

УПРАВЛЕНИЕ ТУРБОРЕАКТИВНЫМИ ДВУХКОНТУРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО САМОЛЁТА В ПОЛЁТЕ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ ТЯГОЙ

Бурова А.Ю., Кочетков Н.Ю., Нестеров В.А., Сыпало К.И.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

frambe@mail.ru, kolabuy@gmail.com, nesterov_46@inbox.ru, office@tsagi.ru

Аннотация. Исследованы возможности анэррорики управления двухконтурными турбореактивными (турбовентиляторными) двигателями воздушного судна. Цель – минимизация ошибок в автоматическом регулировании их тяги скоростями роторов в полете. Разработаны критерии многопараметрического выбора таких двигателей и модель управления ими в полете для уменьшения асимметрии их тяги.

Ключевые слова: асимметрия тяги, многопараметрический выбор, программа управления, силовая установка, турбореактивный двигатель.

Введение

Широкое внедрение беспилотных авиационных систем (БАС) в сфере гражданского воздушного транспорта подчеркивает необходимость применения аппаратов с разнообразными типами силовых установок [1]. Ожидается, что интерес к БАС будет возрастать в предстоящие годы, превращая их в ключевой элемент авиационной системы [2]. Тем не менее, для успешной интеграции БАС в гражданскую авиацию критически важно гарантировать высокий уровень их эксплуатационной надежности [3].

Актуальность использования БАС, оснащенных турбореактивными двигателями с двумя контурами (ТРДД), стимулирует изучение методов повышения точности автоматического регулирования ТРДД в составе двухмоторных самолетов для достижения равновесия тяг в процессе полета [4-5].

Концепция и понятие "АНЭРРОРИКА" введены для описания комплекса подходов, алгоритмов и технических средств, направленных на минимизацию ошибок в цифровой интерпретации данных измерений и мониторинга [6]. Этот подход активно применяется в презентациях на глобальных научных форумах и в публикациях в рецензируемых изданиях, включенных в базы Scopus и Web of Science [6-9].

Регулировка тяги ТРДД осуществляется через корректировку наблюдаемых скоростей вращения роторов компрессоров низкого и высокого давления [10]. Непрерывный мониторинг этих скоростей позволяет рассматривать их как индикаторы уровня тяги [10-11]. Для анализа связи тяги ТРДД (R) с скоростями ротора низкого давления (РНД, n_1) и ротора высокого давления (РВД, n_2) используются разнообразные математические представления [12]. В основе этих моделей лежат статистические техники, создавая возможность оценки тяги на основе данных заводских тестов двигателей в массовом производстве.

Снижение тяги одного из ТРДД в полете может быть вызвано перегревом из-за продолжительного использования форсированного режима в жарких условиях или повреждением компонентов турбины, включая лопатки, под влиянием коррозии, эрозии газов или абразивных частиц (например, песка). Система автоматического регулирования (САР) компенсирует это только при падении скоростей РНД и РВД ниже рабочих пределов [11]. Следовательно, обнаружение потери тяги рекомендуется проводить путем сравнения скоростей роторов одного двигателя с другим, учитывая степень дисбаланса тяг. Это сравнение помогает определять потребность в корректировке тяги в воздухе. Чтобы уменьшить необходимость в таких корректировках, при подборе пар ТРДД для самолета приоритетным критерием после всесторонних заводских проверок должно стать минимальное отклонение тяг двигателей одной партии [4].

Алгоритмы регулирования исключительно по скорости РНД $n_1 + \delta n_1 = const$ или РВД $n_2 + \delta n_2 = const$, с переменными знаками корректировок δn_1 и δn_2 , интегрированы в САР воздушного судна (ВС). Использование разработанной в процессе выполнения данного исследования многомерной модели взаимосвязей параметров тяги позволяет ввести два условия для ужесточения контроля соответствия качества двигателей одной линии. Предлагаемая модель способствует созданию симуляций для мониторинга надежности и качества ТРДД в реальном времени, учитывая несколько параметров и внешние помехи в полете. Ее применение обеспечивает автоматизированное регулирование тяги R_{low} до уровня нормального R_{norm} в пределах $R_{min} \leq R_{low} < R_{norm} \leq R_{max}$, где

R_{min} – минимальный допустимый, R_{max} – максимальный достижимый. Модель позволяет корректировать тягу через изменение скоростей роторов в заданных пределах. Трехмерное представление взаимосвязей параметров тяги ТРДД в симуляциях обеспечивает снижение дисбаланса путем анализа скоростей РНД и РВД с учетом их производных как переменных корректировок для контроля темпа и направления изменений.

