

УДК 629.7.03.018

Б.Б. КОРОВИН<sup>1</sup>, Т.П. ГРЫЗЛОВА<sup>2</sup>, О.Н. БЫЛИНКИНА<sup>1</sup><sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие РФ  
«Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Жуковский, Россия<sup>2</sup>Рыбинская государственная авиационная технологическая  
академия им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия

## АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ МНОГОВАЛЬНОГО ГТД НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СЛОЖНОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ ЕГО ВАЛОВ

На основе спектрального анализа реальных вибропроцессов многовального ГТД выбран диагностический признак потери соосности его валов. Рассмотрены алгоритмы контроля состояния роторных систем применительно к выявлению указанного признака. Традиционный алгоритм строится на использовании узкополосной цифровой фильтрации заданных кратнороторных составляющих вибропроцесса. Предпринята попытка получения алгоритмов контроля, в основе которых лежит модель сложного источника, формализованная методами математической теории проектирования вычислительных систем. Показано, что полученные таким способом алгоритмы могут быть эффективно использованы для контроля состояния роторов в реальном времени. Обсуждены достоинства и перспективы применения алгоритмов анализа системы роторов по характеристикам и кодам полуоволн.

**Ключевые слова:** турбовинтовентиляторный двигатель (ТВВД), диагностический признак, сложный источник, винтовентилятор, распознавание последовательности, распознавание состояний, вибропроцесс, спектр, гармоника, полуоволны, контроль, реальное время.

### Введение

Контроль и диагностика состояния роторных систем по вибросигналу получили широкое распространение в двигателестроении [1, 2]. Поэтому разработка и совершенствование алгоритмов такого контроля в реальном времени, адаптированных к современным методам и средствам обработки сигналов, не теряет своей актуальности. Настоящая публикация посвящена синтезу алгоритма виброконтроля состояния роторной системы по известному диагностическому признаку на основе применения к вибросигналам, составляющим обучающую последовательность, методов временного анализа, предложенных для решения формализованной задачи распознавания последовательности состояний сложного источника [3, 4].

**Формулирование проблемы и методы ее решения.** При анализе материалов вибрографирования демонстрационного ТВВД большой размерности и сверхбольшой степени двухконтурности с закапотированным биротативным винтовентилятором было выявлено кратковременное нарушение соосности валов ротора высокого (РВД) и низкого (РНД) давления двигателя [5, 6]. Это нарушение было обнаружено по вибросигналам, замеренным на редукторе, и наблюдалось на проходных режимах работы

двигателя, соответствующих критическим оборотам вала ротора высокого давления ( $N_{\text{РВД}} = 94\%$ ). Оно проявлялось в большей интенсивности составляющей вибрации РВД2 (с частотой второй кратности к частоте вращения ротора высокого давления), нежели интенсивность роторной составляющей РВД.

Указанное явление иллюстрируется рис. 1, на котором показана диаграмма Кемпбелла, полученная для вибропроцессов, измеренных на редукторе. Вибрации двигателя при расчете диаграммы оценивались в полосе частот 10...10000 Гц.

При идентификации источников колебаний использовался спектральный анализ вибропроцессов с разрешением 1Гц и частотная модель трехвального двигателя, включающая в себя также два ротора разноразворачивающихся колес винтовентилятора в капоте и более мелкие ротора агрегатов, входящих в кинематическую схему двигателя.

Цель настоящей работы – разработка алгоритмов контроля состояния роторной системы с использованием вышеуказанного диагностического признака потери соосности валов, когда выполняется соотношение

$$A_{\text{РВД2}}/A_{\text{РВД}} \geq 1, \quad (1)$$

где  $A$  – интенсивность вибропроцесса.

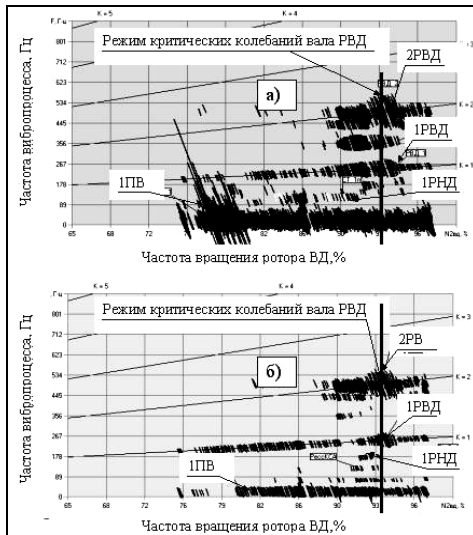


Рис. 1. Амплитудно-частотные диаграммы вибраций двигателя, замеренных в районе редуктора при его наземном опробовании: а –  $V_{ред} Z_{шт}$ ; б –  $V_{ред} Y$

