

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

ГРАСЬКО ТАРАСА ВАСИЛЬЕВИЧА

на диссертационную работу Буровой Аделии Юрьевны
на тему «Метод уменьшения разнотяговости турбореактивных
двухконтурных двигателей силовой установки двухдвигательного самолёта»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

Актуальность темы исследования

Проблема разнотяговости (асимметрии тяги) двигателей возникла с появлением самолётов с количеством двигателей более одного, установленных симметрично относительно оси самолета.

Уменьшение разнотяговости двигателей, установленных на самолёт с двухдвигательной силовой установкой, должно обеспечивать:

- повышение топливной эффективности за счёт снижения удельного расхода топлива при сохранении требуемой величины тяги силовой установки в полёте;

- увеличение дальности и продолжительности полёта;

- безопасность полёта;

- снижение эмиссии вредных веществ в атмосферу.

В настоящее время уменьшение разнотяговости решается различными способами: подбором двигателей с минимальной разнотяговостью (на этапе установки двигателей на самолет), компенсацией разнотяговости двигателей с помощью рулевых поверхностей самолёта, заданием режимов работы двигателей, отличающихся друг от друга.

В первом случае подбор пары двигателей, как правило, производится с учётом частот вращения роторов низкого или высокого давления 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 движется со скольжением, что вызывает увеличение аэродинамического сопротивления и, как следствие увеличение расхода топлива.

В третьем случае допускается рассогласование положения рычагов управления двигателями на величину не более 6° по лимбу. 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.

Известные способы 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 оснащения 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.

Этому посвящена диссертация Буровой А.Ю.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертации не вызывает сомнений и подтверждается апробацией результатов исследования на научно-практических конференциях различного уровня, полным отражением основных результатов диссертационной работы в 28 работах, из них 16 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке двухэтапного метода 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, а ее **практическая ценность** заключается в разработке способа селективного отбора ТРДД одной серии, позволяющей выбирать наиболее близкие по тяге пары двигателей для их установки на двухдвигательный самолёт, что обеспечивает в зависимости от конкретной конструкции самолёта и его силовой установки экономию топлива за счёт исключения необходимости коррекции разнотяговости аэродинамическими поверхностями управления самолётом.

Достоверность полученных автором результатов подтверждается корректной постановкой научной задачи, использованием апробированных методов исследования, их правомерностью, применением обоснованных допущений и ограничений, тождественностью полученных результатов.

Научная новизна результатов

1. Метод уменьшения разнотяговости ТРДД силовой установки двухдвигательного самолета, включающий два этапа: селективный отбор пар ТРДД одной серии для их установки на самолет и коррекцию тяги двигателей в полете.

2. 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. 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 полета и позволяющий учесть индивидуальные параметры двигателя и изменение КПД его агрегатов и узлов.

4. 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.

Автореферат соответствует диссертационной работе и в достаточной степени отражает основные результаты, полученные в ходе исследования.

Общая характеристика работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, степень её разработанности, сформулированы цель и задачи, которые необходимо решить для её достижения, поставлена научная новизна, изложена теоретическая и практическая значимость выполненной работы. Представлены положения, выносимые на защиту, апробация полученных результатов и публикации по теме диссертации.

В первой главе раскрыты причины возникновения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта и существующие 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, обеспечивающие безопасность полётов при разнотяговости его ТРДД. Выявлены основные недостатки существующих методов уменьшения разнотяговости ТРДД.

Во второй главе автор рассматривает различные подходы к решению проблемы уменьшения разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолёта, а также аналоговые и цифровые методы ее решения в полуавтоматическом

режиме управления полётом такого самолёта с визуальным определением разнотяговости его ТРДД по штатным аэронавигационным приборам и в автоматическом режиме при использовании компьютерных систем. Выявлены теоретические предпосылки к решению поставленной научной задачи.

