

УДК 629.7.03.018

Б.Б. КОРОВИН, О.Н. БЫЛИНКИНА, А.А. СТАСЕВИЧ*Федеральное государственное унитарное предприятие РФ «Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Жуковский, Россия.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМБИНАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАСТЕЙ БИРОТАТИВНОГО ВИНТОВЕНТИЛЯТОРА РЕДУКТОРНОГО ТВВД

Исследованы условия проявления комбинационных колебаний лопастей переднего колеса биротативного винтовентилятора с разновращающимися колесами в капоте, обнаруженных при испытаниях опытного ТВВД редукторной схемы на летающей лаборатории. Показано, что указанные колебания с частотой, равной сумме частот вращения колес винтовентилятора, возникают при рассогласовании их частот вращения. Обсуждены возможные механизмы генерации рассматриваемых колебаний. Кинематический, как результат взаимодействия неуравновешенных сил динамически несбалансированных колес противоположного вращения, осуществляемого через межвальные подшипники винтовентилятора, и аэродинамический. Последний базируются на воздействии на лопасти переднего колеса винтовентилятора вращающейся неравномерности, создаваемой задним колесом.

Ключевые слова: турбовинтовентиляторный двигатель (ТВВД), винтовентилятор в капоте, лопасти, редуктор, комбинационные колебания, вибрационная нагрузка, спектр, гармоника, амплитудная модуляция.

Введение

Ввиду актуальности освоения авиационных газотурбинных двигателей сверхбольшой степени двухконтурности сложных схем и большой размерности исследования динамики колес биротативных винтовентиляторов представляют практический интерес. Настоящая публикация посвящена экспериментальным исследованиям комбинационной составляющей колебаний лопастей винтовентилятора, выявленной при испытаниях на летающей лаборатории демонстрационного ТВВД редукторной схемы с биротативным винтовентилятором в капоте.

1. Формулирование проблемы и методы ее решения

Биротативный винтовентилятор в капоте для большеразмерных (тягой 18 – 20 т с миделем ≈ 3 м) ТВВД редукторной схемы представляет собой сложную динамическую систему. При работе в составе двигателя указанная система испытывает воздействие большого числа факторов, усиливающих риски возникновения высоких динамических нагрузок аэродинамической и кинематической природы.

К указанным факторам естественно отнести:

– влияние суммарного дисбаланса разновращающихся переднего (ПВ) и заднего (ЗВ) колес винтовентилятора (ВВ) с существенной составляю-

щей аэродинамической неуравновешенности ввиду относительно малого числа широкохордных лопастей в колесе (8 и 10 для ПВ и ЗВ соответственно);

– отличия в нагруженности ПВ и ЗВ (соотношение крутящих моментов 0,4/0,6);

– влияние кинематики высоконагруженного дифференциального редуктора, обеспечивающего возможность регулирования частот вращения колес в заданных диапазонах их изменения и рассогласования за счет изменения углов установки лопастей;

– большую протяженность вала турбины привода;

– редуктора ВВ, расположенного внутри валов узлов высокого и низкого давления газогенератора;

– наличие нескольких межвальных подшипников;

– аэродинамическое взаимодействие разновращающихся колес винтовентилятора.

Из вышеизложенного следует актуальность выявления и изучения динамических эффектов в биротативном винтовентиляторе ТВВД. В настоящей публикации представлены результаты экспериментальных исследований одного из таких эффектов – комбинационных колебаний выполненных из композитных материалов широкохордных лопастей переднего колеса ВВ.

Возникновения значимых комбинационных колебаний в венцах рабочих колес турбомашин с час-

той, равной сумме частот вращения их роторов, в практике летной доводки авиационных ГТД различного типа, включая вибрационную доводку биротативных винтов ТВД и биротативных винтовентиляторов ТВВД, никогда ранее не отмечалось [1, 2]. О возможности подобных колебаний венцов рабочих колес не упоминается и в столь авторитетных монографиях по динамике ГТД, как [3, 4].

Настоящие исследования базируются на анализе материалов динамического тензометрирования и вибрографирования демонстрационного ТВВД большой размерности и сверхбольшой степени двухконтурности с биротативным винтовентилятором в капоте при его испытаниях на летающей лаборатории. [5]. Схема препарирования двигателя тензо- и вибродатчиками показана на рис. 1.