Минимизация дисбаланса тяг ТРДД в полете важна для повышения безопасности по одному из ключевых показателей, позволяющему планировать меры по снижению рисков чрезвычайных ситуаций от неуправляемых факторов. Согласно нормам Авиационных правил МАК АП-25, такие ситуации классифицируются как катастрофические, аварийные, сложные или усложняющие полет. Для предотвращения предлагается критерий отсутствия дисбаланса тяг двигателей, поскольку безопасность полета подразумевает снижение и контроль рисков эксплуатации до приемлемых значений. Баланс тяг левого и правого ТРДД может служить одним из таких значений.

Для обозначения параметров левого (LEFT ENGINE, LE) и правого (RIGHT ENGINE, RE) ТРДД критерий безопасности формализуется как $R_{min} \leq R^{LE} = R^{RE} \leq R_{max}$.

Дисбаланс тяг ТРДД может привести к развороту ВС и аварии.

Цель работы:

Цель – минимизация ошибок в автоматическом регулировании тяги ТРДД двухмоторного самолета скоростями их роторов с использованием трехмерной модели связи параметров тяги этих двигателей. Данные для исследования – результаты заводских тестов ТРДД одной серии.

1. Формулировка проблемы

Предполагается, что САР двухмоторного самолета с ТРДД включает алгоритмы регулирования по скорости РНД $n_1 + \delta n_1 = const$ и РВД $n_2 + \delta n_2 = const$ с переменными корректировками δn_1 и δn_2 [4-5].

Связь тяги R с скоростями вращения РНД и РВД отображена на Рис. 1, где каждому значению R соответствует уникальная точка для n_1 и n_2 .

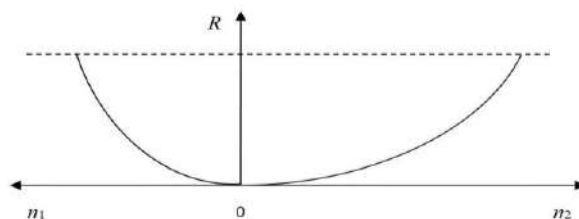


Рис. 1. Связь тяги R с скоростями вращения РНД и РВД

Динамику РНД и РВД учитывают по данным детального тестирования после заводских испытаний [5]. На практике зависимость определяют экспериментально для расчета тяги от оборотов и отображают в виде эллипса (Рис. 2) [4-5].

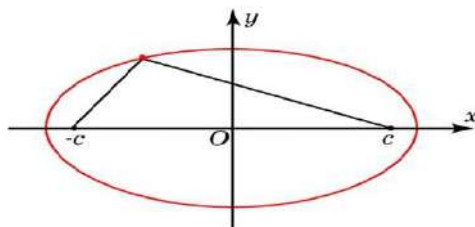


Рис. 2. Эллипс с фокусами $F_1(-c, 0)$ и $F_2(c, 0)$

Нужно формализовать критерии многопараметрического подбора пар ТРДД и разработать архитектуру САР для снижения дисбаланса тяг через корректировку скоростей на основе модели [5].

2. Решение проблемы

Результаты подтверждают возможность регулирования ТРДД через дополнительную подачу топлива на основе анализа скоростей роторов и их производных с использованием трехмерной модели для баланса тяг в полете.

Создана трехмерная модель связи тяги с скоростями роторов компрессоров. Скорости служат косвенными индикаторами тяги. Модель основана на данных заводских тестов и детального анализа. Это квадратичное уравнение с переменными R, n_1, n_2 :

$$R = J_2 \cdot (n_2)^2 + J_1 \cdot (n_1)^2. \quad (1)$$

Здесь J_1 и J_2 – коэффициенты совместного влияния; "+" указывает на аддитивный эффект.

Графическое изображение на рис. 3: зависимость балансировочных скоростей n_1^{BL} и РВД n_2^{BL} от тестовых n_1^{TE} и n_2^{TE} при R^{TE} (TE – tested engine, BL – balanced level).

