

## Система радиолокационной диагностики

А.С. Бажанов<sup>1</sup>, Я.О. Васильев<sup>1</sup>, С.В. Иода<sup>1</sup>, С.С. Некрасов<sup>2</sup>, В.И. Матвеев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГУП СКБ ИРЭ РАН, г. Фрязино, Московской области, площадь имени академика Б.А.Введенского, д.4. E-mail: [bajanov@sdbireras.ru](mailto:bajanov@sdbireras.ru)

<sup>2</sup> Филиал ОАО "НПО "Сатурн" НТЦ им. А. Льюльки

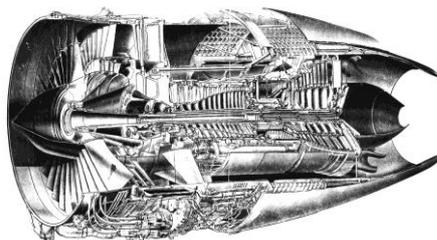
<sup>3</sup> НИИИИ МНПО «Спектр» г. Москва, улица Усачева, д. 35, стр.1. E-mail: [v.matveev98@yandex.ru](mailto:v.matveev98@yandex.ru)

*Предлагаются система дистанционной радиолокационной диагностики и разработанный радиолокационный датчик вибраций. Анализ измеренного спектра вибраций газотурбинных двигателей позволяет реализовать оперативный контроль состояния двигателя, определить конкретные дефекты при его испытаниях, обосновать продление моторесурса, перехода на обслуживание двигателей по их фактическому техническому состоянию, что значительно снижает экономические и технические затраты на эксплуатацию и ремонт и обеспечивает безопасность полета.*

*The system of remote radar diagnostics and the developed radar vibration sensor are offered. The analysis of the measured spectrum of vibration of gas turbine engines allows for operational control of the engine, to determine the specific defects in its tests, to justify the extension of the engine life, the transition to maintenance of engines according to their actual technical condition, which significantly reduces the economic and technical costs of operation and repair and ensures flight safety.*

### Введение

Состояние любого двигателя, в котором есть вращающиеся элементы, без его демонтажа и разборки может определяться только по величине его вибрации. Кроме того, объективное заключение о пригодности вновь изготовленного двигателя к эксплуатации на конкретном объекте может быть сделано только по результатам измерений его вибрации. Особенно это относится к авиационным двигателям, основной парк которых представлен газотурбинными двигателями (ГТД) (рис 1).



**Рис. 1. Газотурбинный двигатель.**

Методы и средства оценки технического состояния двигателей в процессе их работы предусматривают 3 основных направления анализа вибрации в интересах:

1. Контроля параметров вибрации;
2. Мониторинга технического состояния и прогнозирования;
3. Диагностирования с идентификацией места, вида и величины дефекта конкретного узла и детали двигателя.

Контроль (измерение) параметров вибрации обеспечивает высокую оперативность оценки технического состояния двигателя, определение величины отклонений параметров в пределах допустимых значений и выявление ориентировочного места возможных дефектов.

Мониторинг предусматривает периодический контроль в целях получения информации о тенденциях значений параметров вибраций во времени. Это позволяет делать прогноз исправной работы двигателя.

Вибродиагностика обеспечивает перевод показателей вибрации в конкретные дефекты составных элементов двигателя с определением характеристик этих дефектов. При этом должно использоваться множество данных о конструкции двигателя, а также о системах и агрегатах, входящих в его состав. Это накладывает ограничения на реализацию вибродиагностики в полевых условиях из-за отсутствия указанных выше достоверных данных, проблем с реализацией программного обеспечения, а также низкой оперативности определения дефекта и его характеристик.

Вибродиагностика, как правило, используется на предприятиях, которые изготавливают и ремонтируют двигатели, а также в научно-исследовательских и конструкторских центрах. Кроме того, для проведения вибродиагностики необходимо сложное программно-аппаратурное обеспечение и специально подготовленные высококвалифицированные специалисты. Для двигателей, находящихся в эксплуатации, вибродиагностика проводится на основе оперативного контроля параметров вибрации, в процессе которого определяется необходимость более детального анализа, возможного ремонта или перевода авиационных ГТД в категорию наземного использования.

