

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПЛЕКС ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВЫХ ОПОР АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Зубко А.И.

*Опытно-конструкторское бюро им. А. Люльки — филиал «Уфимское
моторостроительное производственное объединение»,
ОКБ им. А. Люльки — филиал УМПО, ул. Касаткина, 13, Москва, 129301, Россия
e-mail: zbk2@yandex.ru*

Рассматриваются вопросы виброакустической диагностики подшипниковых опор газотурбинных двигателей, разработки новых способов и методов диагностики и создания диагностического комплекса, включающего специально разработанные: приспособление, электронный блок и программное обеспечение. Приводится анализ существующих методов диагностики подшипников, применяемых в настоящее время эксплуатирующими организациями.

Ключевые слова: газотурбинные двигатели, подшипники качения, виброакустическая диагностика.

Введение

Проблема вибрационной диагностики подшипниковых опор в составе газотурбинных двигателей (ГТД), особенно тех, которые в силу конструктивных особенностей двигателя расположены между роторами, не решена до настоящего времени. Большинство методов работают неустойчиво, нет повторяемости диагноза при аналогичных дефектах, не объяснены физические принципы возникновения тех или иных анализируемых вибрационных составляющих в спектре.

Существующие способы и методы комплексной параметрической и вибрационной диагностики подразделяются на три категории:

— диагностика в полете (на данном этапе без выдачи предупреждения летчику) или при обработке послеполетной информации;

— диагностика во время наземного опробования двигателя (в составе самолета) в эксплуатации или на двигательном стенде завода-изготовителя;

— диагностика во время стоянки, без запуска двигателя, путем выполнения ручной прокрутки роторов или холодной прокрутки (ХП) с помощью турбостартера.

В пользу последней категории говорят ее минимальные финансовые и трудозатраты.

Основным видом износа межроторного подшипника (МРП) как наиболее влияющего на ресурс

двигателя является усталостное выкрашивание тел и дорожек качения в виде раковин от питтинга. При вращении подшипника, во время работы двигателя, тела качения проваливаются в крупные раковины от питтинга, ударяясь об их края и подпрыгивая при выходе из них. За один оборот, в силу возникновения прецессии ротора из-за таких подпрыгиваний, количество ударов с каждым оборотом практически всегда разное, но находится в определенном диапазоне (почти периодический процесс). При снижении частоты вращения, в результате уменьшения свободной энергии (дисбаланса) на создание прецессии, диапазон разброса ударов уменьшается. При ручной прокрутке ротора с частотой 1—2 Гц процесс становится практически периодическим (из почти периодического при высоких частотах вращения).

При проведении диагностики подшипниковых опор вибрационный сигнал измеряется датчиком вибрации на наружном корпусе ГТД и коке (обтекателе) входных направляющих аппаратов на режиме ручной прокрутки. Режим холодной прокрутки для этого не используется. Из-за удаленности источника сигнала от места измерения существующие методы диагностики практически неэффективны для определенного ряда подшипников, как например МРП.

Разработка моделей и алгоритмов диагностирования

Для решения вопроса контроля и вибрационной диагностики МРП двигателей семейства АЛ-31 «на земле», при ручной прокрутке двигателя и ХП, использовались два самостоятельных направления: вибрационное и акустическое.

Изначально первым направлением стало вибрационное. Для вибрационной диагностики было разработано приспособление ДП-02. Приспособление разрабатывалось с целью максимального уменьшения пути прохождения полезного вибрационного сигнала от источника вибрации до датчика. При этом не требовалась разборка двигателя и исключалось вредное влияние встречающихся на пути сигнала плавающих соединений деталей подшипников, имеющих рабочие зазоры, покрытые маслом, устройств демпфирования, и не допускалось значительное ослабление сигнала элементами корпуса ГТД.

В ходе работ, направленных на исследование возможности использования для диагностики работающего ГТД технического микрофона, был определен ряд методов, связанных с высокочастотной составляющей (ВЧС) спектра сигнала звукового давления. На этом этапе микрофон устанавливался на корпус двигателя. Суть методов заключалась в поиске как периодических, так и почти периодических вибрационных процессов, возникающих в результате дефекта подшипниковых опор. (Под почти периодическим понимается процесс, в котором период колебаний в определенных пределах постоянно изменяется.)

