

ВИБРОАКТИВНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ БИРОТАТИВНОГО ВИНТОВЕНТИЛЯТОРА ТВВД СВЕРХБОЛЬШОЙ СТЕПЕНИ ДВУХКОНТУРНОСТИ ПРИ НЕРАСЧЕТНОЙ РАСКРУТКЕ ЗАДНЕГО ВИНТА

ОАО "Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова":
Борис Борисович Коровин, начальник лаборатории НИО-3, д.т.н.
Ольга Николаевна Былинкина, начальник сектора

Проанализированы особенности изменения составляющих колебаний элементов переднего колеса биротативного винтовентилятора с разновращающимися колесами в капоте при нерасчетном рассогласовании их частот вращения; обсуждены возможные механизмы генерации рассматриваемых колебаний и кратковременного повышения вибраций двигателя на переходных режимах его работы; показана приемлемость вибронегруженности всех обследованных элементов винтовентилятора в проверенной области рассогласования частот вращения его колес при работе в составе демонстрационного редукторного ТВВД сверхбольшей степени двухконтурности; выявлены области кинематического и аэродинамического возбуждения лопастей переднего винтовентилятора на указанных нерасчетных режимах.
The peculiarity of vibration components changing for the head wheel elements of shrouded birotary propfan was researched while propeller discs speed disorder occur; probable vibration generation mechanisms as well as a short engine vibration growth at unsteady engine mode are discussed; acceptability of vibration load for all inspected propfan elements under examined field of propeller discs speed disorder was shown while running as a part of developed high-bypass turbofan; engine mode areas for a head wheel fan vibration generation have been exposed as result of cinematic and aerodynamic effect.

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

Key word: high-bypass turbofan, shrouded propfan, fan, blades, fan gearing, combinative oscillation, dynamic loading, spectrum, harmonic, amplitude modulation.

Биротативный винтовентилятор в капоте для большеразмерных (тягой 18...20 т с миделем 3 м) ТВВД редукторной схемы представляет собой сложную динамическую систему. Кинематическая схема двигателя позволяет достаточно большое рассогласование частот вращения разновращающихся колес винтовентилятора. Учитывая большой диаметр винтовентилятора (ВВ), наличие регулируемых поворотных лопастей и высоконагруженного дифференциального редуктора, динамические эффекты, возникающие при таком рассогласовании должны быть хорошо изучены. Частично указанная задача была уже рассмотрена в работе [1], в которой авторами проанализированы комбинационные колебания лопастей переднего колеса винтовентилятора с частотой, равной сумме частот вращения переднего (ПВ) и заднего (ЗВ) колес винтовентилятора. В работе, в частности, было показано, что преобладающим фактором возбуждения таких колебаний является окружная неравномерность, вносимая задним винтом. При этом не исключалась и возможность кинематического возбуждения комбинационных колебаний лопастей ПВ на некоторых режимах за счет модуляционного взаимодействия роторных вибраций, вызываемых дисбалансами ПВ и ЗВ, осуществляемого через межвальные подшипники узла винтовентилятора.

Цель настоящей работы - уточнение природы возбуждения всех значимых составляющих колебаний обследуемых элементов переднего колеса биротативного винтовентилятора и виброактивности узла ВВ в процессе нерасчетной раскрутки его заднего винта.



Рис. 1. Горизонтальный разрез винтовентилятора

Исследования базируются на материалах тензометрирования и вибрографирования полноразмерного демонстрационного двигателя на летающей лаборатории ЛИИ им. М.М. Громова [2].

При анализе материалов тензометрирования использовались замеры переменных напряжений, выполненные с помощью ограниченного числа тензодатчиков, наклеенных в 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.х}, V_{ред.у}) и по оси Y на передней опоре (V_{по.у}). При идентификации источников колебаний использовались методы спектрального анализа вибропроцессов с разрешением 1 Гц, цифровая фильтрация их узкополосных составляющих с разрешением 3 Гц, корреляционный анализ результатов обработки, диаграмма Кемпбелла и математические модели возбуждения колебаний в турбомашине [1, 3].

