

УДК 621.45.00.11

В.Б. КОРОТКОВ, Д.А. ИОНОВ

ФГУП ММПП «Салют», Москва, Россия

КОНТРОЛЬ ВИБРОСОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЯ МАНЕВРЕННОГО САМОЛЕТА

Характерной особенностью двигателей маневренных самолётов является частая смена режимов от малого газа до форсажного. Для такой сложной ситуации решена задача контроля вибросостояния двигателя при его работе на земле и в полёте. Распознавание нештатной ситуации выполняется в полёте и на земле несколькими методами: контролем за непревышением предельного значения виброскорости, краткосрочным тренд-анализом текущих значений виброскорости на кратковременных установившихся режимах работы двигателя, контролем за отклонениями текущих значений виброскорости от базовых зависимостей, снятых на земле и в полёте при поступлении двигателя в эксплуатацию. (Предложен метод выделения зон работы двигателя, подозрительных с точки зрения появления неисправности).

техническое состояние, газотурбинный двигатель, диагностика, виброскорость

Введение

Известно, что эффективная эксплуатация авиационных двигателей и повышение безопасности полётов во многом зависит от возможностей автоматизированных систем контроля и диагностирования их технического состояния. В России успешно эксплуатируется целый ряд таких систем, предназначенных для двигателей, установленных на больших гражданских самолётах. Но для двигателей маневренных самолётов систем, которые бы в таком объёме, как системы гражданских самолётов, оценивали текущее техническое состояние двигателей, не существует.

Изложение материалов исследования

В настоящее время в опытном агрегатном конструкторском бюро «ТЕМП» федерального предприятия «САЛЮТ» разрабатывается система контроля и диагностирования технического состояния для двигателя маневренного самолёта. Система определяет техническое состояние двигателя и вырабатывает рекомендации в минимальном объёме лётчику для успешного завершения полёта и в полном объёме для наземного обслуживающего персонала.

Разрабатываемая система предусматривает как обычный набор функций контроля (допусковый

контроль, тренд – анализ, прогнозирование поведения параметров всех систем и узлов двигателя), так и по данным измерений рассчитывает текущие характеристики основных узлов двигателя с целью обеспечения его эксплуатации по фактическому техническому состоянию.

Составной частью этой системы, во многом определяющей безопасность полёта, является блок контроля вибросостояния двигателя, описанию которого посвящена настоящая работа.

Методическое обеспечение контроля вибросостояния двигателя разрабатывалось с учётом опыта эксплуатации отечественных систем контроля и диагностирования авиационных двигателей, опыта, накопленного на предприятии «САЛЮТ», и характерной особенности эксплуатации двигателя маневренного самолёта в полёте – частой (почти непрерывной) сменой режимов его работы в довольно широких пределах (от малого газа до форсажа).

Основное назначение блока контроля вибросостояния – распознавание неисправностей, вызывающих изменение этого состояния, на ранней стадии их развития, и своевременная выдача рекомендаций лётчику в случае, если текущее вибросостояние требует принятия мер по изменению режима работы двигателя, а также формирование информации для обслуживающего персонала.

Исходными данными для сравнения являются две базовые зависимости виброскорости от частоты вращения ротора высокого давления двигателя. Первая базовая зависимость снимается на земле после установки двигателя в самолёт, для построе-

ния второй используются данные, зарегистрированные в первых трёх полётах.

Использование двух базовых зависимостей обусловливается существенными отличиями в нагрузках на самолёт на земле и в полёте (рис. 1).