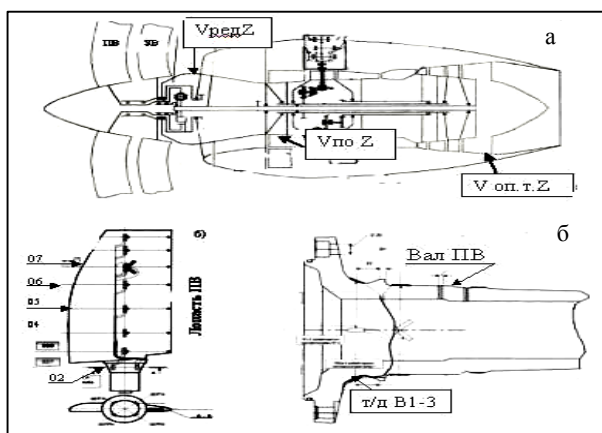


Рис. 1. Схема препарирования двигателя: а – вибродатчиками; б – тензодатчиками

Анализ выполнялся с помощью разработанного в ЛИИ программно-аппаратного комплекса «Виброанализ», предусматривающего цифровую обработку объединенных баз данных о высокочастотной и сопровождающей низкочастотной информации при высокой степени автоматизации вторичной обработки вибропроцессов [6].

При анализе материалов тензометрирования использовались замеры напряжений, выполненные с помощью ограниченного числа тензодатчиков, наклеенных в наиболее представительных местах пера лопасти и у комля, а также на вале переднего колеса ВВ. Все указанные датчики были ориентированы для оценки преимущественно изгибных форм колебаний. Уровень переменных напряжений в обследуемых элементах винтовентилятора определялся по оцифрованным тензосигналам методом огибающей.

Вибрации двигателя оценивались в полосе роторных частот 10...380 Гц по СКЗ вибросигналов штатных замеров по оси Z в плоскостях опоры редуктора, передней опоры КНД и опоры турбины –

$V_{ред.Z_{шт}}$, $V_{по.Z_{шт}}$, $V_{оп.т.Z_{шт}}$ соответственно, а также по экспериментальным замерам по осям X и Y на редукторе ($V_{ред.x}$, $V_{ред.y}$) и по оси Y на передней опоре ($V_{по.y}$). При идентификации источников колебаний использовался спектральный анализ вибропроцессов с разрешением 0,3 – 1 Гц, математическая модель амплитудной модуляции и диаграмма Кемпбелла.

2. Результаты исследований

2.1. Условия проявления комбинационных колебаний в элементах переднего колеса ВВ.

Комбинационные колебания лопастей ПВ, частота которых соответствовала сумме частот вращения переднего и заднего колес винтовентилятора, были обнаружены при нештатном рассогласовании частот вращения переднего и заднего колес ВВ в наземных условиях работы двигателя. Указанные колебания наблюдались на режиме малого газа (МГ) и в процессе перехода на режим 0,4 максимального полетного (0,4 МП) при $N_{зв} > N_{пв}$ и величине рассогласования частот вращения ПВ и ЗВ в диапазоне 10...690 об/мин (0,16...11,5 Гц) (рис. 2).

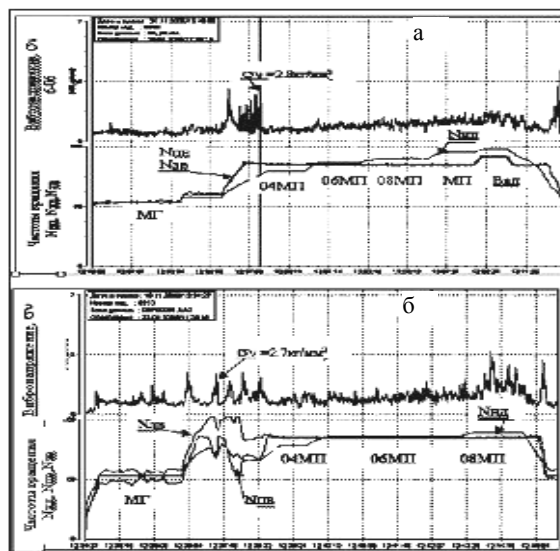


Рис. 2. Изменение частот вращения ПВ, ЗВ, ротора низкого давления Ннд, а также вибронгруженности лопастей ПВ в зависимости от режима работы двигателя для штатной ситуации (а), при раскрутке заднего колеса винтовентилятора (б)

Согласно ТУ на двигатель, максимальная расчетная частота вращения колес ВВ составляет 1720 об/мин., а допуск отклонения частот вращения переднего и заднего колес ВВ от величины, заданной программой регулирования, для установившихся режимов не должен превышать $\pm 6,2$ об/мин (0,1 Гц). Общее представление об изменении частот вращения ПВ, ЗВ и регулируемого ротора низкого

давления $N_{дв}$ в зависимости от режима работы двигателя для штатной ситуации и при нерасчетной «раскрутке» колеса 3В можно получить, рассматривая рис. 2.