Анализ выполнялся с помощью разработанного в ЛИИ программно-аппаратного комплекса, предусматривающего цифровую обработку объединенных баз данных о высокочастотной и сопровождающей низкочастотной информации при высокой степени автоматизации вторичной обработки вибропроцессов [4].

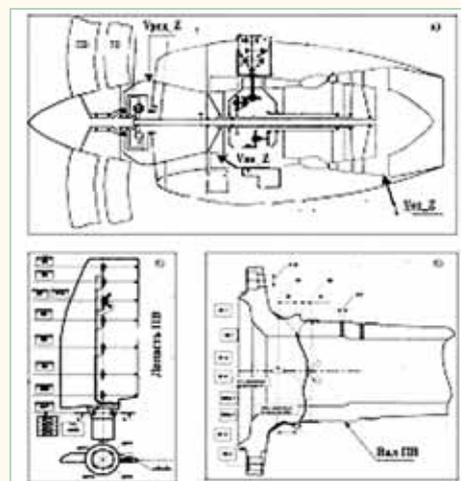


Рис. 2. Схема препарирования двигателя тензо- и вибродатчиками

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 6,2 об/мин (0,1 Гц).

Предметом настоящих исследований являются колебания винтовентилятора, возникающие при нерасчетной раскрутке заднего винта ($N_{зв} > N_{пв}$). Указанные колебания наблюдались на режиме малого газа (МГ) и в процессе перехода на режим 0,4 максимального полетного (0,4 МП) при величине рассогласования частот вращения переднего (ПВ) и заднего (ЗВ) колес ВВ в диапазоне 10...690 об/мин (0,16...11,5 Гц).

В спектрах вибропроцессов всех обследованных элементов переднего колеса винтовентилятора в процессе раскрутки заднего винта присутствовали составляющие колебаний с роторными частотами ПВ и ЗВ, с комбинационными частотами, равными сумме и разности роторных частот (условимся обозначать их ПВ+ЗВ и ЗВ-ПВ) а также с удвоенной роторной частотой 2ПВ.

Здесь и далее по тексту аббревиатура ПВ и ЗВ означает источник колебаний, а цифры (либо их отсутствие) - целочисленную кратность частоты соответствующих составляющих колебаний. Например, 1ПВ (ПВ) означает составляющую колебаний с частотой вращения переднего колеса ВВ, 2ПВ - составляющую с частотой второй кратности к роторной частоте ПВ, а 1ПВ+1ЗВ (ПВ+ЗВ) - составляющую с частотой, равной сумме частот вращения колес переднего и заднего ВВ.

Сложность идентификации вышеуказанных колебаний, заключается в том, что их одноименные составляющие могут иметь как аэродинамическую, так и кинематическую природу, каждая из которых допускает взаимное модулирующее воздействие [1].

При дефиците замеров в эксперименте (отсутствие данных о переменных напряжениях в элементах ЗВ, нет замера полей неравномерности за венцом ПВ) попробуем уточнить наши представления о природе колебаний анализом взаимного протекания различных составляющих этих колебаний в процессе раскрутки ЗВ.

Как можно видеть из рассмотрения рис. 3,d, максимальная виброн нагруженность (не более 1,0 кг/мм²) для составляющей первой роторной гармоники ПВ отмечена в вале. Виброн нагруженность комля и пера лопасти, как правило, существенно ниже, чем в вале, за исключением двух узких зон 1 и 2, соответствующих главным локальным минимумам нагружения в вале которое оказывается близким к локальным максимумам в лопасти и комле ПВ.

Первая из этих зон соответствует существенному рассогласованию частот вращения колес вблизи максимума этого рассогласования для его первого "всплеска", а вторая - окончанию более протяженного, второго "всплеска" при одной и той же величине рассогласования (20% от диапазона изменения $N_{зв}$). Максимальные переменные напряжения в вале и лопасти при этом не превышали величины 0,5 кг/мм².

