

УДК 629.7.036.3

В.С. ЧИГРИН, А.М. ШОДЖАИ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИСБАЛАНСА РОТОРА ГТД

Работа газотурбинных двигателей всегда сопровождается вибрациями, основными источниками которых являются быстровращающиеся роторы. Дисбаланс вращающихся масс ротора является одним из самых распространенных дефектов ГТД. Для выявления дисбаланса ротора используется информация, получаемая бортовой ЭВМ от внутреннего встроенного датчика вибрации и датчика фазового положения ротора относительно статора двигателя. В статье приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования возможности определения величины и положения дисбаланса ротора по данным только одного штатного индукционного датчика частоты вращения. Показана принципиальная возможность определения дисбаланса и его положения на роторе ГТД без применения встроенного измерительного преобразователя вибрации, а только по сигналу с ДЧВ с использованием специального алгоритма обработки получаемой с него информации. ДЧВ в этом случае работает и в режиме счетчика импульсов, и в режиме проксиметра. Величина дисбаланса и его положение на роторе уверенно определяются на докритических частотах вращения ротора. Задача определения этих величин на закритических частотах вращения для «гибкого» ротора требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: дисбаланс ротора, индукционный датчик частоты вращения, критическая частота вращения ротора, проксиметр, быстрое преобразование Фурье.

Введение

Работа газотурбинных двигателей всегда сопровождается вибрациями. Основными источниками вибраций ГТД являются быстровращающиеся роторы. Причиной повышенной вибрации двигателя является дисбаланс ротора – увеличение неуравновешенности ротора турбокомпрессора (ТК) или свободной турбины.

Взаимодействие роторов в многовальных двигателях между собой и с упругой системой корпусов и подвески двигателей порождает многочисленные резонансные явления, при которых уровень вибраций резко возрастает, возникает упруго-динамическая неустойчивость всей системы двигателя, приводящая к различным дефектам.

После проведения некоторой систематизации и обобщения, все многообразие причин появления повышенных вибраций двигателя можно свести в несколько основных групп [1]:

- дефекты изготовления вращающегося ротора или его элементов на заводе, на ремонтном предприятии, недостаточный выходной контроль предприятия-изготовителя оборудования, удары при перевозке, плохие условия хранения;

- неправильная сборка ротора или подшипниковых опор при первичном монтаже или после ремонта;

- разрушение деталей ротора (разрушение или обрыв рабочих лопаток компрессора или турбины), наличие на вращающемся роторе изношенных, сломанных, дефектных, недостающих, недостаточно прочно закрепленных и т. д. деталей и узлов;

- резонансные колебания ротора из-за нарушения режима работы упруго-демпферных опор и изменения жесткости системы ротор-корпус (их внешнее проявление в спектре вибрации аналогично неуравновешенности ротора);

- несоосность ротора и корпуса в проточной части (в этом случае возрастает амплитуда роторной вибрации соответствующего ротора на частоте $f = n_c$);

- овальность корпуса компрессора, или турбины (в этом случае возрастает амплитуда роторной вибрации соответствующего ротора на частоте $f = 2 n_c$);

- результат воздействия параметров технологических процессов и особенностей эксплуатации данного двигателя, приводящих к неравномерному нагреву и искривлению роторов;

- нарушения работы зубчатых зацеплений в коробках приводов агрегатов двигателя;

- повышенный износ или разрушение подшипниковых узлов.

Постановка задачи

Дисбаланс вращающихся масс ротора является одним из самых распространенных дефектов ГТД. Его появление обычно приводит к резкому увеличению вибраций. Причины возникновения дисбаланса в ГТД могут иметь различную природу, являясь следствием многих особенностей конструкции и эксплуатации. В процессе проектирования двигателей проводятся специальные расчеты и экспериментальные исследования, чтобы заранее установить вероятность возникновения опасных вибраций и выявить их причины. При изготовлении и ремонте двигателей балансировка выполняется подбором и установкой специальных балансировочных грузиков.

Фирма Vibro-Meter (Швейцария), признанный всемирный лидер в анализе и измерении вибраций, устанавливает на двигателях самолетов A310/A330 и Boeing системы контроля вибрации, позволяющие выявлять во время полета дисбаланс ротора авиадвигателя и выполнять при подготовке самолета к следующему полету коррекцию балансировки вентилятора путем замены балансировочных грузиков (винтов) на коке вентилятора (рис. 1).