Колебания лопастей ПВ с частотой, равной сумме частот вращения колес ВВ, были также зафиксированы в полете при снижении летающей лаборатории с двигателем, работающим на режиме МГ, при нерасчетном рассогласовании частот вращения заднего и переднего колес винтовентилятора $N_{3В} - N_{пв} \approx 180$ об/мин (3 Гц).

В тех случаях, когда частота комбинационных колебаний лопастей оказывалась близкой к частоте колебаний, вызываемых 2-ой гармоникой возбуждения, при близости интенсивности составляющих двух указанных колебаний ПВ2 и ПВ+3В тензосигнал с лопастей во временной области имел форму биений. Характерные осциллограмма и спектры тензосигналов, иллюстрирующие рассматриваемые колебания лопастей ПВ показаны на рис. 3.

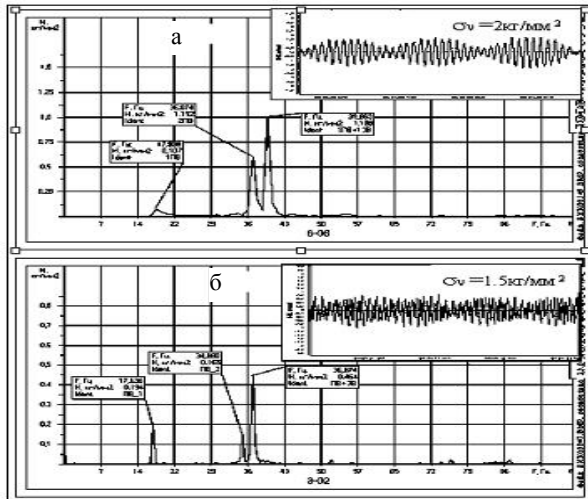


Рис. 3. Иллюстрация проявления комбинационных колебаний ПВ+3В вблизи резонанса, вызываемого 2-й гармоникой возбуждения лопасти при работе двигателя на земле (а) и в комле лопасти при снижении ЛЛ с двигателем на режиме МГ (б)

Здесь и далее по тексту аббревиатура ПВ и 3В означает источник колебаний, а цифры либо их отсутствие – целочисленную кратность частот соответствующих составляющих колебаний. Например, ПВ1 (ПВ) означает составляющую колебаний с частотой вращения переднего колеса ВВ, ПВ2 – составляющую с частотой второй кратности к роторной частоте ПВ, а ПВ1+3В1 (ПВ+3В) – составляющую с частотой, равной сумме частот вращения колес переднего и заднего ВВ.

Нештатное рассогласование частот вращения переднего и заднего колес ВВ в широких пределах позволило проанализировать динамику нагружения лопастей для этого нерасчетного случая, оценить

изменение интенсивности комбинационных колебаний в зависимости от величины рассогласования.

На рис. 4 показано изменение по времени частот вращения переднего и заднего колес ВВ, а также амплитудных значений составляющих ПВ1, 3В1, ПВ2, ПВ1+3В1 тензосигнала в лопасти для режима нештатной «раскрутки» ВВ.

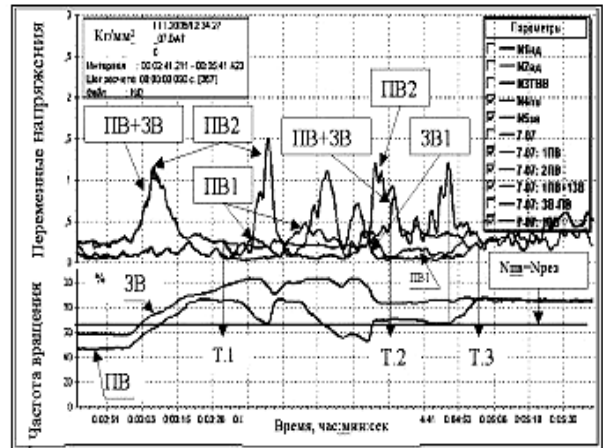


Рис. 4. Изменение по времени амплитудных значений различных спектральных составляющих тензосигнала в лопасти и частот вращения переднего и заднего колес ВВ в процессе раскрутки 3В

Из рассмотрения рисунка 4 видно, что в спектре тензосигнала превалирует составляющая ПВ2, имеющая характерные резонансные пики при $N_{пв} = N_{рез}$. Интенсивности составляющих ПВ1 и 3В1 значительно уступают ПВ2, а комбинационная составляющая ПВ1+3В1 – вторая по ранжиру. Она четко идентифицируется во временном интервале между точками 1 и 3, имея максимум в точке 2. Левее точки 1 составляющие ПВ2 и ПВ+3В неразличимы, а правее точки 3 они имеют близкие значения интенсивности.