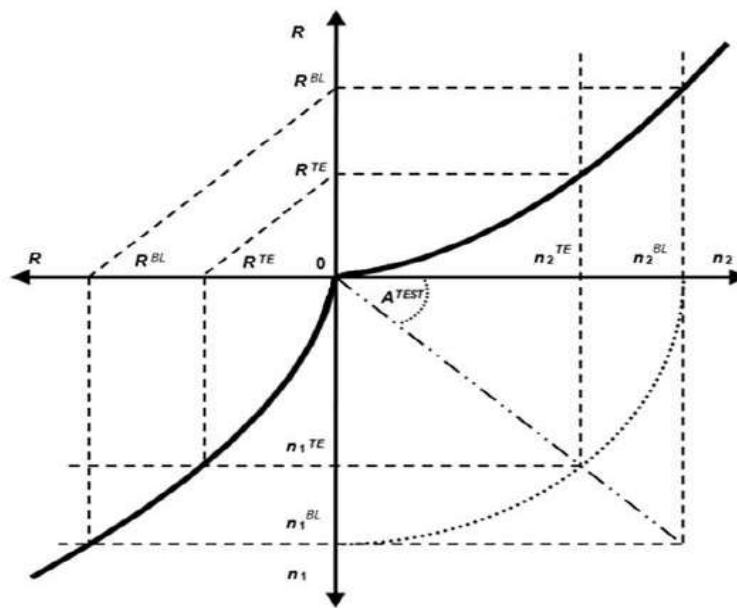


Рис. 3. Зависимость балансировочных скоростей n_1^{BL}, n_2^{BL} от тестовых n_1^{TE} и n_2^{TE}

На рис. 4 – для фиксированного R : четверть эллипса точек n_1 и n_2 .

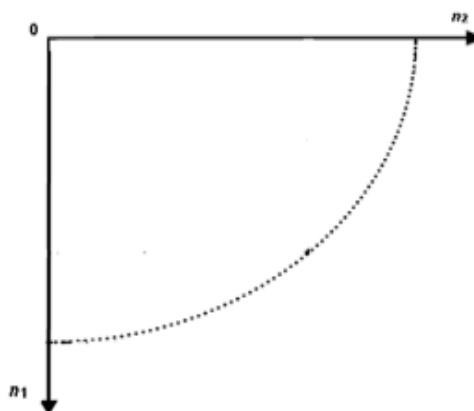


Рис. 4. Взаимосвязь n_1 и n_2 при фиксированном R

На рис. 5 – параболоид с точками (R, n_1, n_2) ; сечение – четверть эллипса для фиксированного R .

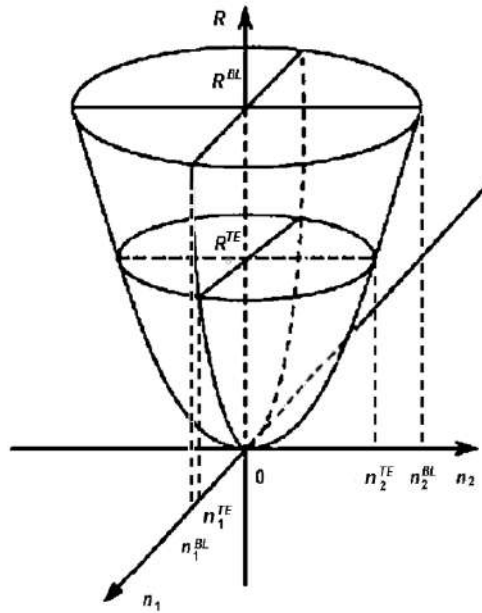


Рис. 5. Зависимость R^{BL} от n_1^{BL} и n_2^{BL}

Результаты статистического и программного моделирования двумерного распределения скоростей по Гауссу в исходном и суженном диапазонах на рис. 6-7.