В этой же главе автором предложен двухэтапный метод уменьшения разнотяговости ТРДД одной серии в условиях их серийного производства и эксплуатации в силовых установках двухдвигательных самолётов. Представлена структурная схема данного метода уменьшения разнотяговости ТРДД.

Третья глава посвящена описанию принципа, алгоритма и методики первого этапа разработанного метода, представлена логическая схема алгоритма и 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.

После выбора ТРДД для оснащения силовой установки самолёта повторяется селективный отбор других ТРДД из той же серии для оснащения силовой установки очередного самолёта. Силы тяги и частоты вращения РНД и РВД этих ТРДД одной серии должны соответствовать критериям приближенного равенства силы тяги двух ТРДД одной серии.

Четвертая глава посвящена разработке и описанию принципа, алгоритма и методики второго этапа разработанного метода, на котором автор предлагает уменьшение разнотяговости ТРДД такого самолёта в крейсерском полёте, которые прошли отбор по результатам выполнения первого этапа.

Представлены графические интерпретации результатов расчёта рабочих параметров ТРДД и разработанная автором перспективная схема системы автоматической коррекции тяги ТРДД двухдвигательного самолёта, работающей только в крейсерском полёте с заданной скоростью на заданных высотах, включающаяся в работу при соответствующем положении РУД на заданных высотах полёта.

К достоинству работы можно отнести следующее:

диссертационная работа и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011, снабжены графическими и табличными

материалами для ясной подачи материала читателю, хорошо логически структурированы; понятийный аппарат теории авиационных двигателей и динамики полета применен правильно.

В качестве критических замечаний отмечу следующее:

1. В работе не рассматривался вопрос применимости разработанного метода уменьшения разнотяговости при досрочном съеме одного из двигателей и установки двигателя другой серии.
2. Одним из недостатков разработанной перспективной схемы системы автоматической коррекции тяги ТРДД двухдвигательного самолёта, является узкий диапазон ее работы (только крейсерский полёт с заданной скоростью на заданных высотах).
3. На рисунках 2.4 – 2.9 диссертации вместо давления воздуха за компрессором p_k необходимо указать полное давление p_k^* (параметр заторможенного потока).
4. На рисунке 4.2 диссертации по оси ординат не указаны единицы измерения тяги двигателя.
5. Рисунок 4.11 – Структурную схему предлагаемой системы автоматической коррекции тяги ТРДД силовой установки двухдвигательного самолёта в крейсерском режиме полёта целесообразно назвать функциональная схема...., так как в прямоугольниках указаны назначения элементов и показаны функциональные связи между ними.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

**Заключение о соответствии диссертации критериям
«Положения о присуждении ученых степеней»**

Диссертационная работа **Буровой А.Ю.** на тему «Метод уменьшения разнотяговости турбореактивных двухконтурных двигателей силовой установки двухдвигательного самолёта» написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством и является законченной научно-квалификационной работой.

По результатам исследований решена актуальная научная задача в области авиационного двигателестроения, направленная на разработку метода уменьшения разнотяговости ТРДД (асимметрии тяги) силовой установки двухдвигательного самолёта, обеспечивающего в зависимости от конкретной конструкции самолёта и его силовой установки экономию топлива в крейсерском режиме полёта при снижении исходной разнотяговости двигателей до 1,5 раз за счёт их селективного отбора по результатам стендовых испытаний в условиях серийного производства.

Таким образом, диссертация соответствует требованиям пунктов 9 и 10 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а ее автор **Бурова Аделия Юрьевна** заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

Заместитель начальника факультета – начальник учебной части факультета летательных аппаратов ФГКВООУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

кандидат технических наук, доцент


18.08.2026 г.

Грасько Тарас Васильевич

Подпись Грасько Тараса Васильевича заверяю:

Начальник отдела кадров ВУНЦ ВВС «ВВА»




18.08.2026 г.

И. Чужин

С отзывом ознакомлена А. Бурова Ю.
25.08.2026 г.