В этой связи, постоянный оперативный контроль параметров вибрации, имеет исключительное значение для обеспечения безопасности полета и обоснованного продления моторесурса ГТД. Внедрение оперативного контроля вибрации дает возможность для перехода на обслуживание двигателей по их фактическому техническому состоянию, что значительно снижает экономические и технические затраты на эксплуатацию и ремонт ГТД.

До настоящего времени основными методами контроля вибрации остаются контактные способы, предусматривающие установку специальных датчиков на различных участках поверхности ГТД. Наиболее широкое применение получили акселерометры, измеряющие параметры виброскорости. Контактный метод имеет низкую оперативность и связан с трудоемким процессом установки датчиков и съема информации. По этим причинам в полевых условиях метод имеет ограниченное применение.

В данном докладе приведены результаты работы по применению разработанного бесконтактного, дистанционного радиолокационного датчика вибрации для использования в системе радиолокационной диагностики ГТД и летательных аппаратов.

### **Постановка задачи**

Основными параметрами вибрации, как известно, являются: вибросмещение ( $s$ ), виброскорость ( $v$ ), виброускорение ( $a$ ). Вибрация составных элементов ГТД происходит на различных частотах в диапазоне от единиц до нескольких сотен Гц.

Для оперативной оценки состояния авиационных ГТД ГОСТ России № 26382-84 определяет:

- источники возбуждения вибрации;
- предельно допустимые уровни вибрации;
- общие требования к контролю вибрации.

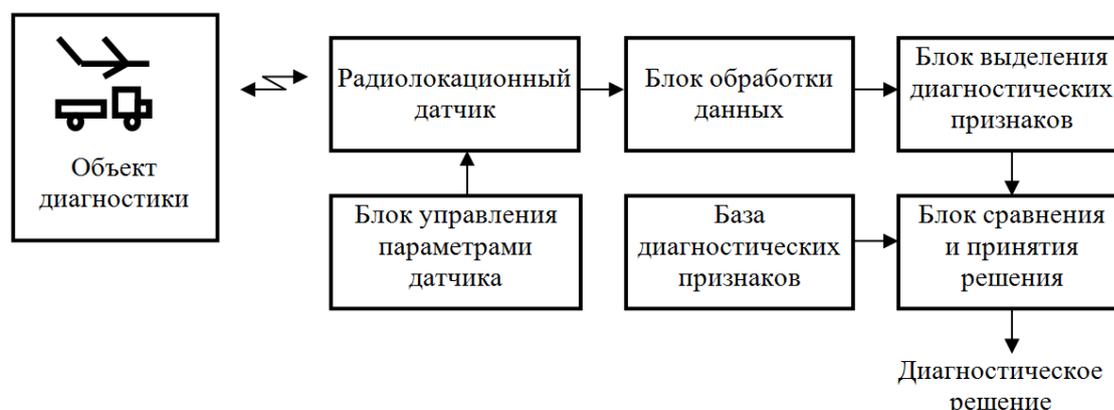
В соответствии с этим ГОСТом если один из измеренных параметров вибрации превышает допустимое значение, то ГТД должен пройти в специализированной организации либо вибродиагностику, либо двигатель может быть переведен в категорию наземного использования в соответствии с ГОСТ Р 52526-2006. К числу основных источников возбуждения вибрации двигателя относятся неуравновешенность и несоосность роторов двигателя, биения подшипников на цапфах роторов, колебательные процессы в проточной части двигателя, массовую неуравновешенность вращающихся элементов в агрегатах, вибрация лопаток турбин и др.

Допустимый уровень вибрации двигателя в местах крепления агрегатов установлен в диапазоне частот вибрации от 5 до 2000 Гц. На установившихся режимах максимальная амплитуда величин вибрации нового и прошедшего капитальный ремонт двигателя не должна превышать значений, указанных в табл. 1.