Для этого используется информация, получаемая бортовой ЭВМ от внутреннего встроенного датчика вибрации и датчика фазового положения ротора относительно статора двигателя. Бортовая ЭВМ рассчитывает уровень дисбаланса и формирует рекомендацию по замене балансировочного грузика в аэропорту после посадки самолета [3].

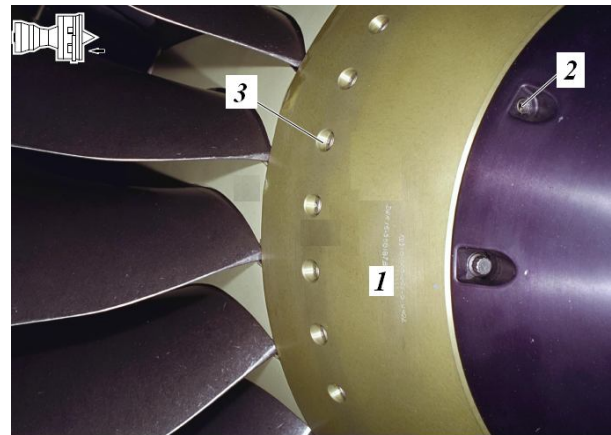


Рис. 1. Передний балансировочный пояс вентилятора ТРДД CFM-56 [2]:
1 – задняя часть кока вентилятора;
2 – винты крепления передней части кока;
3 – балансировочные винты

При отказе внутреннего датчика вибрации придется частично разобрать ГТД для его замены.

Нами экспериментально исследована возможность определения величины и положения дисбаланса ротора по данным только одного штатного индукционного датчика частоты вращения.

Индукционный датчик частоты вращения (ДЧВ) типа ДТА-10 (ДТА-15, VM-135, VM-151 и др.) – датчик генераторного типа, вырабатывающий электрический сигнал при прохождении зуба шестерни-индуктора около катушки, намотанной на магнитный сердечник (рис 2).



Рис. 2. Сигнал с одной обмотки ДЧВ ДТА-15

Определение дисбаланса ротора с помощью индукционного датчика частоты вращения

Для определения дисбаланса ротора по сигналам, полученным с ДЧВ, необходимо изменить ал-

горитм обработки сигнала таким образом, чтобы кроме частоты вращения ротора получить информацию о положении ротора относительно статора и расстоянии от датчика до кромки зуба шестерни-индуктора, которое изменяется при прогибе вала из-за вибрации ротора. ДЧВ в этом случае работает и в

режиме счетчика импульсов, и в режиме проксиметра. На рис. 3 приведен вариант установки на двигателе индукционного датчика частоты вращения и шестерни-индуктора. Для определения положения ротора относительно статора один из зубьев шестерни-индуктора выполняется короче остальных. Сигнал от него является началом отсчета положения ротора относительно датчика.

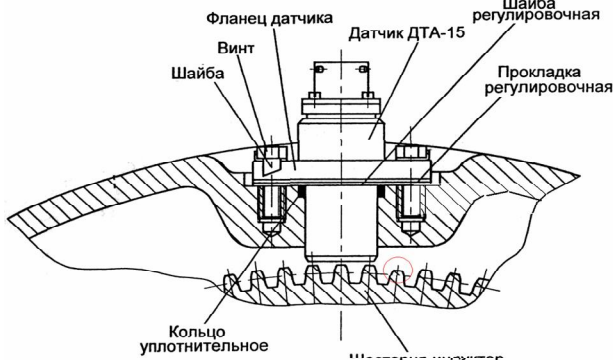


Рис. 3. Установка на двигателе индукционного датчика частоты вращения и индуктора

Экспериментальная проверка возможности определения дисбаланса ротора с помощью индукционного ДЧВ выполнена на лабораторной установке для исследования колебаний ротора [4]. Установка представляет собой полый вал с диском, установленный на двух подшипниках качения и приводимый во вращение электродвигателем.

Для проведения эксперимента на свободном конце вала был установлен индуктор, представляющий собой цилиндр с шестью болтами, имитирующими зубья шестерни. На статоре установлен индукционный датчик ДТА-10, сигнал с которого поступает на ЭВМ (рис. 4).