При разработке алгоритмов, наряду с использованием традиционного подхода, основанного на процедурах следающей фильтрации заведомо известных кратнороторных составляющих вибропроцесса, решалась задача получения требуемого алгоритма на основе применения к вибросигналам, составляющим обучающую последовательность, методов временного анализа полуволн, предложенных для решения формализованной задачи распознавания последовательности состояний сложного источника [3, 4].

Главными преимуществами оцениваемого подхода служат минимальные ограничения к анализируемому сигналу в части его стационарности, случайности и длительности. В основе подхода лежит принцип повторяемости элементов сигнала и общности законов формирования объектов одного класса. При этом элементарные сигналы могут быть сильно вариативными, а законы их формирования сложными и неизвестными [4].

Именно с сигналами подобного вида нередко приходится сталкиваться в практике вибрационной диагностики и виброконтроля авиационных ГТД, когда известные модели источников – комбинаторные, вероятностные, стационарные и составные [3], [4] не отражают реальной сложности исследуемых объектов. Это приводит к ограничениям применения классических методов спектрального, корреляционного или авторегрессионного анализа.

## 1. Решение проблемы

### 1.1. Разработка алгоритма контроля при традиционном подходе

Из рассмотрения модифицированной диаграммы Кемпбелла, иллюстрирующей интенсивность

всех составляющих вибропроцесса с указанием роторных источников колебаний в рабочем диапазоне режимов работы двигателя, видна насыщенность спектра вибросигнала соизмеримыми по мощности составляющими на контролируемом режиме, соответствующем условию  $A_{рвд2}/A_{рвд} \geq 1$ , который наблюдается при  $N_{вд} = 90...94\%$ .

Полагая, что отклонение в соосности валов может быть вызвано не только критическими оборотами одного из роторов, оставим без внимания ограничение, связанное с режимом их проявления при критических оборотах РВД. В этом случае алгоритм контроля должен включать в себя следующие основные процедуры.

1. Выбор в качестве центральных частот узкополосных следающих фильтров частоты РВД и РВД2.

2. Следающую фильтрацию вибросигнала в полосе частот  $f_{рвд} \pm \delta f_1$  и  $f_{рвд2} \pm \delta f_2$  с определением интенсивности  $A_{рвд2}$  и  $A_{рвд}$  на одинаковых фиксированных временных интервалах.

3. Определение отношения  $A_{рвд2}/A_{рвд}$ .

4. Сравнение значения полученного в п.3. отношения с 1,0.

5. Выдача сигнала на индикатор, когда

$$A_{рвд2}/A_{рвд} \geq 1^*$$

Значения  $\delta f_1$  и  $\delta f_2$  выбираются из условий близости значимых составляющих реального спектра по частоте к частотам  $f_{рвд}$  и  $f_{рвд2}$  и обеспечения заданной погрешности воспроизведения сигнала при требуемой скорости перестройки фильтра, определяемой переходными процессами в ГТД.

\* Граничное соотношение  $A_{рвд2}/A_{рвд}$  может быть назначено и меньшим 1,0 в зависимости от опасности потери соосности валов для конкретной конструкции многороторного ГТД.

Вышеуказанный алгоритм контроля может быть реализован в цифровом и аналоговом исполнении. В любом случае потребуются достаточно серьезные временные и финансовые затраты на разработку и изготовление фильтров с характеристиками, которые в состоянии обеспечить эффективную процедуру контроля [1, 2], что невозможно без наличия адекватной модели вибросигнала в эксплуатационных условиях работы контролируемого ГТД.

### 1.2. Краткая характеристика метода анализа состояния сложного источника

Предлагаемый метод анализа использует информацию, заключенную в характеристиках полуволн и их последовательностей, привязанную к последовательности моментов времени пересечения сигналом нулевого уровня. Главное достоинство метода состоит в том, что он базируется на простых и быстрых алгоритмах вычисления нестационарных

функционалов от временных характеристик сигналов, которые могут быть информативнее, чем распространенные функционалы от амплитудных характеристик. Основные положения метода заключаются в следующем.

