

УДК 629.7.035.7

doi: 10.32620/aktt.2020.8.08

В. В. ДОНЧЕНКО, И. Ф. КРАВЧЕНКО*ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ШИРОКОХОРДНОГО ВЕНТИЛЯТОРА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОТСУТСТВИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Рассматриваются основные газодинамические параметры для исследования отсутствия автоколебаний широкохордного вентилятора авиационного двигателя. Предлагается расчетно-экспериментальный метод для подтверждения отсутствия автоколебаний на вентиляторе во всем рабочем диапазоне работы авиационного двигателя. Метод основан на опыте проектирования и доводки вентиляторов авиационных двигателей. В методе предлагаются ограничения исследуемой области эксплуатации широкохордного вентилятора авиационного двигателя. В методе показаны границы возможной эксплуатации широкохордного вентилятора авиационного двигателя с учетом ограничений исследуемого диапазона и необходимых запасов, выбранных для исследований и отработки метода. Выполнена обработка параметров полетов самолета с контролем отсутствия автоколебаний с помощью датчиков пульсаций. Обобщены и систематизированы результаты обработки исследованных полетных параметров. Показан способ графического изображения основных контролируемых параметров метода в двухмерной и трехмерной постановке с указанием границ возможного диапазона эксплуатации исследуемого широкохордного вентилятора авиационного двигателя с учетом запасов по давлению и температуре. Для верификации метода графически показаны точки испытаний вентилятора в термобарокамере подобного по размерам вентилятора авиационного двигателя, которые, как показывают рисунки, лежат возле предлагаемых в методе границ. Предложено использовать исследованные точки с доказанным отсутствием автоколебаний для верификаций расчетных моделей с использованием программных комплексов и методик, для расчетного определения отсутствия автоколебаний с учетом определенных в методе границах возможной эксплуатации. Предлагаемые границы исследуемых диапазонов позволят существенно сократить перечень испытаний на летающей лаборатории и количество расчетных точек, что позволит произвести оптимальный вариант проверки на отсутствие автоколебаний вентилятора авиационного двигателя расчетно-экспериментальным путем в условиях Украины без использования термобарокамеры и полетов в жаркие и холодные условия.

Ключевые слова: метод; авиационный двигатель; автоколебания; широкохордный вентилятор.

Введение

Проверка на отсутствие автоколебаний проводится во всем эксплуатационном диапазоне приведенных частот вращения вентилятора - от малого газа до максимальных на стационарных режимах работы авиационного двигателя (АД).

Режимы работы двигателя при проверках на автоколебания должны охватывать все диапазоны приведенных частот вращений, на которых могут возникать несколько известных типов автоколебаний (срывной флаттер, сверхзвуковой флаттер и др.) характерных для рабочих лопаток вентиляторов и компрессоров газотурбинного двигателя (ГТД), различающихся по механизмам реализации обратных связей и режимах работы двигателя, на которых они возникают. Границы областей различных видов флаттера лопаток трансзвукового вентилятора приведены на рисунке 1 [1].

Обоснование отсутствия автоколебаний (флаттера) рабочих лопаток вентилятора и первых ступенях компрессоров ГТД авиационного и наземного применения является важной, актуальной научной и практической задачей, стоящей перед их разработчиками.

Как правило, данная задача решается экспериментальным путем – на экспериментальных установках и на испытательных стендах (наземных и термобарокамерах), а также путем летных испытаний в составе летающей лаборатории. Все указанные испытания являются дорогостоящими и не всегда возможными для Украины (например, испытания в арктических и тропических условиях).

Поэтому замена ряда экспериментальных этапов компьютерным (расчетным) моделированием позволит существенно сократить материальные и временные затраты на проектирование и доводку авиационных и наземных ГТД отечественной разработки.

