

Юр Т. В.¹, Харитонов В. Н.², Дубровин В. И.³¹Ассистент Запорозького національного технічного університета²Інженер-конструктор ГП ЗМКБ «Прогрес» ім. Івченко, Запорозьє³Канд. техн. наук, професор Запорозького національного технічного університета

МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УЗЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И S-ДИСКРИМИНАНТА

В работе предложена модель диагностирования узлов газотурбинного двигателя с применением метода спектрального анализа вибрационных сигналов на основе непрерывного вейвлет-анализа и S-дискриминанта. Разработанная модель может быть использована при проектировании перспективных систем управления силовых установок современных летательных аппаратов для анализа особенностей нестационарных сигналов и диагностирования состояний деталей и узлов ГТД.

Ключевые слова: модель диагностирования, вибросигнал, вейвлет-фильтрация, S-дискриминант, узлы ГТД.

ВВЕДЕНИЕ

Одно из перспективных направлений решения задачи повышения эффективности характеристик силовых установок современных летательных аппаратов касательно адаптивности к условиям эксплуатации и режимам использования самолета, надежности и ресурса лежит в области интегрированных систем автоматического управления и контроля авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).

Износ в процессе эксплуатации приводит к изменениям состояния и характеристик узлов двигателя: опор роторных деталей, зубчатых передач, лопаточных машин, камер сгорания, элементов проточной части. В результате значительно изменяются как статические, так и динамические характеристики двигателя, определяющие его свойства как объекта регулирования.

Разработка метода автоматического распознавания технического состояния узлов двигателя, реализуемого в системе автоматического управления (САУ) двигателя, позволит в процессе функционирования двигателя автоматически переходить к режиму управления, наиболее оптимальному в данных условиях.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одними из эффективных средств технического диагностирования ГТД являются вибродиагностические методы. Вибрационный сигнал несет в себе большое количество информации о техническом состоянии узлов двигателя и может быть достоверным показателем их работоспособности.

В работе [1] авторами предложено усовершенствование статистического метода анализа вибрационных сигналов за счет применения S-дискриминанта [2], что позволило создать метод первичной экспресс-диагностики отклонения технического состояния двигателя от нормального.

Для эффективного анализа вибрационных сигналов ГТД с целью выделения характерных составляющих

и признаков износа узлов авторами усовершенствован метод анализа огибающей высокочастотной случайной вибрации за счет применения банков вейвлетных фильтров и кросс-спектрального анализа [3, 4].

За счет выделения не только гармонических, но и импульсных составляющих, предложенный метод позволяет выделить большее количество характеристических частотных составляющих вибрационных сигналов, что дает более четкие признаки отклонения состояния узлов двигателя от нормального.

Результаты экспериментального исследования эффективности разработанного метода анализа вибрационных сигналов на основе непрерывного вейвлет-преобразования для решения практических задач диагностирования износа подшипников качения приведены в работах [3, 4].

Результаты проведенного исследования показали, что применение вейвлет-фильтрации увеличивает быстроту действия и надежность постановки диагноза по сравнению с традиционными статистическими методами и методами, основанными на применении быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Кроме того, полученные результаты позволяют сделать вывод об универсальности предложенного метода и возможности его эффективного применения для идентификации различных дефектов двигателя: дефектов подшипников, зубчатых передач, дефектов роторных деталей и т. д.

Целью данной работы является разработка модели диагностирования узлов ГТД, основанной на применении разработанных авторами методов анализа вибрационных сигналов.

2. ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УЗЛОВ ГТД

Реализация методов диагностирования рассмотрена на примере двигателя ТВ3-117ВМА-СБМ самолета Ан-140.

Для реализации метода диагностирования узлов ГТД с применением предложенных методов анализа вибрационных сигналов возможны два варианта реализации.

В первом варианте на самолете не предусматривается никаких доработок, а реализация разработанного метода диагностирования осуществляется в наземном технологическом цифровом аппаратно-программном комплексе, который подключается к бортовой аппаратуре контроля вибрации.

У данного варианта существует ограничение. Как показала практическая отработка предложенных методов, зависимость амплитуды характерных частот дефектов подшипников от уровня повреждений элементов подшипников носит нелинейный характер. Имеющее место уменьшение амплитуды при среднем уровне повреждения может быть пропущено при периодическом контроле. В таком случае может быть некорректно определен момент развития более опасных и быстроразвивающихся значительных уровней повреждения элементов конструкции подшипника.