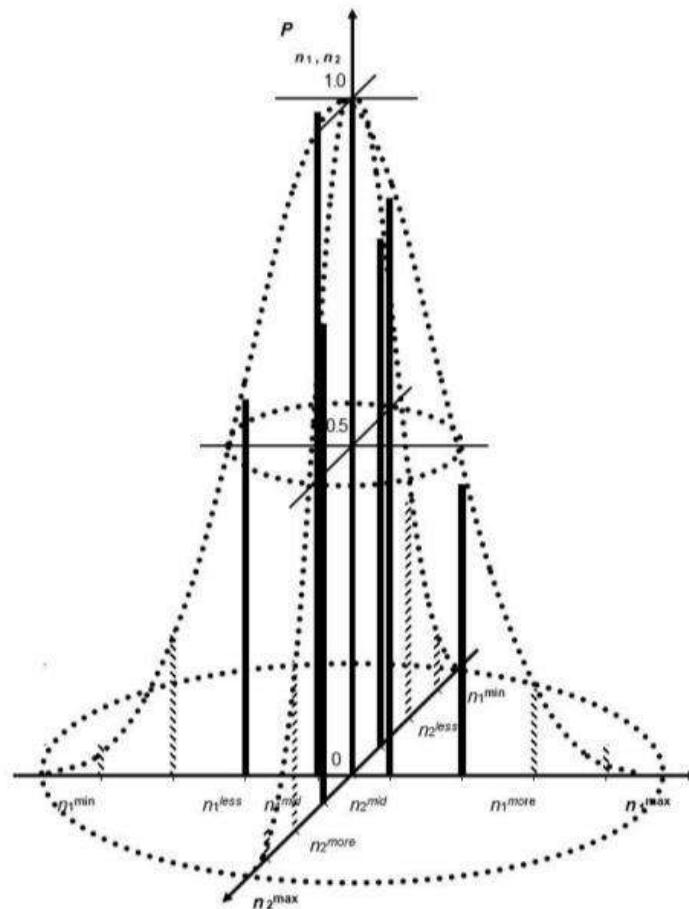


Рис. 6. Трехмерный график распределения

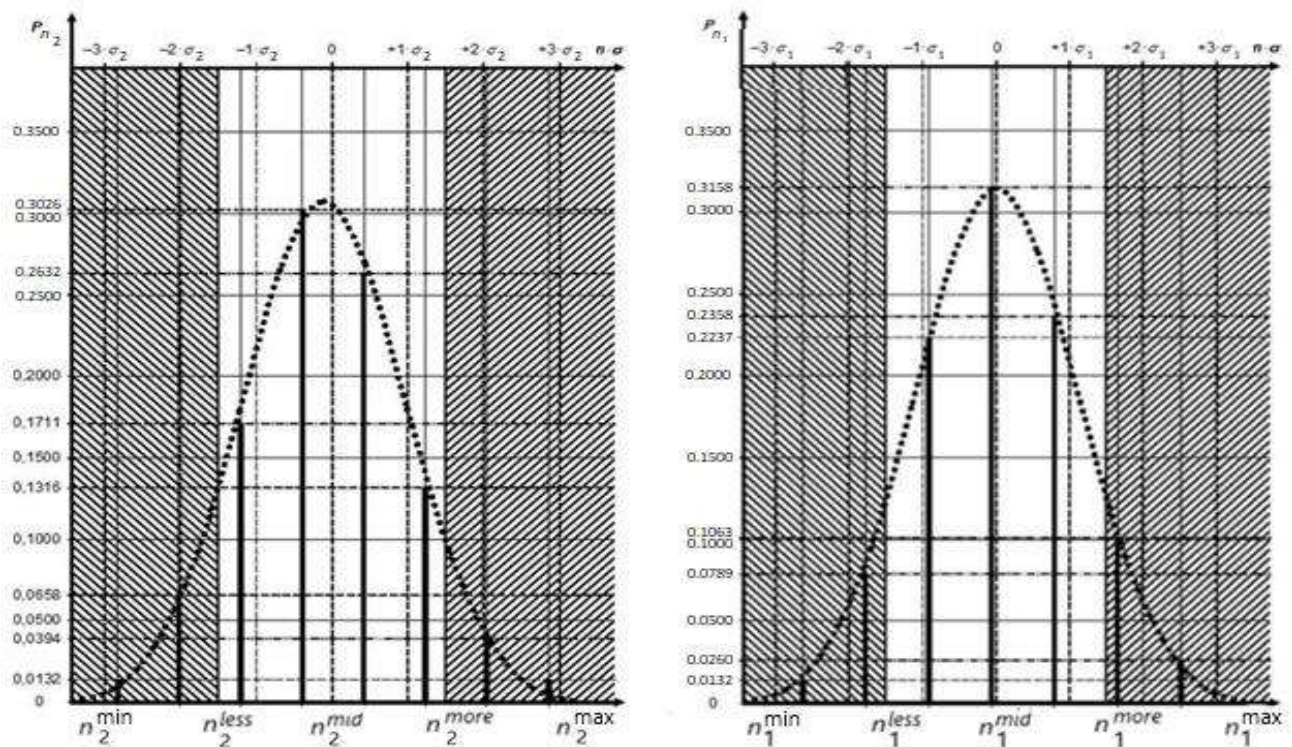


Рис. 7. Графики распределения скоростей относительно средних n_1^{mid} , n_2^{mid}

На представленных диаграммах отображены скорости вращения РВД и РНД в установленных интервалах $[n_1^{min}, n_1^{max}]$ и $[n_2^{min}, n_2^{max}]$, соответствующих «правилу трех сигм», а также в диапазонах, суженных в два раза $[n_1^{less}, n_1^{more}]$ и $[n_2^{less}, n_2^{more}]$.

