения частоты вращения роторов двигателей в зависимости от разности оценочных значений силы тяги двигателей в полёте, определяемой с учетом индивидуальных особенностей каждого двигателя, текущих условий полёта и изменения КПД узлов двигателя.

5. Разработаны структура и алгоритм работы системы автоматической коррекции тяги ТРДД силовой установки двухдвигательного самолёта для уменьшения их разнотяговости в крейсерском режиме полёта, учитывающие предложенный алгоритм определения оценочных значений силы тяги ТРДД.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем.

1. Обоснован способ уменьшения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта в крейсерском режиме путём балансировки тяги двигателей в полёте.

2. Получен алгоритм селективного отбора ТРДД одной серии, позволяющий выбирать наиболее близкие по тяге двигатели для их установки на двухдвигательные самолёты.

3. Впервые предложены и обоснованы способ и алгоритм уменьшения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта с системой автоматической коррекции тяги его двигателей, позволяющей уменьшать их разнотяговость в крейсерском режиме полёта, балансируя их тяги.

Практическая значимость работы состоит в следующем.

1. Предложенный способ селективного отбора ТРДД одной серии позволяет выбирать наиболее близкие по тяге пары двигателей для их установки на двухдвигательный самолёт, что при минимальных затратах на уменьшение их разнотяговости в полёте позволит улучшить балансировку сил, действующих на самолёт в крейсерском режиме полёта.

2. Предложенный способ уменьшения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта с системой автоматической коррекции тяги его двигателей позволит повысить качество управления двухдвигательным самолётом за счет выравнивания самолёта в крейсерском режиме полёта.

3. Предложенный метод уменьшения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта в крейсерском режиме полёта способствует экономии топлива за счёт исключения необходимости коррекции разнотяговости аэродинамическими поверхностями управления самолётом.

Методология и методы исследования

При решении задач диссертационной работы использована совокупность методов теории авиационных двигателей, теории автоматического управления, системного анализа, теории

вероятностей и метода термогазодинамического моделирования ТРДД, а также методы регрессионного анализа и иерархического кластерного анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Двухэтапный метод уменьшения разнотяговости ТРДД силовой установки двухдвигательного самолёта, на первом этапе которого осуществляется селективный отбор двигателей в условиях их серийного производства, на втором этапе – корректировка тяги силовой установки в крейсерском режиме полёта самолёта по результатам определения и сравнительного анализа оценок значений силы тяги каждого двигателя.

2. Способ и алгоритм отбора пар ТРДД одной серии для комплектации силовой установки двухдвигательного самолёта по результатам регрессионного анализа и иерархического кластерного анализа.

3. Способ и алгоритм уменьшения разнотяговости ТРДД силовой установки двухдвигательного самолёта в крейсерском режиме полёта, использующие результаты термогазодинамического моделирования высотно-скоростных и дроссельных характеристик ТРДД, представленные в виде специально сформированных матриц данных, и учитывающий возможность совокупного изменения КПД узлов установленных на самолёт ТРДД.

4. Структура и алгоритм работы системы автоматической коррекции тяги ТРДД силовой установки в крейсерском режиме полёта двухдвигательного самолёта, учитывающие особенности разработанного алгоритма уменьшения их разнотяговости и результаты определения и сравнительного анализа оценок значений силы тяги обоих ТРДД с помощью матриц данных, содержащих расчетные значения параметров полёта и рабочие параметры обоих ТРДД.

Достоверность результатов работы

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается результатами проведённого математического моделирования, а также согласованностью результатов с известными данными в этой области.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практических и научно-технических конференциях: XXIV Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации» в 2015 году; IV Всероссийской научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения» в 2016 году; XXVIII Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации» в 2019 году; IV Межведомственной научно-технической конференции «Проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления специального

назначения» в 2019 году; Международной научно-технической конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2019» в 2019 году; XXIX Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» в 2020 году; 21-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» в 2022 году; Международной научно-технической конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2022» в 2022 году, 23-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» в 2024 году.

Публикации по теме исследования

По материалам диссертационной работы опубликованы 28 работ, из них: 10 статей в рецензируемых научных изданиях ВАК РФ по специальности 2.5.15 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» и приравненных к ним, 6 статей в других рецензируемых научных изданиях ВАК РФ, 1 статья в Научном электронном архиве заочной научной электронной конференции Российской академии естествознания, 4 статьи и тезисы 4-х докладов в сборниках материалов научных конференций, проиндексированных в базе данных РИНЦ, 1 аннотация конкурсной работы и 2 публикации в сборниках материалов научных конференций, проиндексированных в международной базе данных «Scopus».

Внедрение результатов работы

Использование результатов проведённых и приведённых в диссертации исследований в производственную практику подтверждается соответствующими актами: Актом об использовании результатов диссертационной работы в Акционерном обществе «Московское машиностроительное предприятие имени В.В. Чернышёва» и Актом об использовании результатов диссертационной работы в Федеральном автономном учреждении «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского».

Личный вклад автора состоит в следующем.

Представленные в работе научные результаты получены автором лично. В частности:

1. Разработан новый метод уменьшения разнотяговости пар ТРДД по результатам их селективного отбора в условиях серийного производства и по результатам определения и сравнительного анализа оценочных значений силы тяги этих двигателей в крейсерском полёте.
2. Предложена и разработана новая методика уменьшения разнотяговости ТРДД одной серии в условиях серийного производства при селективном отборе этих двигателей по результатам стендовых испытаний и по результатам моделирования тех же двигателей с учётом совокупного изменения КПД их узлов.

3. Проведено моделирование ТРДД с учётом совокупного изменения КПД их узлов по результатам стендовых испытаний и формирование матриц данных для расчетных значений рабочих параметров ТРДД двухдвигательного самолёта в полёте.

4. Предложена и разработана новая методика уменьшения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта в крейсерском режиме полёта при определении и сравнительном анализе оценочных значений силы тяги этих двигателей по результатам измерения значений параметров полёта и рабочих параметров обоих двигателей в полёте и по результатам направленного перебора матриц данных о расчетных значениях тех же параметров.

5. Предложены и разработаны структура и алгоритм работы системы автоматической коррекции тяги ТРДД двухдвигательного самолёта в крейсерском полёте.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 144 страниц, включает 54 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 122 источника. Приложение содержит два акта об использовании результатов диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обосновывается актуальность темы исследования, поставлена цель диссертационной работы, определены её задачи, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются причины возникновения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта и известные методы её уменьшения, которые реализуются, когда программы управления по частотам вращения РНД и РВД работают выборочно. Описаны типовые схемы управления силовой установкой такого самолёта, особенности управления ею и способы уменьшения влияния разнотяговости её ТРДД на траекторию полёта. Приведены требования, предъявляемые к силовой установке двухдвигательного самолёта для обеспечения безопасности полётов при разнотяговости его ТРДД. Выявлены основные недостатки существующих методов уменьшения разнотяговости ТРДД.

Во второй главе рассматриваются различные подходы к решению проблемы уменьшения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта, а также аналоговые и цифровые методы решения этой проблемы в полуавтоматическом режиме управления полётом такого самолёта с визуальным определением разнотяговости его ТРДД по компасу и креномеру и в автоматическом режиме при использовании компьютерных систем. Выявлены теоретические предпосылки решения этой проблемы. Предложен двухэтапный метод уменьшения разнотяговости ТРДД

одной серии в условиях их серийного производства и эксплуатации в силовых установках двухдвигательных самолётов. Представлена структурная схема этого метода (Рис.1).