Более перспективным следует считать второй вариант, который предусматривает установку на борту самолета бортового цифрового модуля контроля и диагностики.

Цифровой модуль контроля и диагностики принимает аналоговые сигналы от усилителей заряда штатной бортовой аппаратуры контроля вибрации и производит их обработку. В результате обработки решается ряд задач по распознаванию технического состояния узлов и систем двигателя:

- контроль роторных составляющих;
- контроль переднего редуктора на частотах шестеренчатых и подшипниковых составляющих;
- контроль заднего редуктора и валопровода на частотах шестеренчатых и подшипниковых составляющих;
- контроль коробки приводов на частотах шестеренчатых и подшипниковых составляющих;

- контроль загрязнения масла;
- оценка состояния измерительных трактов «датчик вибрации – усилитель заряда»;
- контроль элементов газоздушного тракта.

По результатам распознавания выдаются управляющие воздействия (сообщения) в САУ самолета.

Для решения перечисленных задач авторами разработана модель диагностирования узлов ГТД, использующая разработанные методы анализа вибрационных сигналов: статистический метод, улучшенный применением S -дискриминанта, и метод, основанный на применении вейвлетной фильтрации.

3. МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УЗЛОВ ГТД

Разработанная модель диагностирования узлов ГТД основана на существующей модели [5], представляющей систему вибродиагностирования ГТД на основе применения БПФ. Модель была модифицирована с учетом специфики применяемых разработанных методов анализа сигналов. На рис. 1 представлен общий вид разработанной модели.

В модель диагностирования поступает информация двух видов: аналоговая информация от усилителей заряда (УЗ) датчиков вибраций (ДВ) (анализируемый вибрационный сигнал) и цифровые данные по частотам вращения роторов, крутящему моменту на валу винта и др. ($N_{ВВ}$, $N_{СТ}$, $N_{ТК}$, $M_{КР}$). Выходными данными модели являются сообщения, передаваемые в САУ самолета.

В модуле предварительной обработки информации (МПОИ) определяется режим работы двигателя как динамической системы. Если полученные параметры находятся в устойчиво-неизменяемом состоянии в текущем временном диапазоне, то такой режим считается установившимся (УР), в противном случае режим следует считать переходным (ПР).

Вышеописанная характеристика режима работы двигателя важна как на этапе подготовки данных (определе-

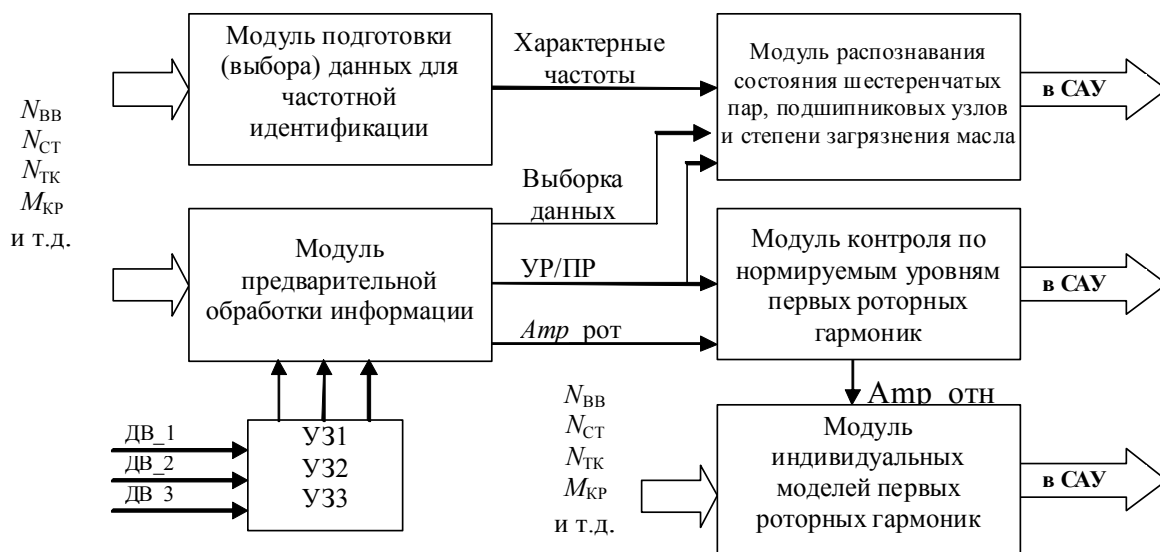


Рис. 1. Модель диагностирования узлов ГТД

ние количества точек в выборке и количества групп выборок данных по вибрациям), так и на этапе контроля и диагностики. В МПОИ происходит оцифровка вибрационного сигнала с отбраковкой сбойных групп данных на основе допускового и перекрестного контроля. После чего данные проходят вейвлет-преобразование с дальнейшим спектральным анализом полученных вейвлет-коэффициентов. Из спектров выделяются составляющие первых роторных гармоник роторов турбокомпрессора, винта и трансмиссии. Амплитудные значения выделенных составляющих спектров передаются в модуль контроля по нормируемым уровням, где происходит их сравнение с тремя типовыми уровнями.