«Отслоение» комбинационных колебаний от составляющей ПВ2 наглядно иллюстрируется каскадом спектров на рис. 5.

Значения величин $N_{3В}$ и $N_{пв}$ между точками 1 и 3 менялись во времени разно направленно и сложным образом. При этом максимум составляющей ПВ1+3В1 наблюдался не при максимальной разнице величин $N_{3В}$ и $N_{пв}$, достигавшей 690 об/мин (11,5 Гц), а при существенно более низком рассогласовании (3,1 Гц) (рис. 6, а).

Так как указанная величина рассогласования частот вращения ПВ и 3В в рассматриваемом эксперименте наблюдалась не один раз при единственном мощном всплеске интенсивности, в качестве экспериментального критерия оценки условий проявления комбинационных колебаний было проверено безразмерное частотное соотношение, учитывающее средний уровень диапазона рассогласования частот

вращения $(F_{ПВ} - F_{ЗВ}) / (F_{ПВ}/2 + F_{ЗВ}/2)$.

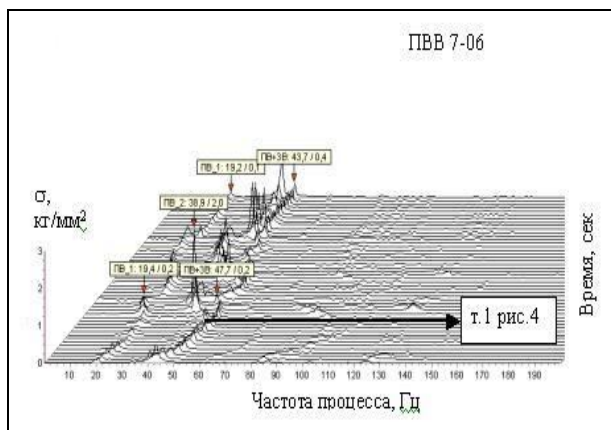


Рис. 5. Каскад спектра, рассчитанный для тензосигнала на лопасти, иллюстрирующий расхождение составляющих ПВ2 и ПВ+ЗВ

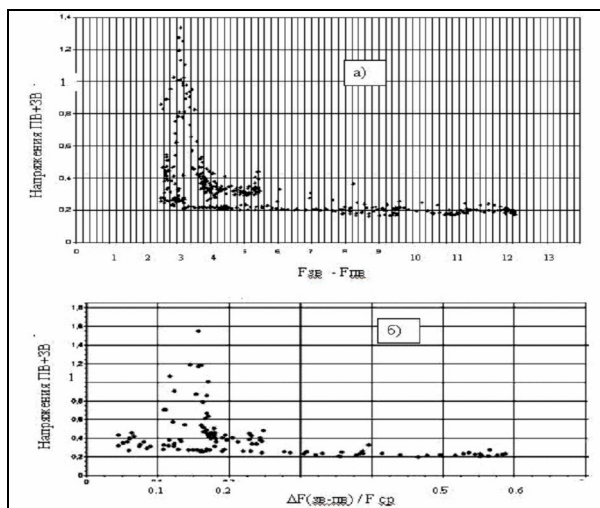


Рис. 6. Изменение интенсивности составляющей переменных напряжений с частотой ЗВ+ПВ в лопасти переднего винтовентилятора от абсолютной (а) и относительной (б) величины рассогласования частот вращения при раскрутке ЗВ.

Изменение интенсивности комбинационной составляющей по этому критерию показано на рис. 6, б.

2.2. К объяснению возникновения комбинационных колебаний лопастей ПВ

Один из возможных механизмов возбуждения составляющей колебаний ПВ+ЗВ в лопастях переднего колеса винтовентилятора – их вибрационный отклик на аэродинамическое воздействие вращающейся неравномерности параметров потока, создаваемой вращением заднего колеса ВВ.