При проведении спектрального анализа выборки длительностью в одну секунду, при наличии почти периодического процесса будет выявлен только шум в некотором частотном диапазоне.

Эксперименты проводились как на двигателях, так и на стендах испытаний подшипников.

С целью более подробного анализа исследования данных процессов было проведено их математическое моделирование в среде Matlab Simulink. На

первом этапе исследовалось отображение в спектре непериодического сигнала. С этой целью использовались источник «бесформенного» сигнала и блок спектрального анализа. При выведении результатов формирования импульсов от источника непериодического сигнала блок спектрального анализа отображал появление шума с одинаковой амплитудой во всем частотном диапазоне измерения (рис. 1). Исходный источник сигнала имел безразмерную амплитуду 100 единиц, но распределился по частотному диапазону и принял среднее значение амплитуды 0,6 единиц (рис. 2). Из этого можно сделать вывод о том, что энергия в виде непериодических колебательных процессов, распределившись по всему частотному спектру, становится практически незаметной. При проведении вибрационной диаг-

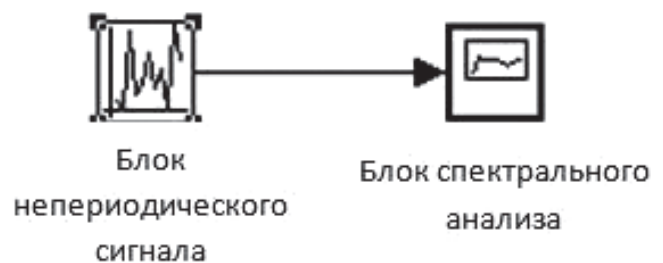


Рис. 1. Математическая модель непериодического сигнала

гностики ГТД на данный факт (шумовой подложки) принято не обращать внимания.

Далее, для понимания почти периодических процессов, исследовалось их отображение при проведении спектрального анализа. Для этого применялись источник «случайного» сигнала, блок умножения сигналов и блок спектрального анализа (рис. 3).

Блок умножения сигналов использовался для частотной модуляции двух сигналов, т. е. непериодический сигнал модулировался периодическим (синусоидальным), что в итоге вызвало появление одного почти периодического сигнала. Данный сигнал, при его спектральном разложении, отобразился в виде повышения амплитуды шума в опреде-