Ограничительные уровни «Опасная вибрация» (ОВ) и «Повышенная вибрация» (ПВ) устанавливаются исходя из комплексных требований прочности конструкции двигателя и его комплектующих агрегатов и их долговечности на протяжении выработки жизненного цикла. Т. е. значения ОВ и ПВ оговариваются параметрами точности. Если текущее значение превысит указанные уровни и это превышение устойчиво будет фиксироваться на протяжении определенного времени, то в САУ самолета будет выдано соответствующее аварийное сообщение.

Информационный уровень «Статистический типовой» представляет зависимость амплитуды той или иной роторной гармоники (статистически максимально вероятной для парка двигателей данного типа) от частоты вращения соответствующего ротора или крутящего момента. Данный уровень используется для вновь устанавливаемого на самолет двигателя на период формирования индивидуальной модели в модуле индивидуальных моделей первых роторных гармоник (МИМПРГ).

Одновременно в модуле контроля по нормируемым уровням первых роторных гармоник производится вычисление текущих значений относительных амплитуд той или иной роторной гармоники по формуле

$$Amp_i \text{ _отн} = 20 \log \frac{Amp_i \text{ _тек}}{Amp_i \text{ _ОВ}}, \text{ дБ},$$

где $Amp_i \text{ _тек}$ – текущее значение амплитуды, $Amp_i \text{ _ОВ}$ – значение амплитуды для уровня опасной вибрации.

Вычисленные значения относительных амплитуд передаются в МИМПРГ.

МИМПРГ отвечает за формирование и хранение в энергонезависимой памяти индивидуальных моделей первых роторных гармоник, а также оценку тренда этих моделей в процессе выработки ресурса.

Индивидуальные модели представляются в виде двухуровневых зависимостей относительных амплитуд от частот вращения соответствующих роторов и крутящего момента. Модель для установившихся режимов представляет собой набор поддиапазонных статистически-вероятностных оценок (максимальных и минимальных, средних значений и границ клиппирования) относительных амплитуд, определенных по первым Z полетам. Модель для переходных режимов представляет постоянное

значение для всех частот вращения роторов и крутящего момента, определенного как максимально-достигнутое значение во всех условиях эксплуатации по первым Z полетам.

Оценка трендов по времени выработки ресурса строится на вычислении S -дискриминанта средних значений моделей для установившихся ресурсов. При условии, если текущее значение S -дискриминанта в каком-либо поддиапазоне превысит заранее установленное значение (из опыта экспериментальных исследований работы метода рекомендуется значение равное семи), то в САУ самолета выдается диагностическое сообщение.

На рис. 2 приведена функционально-логическая модель модуля распознавания состояния шестеренчатых пар, подшипниковых узлов и степени загрязнения масла (МРСШПМ).

Поступающая в МРСШПМ оцифрованная в МПОИ информация «переупаковывается» относительно частоты вращения винта. Данная операция производится для того, чтобы компенсировать влияние низкочастотных процессов в системе «турбокомпрессор-трансмиссия-винт». Отсортированные таким образом данные проходят вейвлет-преобразование в соответствии с методом, представленным в работах [3, 4].

Модуль подготовки данных для частотной идентификации (МПДЧИ) производит расчет характеристических частот узлов двигателя в зависимости от частот вращения роторов.

На основании информации, поступающей из модуля выбора данных для контроля шестерен и подшипников редукторов и коробки приводов, в МРСШПМ формируются задания частотной идентификации спектров вейвлет-коэффициентов и взаимных спектров вейвлет-коэффициентов. Затем производится амплитудное сравнение составляющих, выделенных в соответствии с заданием частотной идентификации.