Примечательно, что еще один максимум нагруженности комля и лопасти при одновременном главном максимуме нагружения в вале, составляющим 1 кг/мм², соответствовал такой же величине рассогласования частот вращения ПВ и ЗВ.

Рис. 3,c иллюстрирует виброн нагруженность элементов ПВ, вызываемую дисбалансом заднего винта. Роторные колебания ЗВ передаются на элементы ПВ через вал ПВ, который вращается внутри заднего, обеспечивая их взаимную центровку и опору с помощью шарикового и роликового межвальных подшипников.

На начальном этапе раскрутки (зона "Н", $N_{зв} = 60...95\%$) эта нагруженность на частоте вращения ЗВ близка к нагруженности, вызываемой первой роторной гармоникой ПВ в той же зоне (рис. 3,d). Правее первого "всплеска" рассогласования прямое влияние дисбаланса ЗВ на динамическое нагружение ПВ значительно слабее. Оно проявляется в наличии нескольких локальных максимумов для вала и небольшой зоны "а", характеризующейся одновременным локальным максимумом для вала, лопасти и комля в конце второго "всплеска" рассогласования при максимальной виброн нагруженности не более 0,7 кг/мм² для вала и 0,4 кг/мм² для комля и лопасти и наличии достаточно протяженных зон с существенным рассогласованием частот вращения ПВ и ЗВ, в которых виброн нагруженность с частотой ЗВ на элементы ПВ практически не передается.

Совместное рассмотрение рисунков 3,b и 3,a, на которых представлены протекание по времени интенсивности комбинационных составляющих ПВ+ЗВ и ЗВ-ПВ для вала, лопасти и комля ПВ в процессе раскрутки заднего винта, позволяет идентифицировать природу этих колебаний на различных стадиях раскрутки.

В частности, превалирование нагруженности вала в течение обоих "всплесков" рассогласования для ПВ+ЗВ и ЗВ-ПВ позволяет объяснить происхождение этих колебаний за счет кинематического взаимодействия роторов ПВ и ЗВ через межвальные подшипники по схеме амплитудной модуляции [1], где в качестве носителя несущей частоты выступает более нагруженный задний винт

$$A_{пв} \cos 2 f_{пв} t \cdot A_{зв} \cos 2 A_{зв} t = 1/2 A_{зв} A_{пв} [\cos 2(f_{зв} - f_{пв})t + \cos 2(f_{зв} + f_{пв})t]. \quad (1)$$

Здесь $A_{зв}$ и $A_{пв}$ - амплитудные значения роторных вибраций соответственно для колес-носителей несущей частоты $f_{зв}$ и модулирующей $f_{пв}$ частот колебаний.

Именно этому соотношению удовлетворяют соответствующие частоты составляющих спектров, рассчитанных для переменных тензосигналов, на временных интервалах рис 3,b и 3,a, где виброн нагруженность вала превалирует (рис. 5).