В отличие от анализа Фурье для временного анализа не выдвигается предположение о стационарности сигнала на интервале анализа. Короткие временные окна  $\beta$ , используемые для вычисления функционала  $\Phi_3(t, \beta)$  – среднего значения квадрата приращения расстояния между кодами полуволн в зависимости от дискретного времени или номера отсчета  $t$ , можно подобрать при обучении. Также при обучении выбирается тип используемого для анализа функционала:  $\Phi_3(t, \beta)$ ,  $\Phi_2(t)$ ,  $\Phi_1(t)$  и (или) непосредственно длины полуволн  $\text{THW}^+(t)$  либо их параметры – среднее  $\text{MHW}^+(t)$ , дисперсия  $\text{DHW}^+(t)$ , код  $\text{CHW}^+(t)$ . Функционал  $\Phi_1(t)$  представляет собой расстояние по Хеммингу между двоичными кодами полуволн. Функционал  $\Phi_2(t)$  представляет собой квадрат приращения функционала  $\Phi_1(t)$ . Алгоритмы вычисления приведены в [3, 4].

Процедуры анализа и синтеза метода анализа включают в себя три основных этапа. На первом этапе выявляются пересечения нулевого уровня  $t_{0_i}, t_{1_i}$  в положительном и в отрицательном направлениях, соответственно. Индекс меняется в реальном времени при обнаружении очередного перехода. На втором этапе выделяется полуволна как фрагмент сигнала  $s_{t_{0_i}}^{t_{1_i}} = \text{HW}_i^+$ .

Третий этап *синтеза* состоит в выборе правил принятия решения или обучения. Обработка на этом этапе зависит от целей и может включать в себя сегментацию, обучение распознаванию сегментов, обнаружение нарушений однородности процесса. Наиболее значимым является формирование правил принятия решения о существенном изменении сигналов или смене состояния источника, а также обучение распознаванию состояния источника.

Третий этап *анализа* сигналов (использование алгоритмов контроля) заключается в вычислениях выбранных на этапе синтеза функционалов, проверке необходимых условий и принятии решения.

### 1.3. Методика получения и апробации алгоритма контроля состояния ГТД с использованием модели сложного источника

Имея достоверный диагностический признак потери соосности валов трехвального ГТД, попробуем получить алгоритм контроля потери этой соосности нетрадиционным методом, основанным на использовании модели сложного источника. Для этого воспользуемся программной реализацией ме-

тода автоматизированного анализа последовательности состояния такого источника согласно [3, 4].

В качестве указанного источника будем оценивать располагаемые записи вибросигналов, полученных на реальном двигателе.

Вибрации двигателя, для которого разрабатывался алгоритм контроля несоосности валов, оценивались в штатных местах по оси  $Z$  на редукторе, передней опоре и в плоскости опоры турбины  $V_{\text{ред. } Z_{\text{шт.}}}$ ,  $V_{\text{по. } Z_{\text{шт.}}}$ ,  $V_{\text{оп.т. } Z_{\text{шт.}}}$  соответственно, а также по экспериментальным замерам по оси  $Y$  на редукторе ( $V_{\text{ред. } Y}$ ) и передней опоре ( $V_{\text{по. } Y}$ ).

В качестве обучающей последовательности при отработке алгоритма виброконтроля с использованием модели сложного источника принималась первая из двух располагаемых временных последовательностей вибросигналов, замеренных на редукторе ( $V_{\text{ред. } Y}$  и  $V_{\text{ред. } Z_{\text{шт.}}}$ ), в которых в ограниченном временном интервале 34 секунды проявляется диагностический признак в виде условия  $A_{\text{рвд2}}/A_{\text{рвд}} = 2$ .

При апробации метода использовались все шесть располагаемых временных последовательностей (реализаций) вибропроцессов длительностью 12 минут, при том, что только две из них ( $V_{\text{ред. } Y}$  и  $V_{\text{ред. } Z_{\text{шт.}}}$ ) содержали диагностический признак.

