



ОЦЕНКА РАЗНОТЯГОВОСТИ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВУХКОНТУРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО САМОЛЁТА, ОБУСЛОВЛЕННОЙ РАЗНИЦЕЙ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ ИХ РОТОРОВ

Продолжение темы. Начало в №5 и №6 за 2018 г.

"Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (МАИ)
Аделя Юрьевна Бузова, старший преподаватель
Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой разнотяговости турбореактивных двухконтурных двигателей силовой установки двухдвигательного самолёта в полёте с несимметричной тягой. Формализованы принципы пошаговой оценки разнотяговости этих двигателей по измеряемым значениям частот вращения их роторов при взлёте самолёта и наборе им высоты.

The issues related to the assessment of the thrust asymmetry of turbojet two-circuit engines of the power plant of a twin-engine aircraft in flight with asymmetric thrust are considered. The principles of step-by-step evaluation of the thrust asymmetry of these engines on the measured values of the rotation frequencies of their rotors during takeoff and climb are formalized.

Ключевые слова: турбореактивный двухконтурный двигатель, тяга, разнотяговость, частота вращения ротора низкого давления, частота вращения ротора высокого давления.

Keyword: turbojet two-circuit engine, thrust, thrust asymmetry, low pressure rotor speed, high pressure rotor speed.

Согласно программам управления турбореактивными двухконтурными двигателями (ТРДД) силовых установок (СУ) среднемагистральных самолётов (СМС) и дальнемагистральных самолётов (ДМС) по частоте вращения ротора низкого давления (РНД) $n_1 \pm \delta n_1 = const$, как, например, у Airbus A-310 с двигателями фирмы "General Electric", и частоте вращения ротора компрессора высокого давления (КВД) $n_2 \pm \delta n_2 = const$, как, например, у Airbus ИЛ-96-300 с ТРДД ПС-90А, разнотяговость ТРДД можно и должно оценивать, вводя в систему автоматического управления (САУ) СУ СМС и ДМС специальные поправки частот вращения роторов их ТРДД $\delta n_1 = C_1 dn_1/dt$, $\delta n_2 = C_2 dn_2/dt$ и анализируя соотношение частот вращения РНД ТРДД таких СУ n_1 с учётом поправок $C_1 dn_1/dt$ и соотношение частот вращения роторов КВД n_2 тех же ТРДД с учётом поправок $C_2 dn_2/dt$ [1-5]. Величина поправок $C_1 dn_1/dt$ и $C_2 dn_2/dt$ обусловлена техническим состоянием этих ТРДД, от динамических свойств которых зависят числовые значения "весовых" коэффициентов C_1 и C_2 [1,2]. Оценивать уровень DR разнотяговости ТРДД СУ двухдвигательного самолёта в полёте можно и должно сравнительным анализом силы тяги R его двигателя, у которого частоты вращения роторов n_1 и n_2 , а их поправки $C_1 dn_1/dt$ и $C_2 dn_2/dt$ и силы тяги R^* другого двигателя, у которого частоты вращения роторов n_1^* и n_2^* , а их поправки $C_1^* dn_1^*/dt$ и $C_2^* dn_2^*/dt$ [1,2,5].

Результаты исследования и их обсуждение

Принципы пошаговой оценки разнотяговости ТРДД СУ двухдвигательного самолёта по измеряемым значениям частот вращения их роторов при взлёте и наборе высоты на 1 -м и $(i+1)$ -х шагах автоматического контроля значений разнотяговости этих ТРДД (DR_i и DR_{i+1}), соответственно, в зависимости от значений силы тяги (R_i), частоты вращения РНД (n_i) и частоты вращения ротора КВД (n_2), одного из его двигателей с учётом поправок $C_1 (dn_1/dt)_i$ и $C_2 (dn_2/dt)_i$ и значений силы тяги (R^*), частоты вращения РНД (n_1^*) и частоты вращения ротора КВД (n_2^*) другого двигателя с учётом поправок $C_1^* (dn_1^*/dt)_i$ и $C_2^* (dn_2^*/dt)_i$ можно и должно формализовать в виде рекуррентных разностных уравнений с коэффициентами J_1 и J_2 , полагая, что $i=1,2,3...I_{TAKEOFF}-1$; $(n_1)_{i+1}=(n_1)_i + C_1 (dn_1/dt)_i$ при $(n_1)_1=(n_1)_0 + C_1 (dn_1/dt)_0 = n_{1test} + 0 = n_{1test}$ и $C_1 (dn_1/dt)_0 = 0$;