На графиках применены следующие обозначения: n_1^{min} , n_1^{less} , n_2^{min} , n_2^{less} – нижние границы диапазонов и n_1^{max} , n_1^{more} , n_2^{max} , n_2^{more} – верхние границы диапазонов.

Результаты создания и тестирования модели, описывающей зависимость тяги обеспечили выработку и формализацию трех основных критериев целенаправленного отбора парных ТРДД для ВС, чтобы добиться балансировки их тяги в полете:

- критерия сравнительной оценки силы тяги R_l и R_m l -го и m -го ТРДД из L односерийных ТРДД при w_R -ой степени допустимого сужения исходного диапазона замерянных на стенде контрольных значений R $[R_{min}, R_{max}]$:

$$0 \leq |R_m - R_l| \leq (R_{max} - R_{min}) / w_R \text{ при } m \in \overline{1, L}, l \in \overline{1, L}, m \neq l; \quad (2)$$

- критерия сравнительной оценки числа оборотов РНД $(n_1)_l$ и $(n_1)_m$ l -го и m -го ТРДД из L односерийных ТРДД при w_1 -ой степени допустимого сужения исходного диапазона замерянных на стенде контрольных значений (n_1) $[(n_1)_{min}, (n_1)_{max}]$:

$$0 \leq |(n_1)_m - (n_1)_l| \leq ((n_1)_{max} - (n_1)_{min}) / w_1 \text{ при } m \in \overline{1, L}, l \in \overline{1, L}, m \neq l; \quad (3)$$

- критерия сравнительной оценки числа оборотов РВД $(n_2)_l$ и $(n_2)_m$ l -го и m -го ТРДД из L односерийных ТРДД при w_2 -ой степени допустимого сужения исходного диапазона замерянных на стенде контрольных значений (n_2) $[(n_2)_{min}, (n_2)_{max}]$:

$$0 \leq |(n_2)_m - (n_2)_l| \leq ((n_2)_{max} - (n_2)_{min}) / w_2 \text{ при } m \in \overline{1, L}, l \in \overline{1, L}, m \neq l. \quad (4)$$

Такой отбор приобретает особую значимость, поскольку серийно выпускаемые двигатели зачастую демонстрируют существенный разброс в уровнях тяги. В связи с этим рекомендуется начинать минимизацию различий в тяге ТРДД силовых установок самолетов с целенаправленного выбора для них парных ТРДД.

Данные экспериментального моделирования многопараметрического отбора пар ТРДД для силовых установок самолетов с двумя двигателями в соответствии с этими критериями выявили потенциал снижения потребления топлива G_R в полете после снижения разнотяговости ΔR односерийных ТРДД при таком их отборе (Рис. 8), если G_{Rmax} , G_{Rmid} и G_{Rmin} – уровни максимального, среднего и

минимального потребления в полете топлива при максимальной, средней и минимальной разнотяговости односерийных ТРДД ΔR_{max} , ΔR_{mid} и ΔR_{min} , соответственно.

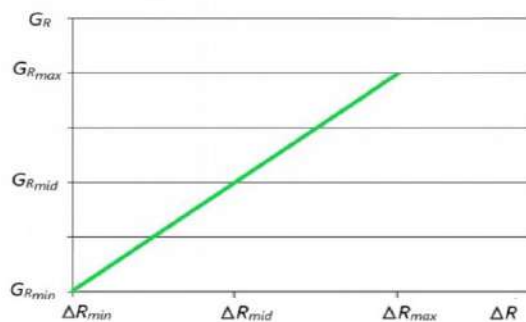


Рис. 8. Потенциал снижения потребления топлива G_R в полете после снижения разнотяговости ΔR односерийных ТРДД при многопараметрическом их отборе

Для минимизации ошибок в автоматическом регулировании тяги ТРДД двухмоторного самолета скоростями их роторов с использованием трехмерной модели связи параметров тяги этих двигателей разработана и предлагается модель управления ими в полете для уменьшения асимметрии их тяги:

- Алгоритм постоянного контроля и автоматической корректировки разнотяговости ТРДД двухдвигательного ВС в полете (Рис. 9);
- Структура системы постоянного контроля и автоматической корректировки разнотяговости ТРДД двухдвигательного ВС в полете (Рис. 10).