Подчеркнем, что все четыре последовательности реального вибросигнала без наличия диагностического признака получены на том же двигателе, что и реализации  $V_{\text{ред. } Z_{\text{шт.}}}$  и  $V_{\text{ред. } Y}$ , но с помощью вибродатчиков, установленных в других местах ( $V_{\text{по. } Z_{\text{шт.}}}$ ,  $V_{\text{оп.т. } Z_{\text{шт.}}}$ ,  $V_{\text{по. } Z_{\text{шт.}}}$ ,  $V_{\text{оп.т. } Z_{\text{шт.}}}$ ).

Такая манипуляция последовательностями вибросигналов при моделировании процедуры эксплуатационного контроля представляется вполне обоснованной, ибо в качестве источника составляющих вибропроцесса выступает один и тот же многороторный ГТД. Это гарантирует близость частотной структуры спектров при существенной разнице интенсивности одних и тех же составляющих.

Последовательности цифровых отсчетов всех обследуемых реализаций вибропроцессов группировались в файлы (векторные столбцы). Частота дискретизации составляла  $f_d = 13284$  Гц. По каждой компоненте векторного сигнала выполнялось вычисление функционалов, указанных в разделе 1.2.

В процессе вычислений осуществлялись следующие основные процедуры.

1. Контролировались события пересечения вибросигналом нулевого уровня в положительном и отрицательном направлении.

2. В массив, индексированный номером полуволны, записывался момент времени, когда возникло событие ее возникновения.

3. По мере поступления отсчетов вибросигнала

вычислялись длины полувольт и сравнивались расстояния по Хэммингу между двоичными кодами полувольт (функционал  $\Phi 1(t)$ ).

4. Вычислялось среднее приращение расстояния по Хэммингу между кодом текущей полувольты и средним кодом нескольких предыдущих полувольт (функционал  $\Phi 3(\beta, t)$ ).

При моделировании и отборе рабочего функционала исследовались последовательность длин полувольт (ТНВ(t)), среднее (МНВ(t)) и дисперсия (ДНВ(t)) по полувольте  $NW^+$ , функционалы  $\Phi 1(t) - \Phi 3(t)$ , коды полувольт. Главное достоинство указанных алгоритмов – отсутствие процедуры умножения и сокращение анализируемой длины последовательности в несколько раз.

#### 1.4. Результаты анализа

На рис. 2 показано изменение по времени интенсивности вибропроцессов  $V_{ред}$ ,  $Z_{шт}$ ,  $V_{ред}$   $Y$  при наземном опробовании двигателя, а также изменение амплитудных составляющих РВД2 и РВД указанных вибропроцессов для фрагмента записи, где реализуется условие  $A_{рвд2}/A_{рвд} = 2$ .

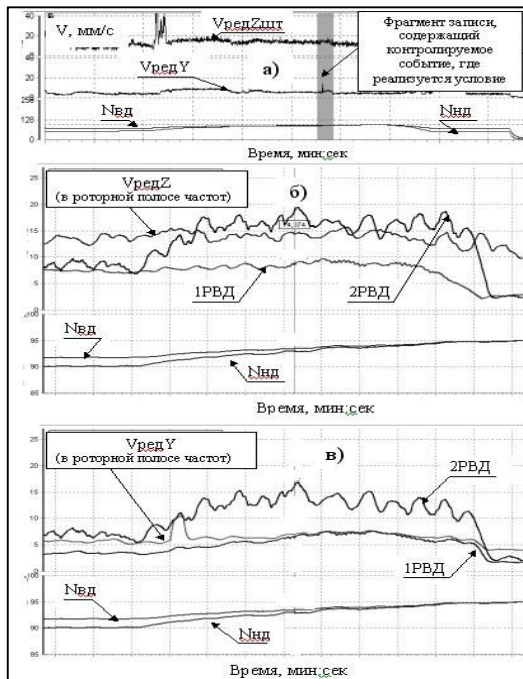


Рис. 2. Изменение СКЗ вибропроцессов  $V_{редZ}$ ,  $V_{редY}$  при наземном опробовании двигателя (а): амплитудные составляющие 2РВД и РВД для  $V_{редZ_{шт}}$  (б) и  $V_{редY}$  (в) на временном интервале, соответствующем выделенному фрагменту записи, где реализуется условие  $A_{рвд2}/A_{рвд} = 2$

Временная последовательность вибропроцесса по каналу  $V_{ред}$   $Y$ , соответствующая вышеуказанному фрагменту записи, использовалась в настоящем

исследовании, как обучающая.

