

## СОЗДАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЕСКОНТАКТНОЙ ДИАГНОСТИКИ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК И ДИСКОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД

### **Краткая характеристика работы.**

На конкурс представляется научно-исследовательская работа по созданию и внедрению в ЦИАМ и на предприятиях авиационного двигателестроения новой технологии бесконтактной диагностики колебаний лопаток и дисков при испытаниях полноразмерных двигателей. Новизна разработанных методов и средств диагностики заключается в спектрально-корреляционном и следящем анализе пульсаций потока и вибраций корпуса газотурбинных двигателей в высокочастотной области спектра. Представляемая работа является комплексной и состоит из трех циклов.

Первый цикл работ посвящен созданию и внедрению нового метода проведения резонансных испытаний рабочих лопаток, когда тензометрирование лопаток по каким-либо техническим причинам невозможно. Сущность проведения резонансных испытаний лопаток прежним методом заключалась в разбиении всего диапазона частот вращения, где на основе расчетных значений частот колебаний лопаток предполагалось возникновение резонансных колебаний, на отдельные узкие интервалы и затем на каждом из этих интервалов выдерживалось заданное время работы турбомашин. Очевидно, что при таком подходе вероятность того, что хотя бы одна из лопаток действительно находится в резонансе, была чрезвычайно мала.

Автором предложена новая технология проведения резонансных испытаний рабочих лопаток, которая основана на спектральном анализе сигналов с датчиков пульсаций потока на частоте следования лопаток. В результате построения математических моделей и анализа экспериментальных исследований было установлено, что при увеличении частоты вращения ротора спектральные составляющие пульсаций потока на частоте следования лопаток монотонно увеличиваются по амплитуде, но в момент возникновения резонансных колебаний лопаток они убывают пропорционально увеличению амплитуде колебаний лопаток (рисунок 1). Поскольку распределение частот колебаний лопаток обычно подчиняется нормальному закону, то частота вращения ротора, на которой происходит наибольшее снижение уровня амплитуды спектральной составляющей на частоте следования лопаток конкретного рабочего колеса, будет с наибольшей вероятностью соответствовать резонансу нескольких лопаток этого колеса. Схема реализации способа диагностики представлена на рисунке 1, а сам способ и устройство для его реализации были запатентованы [1, 2].

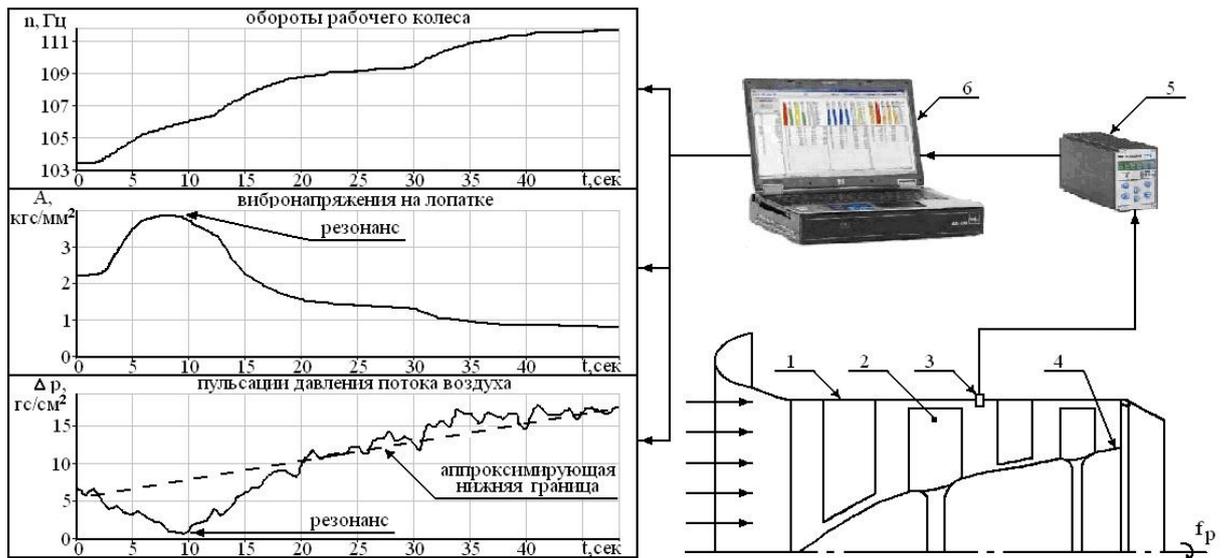


Рисунок 1- Схема реализации способа диагностики резонансных колебаний рабочих лопаток компрессоров:

1 – турбомашина; 2 – рабочие лопатки; 3 – датчик пульсаций давления; 4 – ротор турбомашины; 5 – согласующий усилитель; 6 – регистратор-анализатор.