В соответствии с заданием частотной идентификации спектры вейвлет-коэффициентов и взаимные спектры вейвлет-коэффициентов проходят обработку в специальных согласующих фильтрах. В общем виде формула таких фильтров:

$$Conform Filter (CF) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (V_i \bullet w_i)^2},$$

где

$$w_i = \left[\frac{1}{k} \sum_{t=1}^k V_i(t) \right]^{-1}, \quad k < N.$$

Эти фильтры предназначены для оценки «боковых» и комбинационных составляющих относительно основных характерных составляющих. Цель такой обработки – раннее обнаружение изменений в соответствующих узлах. При отсутствии или незначительных изменениях выходное значение фильтра стремится к единице. В противном случае – к нулю. Результаты фильтрации и амплитуды

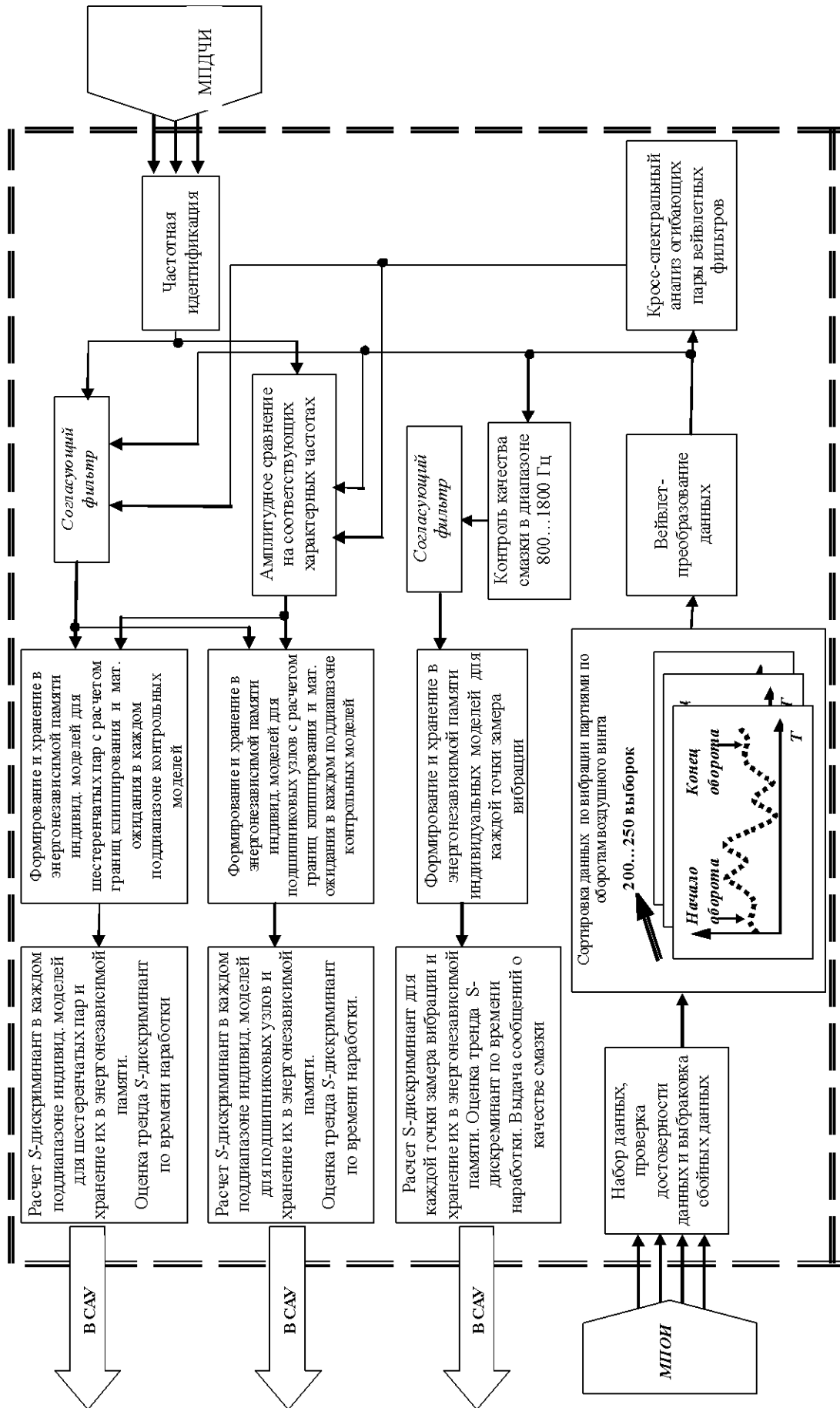


Рис. 2. Модель распознавания состояния шестеренчатых пар, подшипниковых узлов и степени загрязнения масла

литудных сравнений в дальнейшем проходят через процедуры обобщения в индивидуальных моделях и оценку трендов по аналогии с операциями в МИМПРГ. В МРСШПМ предусмотрена оценка степени загрязнения масла на основе обработки данных в частотном диапазоне 800–1800 Гц.