Результаты расчета длины полувольт, а также функционалов  $\Phi 1(t)$  и  $\Phi 3(t)$  как функций номера отсчета  $t$  в обучающей выборке показаны на рис. 3. Из рассмотрения рисунка видна чувствительность всех использованных характеристик к диагностическому признаку.

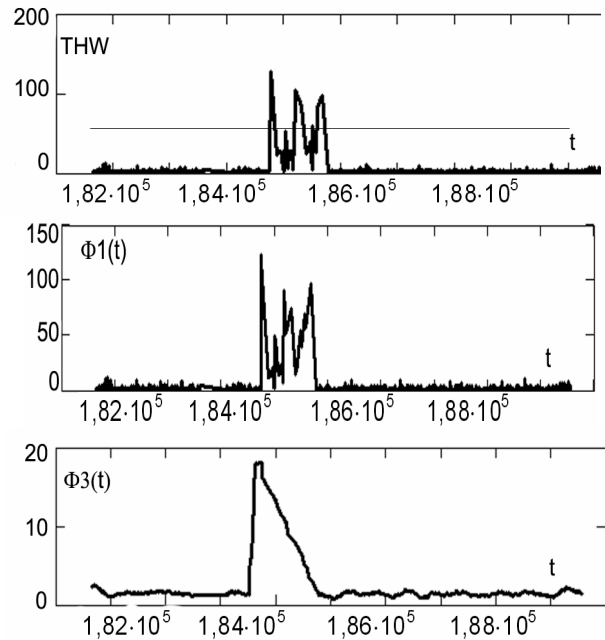


Рис. 3. Длины полувольт (ТНВ), функционал  $\Phi 1(t)$  и функционал  $\Phi 3(t, \beta = 64)$ , полученные по обучающей выборке  $V_{ред}$   $Y$

Визуальная оценка графиков функционалов позволила выбрать соответствующие пороги (отношение максимума функции к ее среднему уровню в окрестности максимума) для каждого из функционалов  $Th^{PL}$ ,  $Th^{F1}$ ,  $Th^{F3}$ . Решение о наличии признака «критической ситуации» принимается по условию превышения порога соответствующим функционалом (рис. 4).

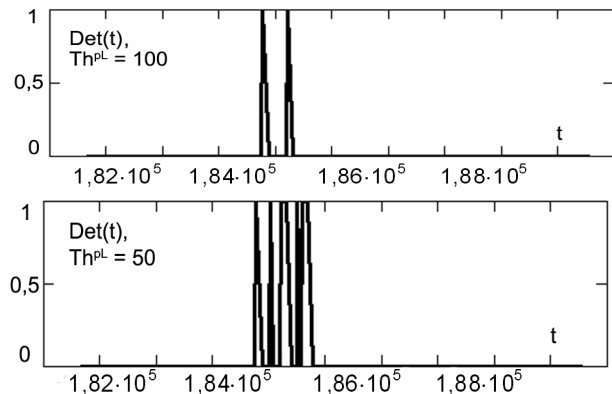


Рис. 4. Оценка ситуации по обучающей выборке (1 – «соосность нарушена», 0 – система роторов соосна) при различных порогах  $Th^{PL}$  (длины полувольт)

Ниже на рис. 5 и 6 представлены результаты тестирования предлагаемого алгоритма на реализации, включающей обучающую последовательность, и для контрольной последовательности по полной реализации.