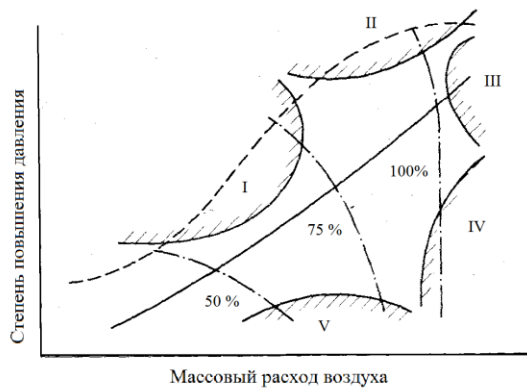


Рис. 1. Границы областей различных видов флаттера лопаток трансзвукового вентилятора: — линия рабочих режимов; - - - граница газодинамической устойчивости; - • - линия различных частот вращения (относительно расчетной); I – дозвуковой срывной флаттер; II – сверхзвуковой срывной флаттер; III – флаттер ударных волн; IV – сверхзвуковой бесрывной флаттер; V – флаттер заклинивания

Постановка задачи исследования

При проектировании вентиляторов АД одним из критериев надежности выступает оценка на отсутствие автоколебаний. Как показывает практика расчетными методами не всегда можно диагностировать наличие автоколебаний или флаттера расчетным путем во всем диапазоне эксплуатации авиационного двигателя.

Стендовые испытания авиационного двигателя также не могут обеспечить проверки на отсутствие автоколебаний во всем рабочем диапазоне. Исследовать весь диапазон работы вентилятора авиационного двигателя возможно только в термобарокамере или на летающей лаборатории.

Термобарокамера и летающая лаборатория доступны не всем организациям, разрабатывающим АД, это требует больших материальных затрат.

Поэтому целью данной работы является создание расчетно-экспериментального метода для подтверждения отсутствия автоколебаний на широкоходном вентиляторе АД во всем рабочем диапазоне работы АД, который позволит доказать отсутствие автоколебаний на широкоходном вентиляторе АД во всем эксплуатационном диапазоне без применения термобарокамеры.

Предлагаемый авторами расчетно-экспериментальный метод исследования устойчивости к автоколебаниям широкоходной рабочей лопатки вентилятора авиационного ГТД основан на анализе рабочих параметров ГТД в исследованном диапазоне высотно – скоростных условий при испытаниях на наземных стендах и в ходе летных испытаний. И применении расчетных методик в неисследованных и предельных областях работы ГТД.

Описание метода исследования

В данном методе рассматривается оптимальный вариант проверки на отсутствие автоколебаний вентилятора авиационного двигателя расчетно-экспериментальным путем в условиях Украины.

В первую очередь для проведения исследований необходимо определить газодинамические параметры которые станут граничными условиями диапазона исследований для проверки отсутствия автоколебаний на вентиляторе АД. Одними из основных параметров авиационного двигателя являются давление, температура и скорость, метод будет основан на использовании данных параметров.

Как показывает практика на основании опыта проектирования и эксплуатации для обеспечения надежности рабочей лопатки вентилятора АД необходимо иметь запас по давлению и температуре во всем эксплуатационном диапазоне работы АД.

Как правило, на основании опыта проектирования и доводки, автоколебания на вентиляторах АД возникают на высоте до 4-х километров. Это будет одним из первых ограничений диапазона исследований на отсутствие автоколебаний на вентиляторе АД.

Следующим ограничением на основании опыта проектирования, доводки, испытаний, исследований и эксплуатации вентиляторов АД возникает возможность, ограничения количества режимов работы двигателя до двух основных – взлетного и номинального, на данных режимах параметры, выбранные в методе достигают максимальных значений, что позволяет охватить весь эксплуатационный диапазон.

Диагностика автоколебаний рабочей лопатки вентилятора при наземных и летных испытаниях основана на использовании методов тензометрирования и виброакустических методов на основе спектрального анализа записей датчиков пульсаций статического давления над вентиляторной ступенью [2].

При определении взаимосвязи (зависимости) динамических напряжений в лопатках вентилятора, полученных при тензометрировании, с диагностическими критериями, полученными при спектральном анализе записей датчиков пульсаций статического давления становится возможным применение виброакустической диагностики автоколебаний рабочей лопатки вентилятора в процессе летных испытаний.

Обработка основных данных полетов и стендовых испытаний, использованных в методе производится с контролем датчиками пульсаций статического давления [2], которые установлены в корпусе

вентилятора – для контролю отсутствия автоколебаний. С помощью этой обработки возникает возможность увеличения исследованной эксплуатационной области работы двигателя с доказательством отсутствия автоколебаний. После обработки определённого количества полетов и набора статистики возникает возможность построить двухмерные и трехмерные графики по основным параметрам работы двигателя, показанных на рисунках 2-9, для оценки исследуемого диапазона.