**Таблица 1**

Диапазон частот вибрации двигателя $f$ , Гц	Допустимая амплитуда		
	виброперемещение, м	виброскорости, м/с	виброускорения, $m/c^2$
От 20 до 57	$7,162 \cdot 10^{-3} \cdot 1/f$	$45 \cdot 10^{-3}$	$0,283 \cdot f$
От 57 до 85	$0,4053 \cdot 1/f^2$	$2,546 \cdot 1/f$	16
От 85 до 637	$4,775 \cdot 10^{-3} \cdot 1/f$	$30 \cdot 10^{-3}$	$0,188 \cdot f$
От 637 до 2000	$3,04 \cdot 1/f^2$	$19,1 \cdot 1/f$	120

Во ФГУП СКБ ИРЭ РАН была проведена работа по созданию системы радиолокационной диагностики (рис. 2) с участием сотрудников предприятий Филиала ОАО «НПО «Сатурн»» НТЦ им. А. Люльки, НИИИИ МНПО «Спектр».



**Рис. 2. Система радиолокационной диагностики.**

Радиолокационный датчик обеспечивает облучение радиосигналом поверхности объекта диагностики, прием отраженного сигнала, усиление, фильтрацию от помех и преобразование его в цифровую форму и формирование файла данных для передачи его по интерфейсу в Блок обработки данных. В Блоке обработки данных определяется спектр отраженного сигнала. В соответствии с полученным спектром в Блоке выделения диагностических признаков формируется пакет данных, которые сравниваются в Блоке сравнения и принятия решения с данными поступающими из Базы диагностических признаков. На основе сравнения выносятся решение о наличии дефектов в конкретных узлах и их допустимых величинах.

### Радиолокационный датчик

Для определения вибраций в основу построения радиолокационного датчика был взят метод определения вибросмещений по фазе отраженного сигнала, который поясняется рисунком 3.



Рис. 3. Определение вибросмещений по фазе отраженного сигнала.

Разность фаз  $\Delta\varphi$  сигналов излученной и отраженной волн зависит от длины  $\lambda$  сигнала и связана с расстоянием  $X$  до поверхности объекта соотношением:  $\Delta\varphi = 4\pi X/\lambda$ . Таким образом, при разработке радиолокационного датчика, должны быть приняты следующие требования: высокая частота сигнала (малая длина волны) для обеспечения высокой чувствительности по изменению расстояния. и возможности облучения малой площади на поверхности объекта; наличие в составе датчика квадратурного фазового детектора.

Разработанный датчик собран по схеме, изображенной на рисунке 4.

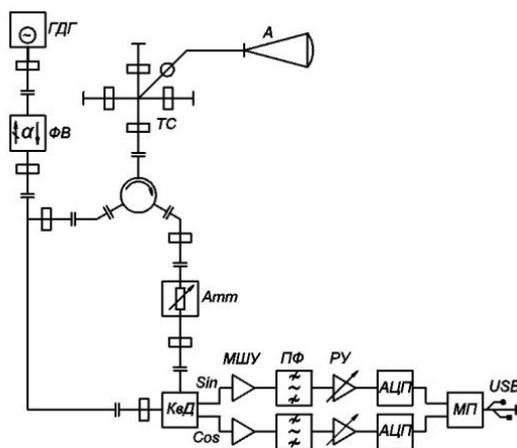
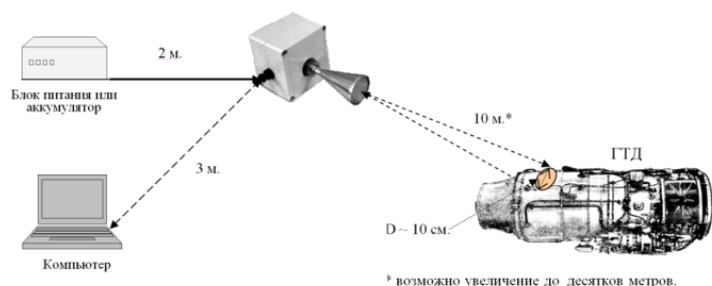


Рис. 4. Схема радиолокационного датчика.