$(n_1^*)_{i+1}=(n_1^*)_i + C_1^* (dn_1^*/dt)_i$ при $(n_1^*)_1=(n_1^*)_0 + C_1^* (dn_1^*/dt)_0 = n_{1test}^* + 0 = n_{1test}^*$ и $C_1^* (dn_1^*/dt)_0 = 0$;

$(n_2)_{i+1}=(n_2)_i + C_2 (dn_2/dt)_i$ при $(n_2)_1=(n_2)_0 + C_2 (dn_2/dt)_0 = n_{2test} + 0 = n_{2test}$ и $C_2 (dn_2/dt)_0 = 0$;

$(n_2^*)_{i+1}=(n_2^*)_i + C_2^* (dn_2^*/dt)_i$ при $(n_2^*)_1=(n_2^*)_0 + C_2^* (dn_2^*/dt)_0 = n_{2test}^* + 0 = n_{2test}^*$ и $C_2^* (dn_2^*/dt)_0 = 0$;

n_{1test} , n_{1test}^* , n_{2test} , n_{2test}^* - значения частот вращения роторов этих двигателей, замеренные на заводских горячих стендах в условиях серийного производства таких ТРДД, [1, 2]:

$$(DR)_{i+1} = (R)_{i+1} - (R^*)_{i+1} = [J_1(n_1)_{i+1}^2 + J_2(n_2)_{i+1}^2] - [J_1(n_1^*)_{i+1}^2 + J_2(n_2^*)_{i+1}^2] =$$

$$= J_1[(n_1)_i + C_1(dn_1/dt)_i]^2 - J_1[(n_1^*)_i + C_1^*(dn_1^*/dt)_i]^2 + J_2[(n_2)_i + C_2(dn_2/dt)_i]^2 -$$

$$- J_2[(n_2^*)_i + C_2^*(dn_2^*/dt)_i]^2 = J_1\{[(n_1)_i]^2 + 2C_1(n_1)_i(dn_1/dt)_i + 2(C_1)^2(dn_1/dt)_i^2 -$$

$$- (C_1)^2(dn_1/dt)_i^2 - (n_1^*)_i^2 - 2C_1^*(n_1^*)_i(dn_1^*/dt)_i - 2(C_1^*)^2(dn_1^*/dt)_i^2 +$$

$$+ (C_1^*)^2(dn_1^*/dt)_i^2\} + J_2\{(n_2)_i^2 + 2C_2(n_2)_i(dn_2/dt)_i + 2(C_2)^2(dn_2/dt)_i^2 -$$

$$- (C_2)^2(dn_2/dt)_i^2 - (n_2^*)_i^2 - 2C_2^*(n_2^*)_i(dn_2^*/dt)_i - 2(C_2^*)^2(dn_2^*/dt)_i^2 +$$

$$+ (C_2^*)^2(dn_2^*/dt)_i^2\} = \{J_1[(n_1)_i^2 - (n_1^*)_i^2] + J_2[(n_2)_i^2 - (n_2^*)_i^2]\} +$$

$$+ 2J_1\{C_1(dn_1/dt)_i[(n_1)_i + C_1(dn_1/dt)_i] - C_1^*(dn_1^*/dt)_i[(n_1^*)_i + C_1^*(dn_1^*/dt)_i]\} +$$