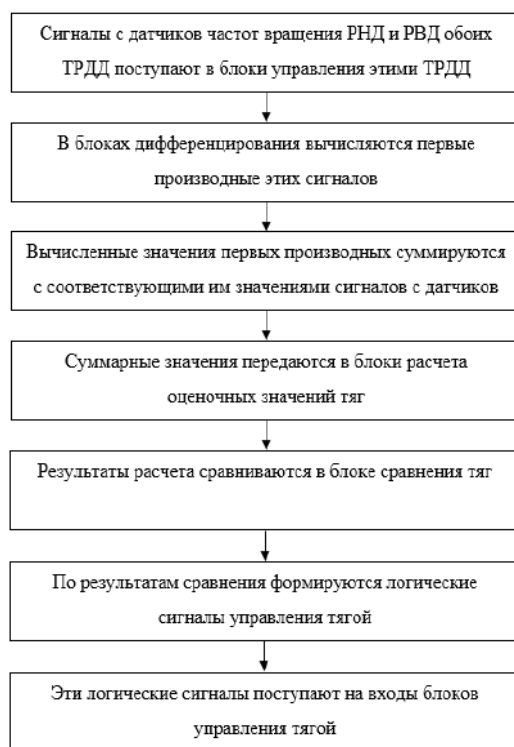


Рис. 9. Алгоритм постоянного контроля и автоматической корректировки разнотяговости ТРДД двухдвигательного ВС в полете

Такой алгоритм можно реализовать с помощью аппаратно-программного обеспечения предлагаемой системы постоянного контроля и автоматической корректировки разнотяговости ТРДД двухдвигательного ВС в полете (Рис. 10). На представленной структурной схеме этой системы используются следующие условные сокращения:

- «БВОТ» для обозначения Блоков вычисления контрольных значений относительной оценочной тяги ТРДД,
- «БДЦС» для обозначения Блоков дифференцирования цифровых сигналов с выходов Датчиков частот вращения роторов ТРДД,
- «БИЦС» для обозначения Блоков алгебраического суммирования (интегрирования) цифровых сигналов,
- «БКЦС» для обозначения Блоков постоянного контроля цифровых сигналов (логических устройств «И»),
- «БПТД» для обозначения Блоков повышения тяги ТРДД,
- «БСОТ» для обозначения Блоков сравнительной оценки контрольных значений относительной оценочной тяги ТРДД,
- «БСЦС» для обозначения Блоков сравнительной оценки цифровых сигналов,
- «ДВСС» для обозначения Датчика воздушной скорости ВС,
- «ДПРУ» для обозначения Датчиков положения рычагов управления ТРДД,
- «ДСВП» для обозначения Датчика-сигнализатора высоты полета ВС,
- «ДСЗТ» для обозначения Датчика температуры заторможенного потока,
- «ДЧВР» для обозначения Датчиков частот вращения роторов ТРДД,
- «ЭБУД» для обозначения Электронных блоков управления ТРДД.