Радиолокационный датчик состоит из генератора на диоде Ганна (ГДГ) с частотой сигнала 37 ГГц. Через развязывающий вентиль (ФВ) часть сигнала поступает на циркулятор, вторая часть используется, как опорный сигнал для квадратурного детектора (КвД). Со второго выхода циркулятора сигнал поступает на турникетное соединение (ТС), которое преобразует линейную поляризацию в круговую. С выхода турникетного соединения сигнал поступает на рупорно-линзовую антенну (А) и излучается в сторону объекта. Отраженный сигнал, фаза которого промодулирована за счет вибрации поверхности принимается той же антенной и через турникетное соединение и циркулятор поступает для регулировки уровня принятого сигнала на переменный аттенюатор (Атт). С выхода аттенюатора сигнал поступает на квадратурный детектор, на выходах которого формируются напряжения пропорциональные амплитуде отраженного от объекта сигнала и синуса или косинуса разности фаз между излученным и принятым сигналом -  $P_{отр}\sin\Delta\varphi$  и  $P_{отр}\cos\Delta\varphi$ . Эти

сигналы усиливаются двухканальным малошумящим усилителем (МШУ), проходят через полосовые фильтры (ПФ) для улучшения помехозащищенности, усиливаются в усилителях с регулируемым коэффициентом усиления (РУ) и поступают на аналого-цифровые преобразователи (АЦП) для преобразования их в цифровую форму. Преобразованные сигналы обрабатываются по заданному алгоритму в микропроцессоре (МП), определяется их спектр. Временной график сигнала и его спектр выводятся по интерфейсу на компьютер типа Notebook.

Внешний вид изготовленного датчика изображен на рисунке 5.



**Рис. 5. Внешний вид датчика при эксплуатации.**

Параметры Радиолокационного датчика приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2.

Наименование/значение	
Разрешающая способность по виброперемещению	0,1мкм
Частотный диапазон измерения вибраций	0...25000 Гц
Рабочая частота зондирования	37 ГГц
Выходная мощность зондирования	≤ 10 мВт
Интерфейсы цифровые:	USB
Допустимый диапазон расстояний до объекта	1,25...10 м
Диаметр пятна засветки	0,12...0,4 м *
Напряжение питания	220 В 50 Гц или =12 В
Потребляемая мощность, не более	15 Вт
Габариты датчика	110 x 60 x 50 мм
Масса датчика	Не более 800 г

Таблица 3.

Диапазон контролируемых частот, Гц	Измеряемые параметры	Диапазон измерений параметров
10÷100	Вибросмещение, м	$1/f^3$
	Виброскорость м/с	$6/f^2$
	Виброускорение м/с <sup>2</sup>	$36/f$
100÷1000	Вибросмещение, м	$10^{-2} \cdot 1/f^2$
	Виброскорость м/с	$6 \cdot 10^{-2} \cdot 1/f$
	Виброускорение м/с <sup>2</sup>	$3,6 \cdot 10^{-1}$
1000÷10000	Вибросмещение, м	$10^{-8}$
	Виброскорость м/с	$6 \cdot 10^{-5}$
	Виброускорение м/с <sup>2</sup>	$3,6 \cdot 10^{-1}$
	Число оборотов об/мин	600-60000

Радиолокационный датчик прошел апробацию на компрессорах и турбинах авиационных двигателей Филиала ОАО "НПО "Сатурн" НТЦ им. А. Люльки, Чебоксарской Газокомпрессорной станции и авиамоторном предприятии г.Шеньян КНР.