$$+ 2J_2\{C_2(dn_2/dt)_i[(n_2)_i + C_2(dn_2/dt)_i] - C_2^*(dn_2^*/dt)_i[(n_2^*)_i + C_2^*(dn_2^*/dt)_i]\} -$$

$$- J_1\{[C_1(dn_1/dt)_i]^2 - [C_1^*(dn_1^*/dt)_i]^2\} -$$

$$- J_2\{[C_2(dn_2/dt)_i]^2 - [C_2^*(dn_2^*/dt)_i]^2\} = (DR)_i + (\delta DR)_i \text{ при } i=1,2,3...I_{TAKEOFF}-1; \quad (5)$$

$$(DR)_1 = (R)_1 - (R^*)_1 = [J_1(n_1)^2 + J_2(n_2)^2] - [J_1(n_1^*)^2 + J_2(n_2^*)^2] =$$

$$= J_1[(n_1)_0 + C_1(dn_1/dt)_0]^2 - J_1[(n_1^*)_0 + C_1^*(dn_1^*/dt)_0]^2 + J_2[(n_2)_0 + C_2(dn_2/dt)_0]^2 -$$

$$- J_2[(n_2^*)_0 + C_2^*(dn_2^*/dt)_0]^2 = J_1[(n_1)_0^2 - (n_1^*)_0^2] =$$

$$= J_1[(n_{1test})^2 - (n_{1test}^*)^2] + J_2[(n_{2test})^2 - (n_{2test}^*)^2]$$

при $(dn_1/dt)_0 = (dn_1^*/dt)_0 = (dn_2/dt)_0 = (dn_2^*/dt)_0 = (\delta DR)_1 = 0.$ (6)

Если при взлёте и наборе высоты число шагов автоматического контроля разнотяговости ТРДД СУ двухдвигательного самолёта не превышает максимального числа таких шагов $I_{TAKEOFF} > i \geq 1$, то оценивать значения разнотяговости этих двигателей $(DR)_i$ и её поправки $(\delta DR)_i$ на i -х шагах такого контроля можно и должно пошагово сравнением измеряемых значений частот вращения РНД этих же двигателей (n_i) и (n_1^*), с учётом поправок $C_1 (dn_1/dt)_i$ и $C_1^* (dn_1^*/dt)_i$ и пошагово

Целью исследования является формализация принципов пошаговой оценки разнотяговости ТРДД СУ двухдвигательного самолёта по измеряемым значениям частот вращения их роторов при взлёте и наборе высоты.

Материал и методы исследования

Материалом исследования являются измеряемые значения частот вращения РНД и роторов КВД однотипных ТРДД. Методами исследования являются методы минимизации разнотяговости и асимметрии тяги однотипных ТРДД в многомерной постановке задачи контроля и компенсации их разнотяговости и асимметрии тяги по двум параметрам тяги ТРДД [5, 6].

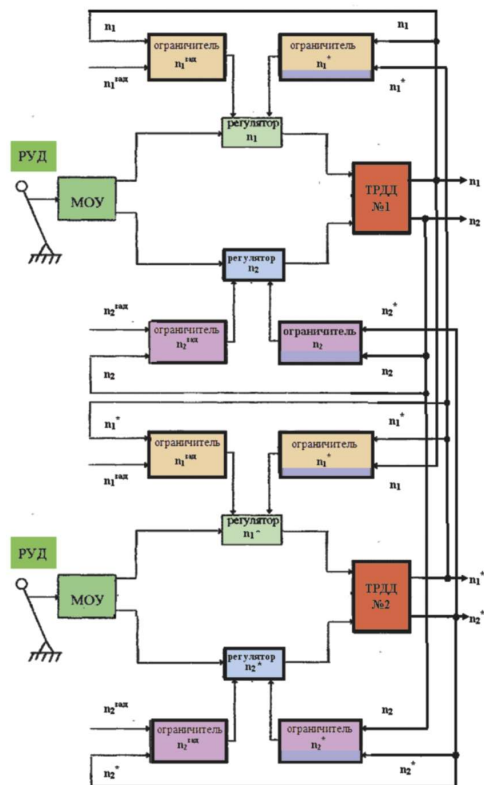


Рисунок 1 - Предлагаемая функциональная схема управления ТРДД двухдвигательного самолёта