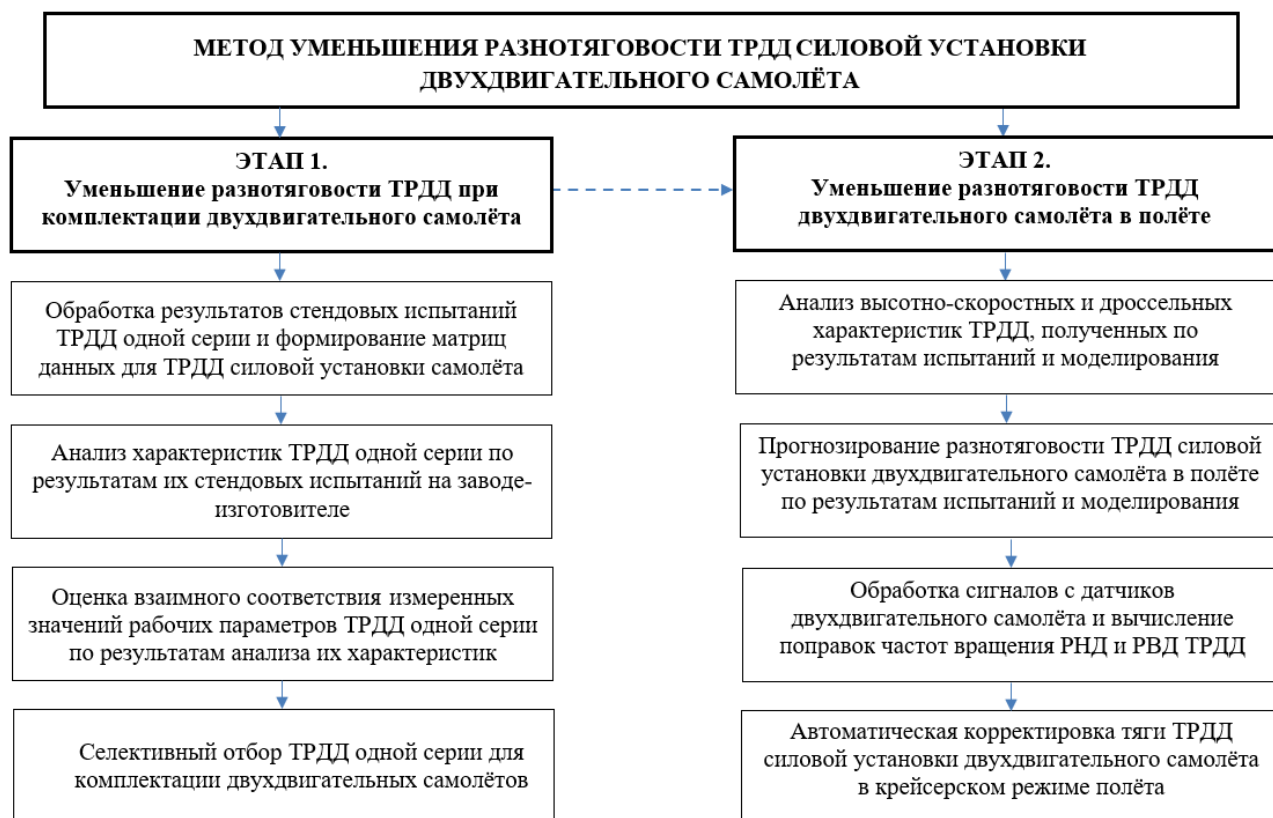


Рис.1. Схема метода уменьшения разнотяговости ТРДД

На первом этапе решается задача отбора пар двигателей для установки на самолет, при которой минимизируется разнотяговость в парах. Отбор производится по результатам стендовых испытаний двигателей и результатам математического моделирования. На втором этапе решается задача компенсации разнотяговости двигателей, установленных на самолет, за счет введения в оборудование самолёта системы автоматической коррекции тяги (САКТ).

В третьей главе предложены и описаны принципы, алгоритмы и методики этапа 1 разработанного метода. Логическая схема алгоритма этапа 1 представлена на Рис.2.

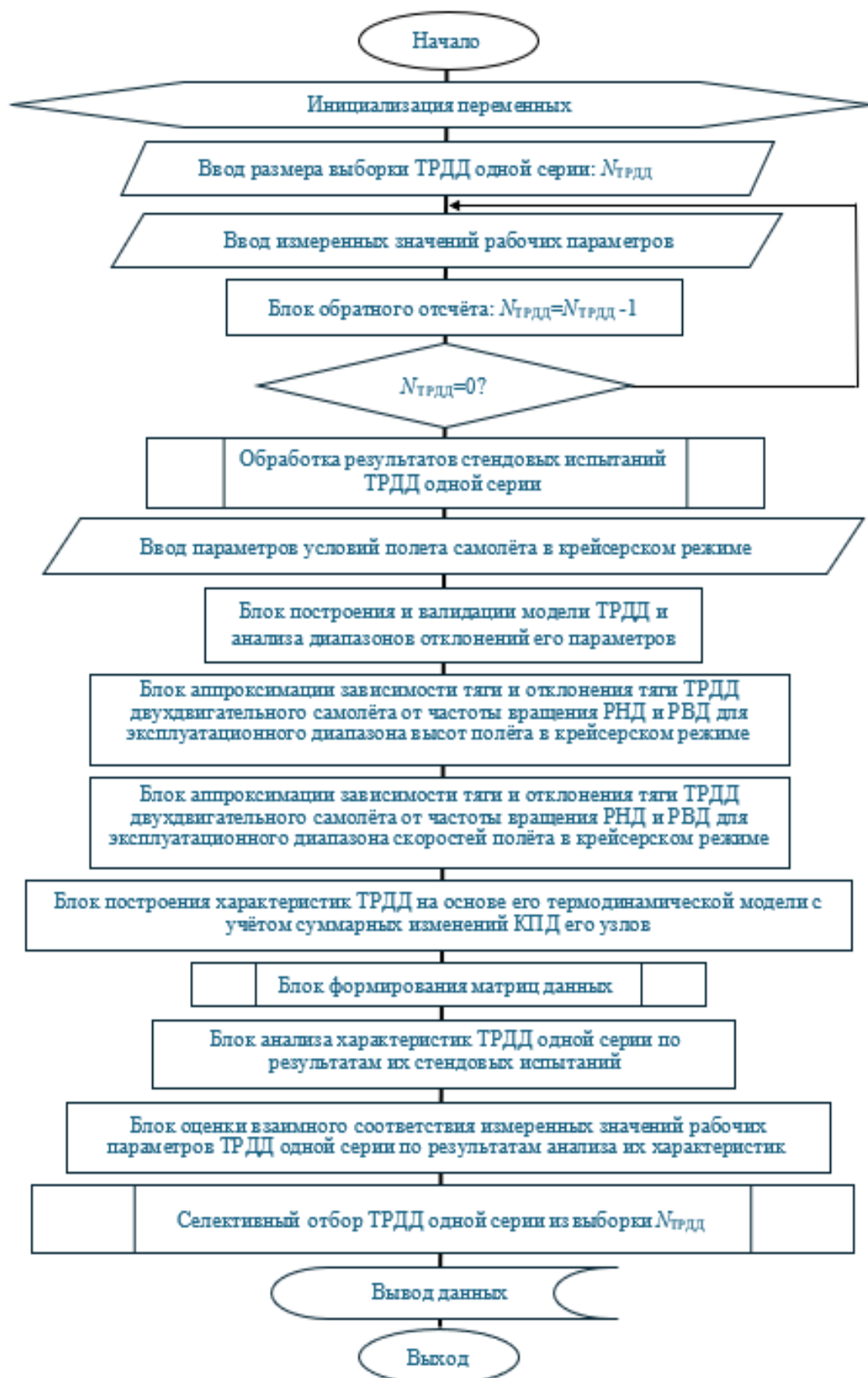


Рис.2. Схема алгоритма (этап 1 предлагаемого метода)

На этапе 1 разнотяговость ТРДД одной серии уменьшается путём введения поправок $\delta n_{1пр}$ и $\delta n_{2пр}$ приведённых частот вращения РНД $n_{1пр}$ и РВД $n_{2пр}$. Применяемая для этого

нормированная двумерная случайная функция $\varphi(x,y)=\varphi_1(x)\cdot\varphi_2(y)$ при $r_{x,y}=0$ описывает в системе координат $X-Y-Z$ поверхность $Z(x,y)$ пространственной фигуры $(\alpha^1, \delta^1, \beta^1, \gamma^1, \varepsilon^1)$, представленную на Рис.3. Вероятность попадания параметров x и y внутрь прямоугольника $(\alpha^1, \delta^1, \beta^1, \gamma^1)$ составляет 99,44 % (Рис.3). Если $x=n_1$ и $y=n_2$ (для упрощения записи формулы индексы «пр» не указаны), то вероятностное распределение функции $\varphi(x,y)=P_{n_1,n_2}=P_{n_1}\cdot P_{n_2}$ по нормальному закону с дисперсиями σ_1^2 и σ_2^2 при $0 < z \leq 3.0$ описывается уравнением (1):

$$P_{n_1,n_2} = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2\sigma_2^2} \int_{-z\sigma_1}^{+z\sigma_1} \int_{-z\sigma_2}^{+z\sigma_2} e^{-\frac{(n_1-\bar{n}_1)^2}{2\sigma_1^2} - \frac{(n_2-\bar{n}_2)^2}{2\sigma_2^2}} dn_1 dn_2 = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2\sigma_2^2} \int_{-z\sigma_1}^{+z\sigma_1} e^{-\frac{(n_1-\bar{n}_1)^2}{2\sigma_1^2}} dn_1 \int_{-z\sigma_2}^{+z\sigma_2} e^{-\frac{(n_2-\bar{n}_2)^2}{2\sigma_2^2}} dn_2 \quad (1)$$

