

СИНХРОНИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ В МУЛЬТИПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА

Е.Г. Стешаков, И.Н. Молокович, С.В. Иванов (ФГУП «ЦИАМ»)

Описана мультипроцессорная система измерения радиального зазора в турбокомпрессорных машинах с использованием оптоволоконных пар, построенная на базе промышленного микроконтроллера STM32F4. Подробно описана структура сети для информационного обмена между измерительными каналами. Приведены основные результаты испытаний системы на стендах ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова».

Ключевые слова: радиальный зазор, Controller Area Network, турбокомпрессорная машина, оптоволоконная пара, временная синхронизация.

Компрессор с высокими параметрами является ключевым узлом авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Его характеристики и условия совместной работы с другими узлами определяют устойчивость двигателя в целом и существенно влияют на его экономичность. В авиационных двигателях требования по массе и габаритам вынуждают проектировать высоконагруженные компрессоры. Конструкция компрессора работает при высоких центробежных, аэродинамических, тепловых и вибрационных нагрузках. Упругие прогибы, пластическая деформация, трещины и колебания лопаток ротора, вызванные аэроупругим взаимодействием, тепловые расширения, малоцикловая и термоциклическая усталость, ползучесть и смятие контактных поверхностей приводят к изменению радиального зазора в процессе его работы и жизненного цикла в целом. Радиальный зазор

между торцами лопаток и сопряженными элементами конструкции оказывает существенное влияние на газодинамическую устойчивость и эффективность компрессора [1]. Поиску технических решений, обеспечивающих уменьшение радиальных зазоров, уделяется большое внимание в отечественных научно-исследовательских программах и за рубежом. Для экспериментальной проверки таких решений требуется система измерения радиальных зазоров, обеспечивающая высокую частоту опроса до 250 кГц (с учетом частоты следования лопаток) и большое число измерительных каналов. Такие параметры достигаются автоматизацией системы измерения с использованием клиент-серверных технологий и промышленных микропроцессоров.

В ЦИАМ разработана система измерения, названная ЦИАМ-ОСИРЗ-8К. Для обеспечения высокой частоты опроса в ней используется оптический принцип измерения зазора. Датчик состоит из оптоволоконной пары (два оптических волокна, расположенные параллельно рядом друг с другом). Одно из волокон излучает свет, другое — принимает. От источника излучения свет по оптическому кабелю освещает торцы рабочих лопаток в моменты их прохождения мимо зонда. Часть света, отраженного торцом лопатки, попадает в другое волокно и передается в фотодетектор (рис. 1).

При проектировании системы были проведены патентные исследования по открытым источникам технической информации за последние 10 лет. Оптические методы измерения просты, устойчивы к электромагнитным помехам, а их основным недостатком являются влияние на сигнал потерь в волокне и изменения отражательной способности поверхности лопаток в процессе работы. При касании лопаток о срабатываемое покрытие или при образовании налета на поверхности лопаток интенсивность отраженного света изменяется независимо от изменения зазора. При патентных исследованиях выявлены технические решения¹, направленные на устранение указанного недостатка, присущего оптическим



Рис. 1. Оптоволоконный датчик, установленный над лопатками рабочего колеса

¹ Li Xunfeng; Huai Xiulan; Cheng Keyong; Zhou Xiaoming; Cai Jun, CN 03438814(A), Institute Of Engineering Thermophysics Chinese Academy Of Sciences, «Optical fiber measurement method and device of blade tip clearance». Zhang Xiaodong; Xie Siying; Niu Hang; Dong Xiaoni; Guo Qi; Zhao Xindan, CN 104697798, Xi'an Jiaotong University, «System and method for three-dimensional characterization of blade tip gaps and dynamic detection of optical fibers of aero-engine».

² Jiang Jiajia; Guo Haotian; Ye de Chao Li; Yang Zong; Wang Kai; Zhang Jilong, CN204329900, «Blade tip clearance measurement system based on large-frequency difference dual-frequency laser phase distance measurement».

методам. Интересный подход реализован в устройстве², принцип действия которого базируется на основе фазового метода измерения расстояний. В этом устройстве излучение двухчастотного лазера делится на опорное и измерительное. Опорное излучение проходит фиксированный путь от лазера до фотодетектора. Длина оптического пути другого луча включает удвоенную величину радиального зазора. По сдвигу фазы между лучами определяется величина радиального зазора. При этом загрязнение торцов оптических волокон не влияет на точность измерения радиального зазора. Однако в этом методе используется дорогостоящий двухчастотный лазер. В системе измерения зазоров ЦИАМ-ОСИРЗ-8К реализованы собственные алгоритмы, основанные на нормализации измеренного сигнала с использованием цифровых технологий.