На рисунках 6 и 7 приведены результаты испытания датчика

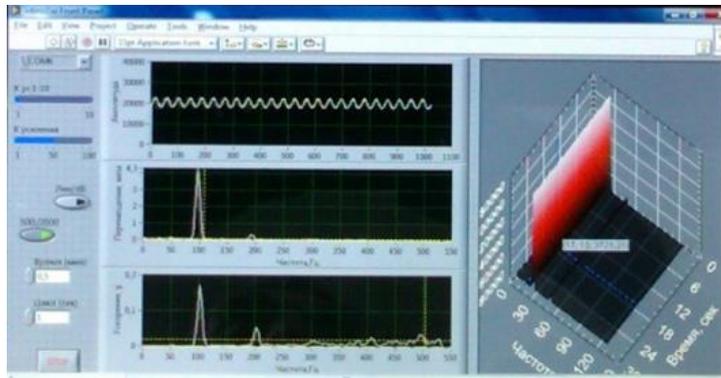


Рис. 6. Временной график и спектр сигнала полученные при испытаниях датчика.

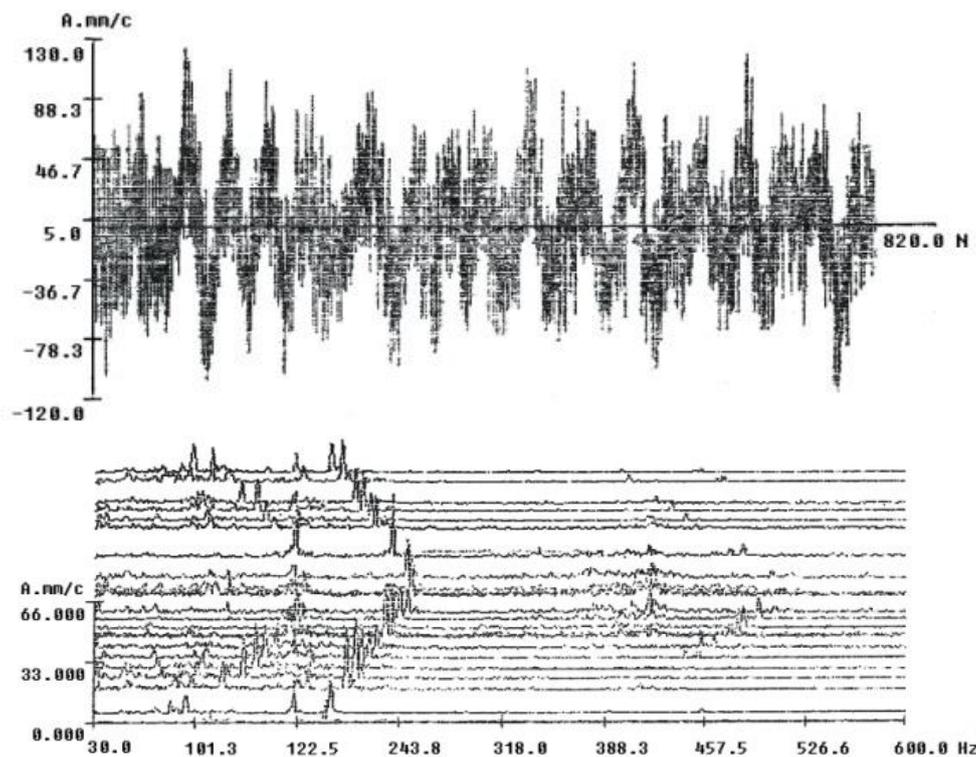


Рис. 7. Временной график и спектр сигнала, полученные при увеличении и уменьшении частоты вращения газотурбинного двигателя.

В процессе работы прорабатывался вариант использования короткоимпульсного амплитудно-модулированного сигнала и фазированной антенной решетки для получения двумерного изображения вибропортрета исследуемых объектов, типа самолета, работающего на малом газу перед взлетом.

### Разработка базы диагностических признаков дефектов

В Филиале ОАО "НПО "Сатурн" НТЦ им. А. Люльки была проведена работа по разработке базы диагностических признаков дефектов деталей и узлов газотурбинного двигателя.

Вибрация, обусловленная неуравновешенностью роторов, практически всегда имеет в качестве одной из составляющих первую роторную гармонику, частота которой равна частоте вращения ротора.