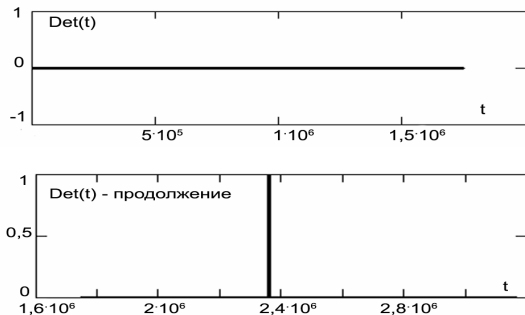


Рис. 5. Решение на контрольной реализации

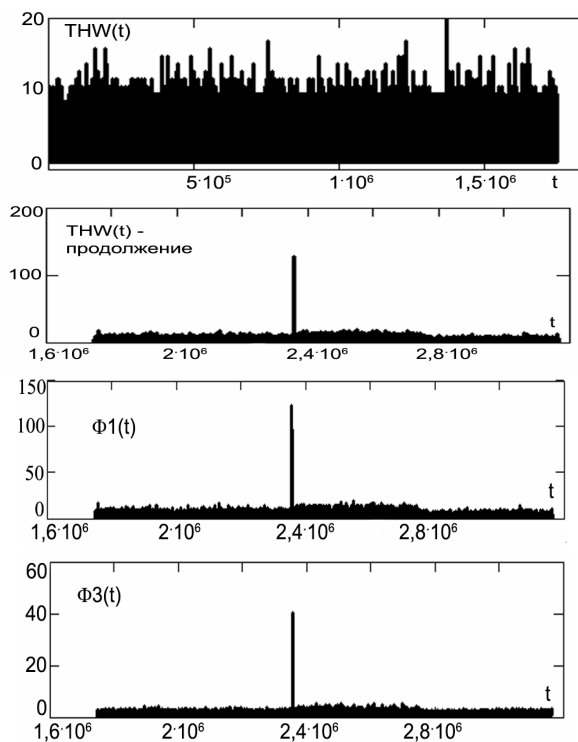


Рис. 6. Результаты тестирования алгоритма для контрольной последовательности

Рисунки иллюстрируют эффективность предложенного подхода для контроля в реальном времени за событием двойного превышения интенсивности вибраций на частоте второй роторной гармоники по сравнению с первой для ротора высокого давления двигателя по вибросигналу  $V_{ред} У$ .

Несмотря на то, что анализ осуществлялся для реального достаточно зашумленного другими составляющими спектра вибросигнала (см.рис.1), все обследованные функционалы на основе характеристик полувольт дают превышение среднего уровня

более чем в 20 раз. Превышения порога функционалами не наблюдалось ни при каких иных значениях времени для реализаций  $V_{ред} У$ , кроме момента, соответствующего событию  $A_{рвд2}/A_{рвд} = 2$ .

Ложных признаков анализируемого события при тестировании всех располагаемых реализаций (с длительностью 12 минут каждая), кроме реализации  $V_{ред} Z_{шт}$  также не обнаружено.

При тестировании полной 12-ти минутной реализации  $V_{ред} Z_{шт}$  решение о появлении анализируемого события с помощью выше указанных алгоритмов выдавалось неоднозначным. Помимо фиксации времени проявления события  $A_{рвд2}/A_{рвд} = 2$ , отмечено и несколько ложных решений в окрестности контролируемого события. Таким образом, рассматриваемая форма алгоритмов оказалась инвариантной к направлению измерения вибраций в районе редуктора. Поэтому контроль несоосности валов обследуемого ГТД целесообразно определять по вибросигналу  $V_{ред} У$ .

### Резюме

При диагностировании несоосности валов по вибросигналу  $V_{ред} У$  признак для принятия решения легко распознается визуально по выбросам всех информационных процессов  $THW^+(t)$ ,  $\Phi 1(t)$ ,  $\Phi 2(t)$ ,  $\Phi 3(t, \beta)$ , перечисление которых дано в порядке возрастания вычислительной сложности.

Для всех функционалов можно ввести пороговый критерий  $Det(t)$  потери соосности. Поэтому представляется целесообразным выбрать наиболее простой вариант – проверку превышения выбранного порога последовательностью  $THW^+(t)$ :

$$Det(t) = \begin{cases} 1, & THW^+(t) > Th_T; \\ 0, & THW^+(t) \leq Th_T. \end{cases}$$

На рабочем этапе эксплуатационного контроля вычисляются  $THW^+(t)$ , сравниваются с выбранным порогом и автоматически принимается решение о критической ситуации.

### Заключение

1. Продемонстрирована принципиальная возможность получения алгоритма контроля состояния многовального ГТД по вибросигналу применительно к распознаванию потери соосности валов на основе формализованной задачи распознавания последовательности состояний сложного источника.

2. Алгоритм не требует больших ресурсов памяти и сложных вычислений, поэтому может быть использован в реальном времени.

3. Представляется целесообразным исследовать возможность получения подобных алгоритмов кон-

троля, которые будут инвариантны к направлению измерения вибраций и позволяют оценивать величину отношения  $A_{рвд2}/A_{рвд}$ .

### Литература

1. Карасев В.А. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей / В.А. Карасев, И.П. Максимов, М.К. Сидоренко. – М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.

2. Коровин Б.Б. Идентификация опасных динамических процессов в ГТД по вибросигналу / Б.Б. Коровин, В.В. Червонык // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. – Куйбышев, 1984. – Вып. 11. – С. 155-158.