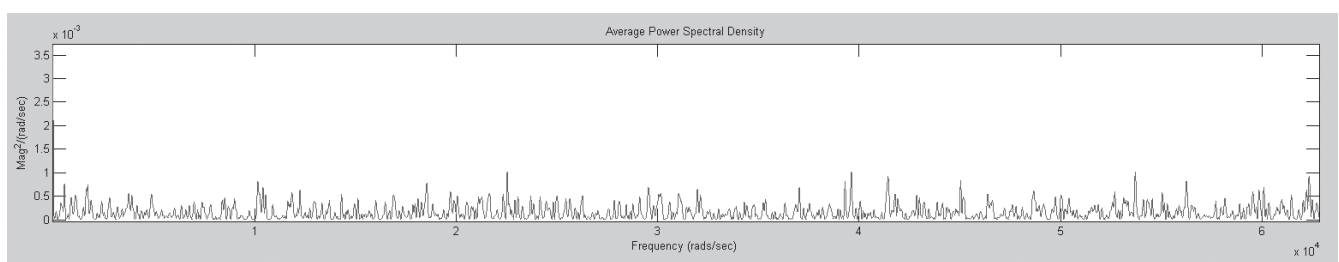


Рис. 2. Отображение непериодического сигнала в окне спектрального анализа

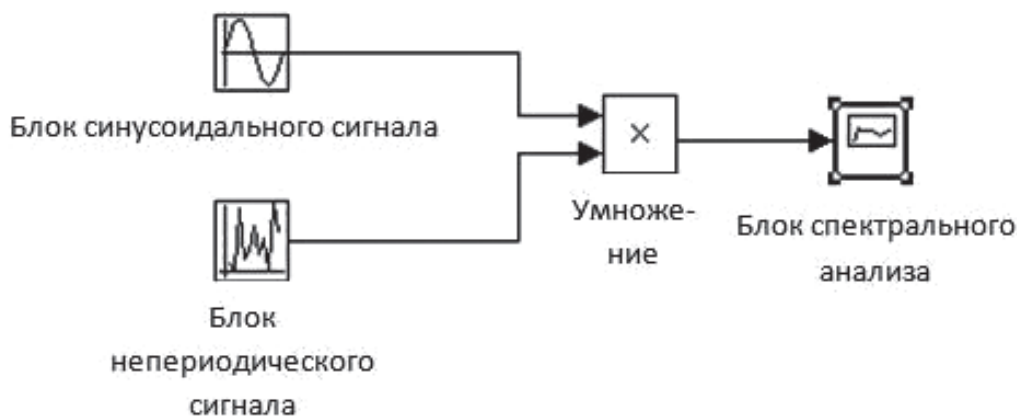


Рис. 3. Математическая модель почти периодического сигнала

ленном частотном диапазоне, серединой которого является частота синусоидального сигнала (рис. 4 и 5).

Периодические процессы высокой частоты возникают как отдельно от почти периодических, так и в увязке с ними. Они проявляются при одинаковом возбуждении вибрационного сигнала с каждым оборотом ротора и являются частотной модуляци-

щих неровностей, всегда имеющих на контактирующих поверхностях скольжения. Это вызывает возбуждение колебаний отдельных деталей конструкции с частотами, равными произведению количества взаимодействий за один оборот вала на частоту вращения ротора, и собственными частотами взаимодействующих деталей.

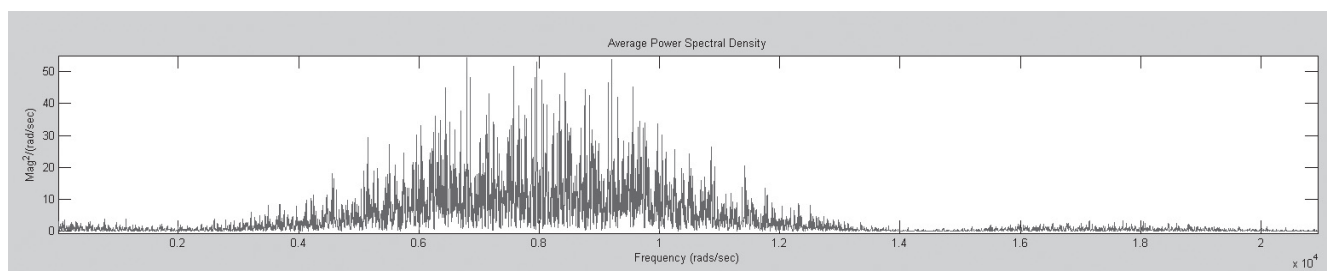


Рис. 4. Отображение почти периодического сигнала в окне спектрального анализа

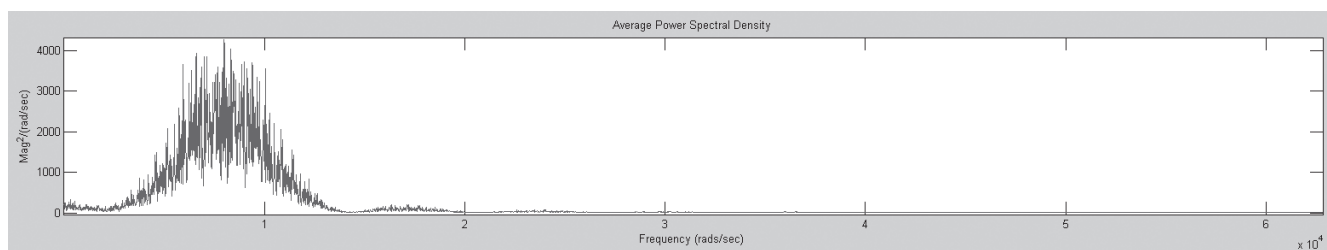


Рис. 5. Отображение почти периодического сигнала в окне спектрального анализа в большем частотном диапазоне

ей вибрационных сигналов от повреждений деталей подшипников. Следовательно, период колебаний при периодических процессах, как правило, определяется частотой вращения ротора.