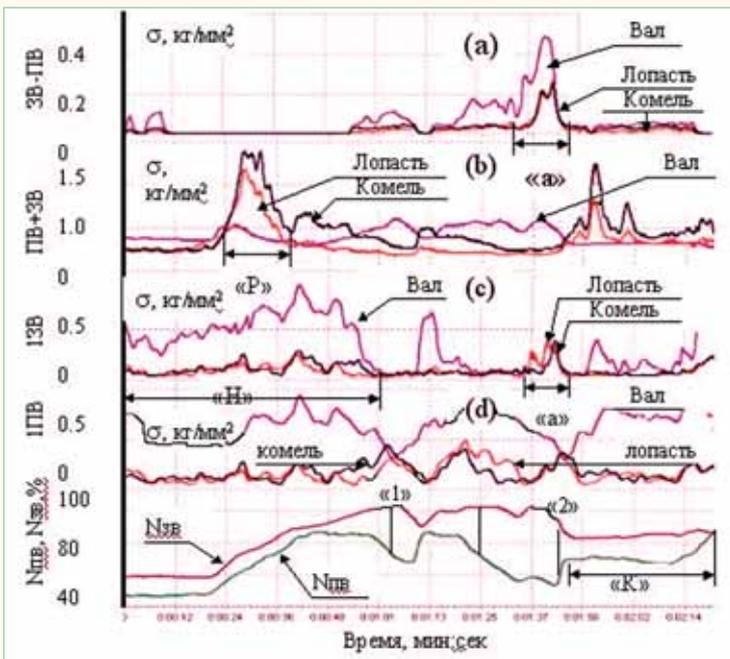


Рис. 3. Изменение по времени интенсивности составляющих ПВ, ЗВ, ПВ+ЗВ, ЗВ-ПВ для вала, комля и лопасти ПВ, а также частот вращения рабочих колес ПВ и ЗВ при раскрутке заднего винта

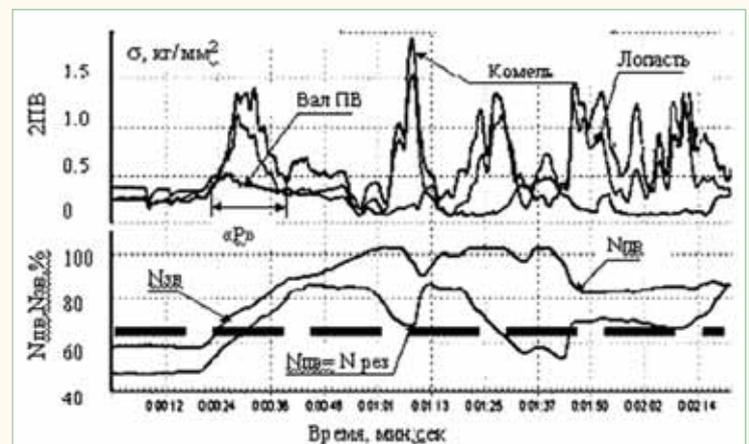


Рис. 4. Изменение по времени интенсивности составляющей 2ПВ для вала, комля и лопасти ПВ, а также частот вращения рабочих колес ПВ и ЗВ при раскрутке заднего винта

Выраженные максимумы вибронгруженности в комле и лопасти для ПВ+ЗВ при практически постоянных и малых уровнях нагружения вала в начале раскрутки (зона "Н") и после второго "всплеска" рассогласования (зона "К") очевидно имеют аэродинамическую природу. С большой вероятностью их можно отнести к вибрационному отклику на аэродинамическое воздействие вращающейся неравномерности параметров потока, создаваемой вращением заднего колеса ВВ [1]. При этом составляющая ЗВ-ПВ, как можно видеть из рассмотрения рис. 3,а, отсутствует.

Следует отметить значимый уровень составляющей переменных напряжений ПВ+ЗВ (до 1,9 и 1,75 кг/мм² для комля; 1,7 и 1,3 кг/мм² для лопасти соответственно в зоне "Р" и "К") при аэродинамическом возбуждении и существенно меньший уровень (не более 1,0 и 0,25 кг/мм² для комля и лопасти) при кинематическом. Переменные напряжения составляющей ЗВ-ПВ не превышали 0,6 кг/мм² для вала и 0,25 кг/мм² для комля и лопасти.

Как можно видеть из рассмотрения рис. 4, составляющая 2ПВ наиболее значима (до 1,9 и 1,55 кг/мм² в комле и лопасти на режимах, соответствующих резонансу второй гармоники возбуждения. Обращает на себя внимание полное совпадение протекания интенсивности 2ПВ и ПВ+ЗВ (рис. 3,б и 4) в зоне "Р", что свидетельствует о совпадении частот составляющих 2ПВ и ПВ+ЗВ для комля и пера лопасти на режиме резонанса при $N_{пв} = N_{рез}$, а, следовательно, и о возможном векторном сложении указанных составляющих [1].