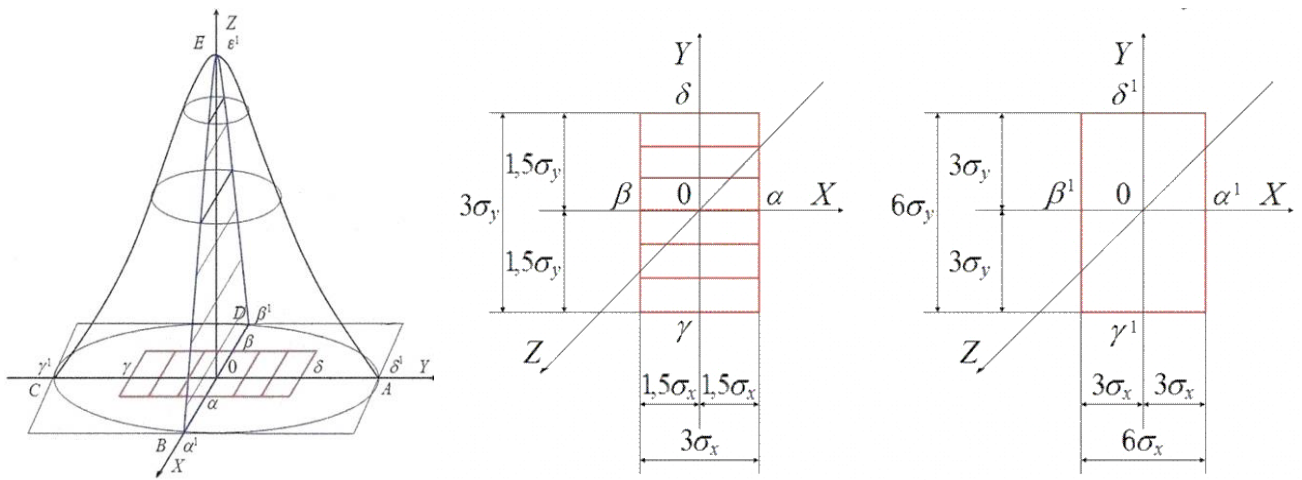


Рис.3. Виртуальный «колокол»

Сужение диапазонов распределения приведённых значений $n_{1пр}$ и $n_{2пр}$ позволит уменьшить разнотяговость ТРДД одной серии по результатам их стендовых испытаний и моделирования с учётом изменений КПД узлов этих ТРДД на основе термогазодинамической модели и моделей с системой нелинейных алгебраических уравнений для определения значений следующих коэффициентов.

Зависимости сил тяги $R(n_{1пр}, H_n)$ и $R(n_{2пр}, H_n)$ ТРДД двухдвигательного самолёта от приведённых частот вращения РНД $n_{1пр}$ и РВД $n_{2пр}$ при изменении высоты полёта H_n в эксплуатационном диапазоне высот в крейсерском полёте формализованы в виде уравнений (2) – (4) с коэффициентами $B_{01}(H_n)$, $B_{02}(H_n)$, $B_{11}(H_n)$, $B_{12}(H_n)$, $B_{21}(H_n)$, $B_{22}(H_n)$, $BB_{02}(H_n)$ и $BB_{12}(H_n)$:

$$R(n_{1пр}, H_n) = B_{21}(H_n) \cdot (n_{1пр})^2 + B_{11}(H_n) \cdot n_{1пр} + B_{01}(H_n). \quad (2)$$

$$R(n_{2пр}, H_n) = B_{22}(H_n) \cdot (n_{2пр})^2 + B_{12}(H_n) \cdot n_{2пр} + B_{02}(H_n) \text{ при } n_{2пр} \leq 0,95. \quad (3)$$

$$R(n_{2пр}, H_n) = BB_{12}(H_n) \cdot n_{2пр} + BB_{02}(H_n) \text{ при } n_{2пр} > 0,95. \quad (4)$$

Зависимости сил тяги $R(n_{1пр}, M_n)$ и $R(n_{2пр}, M_n)$ ТРДД двухдвигательного самолёта от приведённых частот вращения РНД $n_{1пр}$ и РВД $n_{2пр}$ при изменении скорости полёта (числа Маха M_n) в эксплуатационном диапазоне скоростей в крейсерском полёте формализованы в виде уравнений (5) – (7) с коэффициентами $D_{01}(M_n)$, $D_{02}(M_n)$, $D_{11}(M_n)$, $D_{12}(M_n)$, $D_{21}(M_n)$, $D_{22}(M_n)$, $DD_{02}(M_n)$ и $DD_{12}(M_n)$:

$$R(n_{1пр}, M_n) = D_{21}(M_n) \cdot (n_{1пр})^2 + D_{11}(M_n) \cdot n_{1пр} + D_{01}(M_n). \quad (5)$$

$$R(n_{2пр}, M_n) = D_{22}(M_n) \cdot (n_{2пр})^2 + D_{12}(M_n) \cdot n_{2пр} + D_{02}(M_n) \text{ при } n_{2пр} \leq 0,95. \quad (6)$$

$$R(n_{2пр}, M_n) = DD_{12}(M_n) \cdot n_{2пр} + DD_{02}(M_n) \text{ при } n_{2пр} > 0,95. \quad (7)$$

Коэффициенты B , BB , D , DD определяются по результатам стендовых испытаний. В соответствии с Рис. 4 после селективного отбора, если в суженных диапазонах нормального распределения значений силы тяги и частот вращения роторов ТРДД оказываются параметры хотя бы двух ТРДД одной серии, то их разнотяговость ΔR $\Delta R_{TESTmin} = 0,0445$ в 1,5 раза меньше исходной разнотяговости ТРДД этой серии по результатам их стендовых испытаний $\Delta R_{TESTmax} = 0,0667$.

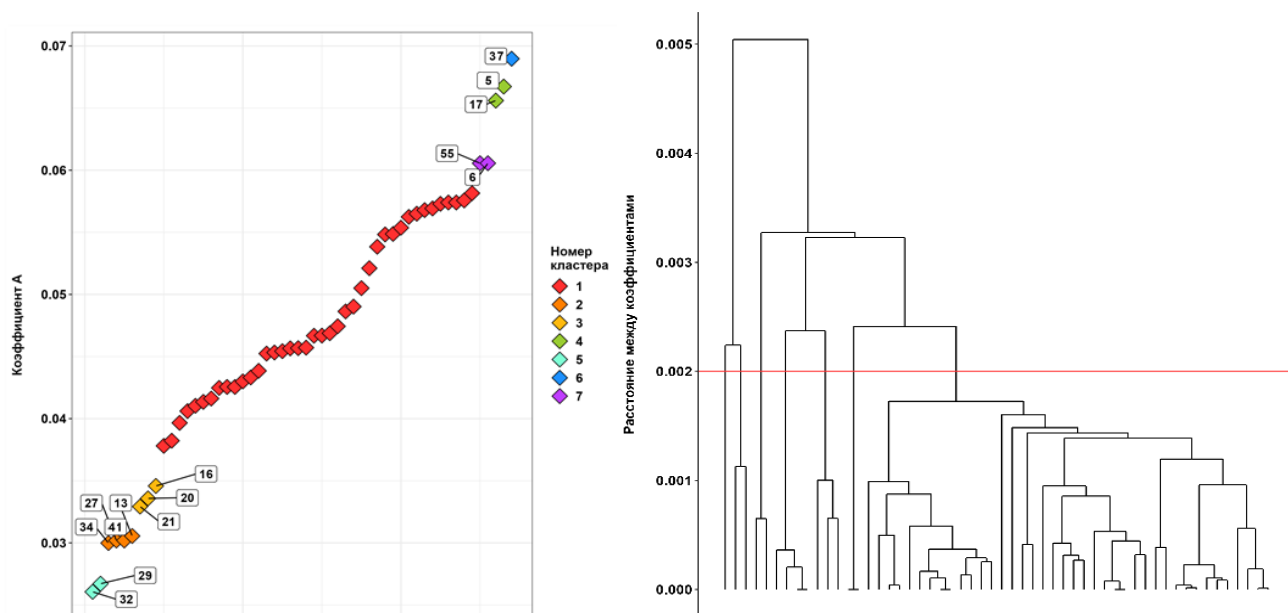


Рис.4. Результаты селективного отбора ТРДД на основе кластерного анализа

Индивидуальные особенности ТРДД определялись с учётом допустимых отклонений значений их рабочих параметров с определёнными значениями КПД узлов ТРДД от заданных значений этих параметров. Анализ характеристик ТРДД выполняется полнофакторным