При проектировании АД известны расчетные значения температуры, давления и скорости во всем возможном диапазоне работы АД, данная область показана на рисунках 2-9 для режимов номинальный и взлетный на высоте до 4-х километров, эта область принадлежит расчетному диапазону эксплуатации широкохордного вентилятора АД, выбранного как пример для отработки метода.

Для обеспечения надежной работы двигателя при испытаниях по температуре и давлению необходимо обеспечить запас, с учетом этого возникают новые границы исследуемого диапазона, которые учтены в данном методе.

На рисунках 2-9 показаны выбранные для метода параметры двигателя на земле с контролем вентилятора от возникновения автоколебаний, флаттера с помощью тензодатчиков, которые позволяют контролировать уровень динамических напряжений. Как видно из рисунков 2-9 с помощью наземных испытаний можно определить безопасную эксплуатацию АД в крайне малом диапазоне.

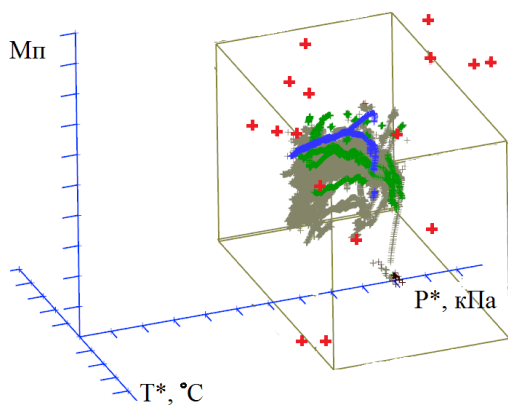


Рис. 2. Трехмерный диапазон исследованных основных данных метода с учетом границ возможной эксплуатации на номинальном режиме работы двигателя:

P^* , кПа – полное давление; $Mп$ – число Маха; T^* , °C – полная температура; — расчетная область эксплуатации АД; + стендовые испытания АД на земле; + испытания вентилятора в термобарокамере; + полеты с тензодатчиками

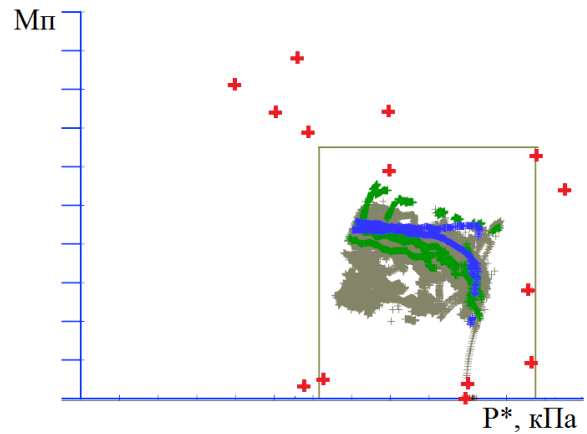


Рис. 3. Зависимость полного давления на входе в двигатель от числа Маха на номинальном режиме работы двигателя:

P^* , кПа – полное давление; $Mп$ – число Маха; — расчетная область эксплуатации АД; + стендовые испытания АД на земле; + испытания вентилятора в термобарокамере; + полеты с тензодатчиками

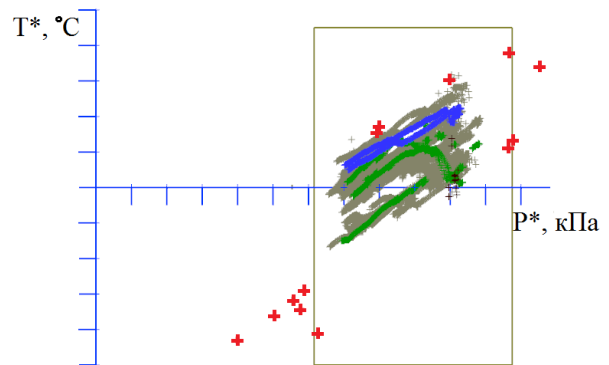


Рис. 4. Зависимость полного давления от полной температуры на входе в двигатель на номинальном режиме работы двигателя:

P^* , кПа – полное давление; T^* , °C – полная температура; — расчетная область эксплуатации АД; + стендовые испытания АД на земле; + испытания вентилятора в термобарокамере; + полеты с тензодатчиками

Для увеличения исследуемого диапазона эксплуатации АД с контролем отсутствия автоколебаний были проведены испытания с закрытым и открытым соплом на летающей лаборатории в условиях Украины, данные основных параметров двигателя показаны на рисунках 2-9. При этом кроме датчиков пульсаций статического давления рабочие лопатки вентилятора были препарированы тензодатчиками. Как видно из рисунков 2-9 изменение сечения сопла не может обеспечить граничные параметры исследуемого диапазона в Украине.

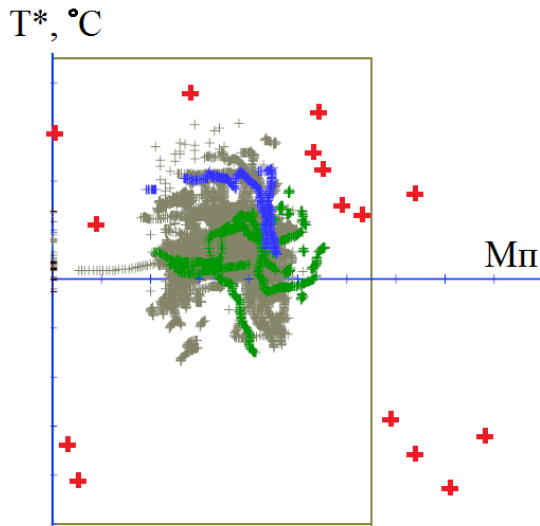


Рис. 5. Зависимость полной температуры на входе в двигатель от числа Маха на номинальном режиме работы двигателя: $Mп$ – число Маха; T^* , °C – полная температура; — расчетная область эксплуатации АД; + стендовые испытания АД на земле; + испытания вентилятора в термобарокамере; + полеты с тензодатчиками

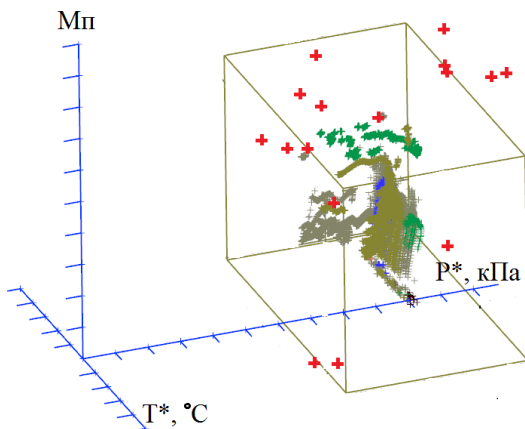


Рис. 6. Трехмерный диапазон исследованных основных данных метода с учетом границ возможной эксплуатации на взлетном режиме работы двигателя:

P^* , кПа – полное давление; $Mп$ – число Маха; T^* , °C – полная температура; — расчетная область эксплуатации АД; + стендовые испытания АД на земле; + испытания вентилятора в термобарокамере; + полеты с тензодатчиками

Для сравнения и проверки выбранного диапазона для определения границы исследований вентилятора АД на отсутствие автоколебаний на рисунках 2-9 показаны испытания подобного вентилятора в термобарокамере. Как видно из рисунков исследованные точки лежат близко к границам предлагаемого диапазона.