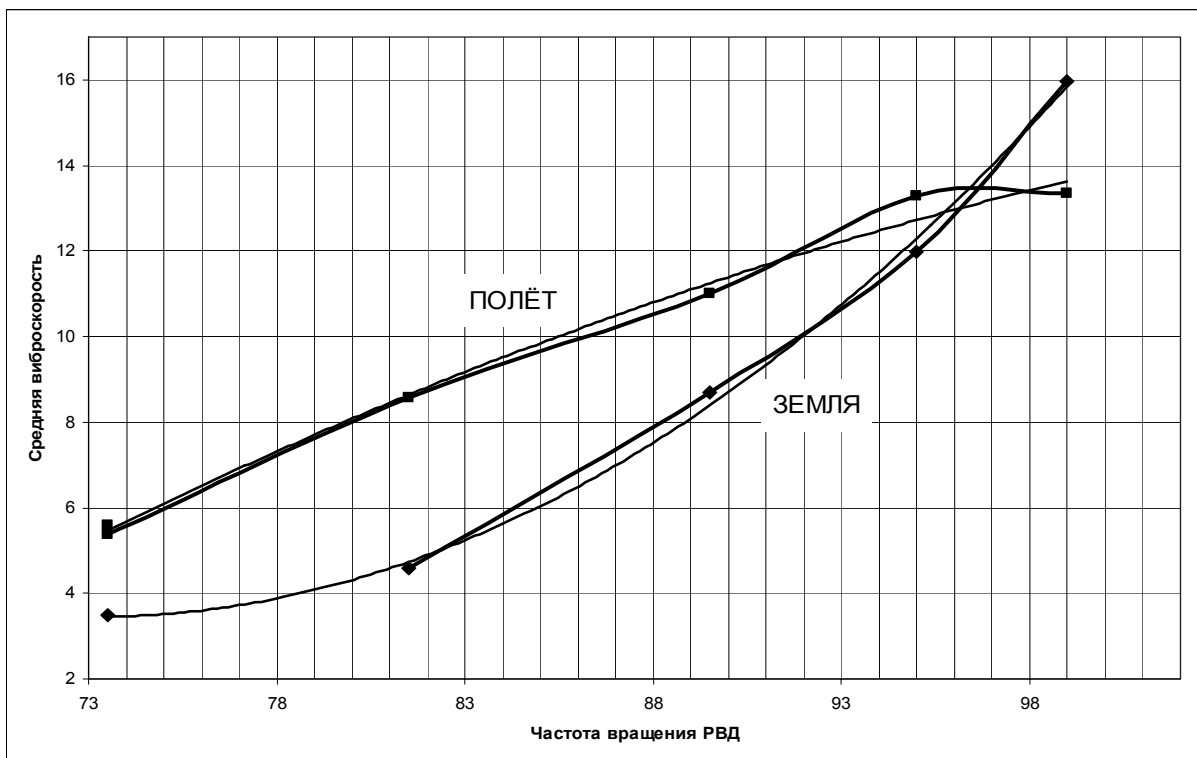


Рис.1. Базовые зависимости виброскорости (полетная и земная).

Накопление данных и аппроксимация базовых зависимостей выполняется автоматически на борту. Данные измерений аппроксимируются полиномами первого – третьего порядков. Степень полинома зависит от индивидуальных особенностей двигателей. Оптимальным полиномом является полином, имеющий наименьшее среднее квадратическое отклонение, причём более высокая степень полинома выбирается, если этот полином существенно понижает дисперсию аппроксимации по сравнению с полиномом с более низкой степенью (критерий Фишера).

В процессе работы двигателя в полёте и на земле с базовыми зависимостями ежесекундно сравниваются скользящие средние значения виброскорости.

Осреднение ведётся по 3 секундам работы двигателя для уменьшения влияния случайности. Для детального анализа выходов отклонения вибрации от базового значения система формирует необходимую информацию о параметрах двигателя за 10 секунд до события и до времени понижения вибрации.

Помимо контроля отклонений виброскорости от базовых зависимостей в блоке контроля вибросостояния двигателя используются краткосрочные (внутри полёта) и долгосрочные (за серию полётов) тренды отклонений виброскоростей, и контроль за непревышением предельной допустимой величины виброскорости.