вым сравнением измеряемых значений частот вращения роторов КВД тех же двигателей (n_{2j} и $(n_2^*)_j$ с учётом поправок $C_2(dn_2/dt)_j$ и $C_2^*(dn_2^*/dt)_j$ одновременно.

Взаимосвязи частот вращения РНД и роторов КВД отображены на функциональной схеме управления ТРДД двухдвигательного самолёта, приведенной на рисунке 1, где МОУ - механизм объединенного управления агрегатами автоматики, РУД - рычаг управления двигателем, $n_{1зад}$ - заданное значение частоты вращения РНД, $n_{2зад}$ - заданное значение частоты вращения ротора КВД.

Предложенная формализация принципов пошаговой оценки разнотяговости ТРДД СУ двухдвигательного самолёта по измеряемым значениям частот вращения их роторов при взлёте и наборе высоты может и должна обеспечить автоматический контроль разнотяговости двигателей такого самолёта путём ввода в САУ его СУ специальных поправок частот вращения роторов её ТРДД и анализа измеряемых значений этих частот с учётом их поправок. Такая формализация является дальнейшим развитием идеи контроля и минимизации разнотяговости и асимметрии тяги одноципных ТРДД в многомерной постановке задачи контроля и компенсации их разнотяговости и асимметрии тяги. Применение программной и (или) аппаратной реализации полученных формул пошаговой оценки разнотяговости ТРДД СУ двухдвигательного самолёта в САУ СУ СМС или ДМС способствует повышению безопасности полёта такого самолёта за счёт автоматического контроля разнотяговости двигателей его СУ по результатам сравнительного анализа измеряемых значений частот вращения РНД её ТРДД с учётом поправок этих частот и результатам сравнительного

анализа измеряемых значений частот вращения роторов КВД тех же ТРДД с учётом поправок этих частот одновременно. **П**

Литература

1. 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.
2. Бурова 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. Галлай М.Л. Полёт самолета с неполной и несимметричной тягой. - М.: Машиностроение, 1970. - 192 с.
4. Дворниченко В.В. Методология решения проблемных вопросов технической и лётной эксплуатации самолётов ГА и их ТРДД на стандартном и криогенных топливах с минимизацией "разнотяговости" ТРДД "на крыле": дис. ... докт. техн. наук. - М., 2006. - 627 с.
5. Дворниченко В.В., Бурова А.Ю. Глубокое тестирование турбореактивных двигателей методами математической статистики для повышения их соответствия нормативам ICAO // Вестник Московского авиационного института. - 2011. - Т. 18, № 3. - С. 116-127.
6. 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.

Связь с авторами: frambe@mail.ru

В ИЗМЕНЕНИЕ НАПЕЧАТАННОГО

На странице 10 прошлого, 120-го номера журнала "Двигатель" была опубликована статья В.В. Чобитка, поднимающая, как показалось редакции, интересную тему: **Определения ГОСТ и терминология в ГТД**. Актуальность темы нам виделась настолько значительной: стандартизирующие документы, действительно, сильно отстали от существующих реалий, что мы, с позволения автора, дали к статье подзаголовок **Критические замечания практикующего инженера** (поскольку как раз кого-кого, а уж практикующих инженеров у нас в редакции и редакционном совете предостаточно), позволили себе несколько подкорректировать отдельные положения, высказанные автором - некоторым образом несогласуемые с практикой двигателестроения. И, хотя автор и дал согласие на наши правки, прочитав статью целиком в журнале, он решил, что она неверно подаёт его собственные замыслы и идеи.