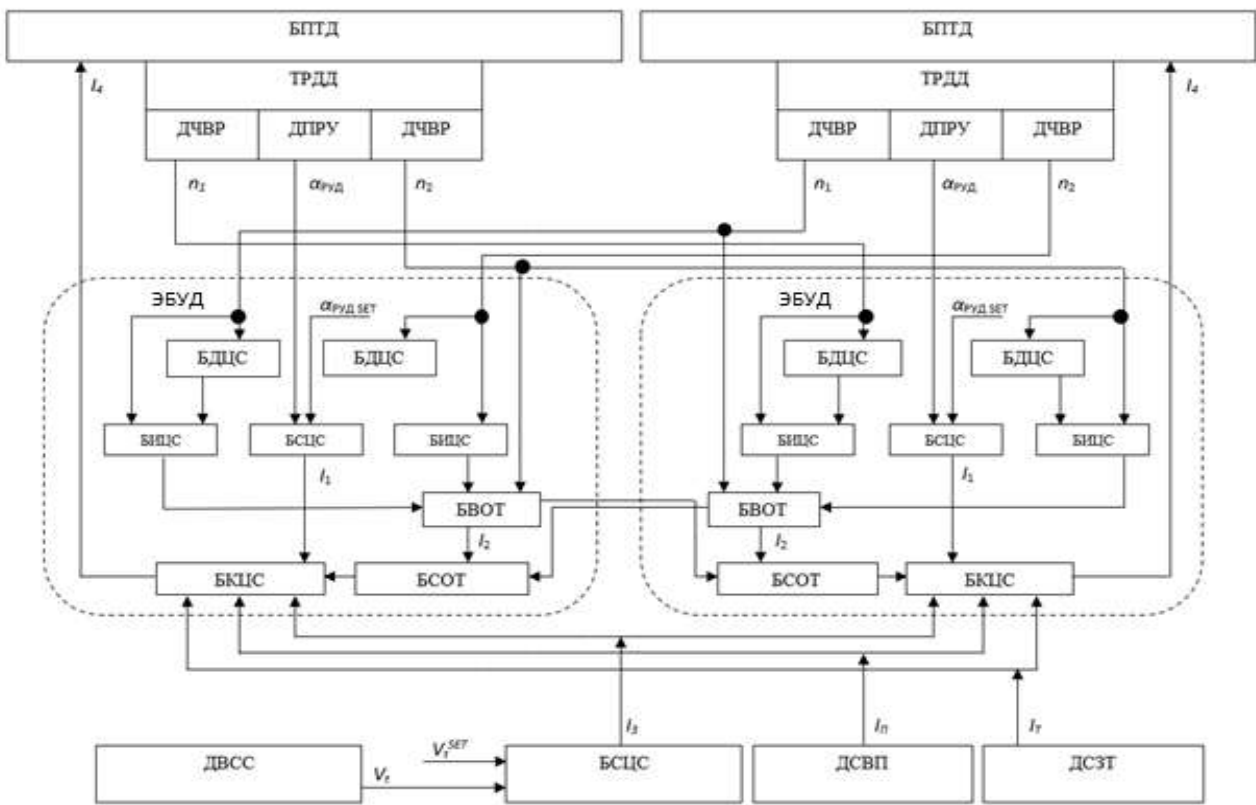


Рис. 10. Структурная схема системы постоянного контроля и автоматической корректировки разности тяги ТРДД двухдвигательного ВС в полете

3. Анализ результатов

Значения коэффициентов влияния скоростей вращения роторов РНД и РВД на тягу ТРДД J_2 и J_2 в формуле (1) можно определить сравнительным анализом соотношений замеренных на заводском стенде контрольных значений силы тяги R^{TE} и числа оборотов РНД n_1^{TE} и РВД n_2^{TE} . Эти значения известны в результате стендовых испытаний односерийных ТРДД (Рис. 2 и Рис. 4):

$$\text{При } n_2 = 0 \text{ необходимо, чтобы } R^{BL} = J_1 \cdot (n_1^{BL})^2. \quad (5)$$

$$\text{Если } n_2 = 0 \text{ при } n_1 = 0, \text{ то } R^{TE} = J_1^{TE} \cdot (n_1^{TE})^2, \text{ поэтому } J_1^{TE} = R^{TE} / (n_1^{TE})^2. \quad (6)$$

$$\text{При } n_1 = 0 \text{ необходимо, чтобы } R^{BL} = J_2 \cdot (n_2^{BL})^2. \quad (7)$$

$$\text{Если } n_1 = 0 \text{ при } n_2 = 0, \text{ то } R^{TE} = J_2^{TE} \cdot (n_2^{TE})^2, \text{ поэтому } J_2^{TE} = R^{TE} / (n_2^{TE})^2. \quad (8)$$

Надежность результатов исследования подтверждается их согласованностью с данными известных разработок [12-20].

4. Заключение

Ключевыми итогами проведенного исследования являются трехмерная модель зависимости тяги ТРДД от скоростей вращения его роторов, алгоритм постоянного контроля и автоматической корректировки разнотяговости ТРДД двухдвигательного самолета в полете и структура системы постоянного контроля и автоматической корректировки разнотяговости этих двигателей для балансировки их тяги в полете.

Для минимизации ошибок в автоматическом регулировании тяги ТРДД двухмоторного самолета скоростями их роторов в полете разработаны критерии многопараметрического выбора таких двигателей и модель управления ими в полете для уменьшения асимметрии их тяги.

Реализация такой модели управления ТРДД двухдвигательного самолета позволит автоматически уменьшать их разнотяговость в полете при ее появлении из-за перегрева этих двигателей или механических повреждений рабочих лопаток турбин компрессоров вследствие эрозии от газов или коррозии, или воздействия мелких посторонних частиц.