Система отслеживает превышение предельной допустимой величины виброскорости на всех режи-

мах работы двигателя: переходных и установившихся, простым сравнением текущего значения вибрации с предельным значением. Как и в случае повышенного отклонения виброскорости от базовой характеристики, здесь формируется вся необходимая информация для анализа на земле и рекомендация лётчику по изменению режима работы двигателя [1].

Краткосрочные тренды виброскорости контролируются в процессе полёта только на установившихся режимах работы двигателя. Подсчитывается модуль суммы разностей последующих и предыдущих величин виброскоростей за определённый интервал времени и сравнивается с допустимой величиной. При удовлетворительном сравнении система переходит к следующему интервалу времени.

В последующем краткосрочный тренд-анализ предполагается усложнить. Ряд значений виброскорости в определённом промежутке времени должен аппроксимироваться линейной зависимостью. В случае значимости линейного коэффициента его величина укажет на скорость изменения виброскорости с хорошей нивелировкой случайно выпавших значений.

Долгосрочный тренд используется при анализе отклонений виброскорости от базовой характеристики. Метод определения аналогичен предыдущему методу тренд анализа с использованием линейной зависимости.

Иногда, уже в процессе развития неисправности, может возникнуть ситуация, когда изменение вибросостояния двигателя началось, но применяемая система допустимых значений ещё не позволяет установить этого факта [2]. При автоматизированной обработке информации для выделения временных зон, в которых возможно появление неисправностей, предлагается новый метод непрерывного отслеживания за скользящим коэффициентом корреляции между частотой вращения ротора высокого давления и виброскоростью.

В целом изменение коэффициента корреляции от полёта к полёту несёт мало информации. Полёты

с мало изменяемыми режимами работы двигателя дадут малое значение коэффициента корреляции. Так же мало отразится на коэффициенте корреляции, вычисленном за весь полёт, неисправность, проявившаяся в малом промежутке времени. Чтобы не пропустить такую неисправность, необходимо подобрать такую величину выборок виброскорости и частоты вращения ротора высокого давления, чтобы имевшее место изменение коэффициента корреляции между этими выборками при возникновении неисправности достаточно надёжно указывало на её наличие и время её появления.

При большом объёме информации, а значит, потребности большого времени для её просмотра, участки полёта с большим отрицательным коэффициентом корреляции, укажут на промежутки времени, в которых могла возникнуть неисправность.

Алгоритм определения «подозрительных» зон с отрицательными коэффициентами корреляции ниже критического уровня описан ниже.

После набора n измерений каждого из двух параметров (виброскорости и частоты вращения ротора высокого давления) формируется первая выборка параметров $1, 2, \dots, n$, после набора $n + 1$ измерений формируется вторая выборка $2, 3, \dots, (n + 1)$, после набора $n + 2$ – третья выборка $3, 4, 5, \dots, n + 2$ и т.д.... В каждой выборке определяется коэффициент корреляции между параметрами. При отрицательном коэффициенте корреляции проводится сравнение его с критическим уровнем. При выполнении неравенства $r > r_{1-\frac{P}{2}}$ три раза подряд и более формируется диагностическое сообщение «Зона возможной неисправности» с указанием времени (начала и конца) существования события.

Величина n определяется опытным путём для каждого типа двигателя. С целью предварительной оценки возможной величины n для одного из двигателей, находящихся в эксплуатации, вычислены коэффициенты корреляции (не скользящие, как требует алгоритм), а в выборках по 100, 50 и 30 измере-

ний, следующих одна за другой. Наиболее чувствителен к изменению оказался коэффициент корреляции, вычисленный по выборке из 30 измерений.

На графике, построенном по реальным полётным данным серийного двигателя (рис. 2), отмеча-

ется зона (в правой части графика), в которой виброскорость резко уменьшается с 17 до 6 мм/с при увеличении режима работы двигателя (с 85 до 97%).

В этой зоне коэффициент корреляции принимает отрицательное значение.