3. Грызлова Т.П. Формализация задачи распознавания последовательности состояний сложного источника / Т.П. Грызлова // Математические ме-

тоды распознавания образов – 14-я Всероссийская конференция (Владимирская обл., г. Суздаль): сб. докладов. – М.: МАКС Пресс, 2009. – С. 333-337

4. Грызлова Т.П. Проблемы анализа сигналов сложных источников / Т.П. Грызлова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 6/63. – С. 80-87.

5. Результаты наземных и летных испытаний опытного двигателя НК-93 на летающей лаборатории Ил-76 №3908 / Бычков В.И., Коровин Б.Б., Данковцев Н.А. Н.А., Былинкина О.Н., Стасевич А.А. и др. // Научно-технический отчет ЛИИ №189-08-III. – 2008. – 214 с.

6. Былинкина О.Н. Особенности динамического нагружения редукторного ТВВД с закапотированным биротативным винтовентилятором / О.Н. Былинкина, Б.Б. Коровин // Вестник двигателестроения. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2009. – № 3. – С. 8-14.

Поступила в редакцию 28. 05. 2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, зам. Ген. конструктора М.Е. Колотников, ФГУП ММП «Салют», Москва.

### АПРОБАЦІЯ МЕТОДУ ЧАСОВОГО АНАЛІЗУ СТАНУ БАГАТОВАЛЬНОГО ГТД НА ОСНОВІ МОДЕЛІ СКЛАДНОГО ДЖЕРЕЛА ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ СПІВОСНІСТІ ЙОГО ВАЛІВ

*Б.Б. Коровін, Т.П. Грызлова, О.М. Билінкіна*

На підставі спектрального аналізу реальних вібропроцесів багатовального ГТД (газотурбінного двигуна) була обрана діагностична ознака утрати соосності його валів. Проведено розглядання контролю стану роторних систем до виявлення вказаної ознаки. Традиційний алгоритм будується на користуванні вузько-смугастої цифрової фільтрації кратно-роторних складових вібропроцеса, які задані. Розпочата спроба одержання алгоритмів контролю на основі моделі складного джерела, яка формалізована методами математичної теорії проектування обчислювальних систем. Було показано, що одержані таким засобом алгоритми, можуть бути ефективно використані для контролю стану роторів у реальному масштабі часу. Обговорено позитивні якості та перспективи застосування одержаних таким чином алгоритмів.

**Ключові слова:** турбогвинтовентиляторний двигун, діагностична ознака, складне джерел, гвинтовентилятор, розпізнавання послідовності, розпізнавання стану, вібропроцес, спектр, гармонія, півхвилі, контроль, реальний час.

### PROPFAN CONDITION TIME ANALYSIS TECHNIQUE APPROBATION BASED ON THE COMPLEX SOURCE MODEL FOR ENGINE SHAFTS COAXIAL MONITORING

*B.B. Korovin T.P. Gryzlova, O.N. Bylinkina*

Resting on the multi-spool GTE vibration spectrum analysis diagnostics feature of the shaft coaxial breaking have been chosen. Algorithms of the rotor systems condition monitoring according above mentioned diagnostics feature considered. Traditional one is based on the tracking digital filter for specify multiple rotor speed vibration components. Successful attempt have been done for the alternative monitoring algorithms obtaining on the base of complex source model analysis, formulized with the help of mathematical theory of calculation systems developing. It was shown that such algorithms may be effective used for real time rotors monitoring condition.

**Key words:** high-bypass turbopfan, diagnostic feature, complex source, propfan, states recognition, vibration process, spectrum, harmonic, monitoring, real time.

**Коровин Борис Борисович** – д-р техн. наук, начальник лаборатории НИО-3 ФГУП «Летно-исследовательский институт им М.М. Громова», Жуковский, Россия, e-mail: flysim-lii@mtu-net.ru.

**Грызлова Татьяна Павловна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математического и программного обеспечения электронных вычислительных систем Рыбинской государственной технологической академии им. П. А. Соловьева, Рыбинск, Россия, e-mail: ktnpgryzlova@mail.ru.

**Былинкина Ольга Николаевна** – начальник сектора НИО-3 ФГУП «Летно-исследовательский институт им М.М. Громова», Жуковский, Россия, e-mail: flysim-lii@mtu-net.ru.