Физическую модель процесса легче всего показать на примере работы подшипников скольжения. При наличии влияния негативных факторов, воздействующих на уменьшение рабочего зазора подшипника, причиной которых является снижение несущей способности или пробивание масляного клина, происходит взаимное задевание выступаю-

При тестировании разработанной методики поиска дефектов деталей подшипников по наличию признаков неперидических сигналов были отмечены положительные результаты, но в условиях эксплуатации двигателей на самолетах возникли сложности с возможностью одинаковой раскрутки ротора ручным приводом до минимально необходимой частоты вращения и определением точки начала замера виброанализатором.

Разработка комплекса акустической диагностики технического состояния подшипника опоры турбины ротора высокого давления

На следующем этапе в самостоятельное направление выделился акустический метод диагностики. Для этого было разработано приспособление ДП-03, цель которого — при максимальном уменьшении пути прохождения акустического сигнала от источника вибрации к микрофону (и увеличении амплитуды ВЧС при дефекте подшипника), без разборки двигателя и его съема с объекта, исключить непосредственный механический контакт датчика и деталей ротора высокого давления.

Конструктивно приспособление устанавливается в окно осмотра входных кромок рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД) (рис. 6). Предварительно в приспособление помещается и фиксируется микрофон. В результате установки приспособления измерительная часть микрофона (с рабочего торца микрофона) устанавливается во внутреннем корпусе газогенератора двигателя, на расстоянии 1–2 см от полки рабочей лопатки ТВД.

Поскольку анализ ВЧС выполнялся только вручную специалистом высокой подготовки, то следующим шагом в создании диагностического комплекса являлось создание автоматического распознавания. Для обработки полученной информации микрофон, установленный в ДП-03, был подключен к специально разработанному для этого электронному блоку анализа и индикации (ЭБАИ) «Фианит 3000».

Для увеличения помехозащищенности и улучшения качества акустического сигнала используется микрофон с узкой диаграммой направленности. С целью исключения влияния на диагностируемый сигнал турбулентного потока за устройством измерения используется его фильтрация в ЭБАИ.

В дальнейшем, для осуществления замеров при одинаковых условиях для проведения диагностики стала выполняться холодная прокрутка роторов двигателя. Данный режим выбран с целью повышения диапазона частот ВЧС дефекта, при этом вращение происходит (в случае МРП) обоих колец, что уменьшает трудозатраты на ручные прокрутки в восьми положениях наружного кольца (для чего выполняется восемь ручных прокруток). В процессе выполнения ХП приспособление с установленным в него микрофоном остается в газовоздушном тракте, не контактируя с роторными деталями. При этом ЭБАИ «Фианит 3000» выполняет поиск высокочастотной составляющей сигнала в виде периодических и почти периодических вибрационных процессов, возникающих при дефекте МРП