виртуальным экспериментальным планом с определением границ отклонения для всех параметров и их сочетаний, не приводящих к отклонению за производственные допуски. Для определения близости друг к другу зависимостей, получаемых в результате регрессионного анализа, в пределах одного кластера используются расстояния Фреше. Результаты селективного отбора ТРДД на основе кластерного анализа приведены на Рис. 4. После выбора ТРДД для комплектации силовой установки самолёта повторяется селективный отбор других ТРДД из той же серии для комплектации силовой установки очередного самолёта. Силы тяги и частоты вращения РНД и РВД этих ТРДД одной серии должны соответствовать критериям по формулам (8) - (10). Традиционно при расчетах высотно-скоростных характеристик ТРДД рекомендуется в большинстве точек иметь недобор тяги не более полпроцента (0,5%). Поэтому, каждый из предложенных критериев ограничен числом 0,005:

1) критерий приближенного равенства силы тяги двух ТРДД одной серии:

$$|R_l - R_m| / (R_{\max} - R_{\min}) \leq 0,005 \text{ при } R_{\min} \leq R_l \leq R_{\max}, R_{\min} \leq R_m \leq R_{\max}, R_{\min} < R_{\max}, l \in \overline{1, L}, m \in \overline{1, L}, l \neq m \quad (8)$$

где R_l – сила тяга l -го ТРДД; R_m – сила тяга m -го ТРДД; $R_{\max}$ и $R_{\min}$ – максимальное и минимальное значения силы тяги ТРДД этой серии.

2) критерий приближенного равенства частот вращения РНД этих ТРДД:

$$|(n_1)_l - (n_1)_m| / [(n_1)_{\max} - (n_1)_{\min}] \leq 0,005 \text{ при } (n_1)_{\min} \leq (n_1)_l \leq (n_1)_{\max}, (n_1)_{\min} \leq (n_1)_m \leq (n_1)_{\max}, (n_1)_{\min} < (n_1)_{\max}, \quad (9)$$

где $(n_1)_l$ – частота вращения РНД l -го ТРДД; $(n_1)_m$ – частота вращения РНД m -го ТРДД; $(n_1)_{\max}$ и $(n_1)_{\min}$ – максимальное и минимальное значения частоты вращения РНД ТРДД этой серии.

3) критерий приближенного равенства частот вращения РВД этих ТРДД:

$$|(n_2)_l - (n_2)_m| / [(n_2)_{\max} - (n_2)_{\min}] \leq 0,005 \text{ при } (n_2)_{\min} \leq (n_2)_l \leq (n_2)_{\max}, (n_2)_{\min} \leq (n_2)_m \leq (n_2)_{\max}, (n_2)_{\min} < (n_2)_{\max}, \quad (10)$$

где $(n_2)_l$ – частота вращения РВД l -го ТРДД; $(n_2)_m$ – частота вращения РВД m -го ТРДД; $(n_2)_{\max}$ и $(n_2)_{\min}$ – максимальное и минимальное значения частоты вращения РВД ТРДД этой серии.

В четвертой главе предложены и описаны принципы, алгоритмы и методика этапа 2 разработанного метода и структура САКТ ТРДД двухдвигательного самолёта. На этапе 2 (см. схему на Рис.5) предлагается уменьшение разнотяговости ТРДД такого самолёта в крейсерском полёте, которые прошли отбор по результатам выполнения этапа 1.

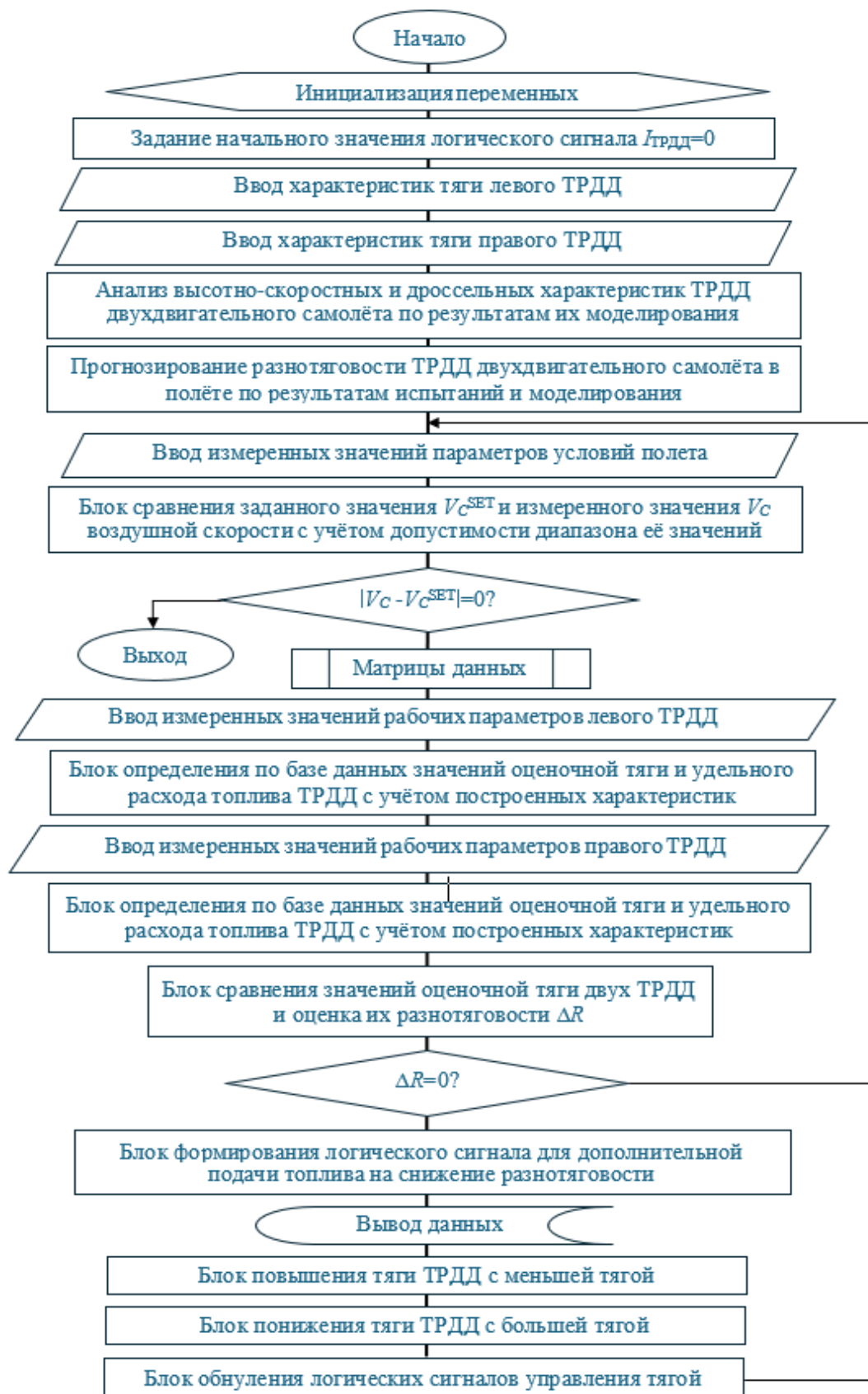


Рис.5. Схема алгоритма (этап 2 предлагаемого метода)

По результатам очередного сравнения оценочных значений силы тяги двух ТРДД начнется или не начнётся увеличение тяги одного из них и соответствующее уменьшение тяги другого двигателя и т.д.

Графические интерпретации результатов расчёта рабочих параметров ТРДД приведены на Рис.6–14.