Впервые этот метод был реализован при резонансных испытаниях компрессора изделия 64М в декабре 2012 года на стендах ОАО «НПО «Сатурн» (Т.о. ЦИАМ № 14235). Затем этот метод был реализован в 2013 году на стенде АО «Мотор Сич» (Т.о. ЦИАМ № 14264) при проведении резонансных испытаний лопаток компрессора и турбины двигателя МС-14, где были установлены не только резонансные частоты вращения, но и выявлены основные гармоники возбуждения резонансных колебаний как от окружной неравномерности потока, создаваемой воздухозаборником, так и от неравномерности, создаваемой винтом. Проведенные затем резонансные испытания подтвердили динамическую прочность лопаток компрессора и свободной турбины. Использование этого метода позволило успешно и в короткие сроки провести на стенде ОАО «НПО «Сатурн» резонансные испытания рабочих лопаток КВД в составе полноразмерного двигателя АЛ-55И по согласованным ТУ 408-5545-0323-2013 (декабрь 2013г.) и оформить заключение по прочности. Вопросы создания информационно-измерительной системы (ИИС) и организации проведения этих испытаний изложены в т. о. ЦИАМ № 14451.

Следующий цикл работ посвящен исследованию автоколебаний (флаттера) лопаток. Результаты бесконтактной диагностики автоколебаний лопаток компрессоров двигателей МС-14, АЛ-31ФН и АЛ-55И изложены в т. о. ЦИАМ № 14263, 14303, 14447. Технология этого метода диагностики колебаний лопаток ранее была также запатентована автором (патент № 2111469) и затем дополнена патентами [3, 4]. Использование этой технологии при испытаниях указанных двигателей позволило надежно диагностировать наличие или отсутствие автоколебаний лопаток, в то время как системы тензометрирования лопаток в этих случаях или невозможно было использовать или количество работающих тензометров

было недостаточно. В частности, при испытаниях КНД двигателя АЛ-31ФН это позволило определить номера диаметральных форм колебаний рабочего колеса 1-й ступени, что невозможно было сделать системой тензометрирования, так как она вносила существенные искажения в фазо-частотные характеристики измерительных каналов.

Третий цикл работ посвящен бесконтактной диагностике колебаний диска-лабиринта КВД, тензометрирование которого в составе полноразмерного двигателя было невозможно. Актуальность этих работ была вызвана тем, что после проведения типовых испытаний двигателя на диске-лабиринте были обнаружены усталостные трещины, свидетельствующие о высоком уровне динамических нагрузок. Для выяснения причин появления этих усталостных трещин были проведены 2 этапа исследований. Первый этап исследований был выполнен на стенде Ц-4Н ЦИАМ при имитации высотно-скоростных условий эксплуатации двигателя. Второй этап исследований был проведен на стенде НПЦГ «Салют». Информационно-измерительная система (ИИС), разработанная для бесконтактной диагностики колебаний диска-лабиринта, представлена на рисунке 2.