Из рис. 6 видно, в частности, совпадение интенсивности составляющих 2ПВ и ПВ+ЗВ и высокая корреляция суммарного тензосигнала с указанными составляющими при проходе через резонанс лопасти, вызываемой второй гармоникой возбуждения, в процессе перехода с режима МГ на 0,4 МП, сопровождавшемся раскруткой ЗВ.

Рассмотрим проявление виброактивности ВВ на статоре двигателя при нерасчетной раскрутке заднего винта. Особенности этого проявления иллюстрируется на рис. 7.

Видно, что максимальные вибрации отмечены для составляющих ПВ и ЗВ в зоне "Р", в которой наблюдаются максимальные переменные напряжения в комле и лопасти ПВ для составляющих 2ПВ и ПВ+ЗВ при совпадении их частот на режиме резонанса лопастей ПВ, вызываемого второй гармоникой возбуждения (рис. 3 и 4). Похожее протекание уровня роторных вибраций ПВ и ЗВ, практически с таким же максимальным забросом, отмечалось и при штатном переходе с режима МГ на 0,4 МП (рис. 8,а).

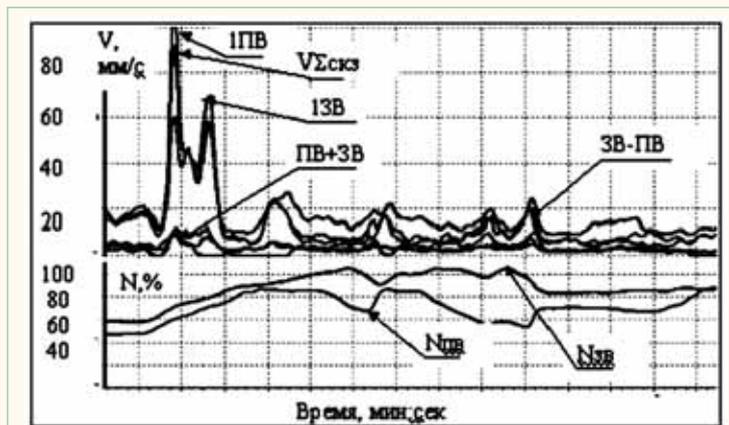


Рис. 7. Иллюстрация роли составляющих 1ПВ, 1ЗВ, 2ПВ, ЗВ-ПВ и ПВ+ЗВ в виброактивности винтовентилятора по замеру $V_{ред} Z_{шт}$ при раскрутке заднего винта

Повышенные вибрации на этом режиме нельзя объяснить реакцией роторной системы на загрузку винтов. При штатной работе затяжеление обоих винтов в соответствии с программой регулирования происходило в эксперименте после спада вибраций, а в случае раскрутки заднего винта указанное затяжеление имело место только для переднего винта, но также уже после спада вибраций.

Доминирование составляющих вибрации ПВ и ЗВ на указанных режимах отмечены только по оси Z при полном отсутствии подобного доминирования вибраций по осям Y и X (рис. 8,б). Поэтому повышенную виброактивность двигателя по оси Z можно отнести за счет резонансных колебаний двигателя относительно его узлов подвески в указанном направлении, как твердого тела.

Указанное явление проявлялось при всех проходах частот вращения ПВ и ЗВ в диапазоне $N_{физ} = 58,8...69\%$ (16,8...19,8 Гц) при прямой зависимости интенсивности вибраций от темпа изменения оборотов (чем больше темп, тем меньше вибрации) и небольшим смещении максимума вибраций при этом.