Так как колеса ПВ и ЗВ вращаются в противоположные стороны, указанная вращающаяся неравномерность параметров потока воспринимается каждой из лопастей переднего колеса винтовентиля-

тора как сумма гармоник

$$\sum_{i=1}^{\infty} B_i \cos K_i (\omega_{ЗВ} + \omega_{ПВ}) t, \quad (1)$$

где B_i – амплитуда соответствующей гармоники возбуждения;

K_i – номер соответствующей гармоники возбуждения;

$\omega_{ЗВ}$ и $\omega_{ПВ}$ – циклические частоты вращения колес ЗВ и ПВ.

Рассмотрим, насколько предложенная модель возбуждения согласуется с результатами эксперимента. Как известно, интенсивность вибрационного отклика в линейной постановке определяется близостью частоты воздействия собственной частоте системы и интенсивностью воздействия. Искомая частота воздействия $f_{ЗВ} + f_{ПВ}$ в эксперименте изменялась в диапазоне 36...50 Гц при собственной частоте колебаний лопасти на работающем двигателе 38 Гц.

Доминирование составляющей ПВ+ЗВ в спектре колебаний лопасти ПВ при снижении ЛЛ (см. рис. 3, б) не противоречит предложенной модели. Указанное доминирование можно объяснить, как близостью ее частоты 36 Гц к собственной частоте лопасти по основному тону, так и относительной значимостью интенсивности первой гармоники вращающейся неравномерности за ПВ в рассматриваемом случае по сравнению интенсивностью первой и второй гармоник окружной неравномерности потока на входе в двигатель. Именно этими гармониками входной неравномерности потока обусловлено возбуждение составляющих ПВ и ПВ2 в спектре на рис. 3, б.

Для расчетного случая, когда $\omega_{ПВ} = \omega_{ЗВ}$, возбуждающее аэродинамическое воздействие на лопасти ПВ даже наиболее мощной первой гармоники вращающейся неравномерности параметров потока $B_1 \cos(\omega_{ЗВ} + \omega_{ПВ}) t$ будет минимальным. При нерасчетном же рассогласовании частот вращения, когда $\omega_{ЗВ} > \omega_{ПВ}$, а положение угла установки лопастей ВВ зафиксировано, интенсивность неравномерности будет расти и можно ожидать локального по частоте максимума воздействия. Рис. 6, иллюстрирующий наличие выраженного максимума интенсивности составляющей ПВ+ЗВ, вполне соответствует такой трактовке.

Таким образом, идентификация колебаний лопасти ПВ с частотой $f_{ЗВ} + f_{ПВ}$, как вынужденных и вызванных первой гармоникой вращающейся окружной неравномерности потока за передним колесом ВВ, не противоречит результатам эксперимента.

Наличие в спектрах тензосигналов лопастей ПВ составляющей колебаний с частотой равной сумме частот вращения колес ПВ и ЗВ может свидетельствовать и о реализации механизма их возбуж-

дения, связанного с модуляционными процессами в системе винтовентилятора, где в качестве носителей несущей частоты и частоты модулирующей функции выступают вращающиеся ротора ЗВ и ПВ.

Если принять в качестве математической модели возбуждения комбинационных составляющих колебаний в элементах ВВ амплитудную модуляцию, в спектрах тензосигналов, замеренных на элементах его ротора и статора, как минимум, следует ожидать и составляющую ЗВ-ПВ с частотами $|f_{зв} - f_{пв}|$.

Априори можно предположить два основных механизма модуляционного взаимодействия при колебаниях элементов ВВ, когда в качестве несущей частоты и частоты модулирующей функции колебаний выступают $\omega_{пв}$ и $\omega_{зв}$. Аэродинамический и кинематический. Рассмотрим их в порядке перечисления

Гармоники вращающейся неравномерности потока (1), создаваемой ЗВ, могут выступать как модулирующие функции для каждой из лопастей ПВ при их колебаниях, возбуждаемых гармониками окружной неравномерности потока на входе в двигатель. Модулирующее воздействие на колебания лопасти ПВ, возбуждаемой первой гармоникой неравномерности потока на входе, первой гармоники вращающейся неравномерности со стороны ЗВ описывается соотношением

$$\begin{aligned} V_1 \cos(\omega_{зв} + \omega_{пв}) t \cdot A_1 \cos(\omega_{пв} t) = \\ = 1/2 A_1 V_1 [\cos(\omega_{зв}) t + \cos(2\omega_{пв} + \omega_{зв})]. \end{aligned} \quad (2)$$