Работы по доводке системы в ЦИАМ включали сравнительные испытания и измерения радиальных зазоров с использованием оптоволоконных датчиков и данных систем, использующих емкостные и контактные датчики [2]. Наряду с развитием системы измерений ЦИАМ проводилась верификация расчетных методов и сравнительные испытания с системой измерения фирмы CapaciSense, в рамках 7-й европейской исследовательской программы ESPOSA. По результатам исследований подтверждено хорошее совпадение расчетных методов с результатами измерений. Развитие расчетных методик позволяет анализировать причину изменений радиальных зазоров и оценивать эффективность мероприятий по обеспечению их регулирования, что в свою очередь сокращает объем экспериментальных исследований и сроки доводки компрессоров.

Основными задачами экспериментальных исследований являются максимальная информативность и достоверность измерений. Оснащение стендов современными, высокопроизводительными многоканальными системами измерений приводит к появлению значительных объемов информации, увеличению расхода технических и временных ресурсов при обработке, передаче, а также хранении зарегистрированных данных. Существующие на предприятиях отрасли измерительные системы в большинстве своем имеют разнородные данные измерений. Это усложняет их совместный анализ и выявление взаимосвязи физических причин и явлений при экспериментальных исследованиях. В разработанной системе ЦИАМ-ОСИРЗ-8К эта проблема учитывалась изначально, ее архитектура обеспечивает обработку, син-

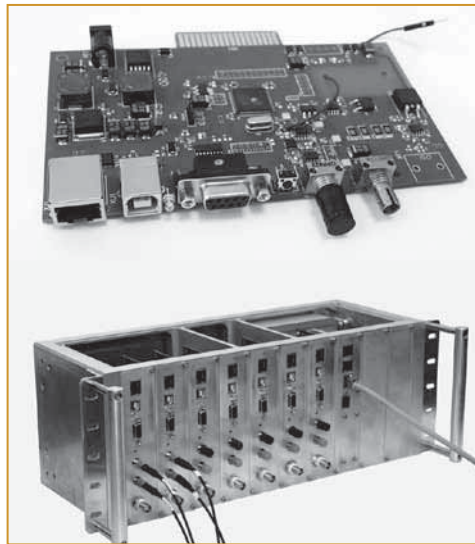


Рис. 2. Плата измерительного канала и блока системы ЦИАМ-ОСИРЗ-8К

хронизацию и запись измерений в единую базу данных.

Система измерения радиальных зазоров проектировалась как легко масштабируемая система, что достигается использованием отдельного вычислительного процессора в каждом канале измерения. Многоканальность системы позволяет оценить сложное пространственное изменение геометрии компрессорных корпусов под действием нагрузок с учетом неравномерного теплового состояния конструкции во время работы ГТД. В качестве вычислительного процессора был использован промышленный контроллер STM32, основанный на 32-битном ядре ARM (Advanced

RISC Machine) Cortex-M4 (<http://www.st.com>). Ядро Cortex-M4 включает систему прерываний, системный таймер, карту памяти, содержит множество шин, позволяющих выполнять операции параллельно, увеличивая общую производительность [4]. ARM Cortex предназначен для решения широкого круга технологических задач и представляет собой полноценное процессорное ядро. В то же время данный процессор является распределенным и надежным решением, конкурирующим по цене с 16-битными промышленными процессорами, что позволило сохранить стоимость созданной мультипроцессорной системы в приемлемом ценовом диапазоне для таких систем.

На рис. 2 представлена отдельная плата измерительного канала и блок системы ЦИАМ-ОСИРЗ-8К, включающий восемь измерительных плат.

Для любой мультипроцессорной измерительной системы, подобной ЦИАМ-ОСИРЗ-8К, критичным требованием является обеспечение обмена данными между всеми контроллерами в режиме реального времени, высокая устойчивость к помехам, а также арбитраж доступа каждого процессора к шине данных без потерь пропускной способности. Для этих целей была выбрана шина CAN (Controller Area Network) — фактический стандарт для промышленной сети, которая объединяет совокупность различных микроконтроллеров, исполнительных устройств и датчиков [3]. Пропускная способность шины CAN позволяет работать в созданной измерительной системе на скоростях до 1 Мбит/с, так как расстояния между измерительными платами в блоке не превышают 5...10 см. Важным фактором указанного выбора сети передачи данных явилась поддержка данного протокола микроконтроллером ARM Cortex.