Максимум суммарных вибраций с небольшим превышением нормируемых значений по СКЗ в роторной полосе частот на режиме перехода от МГ к 0,4 МП, кратковременно отмечался, как при штатной работе программы регулирования, так и в условиях небольшого 68...69% (19,7...20 Гц) нерасчетного рассогласования частот вращения ПВ и ЗВ. Сказанное иллюстрируется на рис. 7 и 8,а). Из их рассмотрения также видно, что все другие составляющие вибраций, включая и комбинационные, существенно меньше, чем составляющие ПВ и ЗВ. При этом в отличие от роторных деталей ВВ составляющая ЗВ-ПВ на статоре оказалась большей, чем ПВ+ЗВ, и отмечалась не только в зонах максимальных "всплесков" рассогласования, но и в зоне "Р". Максимальный уровень комбинационной составляющей ЗВ-ПВ не превышал величины 20 мм/с в зоне "а", которая оказалась чуть ниже уровня составляющей ПВ на этом режиме (рис. 7).

Обращает на себя внимание высокая корреляция между уровнями составляющих ПВ, ЗВ, ЗВ-ПВ и ПВ+ЗВ для вибросигнала на статоре двигателя при раскрутке ЗВ, что косвенно свидетельствует о кинематической природе возникновения комбинационных колебаний.

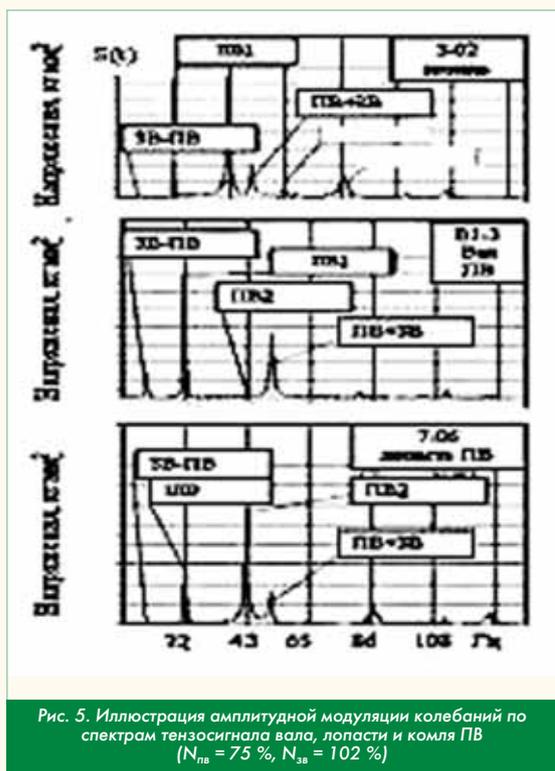


Рис. 5. Иллюстрация амплитудной модуляции колебаний по спектру тензосигнала вала, лопасти и комля ПВ ($N_{пв} = 75\%$, $N_{3в} = 102\%$)

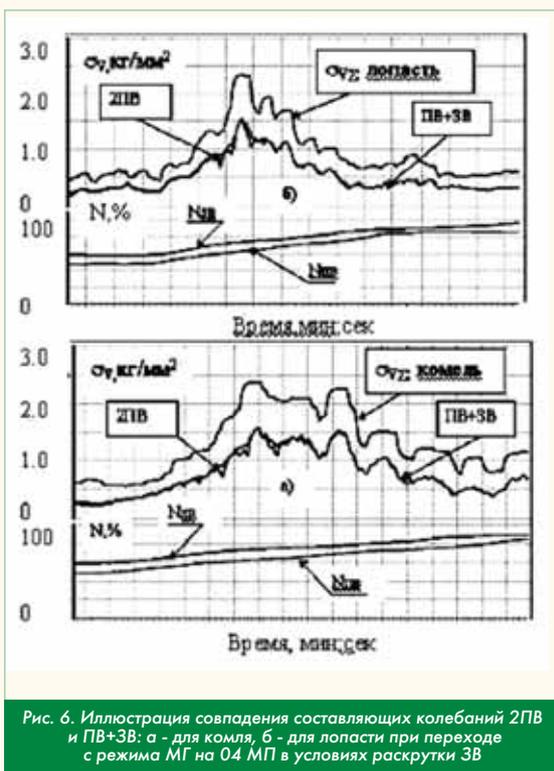


Рис. 6. Иллюстрация совпадения составляющих колебаний 2ПВ и ПВ+ЗВ: а - для комля, б - для лопасти при переходе с режима МГ на 0,4 МП в условиях раскрутки ЗВ