Вибрация, обусловленная дефектами подшипников скольжения может иметь протяженный спектр с гармониками, кратными частоте вращения ротора.

Дефекты подшипников качения, редукторов могут иметь протяженные спектры с гармониками некратными частоте вращения ротора. Резонансные частоты этих элементов равны произведению числа оборотов двигателя на число зубьев, число вращающихся элементов подшипника.

Другим источником вибрации являются аэродинамические факторы. Основные источники этой вибрации вентилятор, компрессор, турбина. Из-за рассеяния размеров различных лопаток одной ступени силы, действующие на них, оказываются различными. При этом величина резонансной частоты равна произведению частоты вращения ротора на число лопаток.

При анализе спектра вибросигнала определяют пик спектра на частоте вращения вала (1X); это "первая гармоника частоты вращения вала. При анализе спектров вибрации двигателя с несколькими валами, определяются пики на каждой частоте вращения валов, рис. 8.

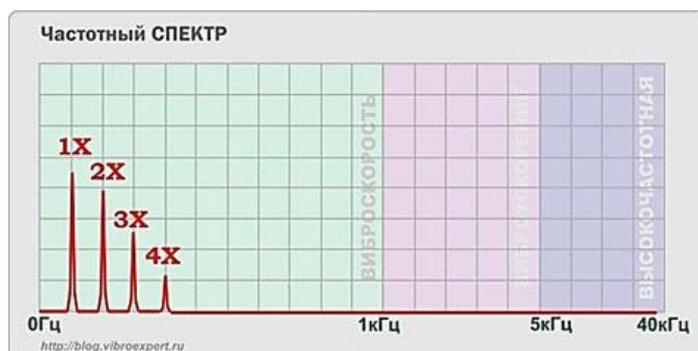


Рис. 8.

Если амплитуда пиков на частоте вращения (1X) доминирует над остальными, то можно предположить, что ее рост связан с дисбалансом (если проявляется в радиальном направлении), дисбалансом консольного ротора (если проявляется в осевом направлении), несносностью валов (если проявляется в осевом направлении), изгибом вала (если проявляется в радиальном направлении), эксцентриситетом ротора (если проявляется в радиальном направлении), гибким или ослабленным основанием (если проявляется в горизонтальном направлении), а также возможно связан резонансом (как правило, в одном направлении - горизонтальном или вертикальном).

Если наблюдаются в спектре гармоники кратные частоте вращения машины 2X, 3X, и 4X, то это может быть связано с несносностью валов (или перекосом подшипника).

Наличие в спектре вибрации дополнительных гармоник, можно связать с износом узла или детали, а если еще наблюдается поднятие уровня шумов, то это связано с ослаблением этих деталей.

Анализируя спектр вибросигнала, определяется какие пики кратные скорости вращения (например, 6X, 15X, 48X скорости вращения), пики которые не являются синхронными, пики которые являются субгармониками (т.е. менее 1X, но кратные ей,

например,  $1/2 X$ ,  $1/3 X$ , и т.д.) и которые субнесинхронные (т.е. менее  $1X$ , но числитель не кратный целому числу, например,  $0.48X$ ,  $0.76 X$  и т.д.)

Синхронные: обычно вибрация связана с вращающимися деталями, которые могут быть вызваны дефектами связанными с потоком жидкости, воздуха (гармоники кратные количеству лопаток насоса, лопастей вентилятора, лопаток компрессора и т.д.), дефектами механических передач (пик на частоте зубчатого зацепления).

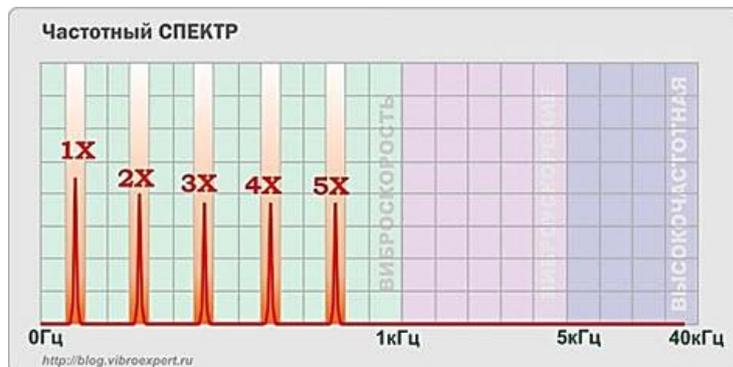


Рис. 9.