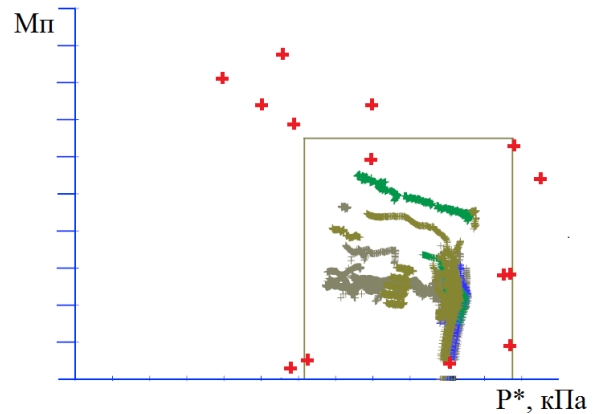


Рис. 7. Зависимость полного давления на входе в двигатель от числа Маха на взлетном режиме работы двигателя: P^* , кПа – полное давление; $Mп$ – число Маха; — расчетная область эксплуатации АД; + стендовые испытания АД на земле; + испытания вентилятора в термобарокамере; + полеты с тензодатчиками

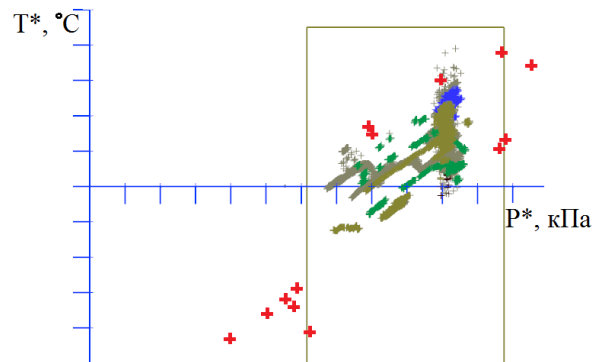


Рис. 8. Зависимость полного давления от полной температуры на входе в двигатель на взлетном режиме работы двигателя: P^* , кПа – полное давление; T^* , °C – полная температура; — расчетная область эксплуатации АД; + стендовые испытания АД на земле; + испытания вентилятора в термобарокамере; + полеты с тензодатчиками

Как видно из рисунков 2-9 ни одной границы расчетного диапазона с учетом запаса при испытаниях выбранного широкохордного вентилятора АД не было достигнуто. На данном этапе развития математического моделирования существуют возможности расчетными программами и методами оценить геометрию лопатки на отсутствие автоколебаний [3 – 5]. При этом для контроля и верификации расчетных моделей использовать экспериментальные данные [6], а для расчетов граничных точек, приведенных в данном методе использовать основные параметры сокращенные и ограниченные предложенным методом.

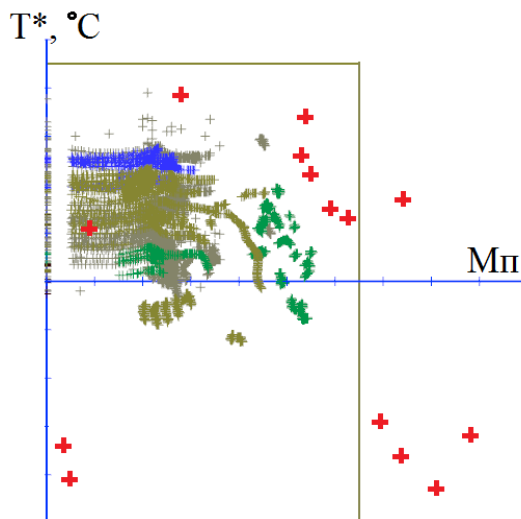


Рис. 9. Зависимость полной температуры на входе в двигатель от числа Маха на взлетном режиме работы двигателя:

Мп – число Маха; T^* , °C – полная температура;
 — расчетная область эксплуатации АД; + стендовые испытания АД на земле; + испытания вентилятора в термобарокамере; + полеты с тензодатчиками

Верификация расчетной модели будет осуществляться на основе сравнения с экспериментальными данными – полученными сочетаниями параметров рабочего процесса ГТД и высотно – скоростных условий в которых возможно наличие и отсутствие автоколебаний. При необходимости расчетная модель будет корректироваться.

Заключение

В данной работе проведен анализ (исследование) полетных баз данных и определены зоны рабочих параметров ГТД и высотно – скоростные условия при которых автоколебания рабочей лопатки вентилятора отсутствуют.

На основании исследований и опыта проектирования доводки и эксплуатации АД ограничены и упорядочены основные газодинамические параметры и границы для исследования отсутствия автоколебаний вентилятора авиационного двигателя.

Предложен расчетно-экспериментальный метод для подтверждения отсутствия автоколебаний на вентиляторе во всем рабочем диапазоне работы широкохордного АД в условиях Украины.