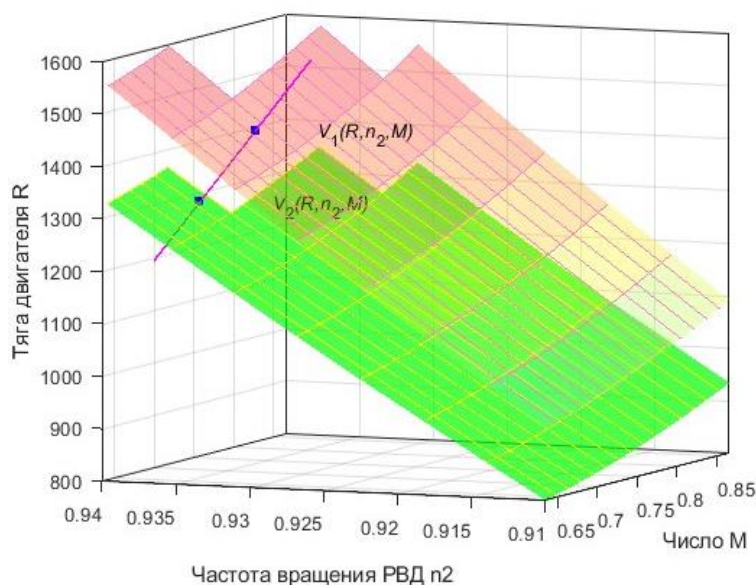


Рис.6. Зависимости силы тяги ТРДД от частоты вращения РВД и числа Маха

На Рис. 6 каждая поверхность соответствует определенной высоте полёта. Прямая линия соединяет известные точки, лежащие на поверхностях, и на этой прямой линии находится искомая точка, соответствующая оценочному значению силы тяги.

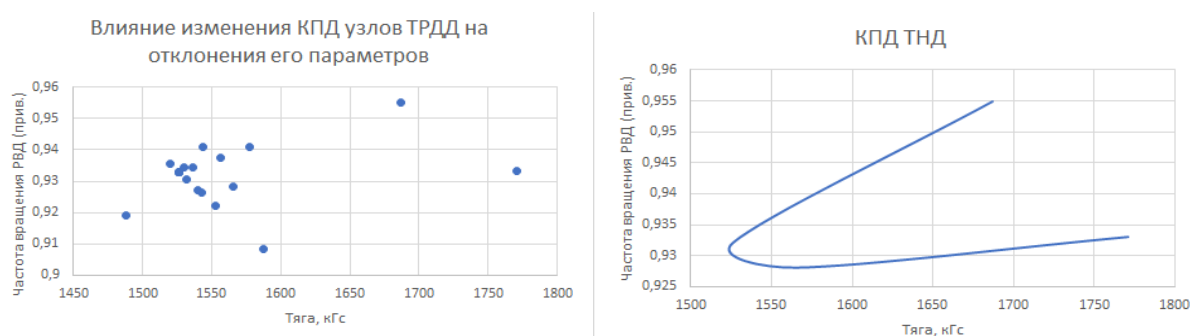


Рис.7. Графики отклонения тяги и частоты вращения РВД от расчётных значений при варьировании КПД различных узлов ТРДД и КПД турбины низкого давления (ТНД)

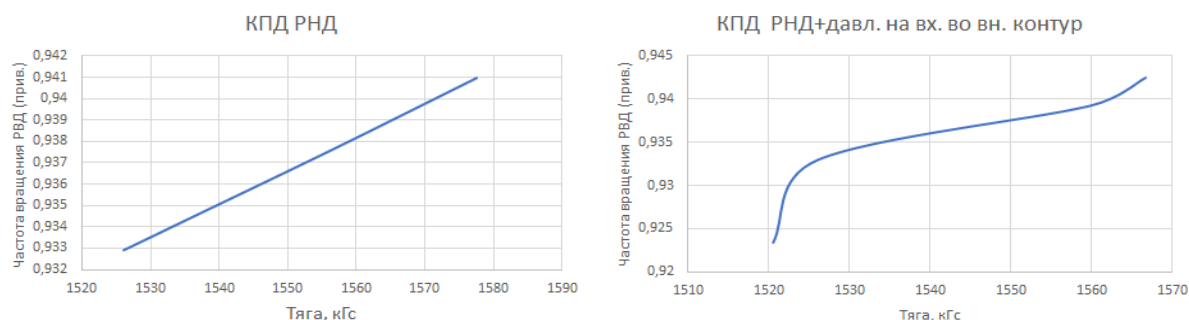


Рис.8. Графики отклонения тяги и частоты вращения РВД при варьировании КПД РНД и изменении давления на входе во внутренний контур при фиксированном отклонении КПД РНД

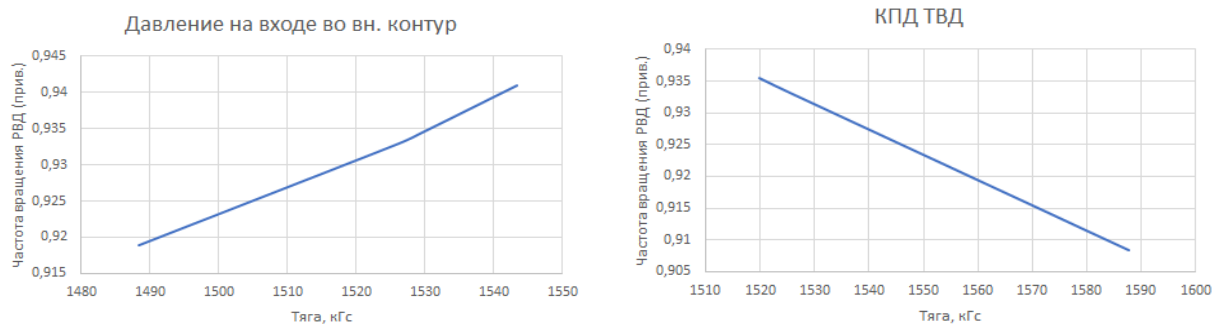


Рис.9. Графики отклонения тяги и частоты вращения РВД при изменении давления на входе во внутренний контур и при варьировании КПД турбины высокого давления (ТВД)

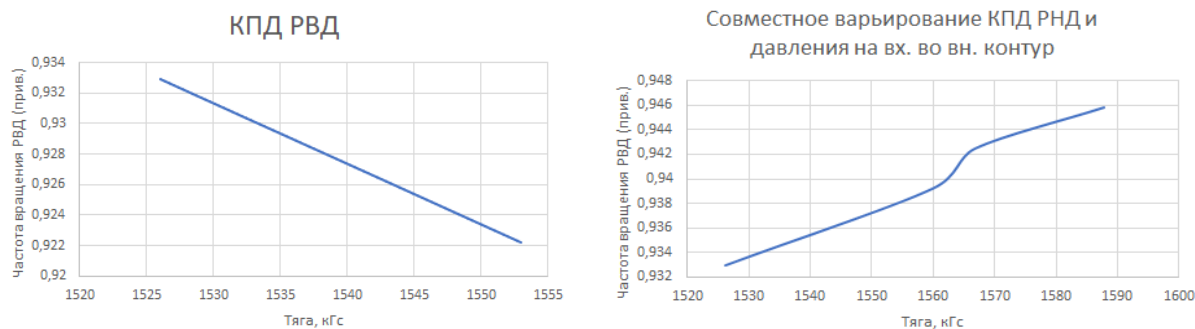


Рис.10. Графики отклонения тяги и частоты вращения РВД при варьировании КПД РВД и совместном варьировании КПД РНД и давления на входе во внутренний контур