Мы никогда не практиковали таких вещей, но в этот раз решили отойти от наших обычаев и, практически БЕЗО ВСЯКИХ КОММЕНТАРИЕВ дали предложенные автором правки (в сравнении с текстом статьи), поскольку убедить автора в неправоте посредством переписки не удалось. **Так что, смотрите. П!**

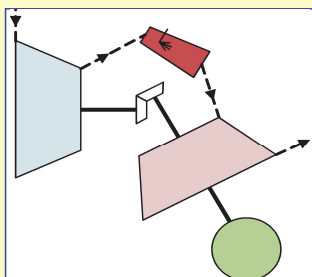


Рисунок 2 - Также одновалный ГТД
Важно понимать, что считается не число наличных в конструкции валов как таковых (на схеме - два вала), а сколько в ней независимых каскадов турбокомпрессоров

ВЕРСИЯ АВТОРА
Рисунок 2. Важно понимать, что считается не число наличных в конструкции валов как таковых (на схеме два вала), а сколько в ней независимых каскадов турбин.

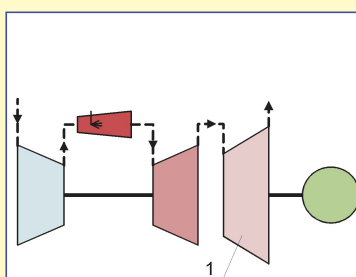


Рисунок 4 - Одновалный ГТД со свободной силовой турбиной и однокаскадным компрессором
1 - свободная силовая турбина с отдельным валом и отбором мощности

ВЕРСИЯ АВТОРА
Рисунок 4. Двухвалный ГТД со свободной силовой турбиной и однокаскадным компрессором
Примечание: к этой схеме относятся ГТД-350, ГТД-350Т (СССР), Boeing Model 502-10МА (США)

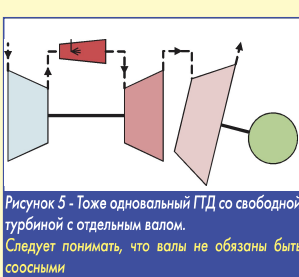


Рисунок 5 - Также двухвалный ГТД
Следует понимать, что валы не обязаны быть соосными

В СТАТЬЕ
При этом лучше пользоваться не "числом турбин" а "количеством турбокомпрессорных групп". Чтобы не включать в это рассмотрение свободные турбины. О них - чуть далее.

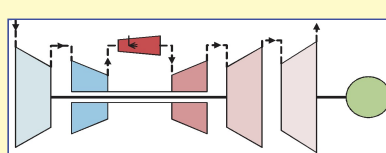


Рисунок 6 - Двухвалный ГТД со свободной силовой турбиной и двухкаскадным компрессором на отдельном валу

ВЕРСИЯ АВТОРА
Рисунок 6. Трёхвалный ГТД со свободной силовой турбиной и двухкаскадным компрессором
Примечание: к этой схеме относятся танковые ГТД-1000Т (СССР), AGT1500 (США)

ВЕРСИЯ АВТОРА
-

В СТАТЬЕ
[К слову, надо заметить, что реальных конструкций, в которых существуют турбокомпрессорные группы с числом валом более трёх, пока не наблюдались, так что спор о классификации имеет скорее теоретический характер, не более. Прим. Ред.]

ВЕРСИЯ АВТОРА
Автор считает, что "число валов турбокомпрессорной группы" и "число валов ГТД" - разные понятия, первое при классификации ГТД определяется терминами "одно-" и "многокаскадный компрессор", второе - "одно-" и "многовалный ГТД" (с указанием числа каскадов и валов для конкретной конструкции). Примером четырёхвального двигателя может служить ГТУ НК-36СТ с трёхкаскадным компрессором (тремя турбокомпрессорными группами)

Связь с автором: chobitok@gmail.com