Литература

1. Кузнецов Г.А., Кудрявцев И.В., Крылов Е.Д. Ретроспективный анализ, современное состояние и тенденции развития отечественных беспилотных летательных аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации, 2018. – № 9 (81). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/retrospektivnyy-analiz-sovremennoe-sostoyanie-i-tendentsii-razvitiya-otechestvennyh-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov>.
2. Ли Цзюньнань, Лю Сяоцзяо. Перспективы развития беспилотных летательных аппаратов в авиации // Научный аспект, 2024. – № 3. – URL: <https://na-journal.ru/3-2024-aviaciya-kosmonavtika/9684-perspektivy-razvitiyabespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-aviastroenii>.
3. Шибаев В., Шнырев А., Буня В. Беспилотные авиационные системы: безопасность полетов и критические факторы // Аэрокосмический курьер, 2011. – № 1. – С. 55–57.
4. Бурова А.Ю., Кочетков Н.Ю., Нестеров В.А., Сыпало К.И. Управление частотами вращения роторов турбореактивных двухконтурных двигателей двухдвигательного самолета с целью обеспечения балансировки их тяги в полете // Изв. РАН. ТиСУ, 2024. – № 5. – С. 149–159.
5. Бурова А.Ю., Кочетков Н.Ю., Нестеров В.А., Сыпало К.И. Формализация критериев многопараметрического выбора пар турбореактивных двухконтурных двигателей для силовых установок двухдвигательных самолетов и разработка структуры их автоматического управления для уменьшения асимметрии тяги // Изв. РАН. ТиСУ, 2025. – № 3.
6. Burova A.Yu., Kabakov V.V. «Unerroric» of multistage discrete Fourier transform of digital signal without arithmetic operations of multiplication // Amazonia Investiga, 2020. – Vol. 9, № 25. – P. 429–437.
7. Бурова А.Ю. Анэррорика дедуктивной обработки цифровых сигналов на основе их многоступенчатого дискретного преобразования Фурье // XXII Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2020», 25 марта – 27 марта 2020 г., Москва, Россия: Доклады. – С. 513–518.
8. Kochetkov Yu.M., Burova A.Yu. Unerroric of Engine Vibration Control by Digital Method of Deductive Signal Processing // Proceeding of the International Science and Technology Conference «FarEastCon 2021», October 2021, Vladivostok, Russian Federation, Far Eastern Federal University: Conference papers. – P. 869–874. – DOI: 10.1007/978-981-16-8829-4_85.
9. Burova A.Yu., Matonov V.A., Bulychev N.A. Unerroric of vibration diagnostics of a hydrogen engine // International Journal of Hydrogen Energy, 2024. – Vol. 51. – P. 87–95. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.129.
10. Gunston B. World Encyclopedia of Aero Engines: From the Pioneers to the Present Day. – Stroud, Gloucestershire: Sutton Publishing Limited, 2006. – 260 p.
11. Giampaolo T. Gas Turbine Handbook: Principles and Practice. 4th Edition. – Lilburn: CRC Press, 2009. – 450 p.
12. Бурова А.Ю. Сертификация авиационной техники. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 300 с.
13. Дворниченко В.В. «Разнотяговость» (асимметрия тяги) ТРДД на дальнемагистральных и среднемагистральных самолетах ГА и способы ее минимизации «на крыле» // Современные проблемы науки и образования, 2008. – № 5. – С. 45–46.
14. Дворниченко В.В., Бурова А.Ю. Глубокое тестирование турбореактивных двигателей методами математической статистики для повышения их соответствия нормативам ICAO // Вестн. МАИ, 2011. – Т. 18, № 3. – С. 116–127.
15. Новичков В.М., Бурова А.Ю. Применение ТРДД на ЛА с минимизацией разнотяговости для повышения безопасности полетов // Фундаментальные исследования, 2015. – № 11 (Ч.7). – С. 1343–1351.

16. Бурова 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.
17. Gurevich O., Smetanin S., Trifonov M. Automatic Control to Reduce the Effect of Deterioration of Gas Turbine Engine Components on its Performance Characteristics // AIAA Propulsion and Energy 2021, Forum, Virtual Conf. 2021. – URL: <https://www.sciencegate.app/document/10.2514/6.2021-3734> (дата обращения: 16.01.2024).
18. 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. Рисунки к докладу.
19. Нестеров В.А., Мельничук А.В., Судаков В.А., Сыпало К.И. Реализация программного приложения для определения взлетно-посадочных характеристик российских воздушных судов с исследованием принципов экспертной системы // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019: Труды двенадцатой международной конференции (1-3 октября 2019 г.). – М.: ИПУ РАН, 2019. – Секция 9. – С. 738–745.
20. Nesterov V., Melnichuk A.V., Sudakov V.A. Development of Software for Computing of Aircraft's Takeoff and Landing Characteristics Using Expert System Technology // 2019 Workshop on Materials and Engineering in Aeronautics IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 714, № 012019. – DOI: 10.1088/1757-899X/714/1/012019.