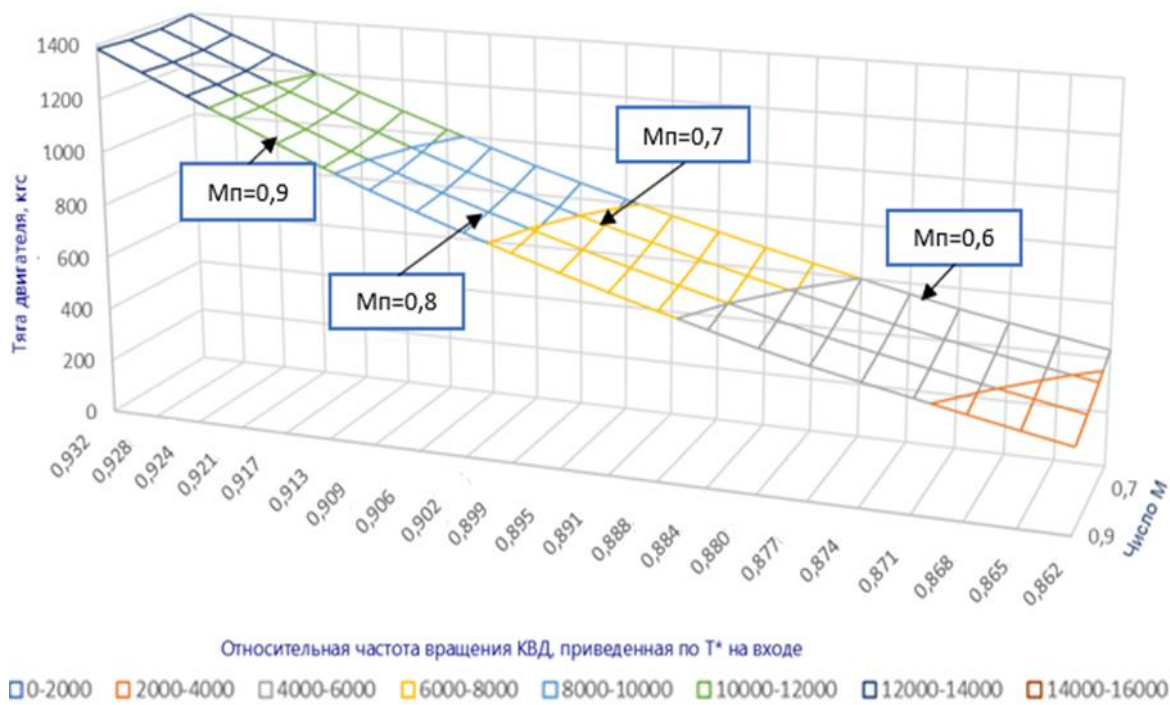


Рис.11. Результаты регрессионного анализа

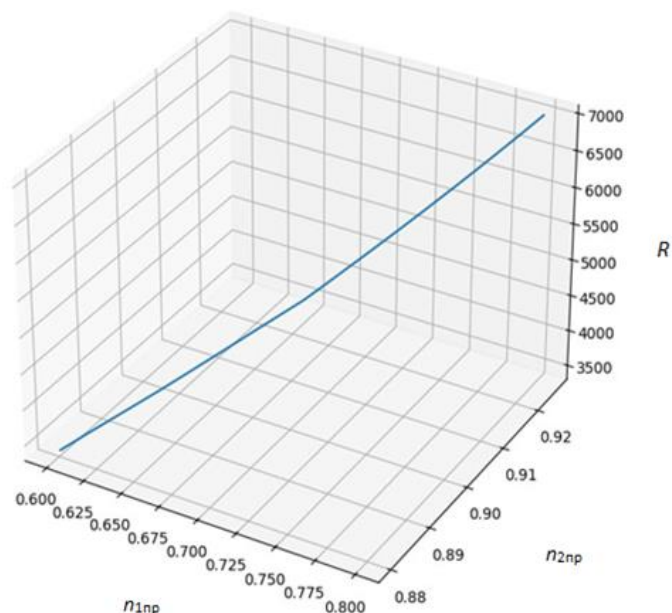


Рис.12. Результаты вычисления силы тяги ТРДД по значениям частот вращения роторов

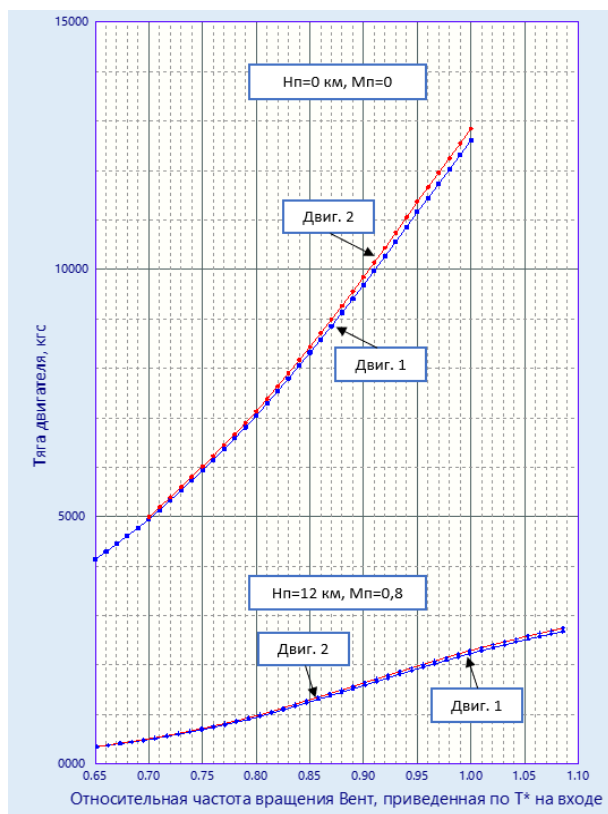


Рис.13. Расчётные зависимости тяги от приведённой относительной частоты вращения вентилятора для двух ТРДД

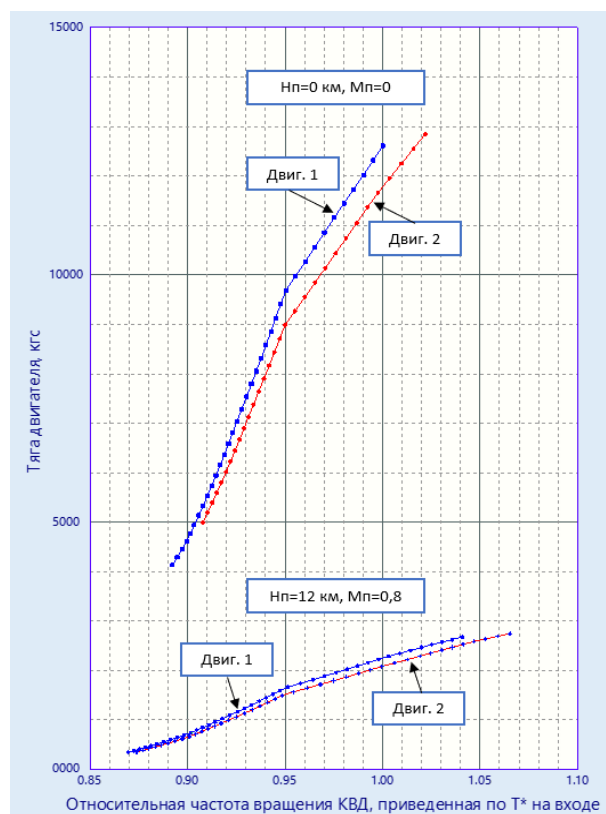


Рис.14. Расчётные зависимости тяги от приведённой относительной частоты вращения компрессора высокого давления для двух ТРДД

Результаты прогнозирования разнотяговости ТРДД представлены на Рис. 15. Схема САКТ ТРДД двухдвигательного самолёта представлена на Рис. 16.

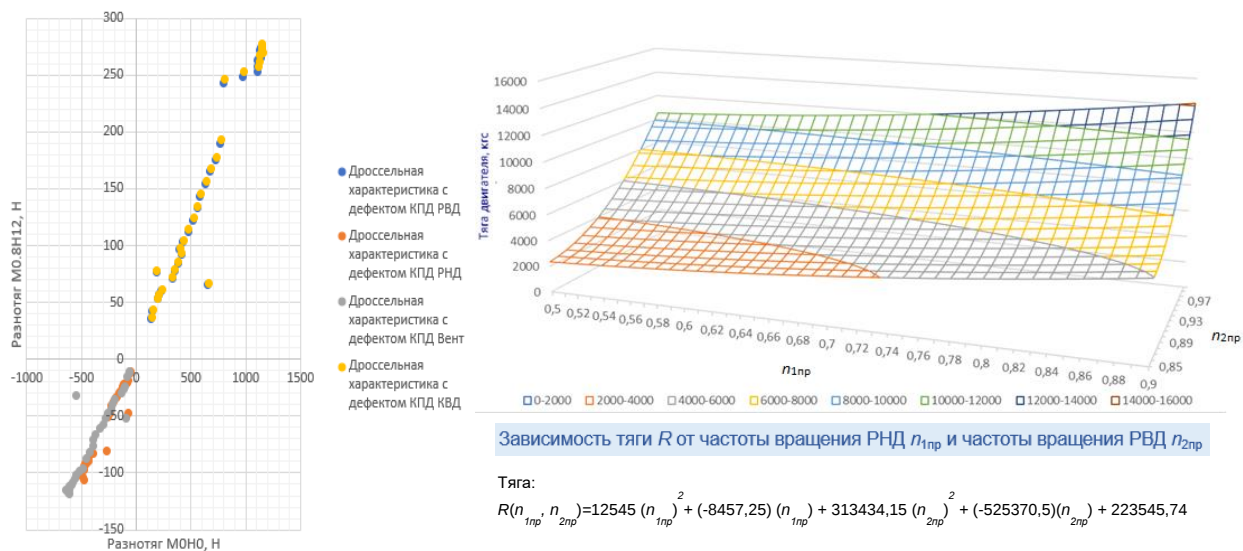


Рис.15. Результаты прогнозирования разнотяговости ТРДД: прогнозирование характеристик (слева) и зависимость тяги от приведенных частот вращения РНД и РВД (справа)

