

УДК 622.012.2:621.31

Н.И. БУРАУ<sup>1</sup>, А.М. ПАВЛОВСКИЙ<sup>1</sup>, Л.Л. ЯЦКО<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев<sup>2</sup>ПАО «НТК «Электронприлад», Киев, Украина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ NI LABVIEW

Для повышения чувствительности и достоверности контроля вибрации авиационных газотурбинных двигателей предложена двухуровневая система контроля вибрации, в состав которой входят: существующая бортовая система контроля вибрации для текущего контроля уровней вибрации на роторных гармониках двигателя и их нормирования (главный уровень); дополнительный микроконтроллер с установленным программным обеспечением для анализа «нормальной» вибрации с целью обнаружения начальных повреждений и дефектов роторных элементов конструкции двигателя. Разработана структура и программная модель двухуровневой системы контроля вибрации, проведено имитационное моделирование ее работы на стационарном и переходном режимах двигателя. Модель системы реализована в виде виртуального прибора в системе NI LabView, отличающейся возможностями расширения и взаимодействия с большим количеством программных и аппаратных средств.

**Ключевые слова:** контроль вибрации двигателя, главный уровень системы контроля вибрации, дополнительный уровень системы контроля вибрации, микроконтроллер, моделирование, система NI LabView.

### Введение

Вибрационный контроль является важной составляющей в общей системе контроля и диагностики авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), эксплуатация которых сопровождается вынужденными и резонансными колебаниями отдельных агрегатов, узлов и деталей. Большинство неисправностей, возникающих в двигателях в процессе эксплуатации, непосредственно обусловлены колебаниями, или проявляются в них. При этом непосредственное измерение признаков состояния объекта не представляется возможным, поэтому для задач контроля и диагностики используются связанные с ними параметры и характеристики вибрации и акустического шума.

Контроль вибрационного состояния ГТД осуществляется путем определения их соответствия нормам по интегральному критерию вибрации [1]. Нормирование выполняется по абсолютным значениям вибрации, которые определяются для первых роторных гармоник. Такой контроль эффективен для идентификации грубых дефектов и повреждений элементов двигателя, а также для диагностирования предаварийных ситуаций. Однако он не позволяет своевременно определить изменение функционального технического состояния (ТС) вследствие возникновения и начального развития дефектов и повреждений. Поэтому для повышения чувствительности и достоверности контроля, расширения функциональных возможностей системы контроля

вибрации ГТД необходима ее модернизация на структурно-функциональном и методическом уровнях. Это позволит создать интегрированные информационно-диагностические комплексы для решения актуальной проблемы обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации ГТД.

### 1. Формулирование проблемы

Как известно [2], в ГТД основным источником вибрации механического происхождения является вращающийся ротор. Он генерирует вибрацию на основной роторной гармонике (равной частоте вращения ротора) и на кратных гармониках. Характер изменения роторной вибрации при изменении частоты вращения определяется инерционно-упругими свойствами системы «ротор-корпус». Амплитуды вибрации зависят от величины дебаланса, демпфирования и от соотношения критической и рабочей частот вращения.

Роторные гармоники являются наиболее информативными составляющими спектра вибрации двигателя. Для оценки вибрационного состояния ГТД анализируются их уровни на резонансных режимах и их изменение на разных частотах вращения ротора. Многие опасные явления (разбалансирование, неустойчивые колебательные режимы, нестационарные вибрационные возмущения и др.) приводят к появлению в спектре вибрации составляющих на высших гармониках частоты вращения ротора. Однако, возникновение начальных дефектов ротор-

ных элементов (микротрещины валов, лопаток, дисков) практически не вызывают изменений в спектре вибрации и не могут быть выявлены на ранних стадиях развития по результатам анализа роторной вибрации. Для повышения чувствительности и достоверности вибрационного контроля, расширения функциональных возможностей системы контроля вибрации ГТД предложена двухуровневая система контроля вибрации [3], блок-схема которой приведена на рис. 1.