Рис. 4. Индуктор и индукционный датчик частоты вращения ротора

Один из болтов индуктора вывернут по сравнению с остальными, сигнал с него формирует начало

отсчета и позволяет определить положение ротора относительно статора. Дисбаланс ротора обеспечивается установкой балансирующего груза на диске.

Напряжение, генерируемое датчиком при прохождении зуба индуктора около катушки, прямо пропорционально скорости прохождения зуба (частоте вращения ротора) и обратно пропорционально величине зазора между зубом и катушкой. Экспериментально было определено влияние частоты вращения ротора на уровень электрического сигнала с датчика (рис. 5).

Зависимость имеет практически линейный вид, что позволяет при дальнейшей обработке достаточно просто корректировать уровень электрического сигнала датчика при различных частотах вращения ротора.

Запись и обработка сигналов датчика выполнялись на ЭВМ с помощью программы SpectroLAB, частота вращения ротора в экспериментах определялась обработкой сигнала БПФ – быстрым преобразованием Фурье (рис. 6).

Далее была выполнена запись сигнала ДЧВ при докритической частоте вращения 880 об/мин для хорошо сбалансированного ротора (рис. 7) и для ротора с дисбалансом на диске, расположенным напротив второго болтика относительно индуктора (рис. 8).

На экспериментальной установке балансирующий грузик на диске и индуктор находятся по разные стороны от опоры ротора. Поэтому увеличение прогиба ротора в плоскости вала вызывает уменьшение зазора между индуктором и катушкой датчика в противоположном направлении. На рис. 8 видно уменьшение уровня сигнала от второго болтика и увеличение от пятого болтика индуктора по сравнению с хорошо сбалансированным ротором.

Для уменьшения случайной погрешности сигналы ДЧВ были нормированы и были определены их математические ожидания по нескольким циклам. На рис. 9 показан сравнительный уровень нормированных сигналов ДЧВ для хорошо сбалансированного ротора и ротора с дисбалансом, осредненных по десяти циклам и приведенных к одинаковой частоте вращения ротора.

Из графика рис. 9 видна принципиальная возможность определения дисбаланса ротора и его положения относительно статора по отклонению уровня сигнала от эталонного значения для хорошо сбалансированного ротора.

Результаты экспериментальных исследований были подтверждены моделированием. Для этого была разработана в пакете SolidWorks-2009 твердотельная модель и выполнен модальный анализ для определения критической частоты вращения ротора (рис. 10).