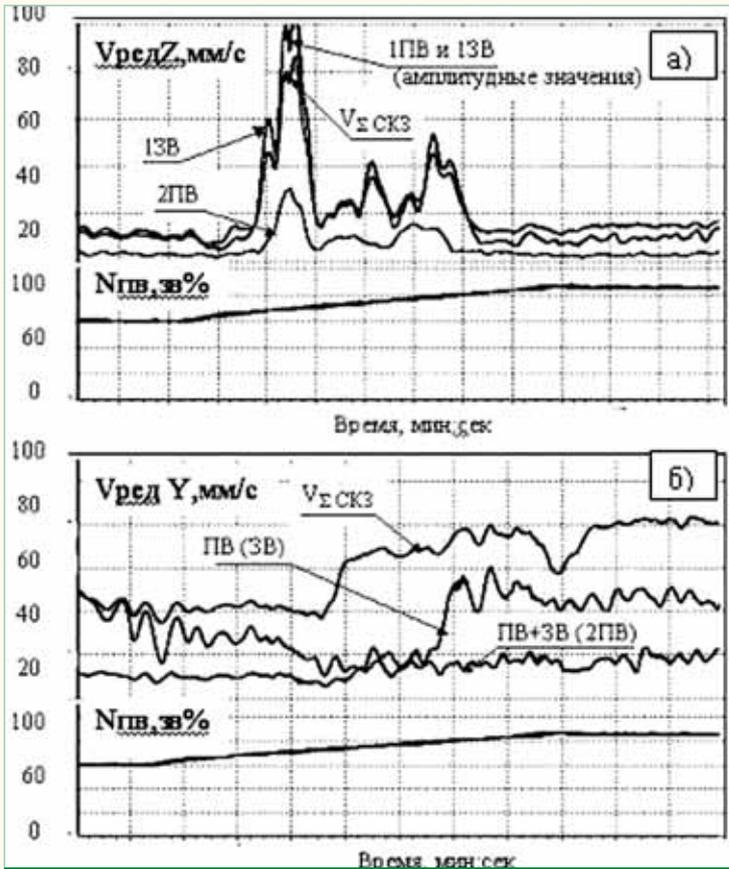


Рис. 8. Виброактивность винтовентилятора по штатному $V_{ред Z_{шт}}$ (а) и экспериментальному $V_{ред Y}$ (б) замерам при штатном переходе с режима МГ на 0,4 МП

Представляется существенным, что все значимые составляющие колебаний обследованных элементов ротора и статора, включая комбинационные составляющие ПВ+ЗВ и ЗВ-ПВ, при нерасчетном рассогласовании частот вращения ПВ и ЗВ в процессе рас-

рутки заднего винта не приводили к неприемлемому суммарному уровню переменных напряжений и вибраций для всех мест их замера на двигателе.

В виброактивности роторных элементов винтовентилятора обследованного ТВВД основную роль играет аэродинамика. Комбинационные составляющие ПВ+ЗВ и ЗВ-ПВ кинематической природы пренебрежимо малы и наблюдаются при максимальных нерасчетных рассогласованиях частот вращения разновращающихся колес ВВ.

Максимальные вибрации двигателя связаны с его колебаниями как твердого тела. Они кратковременно наблюдаются при переходах с режима МГ на 0,4 МП и обратно, слегка превышая нормируемые значения как в штатной ситуации, так и в случае нерасчетного рассогласования частот вращения переднего и заднего колес ВВ.

Полученные результаты свидетельствуют об удачности конструкторских решений в части обеспечения вибрационной надежности обследованного демонстрационного редукторного ТВВД большой размерности и сверхбольшой степени двухконтурности с закапотированным биротативным винтовентилятором.