Принимая в качестве несущей частоты частоту колебаний лопасти ПВ, возбуждаемой 2-ой гармоникой окружной неравномерности на входе, в результате модулирующего воздействия на эти колебания первой гармоники вращающейся неравномерности имеем

$$\begin{aligned} V_1 \cos(\omega_{зв} + \omega_{пв}) t \cdot A_2 \cos(2\omega_{пв} t) = \\ = 1/2 A_2 V_1 [\cos(\omega_{зв} - \omega_{пв}) t + \cos(3\omega_{пв} + \omega_{зв})]. \end{aligned} \quad (3)$$

Анализируя соотношения вида (2) и (3), не трудно показать, что взаимодействие колебаний лопастей ПВ с вращающейся неравномерностью для любых сочетаний гармоник на входе в двигатель и вращающейся неравномерности за ПВ, вносимой вращающимися в противоположные стороны колесами ПВ и ЗВ, не приводит к возникновению составляющей ПВ+ЗВ. В то же время схема генерации комбинационных колебаний согласно (4) может быть источником составляющей ЗВ-ПВ, а при взаимодействии более высоких гармоник возможны также комбинационных колебаний более сложной структуры с частотами $k\omega_{пв} + n\omega_{зв}$, где k и n целые числа, включая 0.

Примечательно, что следы составляющих колебаний с комбинационными частотами подобной

структуры присутствовали в спектрах колебаний лопастей ПВ практически во всей обследованной зоне рассогласования частот вращения колес ВВ.

В заключение рассмотрим кинематическую версию возбуждения составляющей колебаний лопастей ПВ+ЗВ. Известно, что комбинационные гармоники колебаний роторов турбомашин, валы которых связаны межвальными подшипниками – один из диагностических признаков отклонений в соосности этих валов. При этом реализуется механизм амплитудной модуляции, и в спектрах вибрации, замеренной на статоре присутствуют составляющие с частотами как суммы, так и разности частот вращения роторов. Если допустить возможность кинематического возбуждения комбинационной составляющей ПВ+ЗВ в лопастях винтовентилятора, их возникновение может быть объяснено, как результат вибрационного воздействия на них с частотой $f_{зв} + f_{пв}$ со стороны вала ПВ.

Такая возможность не противоречит особенностями конструкции узла ВВ. В самом деле, конструктивно биротативный винтовентилятор рассматриваемого ТВВД представляет из себя консольный узел, содержащий в себе дифференциальный редуктор и два консольных вала рабочих колес винтовентилятора. Передний вал ВВ вращается внутри заднего, а их взаимная центровка и опора обеспечивается шариковым и роликовым межвальными подшипниками. Так как вал (цапфа) ЗВ служит опорой для ПВ, любое отклонение от идеальной оси цапфы ЗВ приведет к взаимодействию в радиальном направлении этой цапфы с валом ПВ и, как следствие, к амплитудной модуляции колебательного процесса, вызываемого вращением одного из валов, подобным процессом, генерируемым вращением другого вала.

Для первой гармоники колебаний указанное взаимодействие описывается соотношением

$$\begin{aligned} A_m \cos 2\pi f_m t \cdot A_n \cos 2\pi f_n t = \\ = 1/2 A_n A_m [\cos 2\pi(f_n - f_m)t + \cos 2\pi(f_n + f_m)t], \end{aligned} \quad (4)$$

где A_n A_m – амплитудные значения роторных вибраций соответственно для колес-носителей несущей f_n и модулирующей f_m частот колебаний.

Источниками вибраций, как колеса ПВ, так и вибрационного модулирующего взаимодействия цапфы ЗВ и вала ПВ, в рассматриваемой модели генерации комбинационных колебаний служат динамически неуравновешенные силы суммарных (массовых и аэродинамических) дисбалансов заднего и переднего колес ВВ соответственно.

На рис. 7 приведены спектры тензосигналов, замеренных в пере и комле лопасти ПВ, а также в вале ПВ, полученные для представительного временного интервала при нештатной раскрутке ЗВ для достаточно редких случаев, когда в спектрах тензо-

сигналов всех обследованных элементов ПВ одновременно присутствовали составляющие ПВ + ЗВ и ЗВ – ПВ.

Как можно видеть из рассмотрения спектров на рис. 7, для всех обследованных элементов ПВ (на валу, в комле и пере лопасти) реализуется один и тот же механизм амплитудной модуляции, соответствующий кинематическому взаимодействию роторов ПВ и ЗВ через межвальный подшипник (4).