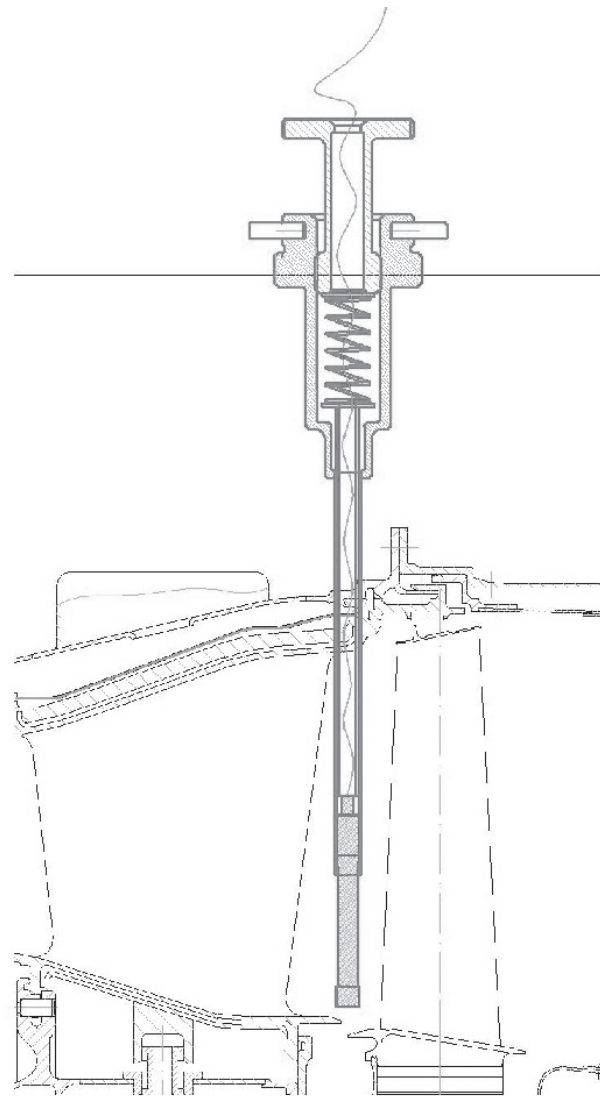


Рис. 6. Приспособление акустической диагностики ДП-03

(рис. 7). Измерение осуществляется в трех частотных диапазонах. В зависимости от степени развития дефекта частотный диапазон возникновения диагностических признаков разрушения подшипника изменяется. С увеличением процесса деградации подшипника связанные с дефектом частоты будут смещаться в более низкий диапазон. Поскольку штатные датчики измеряют среднеквадратическое значение (СКЗ) вибросигнала в диапазоне роторных частот, то только на предаварийной стадии дефекта диагностические частоты переходят из области высоких частот в контролируемую низкочастотную область. Этот факт объясняет столь позднюю диагностику МРП в полете. При этом увеличение СКЗ происходит как от повышения амплитуды роторных частот, так и от возникновения периодических и почти периодических сигналов (шума в определенном частотном диапазоне) в области измерения штатных датчиков.



Рис. 7. Структурная схема ЭБАИ «Фианит 3000»

Разработанный комплекс акустической диагностики состоит из технического микрофона (пьезоэлектрического) с узкой диаграммой направленности, приспособления ДП-03, устанавливаемого в окна осмотра входных кромок рабочих лопаток ТВД, и электронного блока анализа и индикации «Фианит 3000». После установки ДП-03 в резьбу окна осмотра корпуса и включения ЭБАИ измерение производится автоматически.

Алгоритм ЭБАИ «Фианит 3000» состоит в получении сигнала акустического давления от технического микрофона (рис. 8). Для автоматического начала измерения в алгоритм блока встроено измерение амплитуды входного акустического сигнала в дБ. По достижении минимального значения блок распознает запуск турбостартера и начало ХП. После чего производится определение частот вращения ротора высокого давления (РВД), на которых режим является установившимся (максимальные обороты при ХП). При этом раскрутка РВД закончена и ведется поддержание частоты вращения, на которых и производится измерение. Для этого отслеживаются два расчетных диапазона частот, на которых при установившихся частотах вращения ХП присутствует первая гармоника РВД и гармоника частот следования лопаток турбины высокого давления. Срабатывание происходит при

одновременном повышении СКЗ в этих диапазонах (при появлении искомым частот). В результате синхронизации замера и частоты вращения модуль «Синхронизация замера и частоты вращения» дает команду на проведение замера. Затем происходит фильтрация постоянных составляющих от узлов и агрегатов ГТД, мешающих проведению измерения, выше 1 кГц. После этого выполняется выделение трех частотных диапазонов (1–5 кГц; 5–10 кГц; 10–20 кГц), их логарифмирование и сравнение СКЗ по отдельности каждого диапазона. В результате превышения установленного значения любого из диапазонов формируется команда блоком вычислений и индикации (БВИ) о неисправности диагностируемого узла. Минимальное значение диапазонов выбирается из условия максимальной (из ранее набранной статистики) амплитуды каждого диапазона исправного двигателя + 3σ . В зависимости от того, какая была выдана команда — о превышении диапазона или нет — БВИ выдает сигнализацию на индикатор: «Исправен» или «Не исправен». После выключения турбостартера при завершении ХП синхронизатор замера и вращения дает команду о завершении измерения. Сигнализация на индикаторе продолжает гореть до ее выключения вручную. Если по каким-либо причинам произошла ошибка, то на панели индикации загорают