Литература

1. Гостелов, Дж. *Аэродинамика решеток турбомашин* [Текст] : пер. с англ. / Дж. Гостелов. – М. : Мир, 1987. – 392 с.
2. Хориков, А. А. *Метод и система диагностики аэроупругих колебаний рабочих лопаток ком-*

прессоров датчиками пульсаций [Текст] / А. А. Хориков // Труды между. науч.-техн. конф. ИПМаш НАН Украины. – Харьков, 1997. – С. 323–332.

3. A review of flutter analysis of Tandem cascades based on a fluid-structure coupling method [Text] / Weiwei Zhang, Yabin Xu, Dan Su et all // *J. of Aerosp. Eng.* – 2019. – Vol. 32(2). – P. 1–11.

4. Грабовский, А. В. *Исследование связанной задачи аэроупругости с применением современных методов расчета* [Текст] / А. В. Грабовский // *Вестник НТУ ХПИ*. – 2014. – № 29. – С. 44–48.

5. Murthy, Pappu L. N. *A Probabilistic Turbomachinery Aeroelastic Analysis Tool* [Text] : report / Pappu L. N. Murthy, T. S. R. Reddy, George L. Stefco // *Glenn Research Center Cleveland*. – Nasa : Ohio, 2019. – 42 p. – NASA/TM-2019-219979.

6. Численный анализ аэроупругого поведения лопаточного венца вентилятора авиационного двигателя [Текст] / В. И. Гнесин, Л. В. Колодяжная, И. Ф. Кравченко и др. // *Проблемы машиностроения*. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 3–11.

References

1. Gostelov, J. P. *Cascade aerodynamics*. Pergamon Press Ltd, 1984. 270 p. (Russ. ed.: Savina, N. M., Kadetova, A. P. *Ajerodinamika reshetok turbomashin*. Moscow, Mir Publ., 1987. 392 p.).

2. Horikov, A. A. *Metod i sistema diagnostiki ajerouprugih kolebanij rabochih lopatok kompressorov datchikami pul'sacij* [Method and system for diagnosis aeroelastic vibrations of compressor working blades by pulsation sensors]. *Trudy mezhd. nauch. - tehn. konferencii IPMash NAN Ukrainy* [Transactions of international scientific-technical conference of A. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of NASU]. Kharkiv, 1997, pp. 323–332. (In Russian).

3. Zhang, W., Yabin, X., Dan, S., Yiqi G. A review of flutter analysis of Tandem cascades based on a fluid-structure coupling method. *J. of Aerosp. Eng.*, 2019, no. 32(2), pp. 1–11. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.19435525.0000975.

4. Grabovskij, A. V. *Issledovanie svjazannoj zadachi ajerouprugosti s primeneniem sovremennyh metodov rascheta* [Investigation of the associated aeroelasticity problem using modern calculation methods] *Vestnik NTU HPI*, 2014, no. 29, pp. 44–48.

5. Murthy, Pappu L. N., Reddy, T. S. R., Stefco, George L. *A Probabilistic Turbomachinery Aeroelastic Analysis Tool*. Glenn Research Center Cleveland, Ohio 44135, 2019. 42 p. Technical report: NASA/TM-2019-219979.

6. Gnesin, V. I., Kolodjzhnaja, L. V., Kravchenko, I. F., Merkulov, V. M., Sheremet'ev, A. V., Petrov, A. V. *Chislennyj analiz ajerouprugogo povedenija lopatochnogo venca ventiljatora aviacionnogo dvigatelja* [Numerical analysis of the aeroelastic behavior of the blade ring of an aircraft engine fan]. *Problemy mashinostroenija*, 2017, no. 20(3), pp. 3–11.