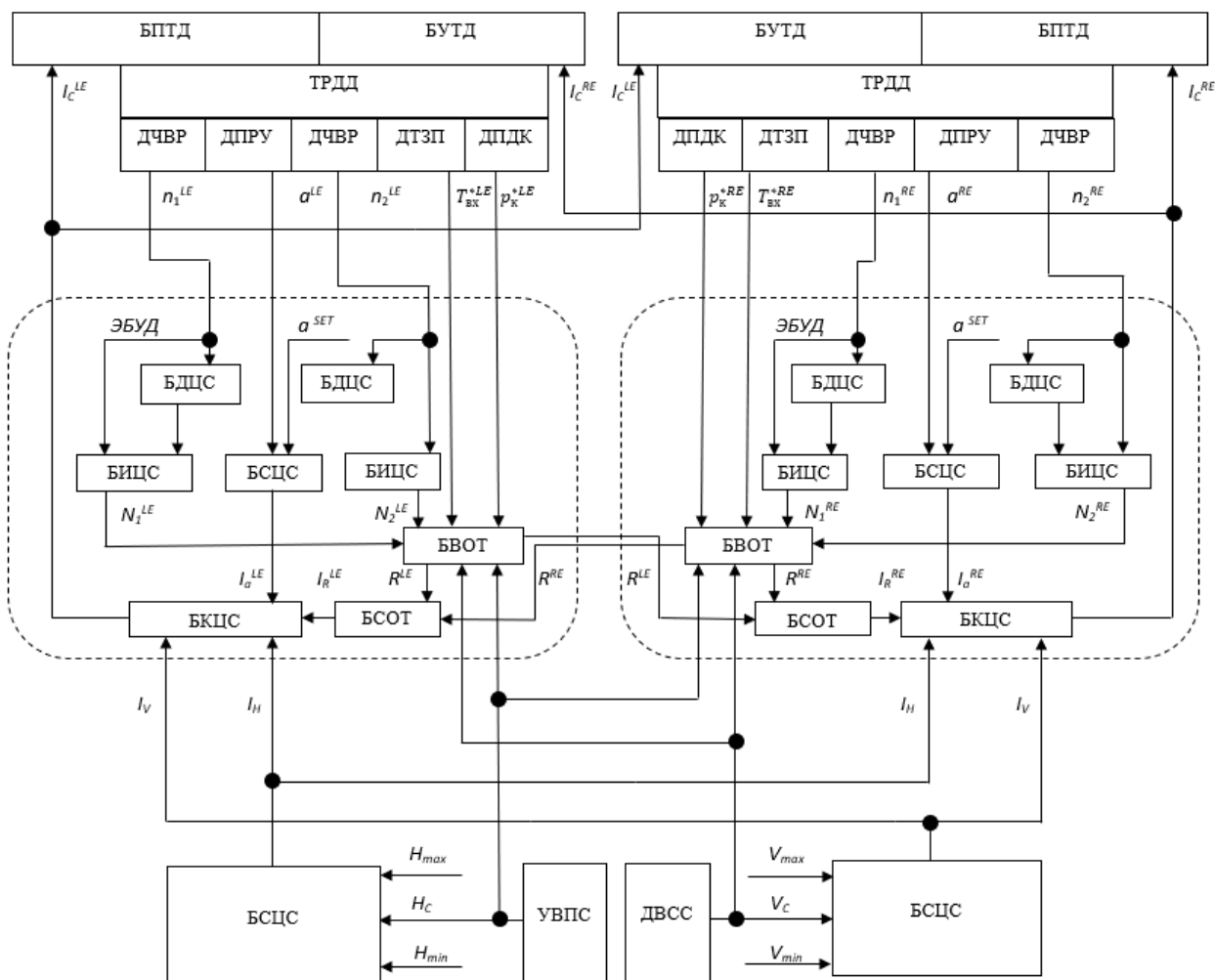


Рис.16. Схема САКТ ТРДД двухдвигательного самолёта

На Рис.16 приняты обозначения: БВТОТ – Блок вычисления оценок тяги; БДЦС – Блок

дифференцирования цифровых сигналов; БИЦС – Блок интегрирования цифровых сигналов; БКЦС – Блок контроля цифровых сигналов; БПТД – Блок повышения тяги двигателя; БСОТ – Блок сравнительной оценки тяги; БСЦС – Блок сравнения цифровых сигналов; БУТД – Блок уменьшения тяги двигателя; ДВСС – Датчик воздушной скорости самолёта; ДПДК – Датчик полного давления за компрессором; ДПРУ – Датчик положения рычага управления; ДТЗП – Датчик температуры заторможенного потока; ДТРД – Двухконтурный турбореактивный двигатель; ДЧВР – Датчик частоты вращения ротора; УВПС – Указатель высоты полёта самолёта; ЭБУД – Электронный блок управления двигателем; a^{SET} – заданное положение РУД; a^{LE} и a^{RE} – положения РУД левого и правого ТРДД; n_1^{LE} и n_2^{LE} – частоты вращения РНД и РВД левого ТРДД; N_1^{LE} – суммарное значение частоты вращения РНД левого ТРДД и её производной, $N_1^{LE}=n_1^{LE}+C_1^{LE}\cdot dn_1^{LE}/dt$; N_2^{LE} – суммарное значение частоты вращения РВД левого ТРДД и её производной, $N_2^{LE}=n_2^{LE}+C_2^{LE}\cdot dn_2^{LE}/dt$; n_1^{RE} и n_2^{RE} – частоты вращения РНД и РВД правого ТРДД; N_1^{RE} – суммарное значение частоты вращения РНД правого ТРДД и её производной, $N_1^{RE}=n_1^{RE}+C_1^{RE}\cdot dn_1^{RE}/dt$; N_2^{RE} – суммарное значение частоты вращения РВД правого ТРДД и её производной, $N_2^{RE}=n_2^{RE}+C_2^{RE}\cdot dn_2^{RE}/dt$; p_k^{LE} и p_k^{RE} – полные давления за компрессорами левого и правого ТРДД; $T_{вх}^{LE}$ и $T_{вх}^{RE}$ – температуры заторможенных потоков в левом и правом ТРДД; R^{LE} и R^{RE} – оценочные значения тяги левого и правого ТРДД; I_a^{LE} , I_a^{RE} , I_C^{LE} , I_C^{RE} , I_{Hc} , I_R^{LE} , I_R^{RE} , I_{Vc} – логические сигналы; H_{max} и H_{min} – максимальная и минимальная высоты крейсерского полёта; H_c – высота полёта; V_{max} и V_{min} – максимальная и минимальная скорости крейсерского полёта; V_c – скорость полёта.

На этапе 2 предлагается выполнять сравнительный анализ измеряемых в полёте и рассчитанных на этапе 1 значений рабочих параметров двигателей и параметров крейсерского полёта с помощью матриц данных для определения оценочных значений силы тяги ТРДД двухдвигательного самолёта в полёте и количественную оценку соотношений оценочных значений силы тяги этих ТРДД, формировать в ЭБУД ТРДД с меньшей тягой единичное значение логического сигнала для повышения тяги этого двигателя и передавать такой сигнал в БПТД этого ТРДД и в БУДТ второго ТРДД для понижения тяги ТРДД с большей тягой при сохранении требуемого уровня суммарной тяги силовой установки.

Перспективная САКТ ТРДД двухдвигательного самолёта работает только в крейсерском полёте с заданной скоростью на заданных высотах, вступает в работу при соответствующем положении РУД на заданных высотах полёта с крейсерской скоростью и блокируется при неисправности одного из ТРДД.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Предложен метод снижения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта в крейсерском режиме полёта, который исключает необходимость коррекции разнотяговости аэродинамическими поверхностями управления.

2. Разработаны способ и алгоритм селективного отбора пар ТРДД одной серии с минимальными отклонениями высотно-скоростных и дроссельных характеристик, определяемых по результатам стендовых испытаний, позволяющие понизить разнотяговость отобранных пар двигателей в среднем в 1,5 раза.

3. Разработан алгоритм определения оценочных значений силы тяги двигателя по его измеряемым параметрам и параметрам самолёта в полёте, позволяющий учесть индивидуальные характеристики двигателей, определяемые по результатам стендовых испытаний, и изменение КПД агрегатов и узлов двигателя при эксплуатации.

4. Разработаны структура и алгоритм работы САКТ для компенсации разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта в крейсерском режиме полёта.