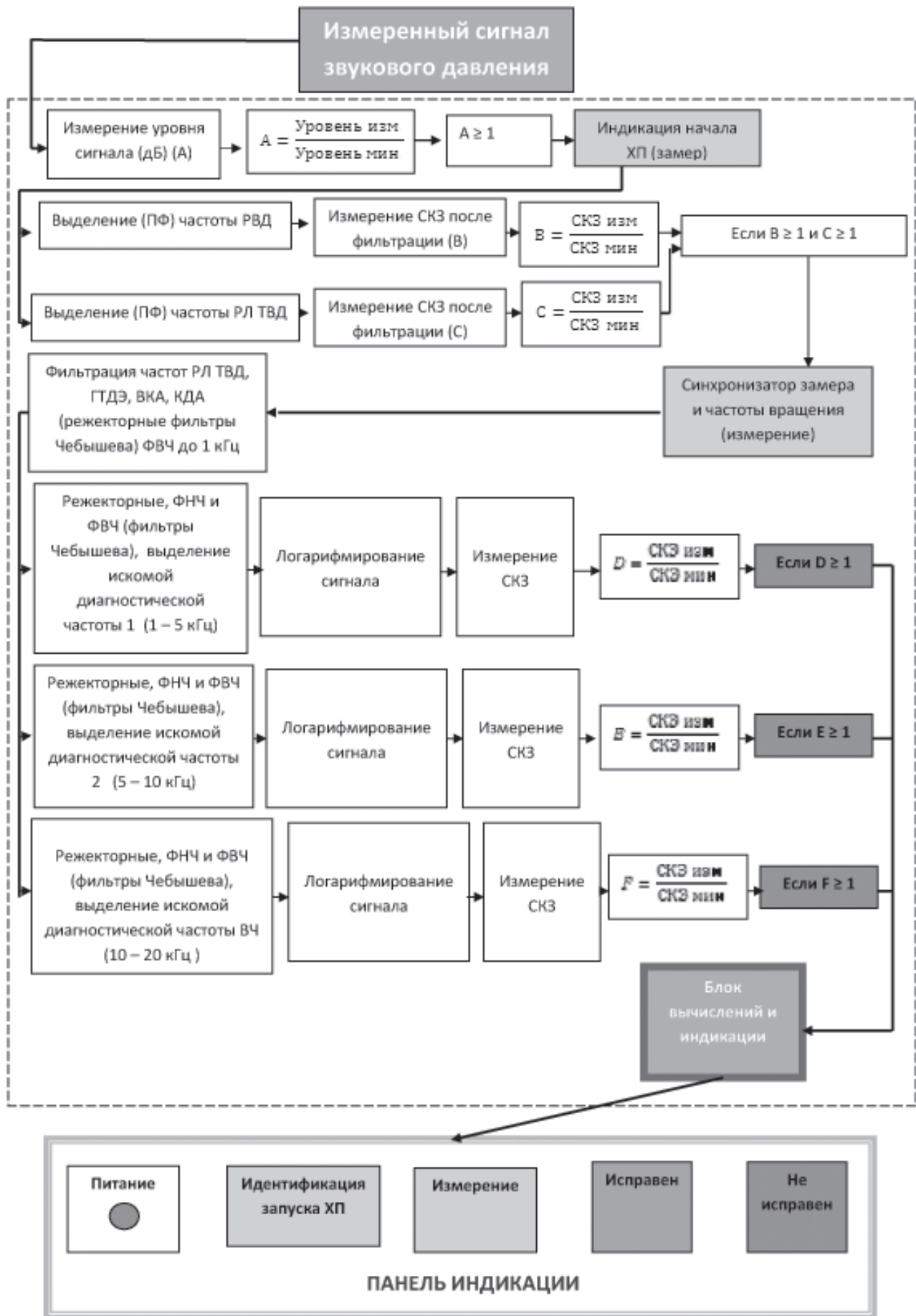


Рис. 8. Функциональная схема ЭБАИ «Фианит 3000»

ся все индикаторы. При этом необходимо проверить правильность подключения микрофона и провести повторно ХП и измерения.

Выводы

В результате анализа алгоритма ЭБАИ «Фианит 3000» можно сделать вывод, что данная система акустической диагностики является автономной и защищенной от основных помех, исходящих от узлов и агрегатов ГТД. При комплексной оценке всей системы выявлена ее высокая помехозащищенность и приспособленность к использованию в условиях эксплуатации для разовых и периодических проверок.