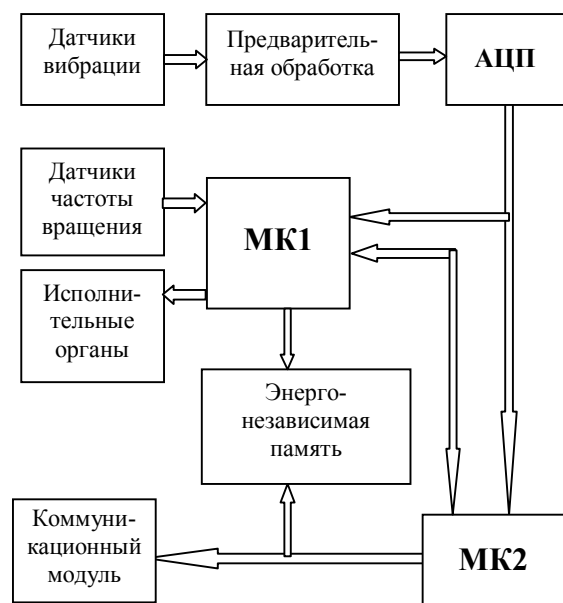


Рис. 1. Блок-схема двухуровневой системы контроля вибрации ГТД

В состав предложенной системы входят: существующая бортовая система контроля вибрации для текущего контроля уровней вибрации на роторных гармониках двигателя и их нормирования (главный уровень); дополнительный микроконтроллер с установленным программным обеспечением для анализа «нормальной» вибрации с целью обнаружения начальных повреждений и дефектов роторных элементов ГТД (дополнительный уровень).

На главном уровне сигналы от датчиков вибрации после предварительного преобразования и фильтрации поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а затем цифровые данные передаются в микроконтроллер МК1 через параллельную шину данных. Для определения уровней вибрации на роторных гармониках в МК1 передаются сигналы от датчика частоты вращения ротора. Значение текущей частоты вращения ротора используется как центральная частота следящего фильтра для выделения составляющей вибрации на роторной гармонике. Полученные значения вибрации (вибрационной скорости) на роторных гармониках сравниваются с установленными пороговыми значениями,

в результате чего принимается решение о текущем уровне вибрации двигателя. На нестационарных режимах работы двигателя центральная частота полосы пропускания следящего фильтра изменяется синхронно с изменением частоты вращения ротора. Это обеспечивается сменным по частоте управляющим сигналом, который поступает на цифровые входы МК1. Сигнал о текущем значении роторной вибрации поступает на информационную панель пилота, а если сигнал вибрации превышает пороговое значение «Повышенная вибрация» или «Опасная вибрация», сигнал с выходов МК1 через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) подается на органы управления двигателем.

Дополнительный уровень предназначен для анализа «нормальной» вибрации с целью выявления или предупреждения появления начальных эксплуатационных повреждений элементов конструкции двигателя. Для этого в системе используется дополнительный специализированный микроконтроллер МК2 со специальным программным обеспечением (ПО). В качестве методов обработки сигналов на данном уровне системы предлагается использовать предварительное Вейвлет – разложение (ВР) сигнала, а для отдельных уровней ВР – спектральный и статистический анализ.

Результаты анализа передаются во внешние информационные сети и/или записываются в энергонезависимую память.

Целью данной статьи является разработка программной модели двухуровневой системы контроля вибрации, обоснование возможности и эффективности ее использования в перспективных разработках и исследованиях систем контроля ГТД.

## 2. Решение проблемы

Современный уровень развития информационных компьютерных технологий и систем позволяет создавать мощные средства для моделирования и исследования сложных объектов. Для построения модели двухуровневой системы контроля вибрации ГТД использовалась система графического программирования LabView фирмы National Instruments (NI) [4]. Система имеет удобный графический интерфейс, обеспечивает широкое взаимодействие с внешними устройствами, а также с наиболее распространенными программными приложениями (пакет Office, Builder C/C++, MatLab и др.). Кроме этого она имеет ряд специализированных расширений, предназначенных для решения сложных технических задач, в том числе и задач вибрационной диагностики.