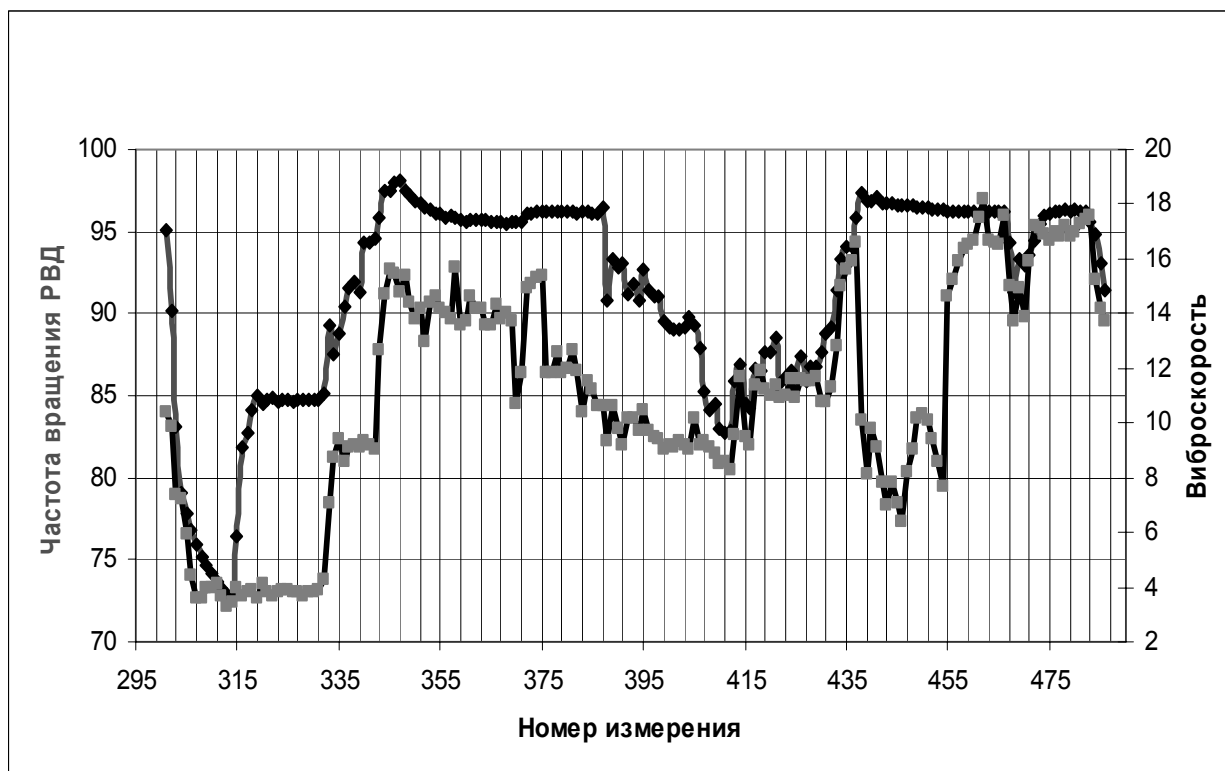


Рис.2. Изменение виброскорости и частоты вращения по времени полета

Выводы

В заключение следует отметить, что представленные алгоритмы оценки текущего вибросостояния двигателя ориентированы на существующую систему измерений конкретного двигателя. Увеличение числа датчиков измерения виброскорости позволит расширить возможности системы, в частности, использовать корреляционный анализ между виброскоростями, измеряемыми этими датчиками.

Литература

1. Автоматизированная система управления процессом испытаний ГТД на стендах ОКБ серийных и

ремонтных заводах / В.Буковский, Г.В. Добрянский, Д. Барышников, Г. Полетов // Двигатель: – 2002. – № 4. – С. 6-8.

2. Новиков А.С., Пайкин А.Г., Сиротин Н.Н. Контроль и диагностика технического состояния газотурбинных двигателей. – М.: Наука, 2007. – 467 с.

Поступила в редакцию 20.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Зазулов, ФГУП ММП «Салют», Москва, Россия.