Библиографический список

1. Звонарев С.Л., Зубко А.И. О возможных причинах отказов подшипников качения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. №3-3(34). С. 16-22.
2. Герман Г.К., Зубко А.И., Калужный О.Н. Проблемы диагностики отказов подшипников качения двухконтурных ГТД и пути их решения // Двигатель. 2013. №1(85). С. 38-39.
3. Критский В.Ю., Зубко А.И. Исследование возможности использования керамических авиационных подшипников скольжения нового поколения в конструкциях опор роторов газотурбинных двигателей // Двигатель. 2013. №3(87). С. 24-26.
4. Зубко А.И. Оценка возможности использования субгармонических колебаний в качестве диагностического признака ухудшения технического состояния опоры вала газотурбинного двигателя (ГТД) // Материалы II Международной заочной научно-практической конференции «Наука вчера, сегодня, завтра» (24.07 2013). — Новосибирск. СибАК, 2013. С. 35-41.
5. Звонарев С.Л., Зубко А.И. Диагностика состояния подшипниковых опор роторов газотурбинных двигателей (ГТД) по изменению степени подогрева проходящего через них масла // Материалы I Международной научно-практической заочной конференции «Актуальные вопросы технических и математических наук». — Киев: Логос, 2013. С. 113 -120.
6. Зубко А.И. Вибрационная диагностика технического состояния опоры ротора двухвального газотурбинного двигателя с помощью орбитального анализа // Научно-технический конгресс по двигателестроению: Сборник тезисов (15-17 апреля 2014). — М.: Двигатель, 2014. Ч. 2. С. 57-59.
7. Зубко А.И., Донцов С.Н. Исследование условий работоспособности и разработка диагностики керамических подшипников нового поколения // Труды МАИ. 2014. №74. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49296> (25.04.2014).
8. Zubko A., Kritsky V. Implementation of Higt Strength Composite Ceramic Materials for Producing Tribotechnical Parts of Gas Turbine Engeines as Constructional Nano-Structured Materials // Материалы 29-го конгресса Международного совета по аэронавтическим наукам (7-12 сентября 2014, Санкт-Петербург). URL: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papee/2014_0746_paper.pdf
9. Зубко А. Оценка возможности использование орбитального анализа вибрации для исследования роторных систем газотурбинных двигателей // Насосы. Турбины. Системы. 2015. №4. С. 97-109.
10. Зубко А.И. Анализ влияния места расположения датчиков на проведение диагностики роторных систем газотурбинных двигателей // Материалы Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые технологии и решения в газотурбостроении». — М.: ЦИАМ, 2015. С. 309-311.
11. Зубко А.И. Анализ причин повреждений и диагностика опоры высокого давления двухконтурного ГТД // Новые технологии: Материалы XII Всероссийской конференции, посвященной 70-летию Победы. — М.: РАН, 2015. С. 57-64.
12. Зубко А.И., Семенова А.С. Исследование причин повреждения экспериментального модельного керамического подшипника скольжения с использованием метода орбитального анализа // Всероссийская ежегодная научная конференция «Актуальные проблемы вооруженной борьбы в воздушно-космической сфере» (9-10 апреля 2015, Воронеж). Сборник статей. — Воронеж: ВУНЦ ВВС, 2015. Ч. V. С. 63-69.

PERSPECTIVE VIBROACOUSTICS DIAGNOSTIC COMPLEX FOR AIRCRAFT GAS-TURBINE ENGINES BEARING ASSEMBLIES

Zubko A.I.

Development Design Bureau named after A.M. Lyulka of NPO UMPO,
13, Kasatkina str., Moscow, 129301, Russia
e-mail: zbk2@yandex.ru

Abstract

The article tackles the questions concerning peculiarities of vibroacoustic diagnostics of bearing assemblies for gas-turbine engine rotors technical condition. Possible reasons of bearing assemblies damaging and corresponding failure symptoms of individual defects, as well as procedures of their application are analysed.

The following options are possible in particular:

- flight diagnostics (while processing post-flight information, without outputting warning the pilot at this stage);
- diagnostics during land approbation of the engine (aircraft-level) in operation or at the manufacturer engine test bench;
- during the parking, without engine activation, by manually turning the rotors or turbostarter cold scrolling (CS).