Модель была реализована на языке графического программирования «G», используемого системой LabView. Система выполнена в виде виртуального

прибора, лицевая панель которого представлена на рис. 2. Интерфейс лицевой панели разработан по блочному принципу. Блок генерации сигнала (БГС) расположен в верхнем левом углу лицевой панели и предназначен для генерации входного вибрационного воздействия на диагностическую модель двигателя. Модель двигателя представлена динамической системой, состоящей из подсистем «вал-диск-лопатки» [5], с возможностью задания ее ТС (кнопка «Дефект»). На первой вкладке БГС задаются основные характеристики главной роторной гармоники с возможностью добавления шума. На вкладке «Полігар-

монічний сигнал» задаются дополнительные суб- и супергармоники роторной вибрации, а вкладка «Настройки канала» предназначена для введения дополнительных параметров во временные характеристики сигнала. Генерация входного вибрационного воздействия производится для различных режимов работы двигателя, для задания которых служит соответствующий блок. Для нестационарных режимов входное воздействие реализуется в виде сигнала с линейной частотной модуляцией [5]. Закон и параметры изменения частоты вращения ротора задаются программно для каждого из указанных нестационарных режимов.

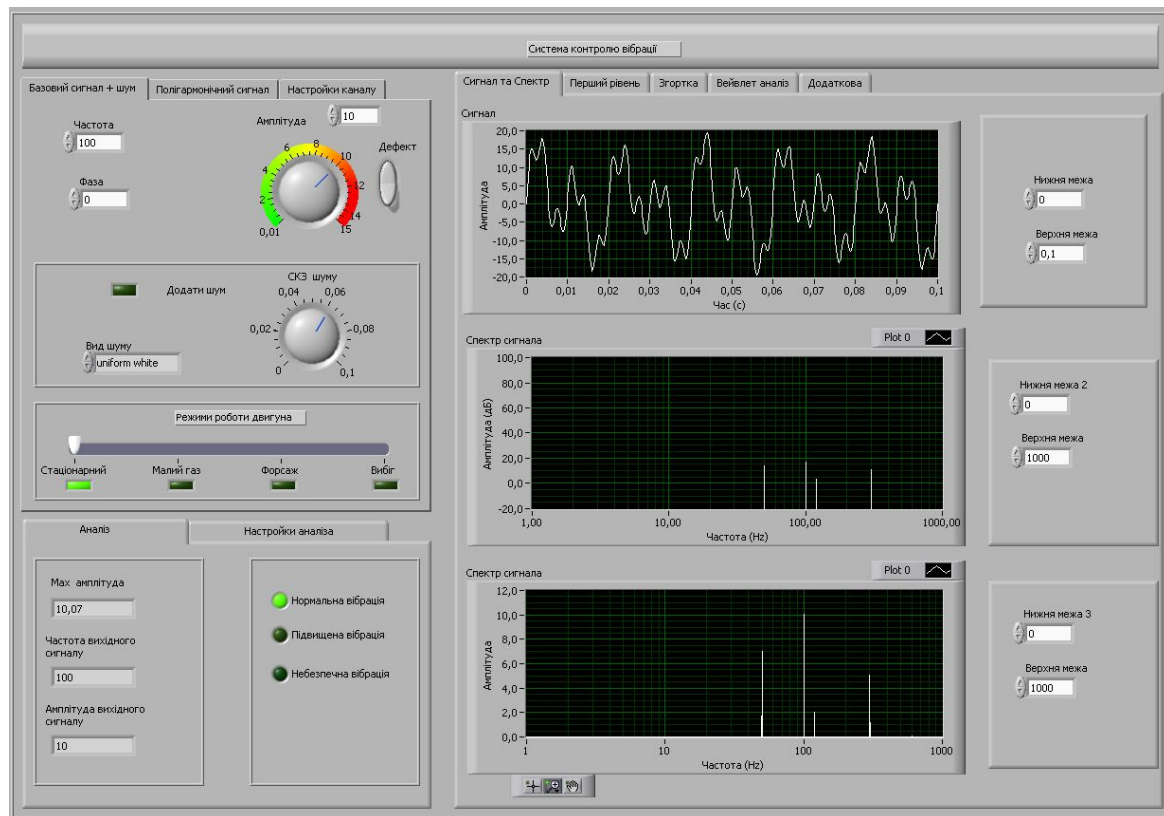


Рис. 2. Главная лицевая панель виртуальной двухуровневой системы контроля вибрации

Блоки в нижнем левом углу панели предназначены для вывода информации об амплитуде и частоте основной роторной гармоники, а также для сигнализации об уровне вибрации на выходе модели двигателя. В случае превышения пороговых значений повышенной или опасной вибрации загорается соответствующий световой индикатор, и с этого момента начинается дублирующая запись сигнала в файл.