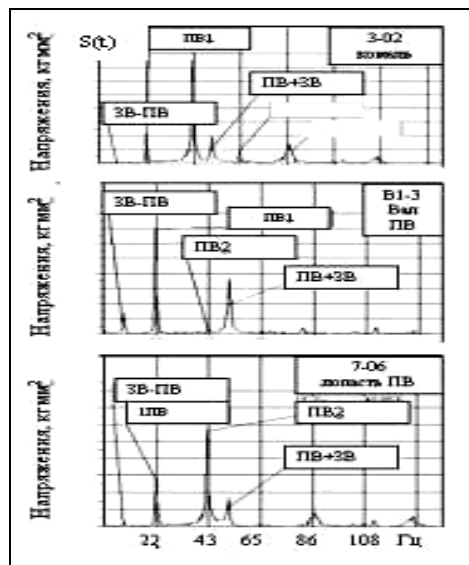


Рис. 7. Иллюстрация одновременного проявления составляющих ПВ+ЗВ и ЗВ-ПВ в спектрах тензосигналов элементов переднего ВВ: $N_{нд} = 76\%$, $N_{вд} = 84\%$, $N_{пв} = 75\%$, $N_{зв} = 102\%$

В самом деле, носителем несущей частоты выступает заднее более нагруженное колесо винтовентилятора $F_{н} = f_{зв}$, а частоты составляющих ЗВ-ПВ и ЗВ+ПВ суть модуляционные частоты $F_{мод} = (f_{зв} \pm f_{пв})$. Отсутствие же, либо малый уровень в спектрах тензосигнала составляющей с разностной частотой роторных колебаний ЗВ и ПВ на лопастях ПВ вполне можно отнести за счет особенности их АЧХ. Значения величины $f_{зв} - f_{пв}$ в эксперименте существенно дальше от собственной частоты лопасти 38 Гц, чем значения величины $f_{зв} + f_{пв}$.

Таким образом, наряду с аэродинамическим механизмом возбуждения составляющей колебаний лопастей ПВ с частотой $f_{зв} + f_{пв}$, правомерно допустить и кинематическое возбуждение лопастей на указанной частоте.

Результаты вибрографирования двигателя не вполне согласуются с таким объяснением. В спектрах вибрации, замеренных в штатных и экспериментальных местах их замера, составляющей ПВ+ЗВ не обнаружено, а составляющая ЗВ-ПВ иногда наблюдалась только в плоскости передней опоры двигателя.

Не дает однозначного ответа на вопрос о при-

роде возбуждения в лопасти ПВ составляющей ПВ+ЗВ и сопоставление протекания амплитудных значений этой составляющей, рассчитанных для лопасти и вала ПВ на режиме «раскрутки». Хотя необходимое условие кинематического возбуждения лопастей и выполнено: в течение всей раскрутки интенсивность составляющей ПВ+ЗВ для вала одна из доминирующих в спектре, ее интенсивность, тем не менее, слабо коррелирована с интенсивностью указанной структурной составляющей, полученной на лопасти.

Несмотря на вышеуказанные невязки, требующие для своего объяснения дополнительных исследований, в целом результаты проведенного анализа позволяют допустить как аэродинамическую, так и кинематическую природу возникновения колебаний лопастей ПВ с частотой $f_{пв} + f_{зв}$.

Представляется существенным, что составляющие комбинационных колебаний лопастей ВВ во всех проверенных случаях соответствовали не расчетному рассогласованию частот вращения ПВ и ЗВ, не вызывая неприемлемого суммарного уровня переменных напряжений и вибраций для всех мест замера на двигателе.

Заключение

1. Обнаруженные в натурном эксперименте комбинационные колебания лопастей переднего колеса биротативного винтовентилятора в капоте с частотой равной сумме частот вращения ПВ и ЗВ наблюдаются в широком диапазоне рассогласования частот вращения и имеют максимальную интенсивность в узкой зоне умеренного рассогласования.

2. Проведенный анализ располагаемых экспериментальных данных позволяет допустить как аэродинамическую природу возникновения колебаний лопастей ПВ с частотой $f_{пв} + f_{зв}$ в результате воздействия на лопасти ПВ вращающейся неравномерности потока, созданной лопастями ЗВ, так и их кинематическое возбуждение, обусловленное взаимодействием разно вращающихся колес винтовентилятора через межвальный подшипник.

3. Выявленные особенности проявления комбинационных колебаний биротативных винтовентиляторов ТВВД нового поколения необходимо учитывать, как при испытаниях этих двигателей, так и при назначении норм на частоты рассогласования роторов ПВ и ЗВ.