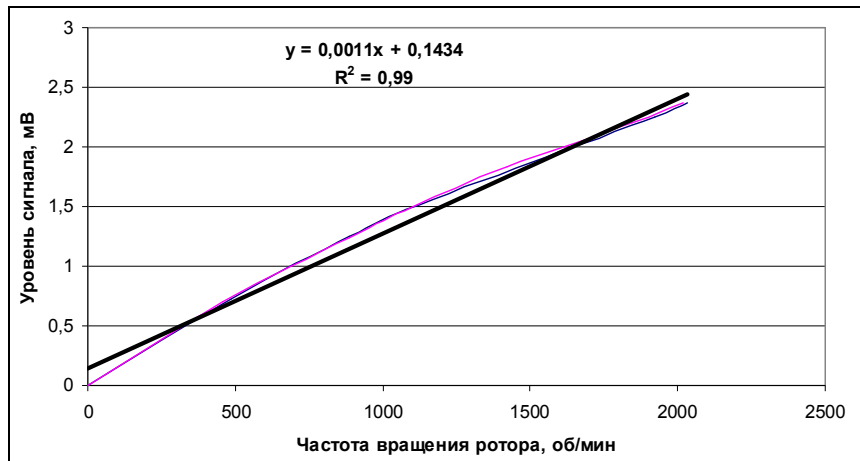


Рис. 5. Зависимость уровня электрического сигнала ДЧВ от частоты вращения ротора

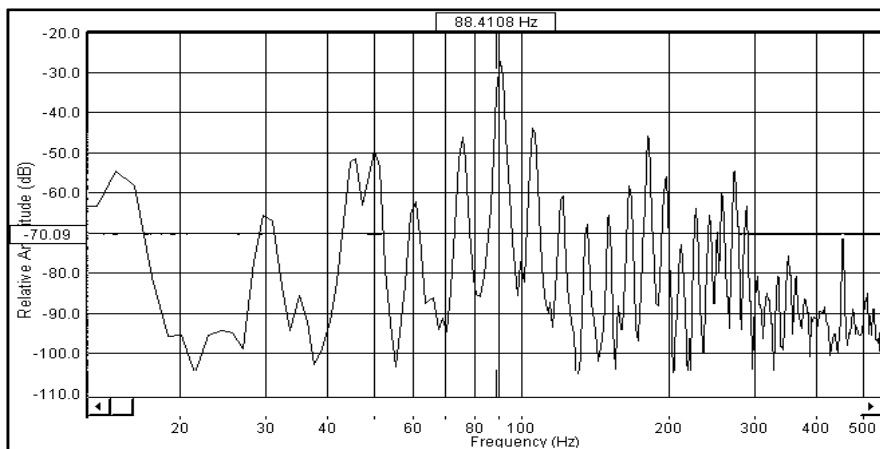


Рис. 6. БПФ сигнала с датчика, частота вращения ротора – 884 об/мин

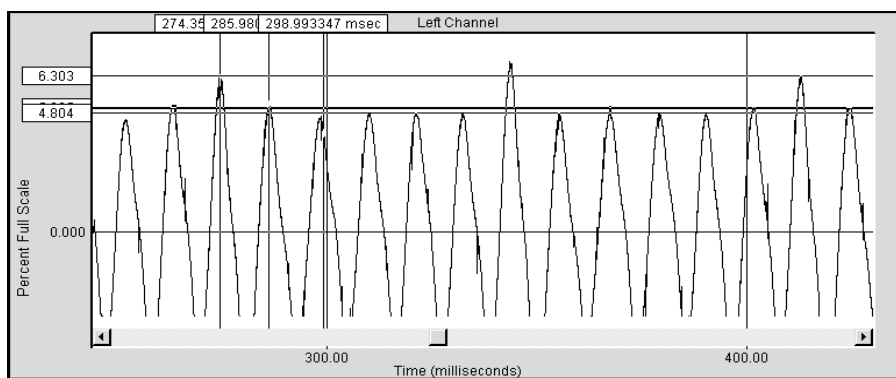


Рис. 7. Сигнал ДЧВ хорошо сбалансированного ротора

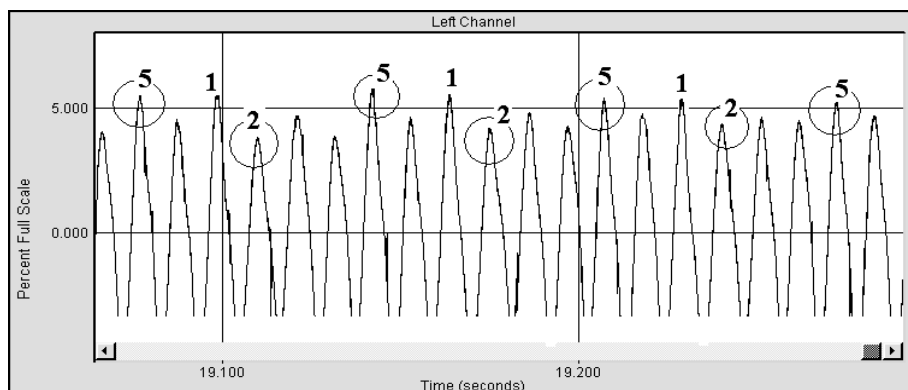


Рис. 8. Сигнал ДЧВ с дисбалансом ротора

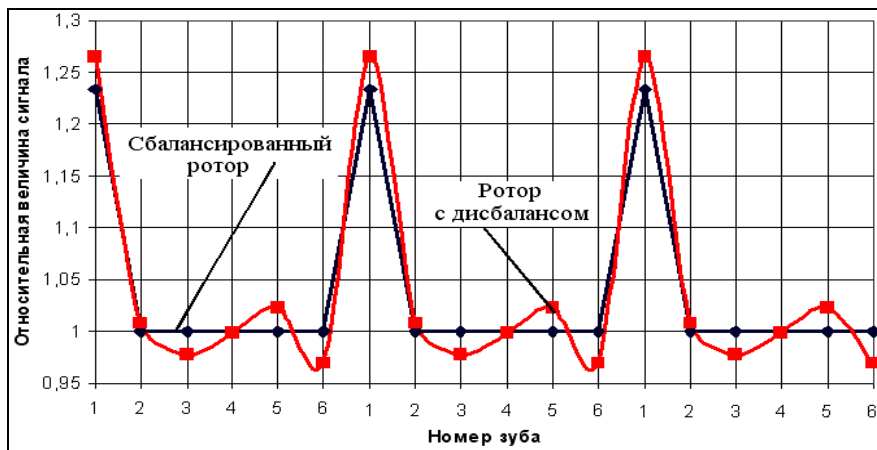


Рис. 9. Относительный уровень нормированного и осредненного сигнала ДЧВ

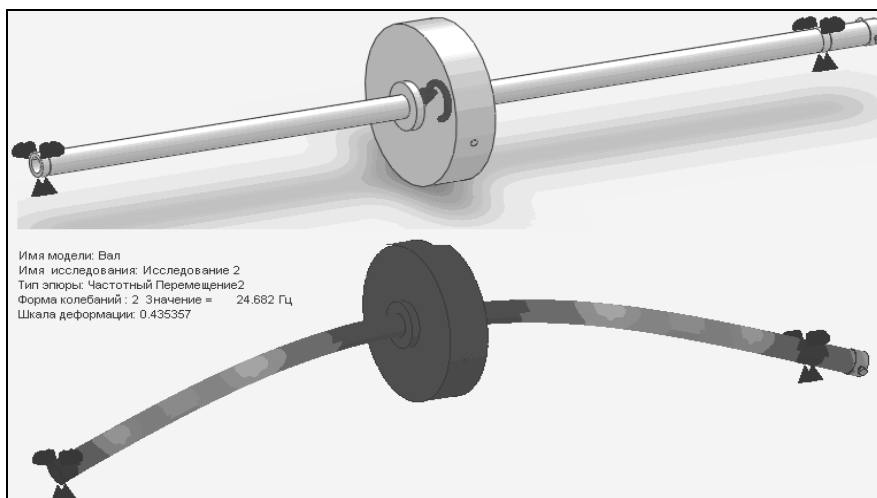


Рис. 10. Твердотельная модель ротора и первая форма изгибных колебаний

В результате модального анализа получена первая критическая частота вращения ротора, равная 24,68 Гц (1481 об/мин), что достаточно хорошо согласуется с экспериментом (24,5 Гц), погрешность составляет 0,7 %. Таким образом, модель адекватно описывает исследуемую конструкцию и может использоваться для дальнейших исследований.

Моделирование с имитацией вращения ротора на докритической частоте 1000 об/мин для хорошо сбалансированного ротора и ротора с дисбалансом показало, что при введении дисбаланса вал ротора прогнулся в плоскости диска на 0,2 мм, а в плоскости индуктора – в обратную сторону на 0,04 мм (рис. 11).

На рис. 12 приведена схема установки ДЧВ и шестерни-индуктора для определения частоты вращения ротора вентилятора ТРДД, позволяющая использовать ДЧВ для определения величины и положения дисбаланса в плоскости вентилятора.

Экспериментальные исследования, выполненные для «гибкого» ротора на закритической частоте вращения 1840 об/мин показали, что ротор с дисбалансом классически самобалансировался и вращался

устойчиво относительно собственного дисбаланса. При этом дисбаланс по сигналам ДЧВ диагностируется, а положение ротора относительно статора (фаза) – не определяется. Эта задача требует дополнительных исследований. В этой связи можно рекомендовать диагностирование величины и положения дисбаланса «гибкого» ротора на докритических режимах – на режиме раскрутки или на выбеге.

Выводы

Экспериментально и моделированием показана принципиальная возможность определения дисбаланса и его положения на роторе ГТД без применения встроенного измерительного преобразователя вибрации, а только по сигналу с ДЧВ с использованием специального алгоритма обработки получаемой с него информации.