Поступила в редакцію 20.05.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ШИРОКОХОРДНОГО ВЕНТИЛЯТОРА АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА НА ВІДСУТНІСТЬ АВТОКОЛИВАНЬ

В. В. Донченко, І. Ф. Кравченко

Розглядаються основні газодинамічні параметри для дослідження відсутності автоколивань широкохордного вентилятора авіаційного двигуна. Пропонується розрахунково-експериментальний метод для підтвердження відсутності автоколивань на вентиляторі в усьому робочому діапазоні роботи авіаційного двигуна. Метод заснований на досвіді проектування та доведення вентиляторів авіаційних двигунів. У методі пропонується обмеження досліджуваної області експлуатації широкохордного вентилятора авіаційного двигуна. У методі показані межі можливої експлуатації широкохордного вентилятора авіаційного двигуна з урахуванням обмежень досліджуваного діапазону та необхідних запасів, обраних для досліджень і відпрацювання методу. Виконана обробка параметрів польотів літака з контролем відсутності автоколивань за допомогою датчиків пульсацій. Узагальнені та систематизовані результати обробки досліджених польотних параметрів. Показаний спосіб графічного зображення основних контрольованих параметрів методу в двовірній і тривірній постановці з зазначенням меж можливого діапазону експлуатації досліджуваного широкохордного вентилятора авіаційного двигуна з урахуванням запасів за тиском та температурою. Для верифікації методу графічно зображені точки випробувань вентилятора в термобарокамері подібного за розмірами вентилятора авіаційного двигуна, які, як зображено на рисунках, розташовані біля пропонувананих в методі меж. Запропоновано використовувати досліджені точки з доведеною відсутністю автоколивань для верифікації розрахункових моделей із використанням програмних комплексів і методик, для розрахункового визначення відсутності автоколивань із урахуванням визначених у методі меж можливої експлуатації. Пропоновані межі досліджуваних діапазонів дозволять істотно скоротити перелік випробувань на літаючій лабораторії і кількість розрахункових точок, що дозволить впровадити оптимальний варіант перевірки на відсутність автоколивань вентилятора авіаційного двигуна розрахунково-експериментальним шляхом в умовах України без використання термобарокамери та польотів в спекотних і холодних умовах.

Ключові слова: метод; авіаційний двигун; автоколивання; широкохордний вентилятор.

THE EXPERIMENTAL-RATED METHOD OF STUDYING OF WIDE-CHORD FAN OF THE AIRCRAFT ENGINE FOR THE ABSENCE OF FLUTTER

V. Donchenko, I. Kravchenko

The main gas-dynamic parameters are considered for studying of the absence of flutter wide-chord fan of aircraft engine. The experimental-rated method is proposed to confirm the absence of flutter on the fan in the entire operating range of the aircraft engine. The method is based on experience in the design and development of aircraft engine fans. The method proposes the limitations of the study area of operation of a wide-chord of the aircraft engine fan. The method shows the boundaries of the possible operation of a wide-chord of the aircraft engine fan, taking into account the limitations of the studied range for the research and development of the testing. The aircraft flight parameters were processed with the control of the absence of flutter using pressure pulsation gauges. The results of processing the studied flight parameters are generalized and systematized. A technique for graphically depicting of the main controlled parameters of the method in a two-dimensional and three-dimensional setting is shown, indicating the boundaries of the possible range of operation, the wide-chord fan of the aircraft engine under study, taking into account the reserves of pressure and temperature. To verify the method, the test points of the fan are graphically showed in a thermal vacuum chamber of a similar sized fan of an aircraft engine, which, as the figures show, lie near the boundaries proposed in the method. It is proposed to use the studied points with a proven absence of flutter for verification of computational models using software systems and methods, for calculating the absence of flutter, taking into account the limits of possible operation defined in the method. The proposed boundaries of the studied ranges will significantly reduce the list of tests at the flying laboratory and the number of design points, which will allow us to make the best option for checking the absence of self-oscillations of the aircraft engine fan by the experimental-rated method in Ukraine without using a thermal pressure vacuum chamber and flying in hot and cold conditions.

Keywords: method; an aircraft engine; flutter; a wide-chord fan.

Донченко Вячеслав Владимирович – інженер-конструктор 1 категорії ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжє, Україна.

Кравченко Ігорь Федорович – д-р техн. наук, директор підприємства, генеральний конструктор ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжє, Україна.

Viacheslav Donchenko – first category designer, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: slavadonchenko88@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-9585-2991.

Igor Kravchenko – Doctor of Technical Sciences, general manager, chief designer, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: progress@ivchenko-progress.com, ORCID Author ID: 0000-0003-2304-3356.