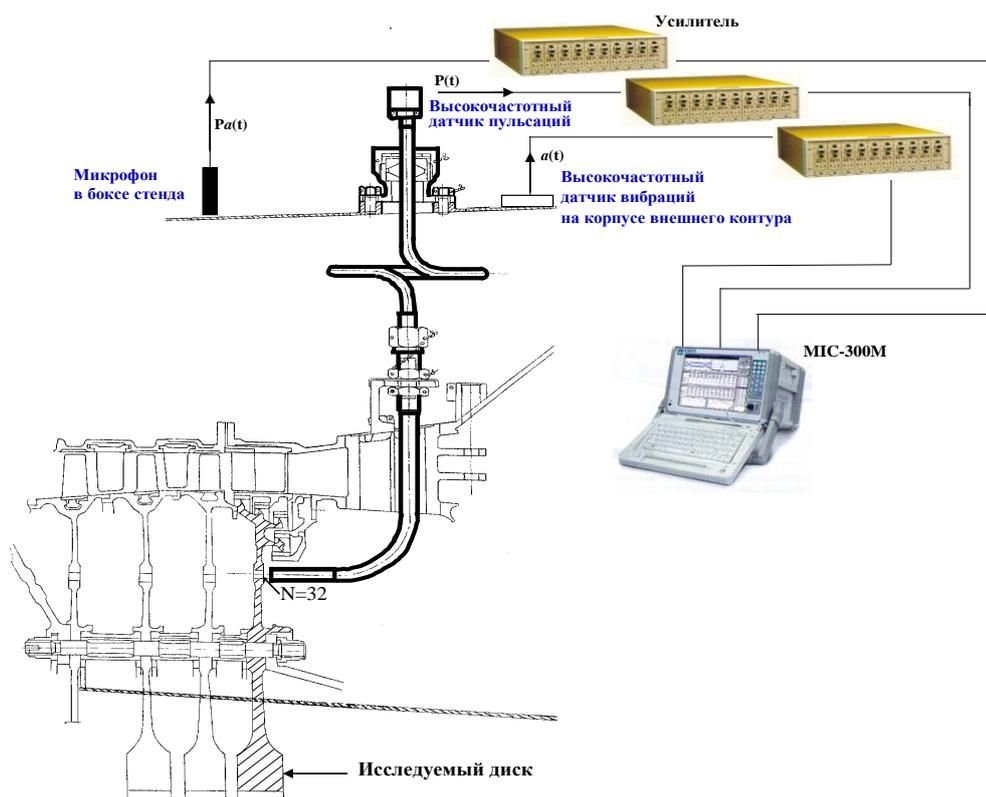


Рисунок 2 – ИИС для бесконтактной диагностики колебаний диска-лабиринта

В результате проведенных исследований было установлено, что при длительной работе двигателя на режиме авторотации при определенных условиях могут возникать автоколебания диска-лабиринта, которые и являются причиной появления усталостных трещин. Изложение этого цикла работ представлено в т.о. ЦИАМ № 14433.

Резюмируя изложенное, можно констатировать, что представляемая на конкурс комплексная работа является разработкой и практической реализацией в 2013 году технологии бесконтактной диагностики аэроупругих колебаний лопаток и дисков авиационных ГТД, которая была запатентована в 2012 году (патентообладатель ЦИАМ, список патентов прилагается). В большинстве приведенных случаев эта технология оказалась единственно возможной для оценки динамической прочности лопаток и дисков авиационных двигателей, а созданные для реализации этой технологии информационно-измерительные системы являются уникальными.

Подробное изложение перечисленных научно-исследовательских работ приведено в 7 технических отчетах, 1-ой технической справке и 1-ой статье. По результатам работы сделано 4 доклада на конференциях. Актуальность и практическая значимость работ подтверждена в 2013 году 6-ю договорами с промышленностью и 6-ю заключениями на эксплуатацию двигателей.

#### **Перечень полученных патентов по представляемой работе**

1. Пат. 2451279 Российская Федерация, МПК G01M 15/14, G01H 13/00. Способ диагностики резонансных колебаний лопаток рабочего колеса в составе осевой турбомшины. / А.А. Хориков, С.Ю. Данилкин; заявитель и патентообладатель ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова" – №2011101521/28; заявл. 18.01.2011; опубл. 20.05.2012, Бюл. №14.

2. Пат. 109287 Российская Федерация, МПК G01H 13/00. Устройство диагностики резонансных колебаний лопаток рабочего колеса в составе осевой турбомшины. / А.А. Хориков, С.Ю. Данилкин; заявитель и патентообладатель РФ, от имени которой выступает Минпромторг России, ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова" – №2011126590/28; заявл. 29.06.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. №28.

3. Пат. 2451922 Российская Федерация, МПК G01H 15/14. Способ диагностики вида аэроупругих колебаний лопаток рабочего колеса осевой турбомшины. / А.А. Хориков, С.Ю. Данилкин; заявитель и патентообладатель ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова" – №2011107493/06; заявл. 01.03.2011; опубл. 27.05.2012, Бюл. №15.

4. Пат. 118745 Российская Федерация, МПК G01H 1/00. Устройство для бесконтактной диагностики автоколебаний рабочего колеса турбомшины. / А.А. Хориков, А.Г. Шатохин, И.Ю. Головченко, С.Ю. Данилкин; заявитель и патентообладатель РФ, от имени которой выступает Минпромторг России, ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова" – №2012112992/28; заявл. 04.04.2012; опубл. 27.07.2012, Бюл. №21.

## **Перечень выпущенных отчётов в 2013 году по представляемой работе**

1. Технический отчет ЦИАМ № 14235 «Анализ динамической прочности лопаток компрессора изделия 64М на основе методики бесконтактного определения резонансных частот вращения».
2. Технический отчёт ЦИАМ № 14263 «Исследование автоколебаний рабочих лопаток первой ступени компрессора двигателя МС-14 на стенде АО «Мотор Сич»
3. Технический отчёт ЦИАМ № 14264 «Исследование и анализ резонансных колебаний рабочих лопаток 1-й и 2-й ступеней компрессора двигателя МС-14»
4. Технический отчёт ЦИАМ № 14303 «Проверка на высотном стенде Ц-4Н ЦИАМ отсутствия автоколебаний рабочих лопаток 1-й ступени, контрольное тензометрирование рабочих лопаток 2-й ступени и бесконтактная диагностика колебаний лопаток вентилятора изделия АЛ-31ФН серии 3»
5. Технический отчёт ЦИАМ № 14433 «Исследование колебаний диска-лабиринта КВД»
6. Технический отчёт ЦИАМ № 14447 «Тензометрирование и проверка отсутствия автоколебаний рабочих лопаток КНД двигателя АЛ-55И на стенде Ц-17Т ЦИАМ»
7. Технический отчёт ЦИАМ № 14451 «Анализ динамической прочности лопаток КВД двигателя АЛ-55И».

Первый Заместитель

Генерального директора ФГУП ЦИАМ

В.М. Гусев