Величина дисбаланса и его положение на роторе уверенно определяются на докритических частотах вращения ротора. Задача определения этих величин на закритических частотах вращения для «гибкого» ротора требует дальнейших исследований.

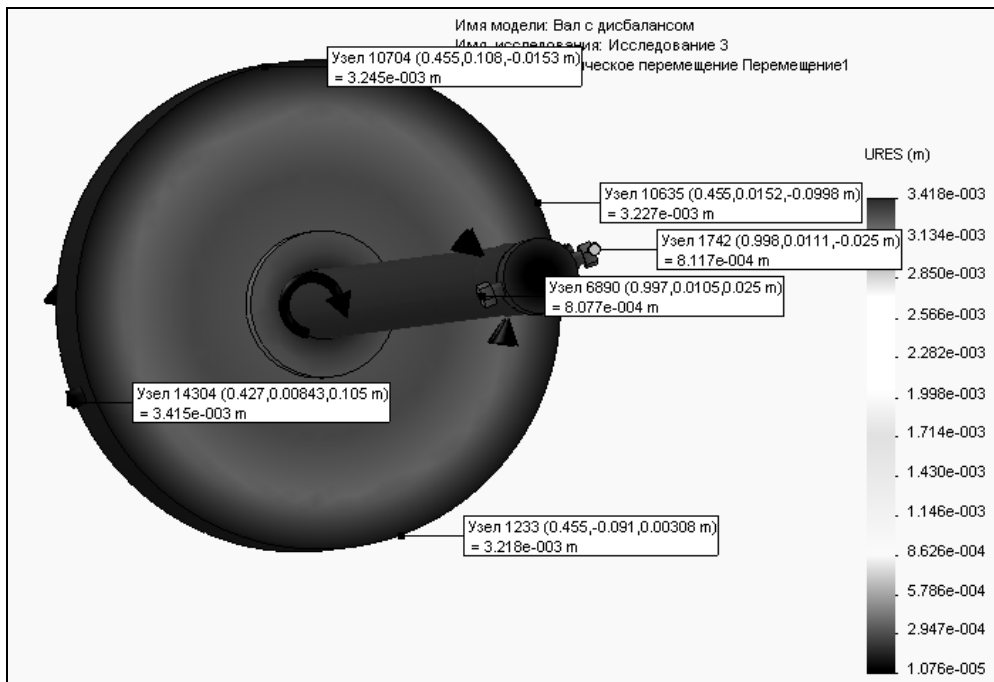


Рис. 11. Моделирование деформации ротора с дисбалансом

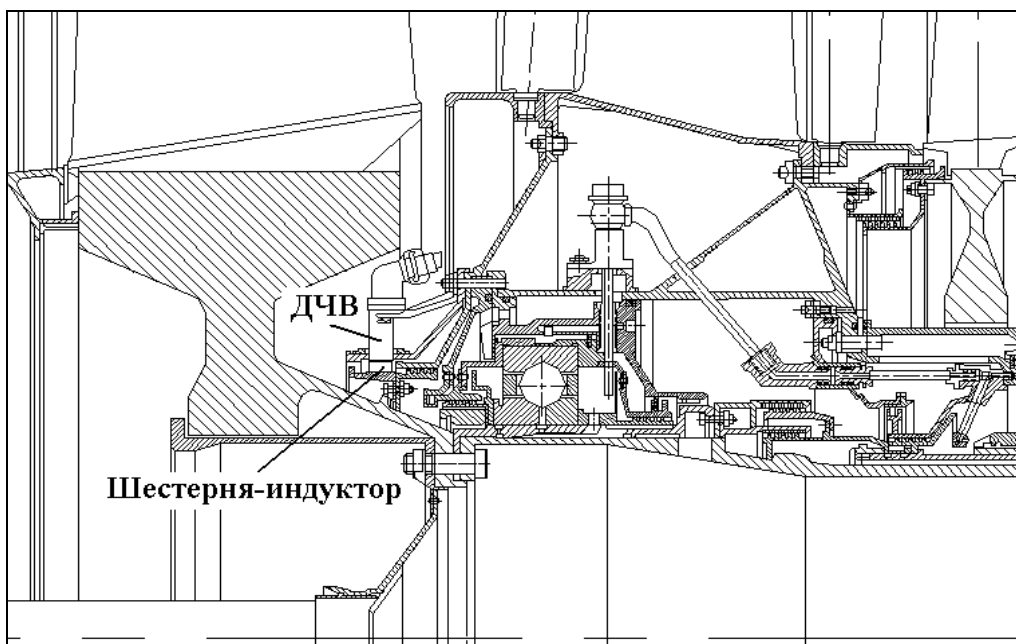


Рис. 12. Установка ДЧВ и индуктора на роторе вентилятора ТРДД

Литература

1. Чигрин, В.С. Виброакустика і вібродіагностика газотурбінних двигунів [Текст]: навч. посібник / В.С. Чигрин, С.І. Суховій. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.С. Жуковського «ХАІ», 2012. – 264 с.

2. CFM56-7B: CFMI Customer Training Center Snecma Services - Snecma Group Direction de l'Aprus-

Vente Civile [Text]. – MELUN-MONTEREAU: Cedex-FRANCE – 2002. – 97 p.

3. Balanced engines: achieved EVM solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vibro-meter.com/pdf/aerospace/brochEngines.pdf>. – 27.04.2012 г..

4. Чигрин, В.С. Колебания [Текст]: учеб. пособие / В.С. Чигрин, А.И. Скрипка. – Х: Гос. Аэрокосмический ун-т ХАИ, 1999. – 36 с.

Поступила в редакцию 27.04.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектирования авиационных двигателей С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІНДУКЦІЙНОГО ДАТЧИКА ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗА ДИСБАЛАНСУ РОТОРА ГТД

В.С. Чигрин, А.М. Шоджаї

Робота газотурбінних двигунів завжди супроводжується вібраціями, основними джерелами яких є ротори, що швидко обертаються. Дисбаланс мас, які обертаються, є одним з найбільш поширених дефектів ГТД. Для визначення дисбалансу ротора використовують інформацію, яка одержується бортовою ЕОМ від внутрішнього вмонтованого датчика вібрації та датчика фазового положення ротора відносно статора двигуна. В статті надано результати експериментальних досліджень і моделювання щодо можливості визначення величини і положення дисбалансу ротора за інформацією тільки одного штатного індукційного датчика частоти обертання (ДЧО). Наведено принципову можливість визначення дисбалансу та його положення на роторі ГТД без використання вмонтованого