Литература

1. Коровин Б.Б., Былинкина О.Н., Стасевич А.А. Экспериментальные исследования комбинационных колебаний лопастей биротативного винтовентилятора. // *Авиационно-космическая техника и технология*.-2009.-№8/65.-С.62-68.
2. Бычков В.И., Коровин Б.Б., Данковцев Н.А., Былинкина О.Н., Стасевич А.А. и др. Результаты наземных и летных испытаний опытного двигателя НК-93 на летающей лаборатории Ил-76 №3908 // *Научно-технический отчет ЛИИ №189-08-III*.-2008.-214 с.
3. Динамика авиационных двигателей./ Под ред. Биргера И.А. и Шорра Б.Ф., М., Машиностроение, 1981.-480с.
4. Былинкина О.Н., Коровин Б.Б., Стасевич А.А. Программно-аппаратный комплекс для летно-прочностных испытаний авиационных ГТД нового поколения. // *Авиационно-космическая техника и технология*.-2005.-№9/25.-С.

Связь с автором: kulakov-ii@mtu-net.ru

ИНФОРМАЦИЯ

"АВИАДВИГАТЕЛЬ" НАРАЩИВАЕТ ЭНЕРГОМОЩНОСТИ ПЕРМСКОГО "ЛУКОЙЛА"

ОАО "Авиадвигатель" и ООО "ЛУКОЙЛ-Энергоинжиниринг" заключили договор о поставке восьми блочных газотурбинных электростанций суммарной мощностью 200 МВт для нужд ООО "ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез". Построив собственную энергогенерацию, пермский нефтеперерабатывающий завод "ЛУКОЙЛа" сможет обеспечить потребности в электроэнергии и тепле своего расширяющегося производства.

В рамках заключенного договора пермские моторостроители обязуются до конца 2013 года поставить ООО "ЛУКОЙЛ-Энергоинжиниринг" восемь ПТЭС-25ПА единичной мощностью 25 МВт. Поставки электростанций будут производиться в два этапа: первые четыре комплекта оборудования - в июле 2013 года, вторая очередь оборудования поступит заказчику в ноябре того же года.

Восемь ПТЭС-25ПА будут скомпонованы по две и расположены в четырех каркасно-панельных зданиях. Подобная схема размещения оборудования неоднократно успешно использована пермяками на объектах ООО "ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь".

Компоновочные решения, идеология строительства газотурбинных электростанций ОАО "Авиадвигатель", разработанные совместно со специалистами "ЛУКОЙЛа", прошли проверку временем на месторождениях Западной Сибири.

В активе "Авиадвигателя" уже есть реализованный проект газотурбинной электростанции мощностью 25 МВт в составе Уфимской ТЭЦ № 1. Энергогенерация "ЛУКОЙЛ-Энергоинжиниринг" имеет некоторые отличия:

- впервые в практике создания энергетического оборудования специалисты "Авиадвигателя" включили в состав ПТЭС-25ПА двигатель ПС-90ГП-25 с газогенератором двигателя ПС-90А2. Это позволит увеличить мощность электростанции с 22,5 МВт до 25 МВт;

- по желанию заказчика электростанция оснащена генератором фирмы Siemens и редуктором фирмы Voith;

- ПТЭС-25ПА будут работать на сухом отбензинном газе (продукте переработки попутного нефтяного газа) в когенерационном цикле. Выработанное станциями тепло и электричество предполагается исполь-

зовать для нужд предприятия.

Каждая ПТЭС-25ПА оснащена системами автоматического управления и контроля, обеспечивающими централизованное управление на всех этапах эксплуатации одним оператором. Конструктивно ПТЭС-25ПА изготовлены из отдельных блоков-модулей контейнерного типа полной заводской готовности, которые собираются на месте эксплуатации без разборки для ревизии. Это соответствует требованиям времени и является одним из современных технических решений конструкции газотурбинных электростанций разработки ОАО "Авиадвигатель".



Уфимская ТЭЦ №1, на которой установлена газотурбинная электростанция ПТЭС-25П разработки и производства ОАО «Авиадвигатель»