The last item is preferable due to minimum financial and working hour costs. For implementation of such methods manual turning of the rotor and a specialist fixing data or carrying out rotor CS are required.

In the course of diagnostics of operating gas-turbine engine aimed at researching possibilities of the technical microphone installed on the engine case a number of the methods connected with a high-frequency component of a signal spectrum of effective sound pressure was revealed. The studies consisted in searching of periodic and nearly periodic vibration processes resulting from bearing assemblies defect mounted on the engine and bearings tests bench.

High frequency periodic processes occur very often either separately from nearly periodic, or together with them. They appear at identical excitation of a vibration signal with each turn. These are frequency modulation of vibration signals from damaged bearing parts, as a rule, with rotor frequency.

Physical model of the process can be easily represented on the example of slider bearing operation. In the presence of negative factors, affecting the bearing clearance reduction, and occurring due to bearing capacity decrease or oil-film wedge punching, a mutual interference of wrinkles always presenting on sliding contacting surfaces takes place. It causes the excitation

of oscillations of separate parts with frequencies equal to the product of number of interactions per one shaft rotation and rotor rotation frequency and natural frequencies of interacting parts.

The vibroacoustic diagnostics complex «FIANITE 3000» was developed to realize the data obtained during the studies.

It consists of a technical microphone (piezoelectric) with the restricted directional diagram, the DP-03 device, installed in inspection ports to inspect entrance edge of high-pressure turbine blades as well as electronic analysis and indication module “FIANITE 3000”. After DP-03 installation into inspection port and activation of electronic analysis and indication module the measuring process will go on automatically.

The developed system of vibroacoustic diagnostics is autonomous and protected from the main interference generated by subassembly of gas-turbine engine. The total evaluation of the system revealed its very effective noise immunity and serviceability for single and periodic checkouts.

Keywords: gas turbine engines, bearings, vibroacoustic diagnostics.

References

1. Zvonarev S.L., Zubko A.I. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P.Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2012, no. 3-3(34), pp. 16-22.
2. German G.K., Zubko A.I., Kalyuzhnyi O.N. *Dvigatel'*, 2013, no. 1(85), pp. 38-39.
3. Kritskii V.Yu., Zubko A.I. *Dvigatel'*, 2013, no. 3(87), pp. 24-26.
4. Zubko A.I. *Materialy II Mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Nauka vchera, segodnya, zavtra" (24.07.2013)*. Novosibirsk, SibAK, 2013, pp. 35-41.
5. Zvonarev S.L., Zubko A.I. *Materialy I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi zaochnoi konferentsii "Aktual'nye voprosy tekhnicheskikh i matematicheskikh nauk"*. Kiev. Logos, 2013, pp. 113-120.
6. Zubko A.I. *Sbornik tezisev "Nauchno-tekhnicheskii Kongress po dvigatelestroeniyu" (15-17 April 2014)*, Moscow, Dvigatel', 2014, part 2, pp. 57-59.

7. Zubko A.I., Dontsov S.N. *Trudy MAI*, 2014, no. 74, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=49296> (accessed 25.04.2014).
8. Zubko A., Kritsky V. *Materialy 29go kongressa Mezhdunarodnogo soveta po aeronavticheskim naukam (7-12 September 2014, St. Petersburg)*, available at: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papee/2014_0746_paper.pdf
9. Zubko A. *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, 2015, no. 1, pp. 97–109.
10. Zubko A.I. *Materialy Vserossiiskoi nauchno tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov "Novye tekhnologii i resheniya v gazoturbostroenii"*, Moscow, TsIAM, pp. 309-311.
11. Zubko A.I. *Materialy XII Vserossiiskoi konferentsii po problemam novykh tekhnologii, posvyashchennoi 70-letiyu Pobedy*, Moscow, RAN, 2015, pp. 57-64.
12. Zubko A.I., Semenova A.S. *II Vserossiiskaya ezhegodnaya nauchnaya konferentsiya "Aktual'nye problemy vooruzhennoi bor'by v vozdushno-kosmicheskoi sfere" (9-10 April 2015, Voronezh). Sbornik statei.* – Voronezh, VUNTs VVS, 2015, part V, pp. 63–69.