Основной блок системы предназначен для отображения в виде графиков и сопутствующей информации всех протекающих процессов системы, промежуточных и конечных результатов обработки. На рис. 2 на вкладке «Сигнал та спектр» в качестве примера приведен график сигнала, который представляет собой реакцию модели ГТД на приложенное вибрационное воздействие на стационарном

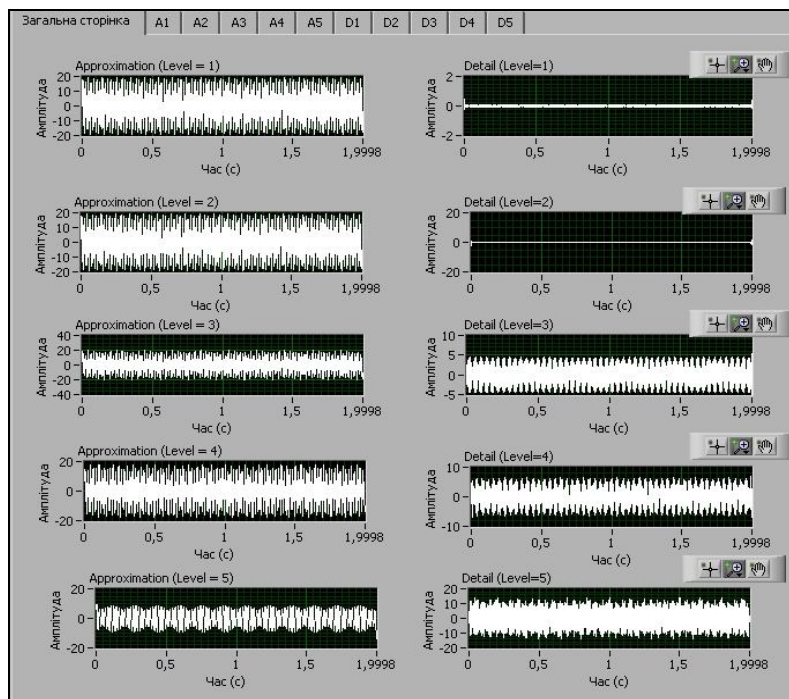
режиме, и графики его спектра (на вход модели подавался сигнал с частотой основной роторной гармоники 100 Гц, а также с составляющими на частотах 50 Гц, 150 Гц и 500 Гц). При открытии вкладки «Перший рівень» в ней отображается исходный сигнал вибрации, который поступает на узкополосный цифровой фильтр для выделения необходимой роторной гармоники, а также спектр сигнала после цифровой фильтрации, который используется для сравнения с установленным пороговым значением для принятия решения об уровне вибрации на заданной роторной гармонике.

Таким образом, разработанная программная модель двухуровневой системы контроля вибрации на первом уровне обеспечивает выполнение следующих функций:

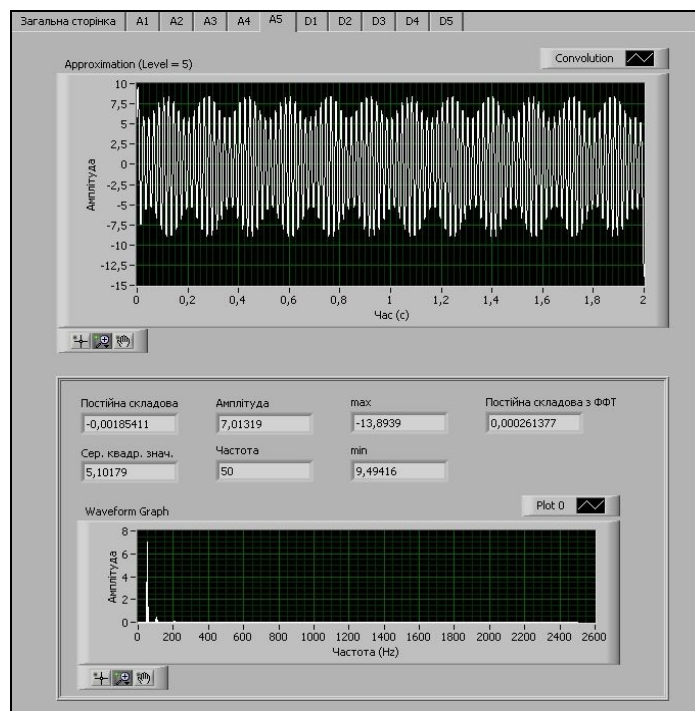
- выделение основной роторной гармоники путем полосовой цифровой фильтрации, на стационарных и нестационарных режимах;
- сравнение амплитуды выделенной роторной гармоники с пороговыми значениями, которые отвечают уровням «Повышенной» и «Опасной» вибрации; в случае превышения порогов – вывод световой индикации;
- запись данных в файл.

Второй уровень системы функционирует при условии «нормальной» вибрации для раннего выявления дефектов и повреждений роторных элементов ГТД, тем самым предотвращая повышение уровней вибрации и возникновение опасных ситуаций.

Вкладки на рис. 3 иллюстрируют возможности созданной виртуальной двухуровневой системы контроля вибрации на втором уровне.



а



б

Рис. 3 Лицевая панель виртуальной двухуровневой системы контроля вибрации для обработки сигналов на втором уровне: а – пример вейвлет –разложения сигнала; б – пример анализа аппроксимации первого уровня разложения

В окне на рис.3, а приведен результат Вейвлет-разложения исследуемого сигнала (разложение на 5 уровней с использованием материнской вейвлет-функции семейства Добеши db10, с графическим отображением результатов разложения – аппроксимаций и деталей каждого уровня). На вкладке «А5» (рис. 3,б) представлен график аппроксимации пятого уровня разложения, приведены детальные характеристики сегмента разложения, а также его спектр. Вкладки «D1»-«D5» предоставляют развернутую характеристику деталей Вейвлет-разложения по уровням, которые используются для выявления диагностических признаков дефектов. Переход на второй уровень обработки осуществляется с главной лицевой панели системы (рис 2) при открытии вкладки «Вейвлет-анализ».

Программная модель двухуровневой системы контроля вибрации на втором уровне обеспечивает выполнение следующих функций:

- вейвлет-разложение широкополосного сигнала вибрации;
  - расширенный анализ (спектральный, статистический) аппроксимаций и деталей полученного разложения;
  - отображение спектров элементов вейвлет-разложения;
  - отображение статистической информации.
- Разработанная виртуальная система позволяет реализовать следующие функциональные возможности:
- подключение к датчикам первичной информации, получение и обработка информации;
  - получение и обработка информации из удаленных сетей/Internet;
  - моделирование различных дефектов роторных элементов, определение диагностических признаков;
  - моделирование совместного проявления дефектов различных конструктивных элементов, исследование взаимодействия таких дефектов, возможности их выявления предложенными методами.

### Заключение

Разработанная программная модель двухуровневой системы контроля вибрации ГТД предназна-

чена для имитационного и физического моделирования процесса вибрационного контроля и диагностики начальных повреждений и дефектов роторных элементов ГТД, отработки наиболее эффективных алгоритмов цифровой обработки вибрационных сигналов для достижения поставленной диагностической цели. Реализация двухуровневой системы контроля вибрации позволит:

- расширить функциональные возможности существующих систем контроля вибрации авиационных двигателей;
- обеспечить оперативное обнаружение дефектов роторных элементов на стационарных и переходных режимах работы ГТД;
- повысить уровень безопасности полетов за счет раннего определения начальных дефектов и повышения достоверности определения технического состояния узлов, агрегатов и двигателя в целом;
- при установке на борт или на удаленный диагностический сервер снизить стоимость планового технического обслуживания и повысить эффективность эксплуатации летательных аппаратов.