перетворювача вібрації, а тільки за сигналом з ДЧО за умов використання спеціального алгоритму обробки одержаної інформації. ДЧО в такому випадку працює одночасно в режимі рахування імпульсів і в режимі проксиметра. Величина дисбалансу та його положення на роторі впевнено визначаються на докритичних режимах обертання ротора. Завдання визначення цих величин на понадкритичних частотах обертання для «гнучкого» ротора потребує подальшого дослідження.

Ключові слова: дисбаланс ротора, індукційний датчик частоти обертання, критична частота обертання ротора, проксиметр, швидке перетворювання Фур'є.

RESEARCH POSSIBILITY USE OF THE INDUCTION GAUGE FREQUENCY OF ROTATION FOR ANALYSIS UNBALANCE OF ROTOR'S JET ENGINES

V.C. Chigrin, A.M. Shojaei

In this paper results of experimental researches and modeling of possibility of definition of size and position unbalance a rotor by data only one regular induction gauge of frequency of rotation are resulted. Basic possibility of definition unbalance and its positions on rotor gas-turbine engine without application of the built in measuring converter of vibration, but only on a signal with rate of rotation speed sensor with use of special algorithm of processing of the information received from it is shown. Rate of rotation speed sensor in this case works and in a mode of the counter of impulses, and in a mode proximity sensor. Size unbalance and its position on a rotor are confidently defined on precritical frequencies rotation of a rotor. The problem of definition of these sizes on supercritical frequencies of rotation for a "flexible" rotor demands the further researches.

Keywords: unbalance a rotor, the sensor frequency of rotation, critical frequency rotation of rotor, Proximity sensor, Fast Fourier transformation(FFT).

Чигрин Валентин Семенович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри конструкції авіаційних двигателів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: chigrin_vs@rambler.ru

Шоджаї Амір Мохаммад – студент кафедри конструкції авіаційних двигателів Національного аэрокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: ashojaei577@gmail.com