5. Показано, что совместное применение алгоритма селективного отбора ТРДД одной серии и алгоритма уменьшения их разнотяговости с помощью САКТ тех же двигателей на двухдвигательном самолёте позволяет в зависимости от конкретной конструкции самолёта и его силовой установки существенно снизить разнотяговость этих двигателей и расход топлива в крейсерском режиме полёта.

6. В перспективе предлагается добавить обратную связь по параметрам движения самолёта в атмосфере с применением установленных на его борту системы воздушных сигналов и инерциальной навигационной системы, что позволит поддерживать стабильную работу САКТ с учётом внешних атмосферных возмущений, тем самым дополнительно уменьшая расход топлива в крейсерском режиме полёта.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях ВАК РФ по специальности 2.5.15 и приравненные к ним:

1. Дворниченко В.В., Бузова А.Ю. Глубокое тестирование турбореактивных двигателей методами математической статистики для повышения их соответствия нормативам ИКАО // Вестник Московского авиационного института. – 2011. – Т. 18, № 3. – С. 116-127.

2. Бузова А.Ю., Кочетков Ю.М. Формализация зависимости разнотяговости турбореактивных двухконтурных двигателей двухдвигательного самолёта, возникающей от разницы частот вращения их роторов // Двигатель. – 2018. – № 5 (119). – С. 28-29.

3. Бузова А.Ю., Кочетков Ю.М. Контроль разнотяговости турбореактивных двухконтурных двигателей двухдвигательного самолёта при появлении разницы частот вращения их роторов // Двигатель. – 2018. – № 6 (120). – С. 8-9.

4. Новичков В.М., Бузова А.Ю. Критерий автоматической оценки исправности турбореактивного двухконтурного двигателя по частотам вращения его роторов в полёте // Двигатель. – 2019. – № 5 (125). – С. 32.

5. Burova A.Yu. Minimization of asymmetry of thrust of the dual-flow turbojet engines of the airliner in accordance with the results of the system analysis of the thrust parameters // Asia Life Sciences Supplement. – 2019. – № 21(2). – Pp. 629-643.

6. Новичков В.М., Бурова А.Ю. Уменьшение асимметрии тяги турбореактивных двухконтурных двигателей алгоритмическим путём с помощью электронной системы управления двухдвигательной силовой установкой самолёта // Двигатель. – 2022. – № 4-6 (142-144). – С. 54-56.

7. Бурова А.Ю. Структура перспективной электронной системы управления двухдвигательной силовой установкой самолёта с разнотяговыми двигателями // Двигатель. – 2022. – № 4-6 (142-144). – С. 57-61.

8. Novichkov V.M., Burova A.Y. Digital Algorithm for Compensation of Airliner Turbojet Engine Thrust Asymmetry // Smart Innovation. Systems and Technologies. – 2022. – № 257. – Pp. 859-867.

9. Burova A.Yu., Kochetkov N.Yu., Nesterov V.A., Sypalo K.I. Control of Rotor Speeds of Turbojet Twin-Circuit Engines of a Twin-Engine Airplane in Order to Balance Their Thrust in Flight // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2024. – Vol. 63. – № 5. – Pp. 858–869.

10. Burova A.Yu., Kochetkov N.Yu., Nesterov V.A., Sypalo K.I. Formalization of Criteria for the Multiparametric Selection of Turbofan Engine Pairs for Powerplants of Twin-Engine Aircraft and Development of Their Automatic Control Structure to Reduce Thrust Asymmetry // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2025. – Vol. 64. – № 3. – Pp. 426–433.

Публикации в других рецензируемых научных изданиях ВАК РФ:

1. Бурова А.Ю. Авиационные ТРДД – программа-прогноз на среднесрочную перспективу развития методов их модернизации и глубокого тестирования для минимизации разнотяговости ТРДД и ТРДДФ самолётов ГА и ВВС // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12 (часть 9). – С. 1862-1872.

2. Новичков В.М., Бурова А.Ю. Применение ТРДД на ЛА с минимизацией разнотяговости для повышения безопасности полётов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11 (часть 7). – С. 1343-1351.

3. Новичков В.М., Бурова А.Ю. Формализация принципа работы системы автоматического управления силовой установкой самолёта в полёте при асимметрии тяги его турбореактивных двухконтурных двигателей с минимальной разнотяговостью // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 11-2. – С. 311-319.

4. Бурова А.Ю. Контроль качества сложной продукции на примере серийных авиадвигателей // Контроль качества продукции. – 2020. – №6. – С.48-52.

5. Бурова А.Ю., Кочетков Н.Ю., Нестеров В.А., Сыпало К.И. Управление частотами вращения роторов турбореактивных двухконтурных двигателей двухдвигательного самолёта с целью обеспечения балансировки их тяги в полёте // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2024. – № 5. – С. 149-159.

6. Бурова А.Ю., Кочетков Н.Ю., Нестеров В.А., Сыпало К.И. Формализация критериев многопараметрического выбора пар турбореактивных двухконтурных двигателей для силовых установок двухдвигательных самолётов и разработка структуры их автоматического управления для уменьшения асимметрии тяги // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2025. – № 3. – С. 84-90.

Публикации в сборниках материалов научных конференций:

1. Бурова А.Ю. Методика глубокого тестирования ТРДД самолётов ГА и ВВС с использованием нормированной двумерной случайной функции для статистических распределений // Инновации в авиации и космонавтике-2011: тезисы докл. научно-практич. конф. студентов и молодых учёных национал. исследов. ун-та «Московский Авиационный Институт» (МАИ) 2011 г. – М.: МЭЙЛЕР, 2011. – С. 27.

2. Дворниченко В.В., Бурова А.Ю. Применение нормированной двумерной случайной функции, распределённой по нормальному закону, для тестирования технического состояния авиационных двигателей типа ТРД и ТРДД (для ГА и ВВС) для повышения их соответствия нормам ICAO // Научный электронный архив Российской академии естествознания. 08.09.2011. – URL: <http://econf.rae.ru/article/6222>.

3. Бурова А.Ю. Турбореактивные двухконтурные двигатели: программа-прогноз ускоренного развития на средне-срочную перспективу // Молодежь и будущее авиации и космонавтики: аннотации работ конкурса научно-техн. работ и проектов национал. исследов. ун-та «Московский Авиационный Институт» (МАИ) 2013 г. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – С. 86.

4. Новичков В.М., Бурова А.Ю. Минимизация разнотяговости авиационных турбореактивных двухконтурных двигателей для обеспечения безопасности полёта // Труды 24-й Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации». – М.: МЭИ, 2015. – С. 140-141.

5. Бурова А.Ю. Минимизация асимметрии тяги глубоко тестированных турбореактивных двухконтурных двигателей двухдвигательного самолёта в полёте с несимметричной тягой // Сб. науч. ст. по материалам IV Всероссийской науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения». – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – 310 с.

6. Новичков В.М., Бурова А.Ю. Регулирование асимметрии тяги ТРДД магистрального самолёта в полёте // Труды 28-й Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации». – М.: МЭИ, 2019. – С. 115-116.

7. Новичков В.М., Бурова А.Ю. Контроль параметров тяги двухвальных турбореактивных двигателей при их разнотяговости // Сборник тезисов IV Межведомственной научно-технической конференции «Проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления специального назначения» (г. Санкт-Петербург, 30 октября 2019). – СПб.:

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2019. – С. 219.

8. Novichkov V.M., Burova A.Yu. Algorithm of Two Turbojets Thrust Asymmetry Minimization for Digital Control System of Twin-Engine Jet Airliner // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Date of Conference: 01-04 October 2019. Date Added to IEEE Xplore: 19 December 2019. – DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934285.

9. Новичков В.М., Бурова А.Ю., Филинов Н.И. Повышение качества контроля функционирования турбореактивных двухконтурных двигателей двухдвигательной силовой установки самолёта в полёте // Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации». – М.: Медпрактика-М, 2020. – С. 97-98.

10. Бурова А.Ю. Повышение взаимного соответствия качества двигателей летательных аппаратов в условиях их серийного производства // Авиация и космонавтика. Тезисы 21-ой международной конференции. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва, 2022. – С. 97-98.

11. Burova A.Yu. Theoretical basis, concept and methodology of control and correction of turbojet engines thrust asymmetry // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – № 2308(1). – 012006.

12. Бурова А.Ю., Кочетков Н.Ю. Автоматизация систем обеспечения надежности и качества ДЛА // Авиация и космонавтика. Тезисы 22-й Международной конференции. – Москва, 2023. – С. 68.