### Литература

1. Стандартизація у сфері вібрації, контролю технічного стану, діагностики та прогнозування ресурсу промислових машин [Текст] / А.А. Стеценко, Б.М. Родель, В.О. Залоза, З.А. Здельнік // Вісник СумДУ. – 2005. – №1 (73). – С. 113 – 122.
2. Дорошко, С.М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам [Текст] / С.М. Дорошко. – М.: Транспорт, 1984. – 128 с.
3. Пат. 70117 Україна, МПК G01H 17/00. Система вібраційного контролю авіаційного двигуна / Бурау Н.І., Павловський О.М., Сопілка Ю.В., Яцко Л.Л.; Власник НТУУ «КПІ». - № u201113927; заявл. 25.11.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. №10. – 7 с.
4. LabVIEW в научных исследованиях [Электронный ресурс] / National Instruments Россия. – Режим доступа: [http://www.labview.ru/labview/fields\\_of\\_application/labview\\_for\\_research.php](http://www.labview.ru/labview/fields_of_application/labview_for_research.php). – 12.03.2012 г.
5. Бурау, Н.И. Динамическая модель газотурбинного двигателя как объекта виброакустической диагностики усталостных трещин в лопатках рабочих колес [Текст] / Н.И. Бурау // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. - №1(17). – С. 28 – 32.

Поступила в редакцию 16.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.П. Квасников, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

# МОДЕЛЮВАННЯ ДВОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА В СИСТЕМІ NI LABVIEW

*Н.І. Бурау, О.М. Павловський, Л.Л. Яцко*

Для підвищення чутливості та вірогідності контролю вібрації авіаційних газотурбінних двигунів запропоновано дворівневу систему контролю вібрації, до складу якої входять: існуюча бортова система контролю вібрації для поточного контролю рівнів вібрації на роторних гармоніках двигуна та їх нормування (головний рівень); додатковий мікро контролер з встановленим програмним забезпеченням для аналізу «нормальної» вібрації з метою виявлення початкових пошкоджень та дефектів роторних елементів конструкції двигуна. Розроблена структура і програмна модель системи, проведено імітаційне моделювання її роботи на стаціонарному та перехідних режимах. Модель реалізовано у вигляді віртуального приладу у системі NI LabView.

**Ключові слова:** контроль вібрації двигуна, головний рівень системи контролю вібрації, додатковий рівень системи контролю вібрації, мікро контролер, моделювання, система NI LabView.

## SIMULATION OF THE TWO-LEVELS VIBRATION CONTROL SYSTEM OF AVIATION ENGINE BY USING NI LABVIEW TECHNIQUE

*N.I. Bouraou, A.M. Pavlovskij, L.L. Yatsko*

This work is devoted to the development a new two-level vibration control system of aviation gas-turbine engines. The bases of the new system are: existing aboard vibration control system for current control and awareness about actual levels of vibration at the harmonics of the rotor rotation (main level); complementary dedicated micro-controller for analysis of “normal vibration” in order to predict or detect small damages of engine systems and details (auxiliary level) and signal processing software. The structure and software model are developed, simulation of system is carried out at the steady-state and transient states. The software model is realized by using NI LabView technique.

**Key words:** vibration control of engine, main level of vibration control system, auxiliary level of vibration control system, microcontroller, simulation, NI LabView technique.

**Бурау Надежда Ивановна** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой приборов и систем ориентации и навигации Национального технического университета Украины «КПИ», Киев, Украина; e-mail: [burau@pson.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:burau@pson.ntu-kpi.kiev.ua).

**Павловский Алексей Михайлович** – аспирант, ассистент кафедры приборов и систем ориентации и навигации Национального технического университета Украины «КПИ», Киев, Украина, e-mail: [a\\_pav@ukr.net](mailto:a_pav@ukr.net).

**Яцко Ласло Ласлович** – канд. техн. наук, заместитель главного конструктора ОАО «НТК «Электрон-прилад», Киев, Украина, e-mail: [iatsko@mail.ru](mailto:iatsko@mail.ru).