Предусмотренная в перечне задач по распознаванию технического состояния узлов и систем двигателя оценка состояния измерительных трактов «датчик вибрации – усилитель заряда» основана на сравнительной оценке (по схеме согласующих фильтров) составляющих в частотном диапазоне 1...10 Гц (самые высшие масштабы вейвлет-преобразования) и составляющей зубозацепления ступени перебора (средние масштабы вейвлет-преобразования).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе получила дальнейшее развитие модель диагностирования узлов ГТД, которая отличается от существующих применением непрерывного вейвлет-анализа и S-дискриминанта.

Проведенные экспериментальные исследования разработанных методов анализа вибрационных сигналов показали их эффективность при выделении признаков износа узлов двигателя.

При помощи усовершенствованного статистического метода предлагается проводить общую экспресс-диагностику отклонения технического состояния двигателя от нормального и следить за степенью развития дефектов. При помощи метода, основанного на применении вейвлетной фильтрации, проводится спектральный анализ вибрационного сигнала с целью выделения частотных характеристических составляющих, позволяющих судить о месте возникновения дефекта.

Таким образом, модель диагностирования, объединяющая в себе разработанные методы, делает возможным выявление признаков износа узлов ГТД на более ранних этапах развития и позволяет в автоматическом режиме следить за степенью развития дефектов.

Разработанная модель диагностирования может быть использована при проектировании перспективных систем управления силовых установок современных летательных аппаратов для анализа особенностей нестационарных сигналов и диагностирования состояний деталей и узлов ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юр, Т. В. Диагностирование технического состояния подшипников качения / Т. В. Юр, В. Н. Харитонов,

В. И. Дубровин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 166–170.

2. Соколова, А. Г. Вибромониторинг машинного оборудования и раннее обнаружение эксплуатационных повреждений / А. Г. Соколова, Ф. Я. Балицкий // *Вестник научно-технического развития*. – 2008. – № 7 (11). – С. 45–50.
3. Юр, Т. В. Метод анализа технического состояния подшипников качения, основанный на использовании вейвлет-математики / Т. В. Юр, В. Н. Харитонов, В. И. Дубровин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – 10(77). – С. 187–191.
4. Юр, Т. В. Исследование фильтрующих свойств вейвлет-преобразования / Т. В. Юр, В. И. Дубровин, В. Н. Харитонов // *Радиоэлектроника, информатика, управління*. – 2010. – № 2. – С. 157–165.
5. Patent US 7013210 B2. Vibration monitoring system for gas turbine engines / Mcbrien, Gary M. (Glastonbury, CT), Gottwald, James (Amherst, NH); Goodrich Pump & Engine Control Systems, Inc. (West Hartford, CT, US). – filed on 16-Mar-2004, published on 14-Mar-2006.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2011.

Юр Т. В., Харитонов В. Н., Дубровін В. І.

МОДЕЛЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ВУЗЛІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА S-ДИСКРИМІНАНТУ

У роботі запропоновано модель діагностування вузлів газотурбінного двигуна із застосуванням методу спектрального аналізу вібраційних сигналів на основі безперервного вейвлет-аналізу та S-дискримінанту. Розроблена модель може бути використана при проектуванні перспективних систем керування силових установок сучасних літальних апаратів для аналізу особливостей нестационарних сигналів і діагностування станів деталей і вузлів ГТД.

Ключові слова: модель діагностування, вібраційний сигнал, вейвлет-фільтрація, S-дискримінант, вузли ГТД.

Yur T. V., Haritonov V. N., Dubrovin V. I.

DIAGNOSTIC MODEL FOR GAS TURBINE ENGINE ELEMENTS BASED ON WAVELET ANALYSIS AND S-DISCRIMINANT

Diagnostic model for gas turbine elements based on wavelet spectral analysis method of vibration signals and S-discriminant is proposed in the work. The developed model could be used in construction of perspective control systems of aircraft engine units to analyze non-stationary signals and to give a diagnosis of engine units state.

Key words: model of diagnostics, vibrations, wavelet filtering, S-discriminant, gas turbine engine units.