Субсинхронные и субнесинхронные: обычно наблюдаются при турбулентности (широкий пик), повреждения обоймы подшипника качения, «масляный Вихрь» в подшипнике скольжения или вибрации, передающиеся от другого двигателя.

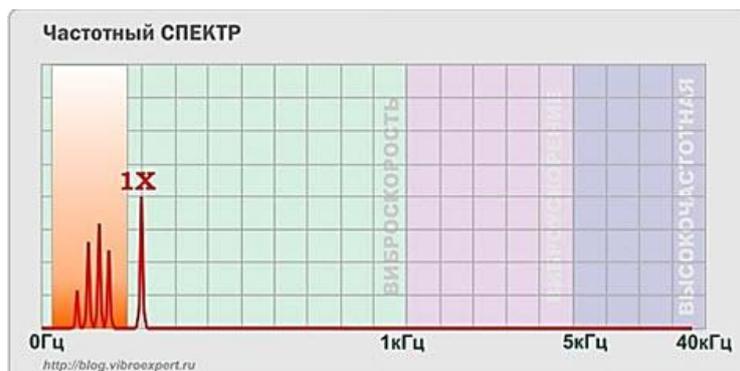


Рис. 10.

Несинхронная: Подозрение на повреждение подшипника качения (ожидается подшипниковая частота и боковые полосы с частотой  $1X$ ) или внешнего источника вибрации. Также может быть связано с другими сочетаниями частот.

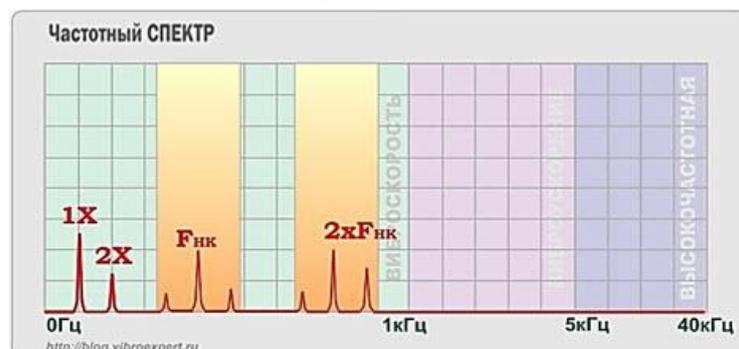


Рис.11.

Гармоники и боковые полосы: Наличие обоих типов пиков амплитуд – это ключ к определенному типу повреждения



Рис. 12.

Если амплитуда гармоник с ростом номера уменьшается, то наблюдается «нелинейная» вибрация, уровень боковых полос неодинаков, это может быть связано с ограничением вращения (задевания).

Сильно выраженные гармоники: наблюдаются повреждения вследствие ударных воздействий (повреждение подшипников, повреждение зубчатых передач и т.д.).

### Заключение

Предложенная структура системы радиолокационной диагностики, разработанный радиолокационный датчик вибраций, анализ спектра вибраций при различных дефектах газотурбинных двигателей позволяют сделать вывод о возможности реализации оперативного контроля состояния двигателя, для обеспечения безопасности полета, обоснованного продления моторесурса, перехода на обслуживание двигателей по их фактическому техническому состоянию, что значительно снижает экономические и технические затраты на эксплуатацию и ремонт.

### Литература

1. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов М. Энергоатомиздат, 1989.
2. Матвеев В.И. Радиоволновой контроль: учеб. пособие /под общ. ред. В.В. Клюева. М. Издательский дом «Спектр», 2011.