Литература

1. Коровин Б.Б. Оценка нагружения элементов конструкции ГТД в условия полета. В кн. Летные испытания газотурбинных двигателей / Б.Б. Коровин

вин; под ред. Г.П. Долголенко. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 83-91.

2. Результаты наземных и летных испытаний на летающей лаборатории Ил-76 № 807 опытной силовой установки с двигателем Д-27 в обеспечение первого вылета и начала ЛКИ самолета Ан-70 / Н.Н. Швалев, В.В. Червонюк, В.И. Пипекин, О.Н. Былинкина и др. // Научно-технический отчет ЛИИ №347-94-III. – 1994. – 188 с.

3. Иванов В.П. Колебания рабочих колес турбомашин / В.П. Иванов. – М.: Машиностроение, 1983. – 420 с.

4. Динамика авиационных двигателей / Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. – М.: Машино-

строение, 1981. – 480 с.

5. Результаты наземных и летных испытаний опытного двигателя НК-93 на летающей лаборатории Ил-76 №3908 / В.И. Бычков, Б.Б. Коровин, Н.А. Данковцев, О.Н. Былинкина и др. // Научно-технический отчет ЛИИ №189-08-III. – 2008. – 214 с.

6. Былинкина О.Н. Программно-аппаратный комплекс для летно-прочностных испытаний авиационных ГТД нового поколения / О.Н. Былинкина, Б.Б. Коровин, А.А. Стасевич // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 9/25. – С. 37-41.

Поступила в редакцию 28.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук М.Е. Колотников, заместитель Генерального конструктора, ФГУП «ММП «Салют», Москва, Россия.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНАЦІЙНИХ КОЛИВАНЬ ЛОПАТЕЙ БІРОТАТИВНОГО ГВИНТОВЕНТИЛЯТОРА РЕДУКТОРНОГО ТВВД

Б.Б. Коровін, О.Н. Былінкіна, А.А. Стасевич

Досліджено умови прояви комбінаційних коливань лопатей переднього колеса біротативного гвинтовентилятора з різнообертаячими колесами в капоті, виявлених при випробовуваннях опитного ТВВД редукторної схеми на льотній лабораторії. Показано, що указані коливання з частотою, яка дорівнює сумі частот обертання коліс гвинтовентилятора, виникають при розгодженні їх частот обертання. Обговорено можливі механізми генерації розглянутих коливань: кінематичний як результат взаємодії неврівноважених сил динамічно незбалансованих коліс супротивного обертання, існуючого через м'ягквальні підшипники гвинтовентилятора, та аеродинамічні. Останні базуються на дії на лопаті переднього колеса гвинтовентилятора обертаючої нерівномірності, створеної заднім колесом.

Ключові слова: турбогвинтовентиляторний двигун, гвинтовентилятор в капоті, лопаті, редуктор, комбінаційні коливання, вібронаватаження, спектр, гармоніка, амплітудна модуляція.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF BLADE COMBINATIVE ESCILLATIONS OF BIROTARY PROPFAN TURBOPROP ENGINE

B.B. Korovin, O.N. Bylinkina, A.A. Stasevich

The conditions of forward disk blades combinative oscillations generation for shrouded birotary propfan with the propellers rotated in opposite directions, found during prototype geared propfan engine tests on flying test bed was investigated. It was shown that mentioned oscillations with the frequency corresponding to the sum of propfan propeller disk speeds were generated in a case of unbalancing of their speeds. The different mechanisms of possible oscillation generation were discussed: cinematic as result of unbalanced forces interaction of dynamically unbalanced wheels of opposite direction rotation realized through propfan intershaft bearings and aerodynamic. The last ones are based on the influence upon forward wheel blades the rotating air irregularity made by the back propfan wheel.

Key words: bypass geared propfan, shrouded birotary propfan, , blades, combinative oscillations, geare, vibration, dynamic loading, spectra, exciting harmonic, amplitude modulation.

Коровин Борис Борисович – д-р техн. наук, начальник лаборатории в КНИО-3 ФГУП Летно-исследовательского института им. М.М. Громова, Жуковский, Россия, e-mail: flysим-lii @ mtu-net.ru.

Былинкина Ольга Николаевна – начальник сектора в КНИО-3 ФГУП Летно-исследовательского института им. М.М. Громова, Жуковский, Россия, e-mail: flysим-lii @ mtu-net.ru.

Стасевич Аркадий Анатольевич – ведущий инженер в КНИО-3 ФГУП Летно-исследовательского института им. М.М. Громова, Жуковский, Россия, e-mail: flysим-lii @ mtu-net.ru.