Протокол CAN разработан компанией Robert Bosch GmbH в середине 1980-х годов и в настоящее время широко распространен в промышленной автоматизации, автомобильной и судовой промышленности, а также

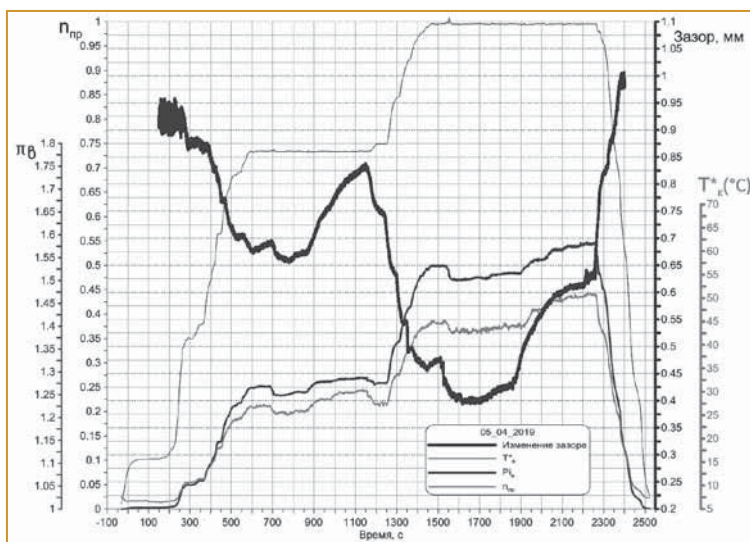


Рис. 3. График изменения среднего радиального зазора над рабочими лопатками модели вентилятора

во многих других областях [3]. Шина CAN представляет собой сеть с общей средой передачи данных, где все узлы могут одновременно принимать сигналы, передаваемые по шине. Однако CAN-контроллеры имеют аппаратную возможность фильтрации CAN-сообщений. В качестве фильтра в системе измерения зазоров использован уникальный 92-битный аппаратный идентификатор процессора, что позволило каждой измерительной плате (контроллеру) принимать только собственные управляющие команды, передаваемые данному измерительному каналу по шине, и полностью игнорировать поток данных результатов измерений, формируемый на шине всеми платами мультисканальной системы. Учитывая, что в протоколе CAN в формате сообщения предусмотрено 8 байт для данных, каждая измерительная плата в каждый момент формирует два значения — четырехбайтную временную метку и соответствующее ей четырехбайтное значение среднего зазора. Старшие 29 бит идентификатора процессора помещаются в 29-битное идентификационное поле CAN-сообщения (расширенный кадр). Таким образом, восьмиканальный измерительный блок при частоте опроса 100 с^{-1} на каждом канале формирует на шине данных информационный поток, который легко обеспечивается пропускными характеристиками CAN-шины. В нашем случае для системы ЦИАМ-ОСИР3-8К этот параметр составляет 500 кбит/с.

В ЦИАМ-ОСИР3-8К отразилась общая тенденция замены централизованной системы управления процессом измерения на распределенное управление. Это реализовано путем размещения в каждой измерительной плате собственного процессора, который, в совокупности с используемой двунаправленной

средой передачи данных, представляет легко масштабируемый, интеллектуальный канал.

На рис. 3 представлены результаты реализации такого подхода при измерении радиальных зазоров над лопатками модели вентилятора. На графике на рис. 3 показано характерное изменение зазора при дросселировании компрессора. Система измерения имеет разрешающую способность 0,005 мм. Для обнаружения касания концов рабочих лопаток о статор необходимо измерять индивидуальное значение зазора у каждой лопатки в нескольких точках по окружности корпуса в режиме реального времени. Это обуславливает необходимость высокой частоты опроса, реализованной в системе. Решение разнородных задач требует обеспечить возможность изменения системы измерения и клиентской части программного обеспечения. Так для решения задач измерения вытяжки диска на гибком вале потребовалось увеличить диапазон измерения зазора 0,8...5 мм, включить в программное обеспечение возможность изменять объем выборки для расчета среднего зазора от 64 тыс. до 4096 тыс. измерений, при частоте 12-разрядного цифро-аналогового преобразователя до 8 МГц.

Испытания системы в стендовых условиях позволили выявить ряд недостатков, например, по электромагнитным наводкам в металлизированном покрытии оптических волокон. После устранения недостатков планируется выполнить сертификацию системы на следующие параметры:

- датчики на основе оптоволоконной пары;
- максимально допустимая температура корпуса в месте установки датчика $750 \text{ }^\circ\text{C}$;
- число измерительных каналов до 64;
- скорость вращения лопаток до 650 м/с ;
- точность измерения зазора $\pm 0,01 \text{ мм}$ в диапазоне 0...1,6 мм;
- точность измерения зазора $\pm 0,1 \text{ мм}$ в диапазоне 2,5...6 мм.

Список литературы

1. Horlock J.H. The Determination of End-Wall Blockage in Axial Flow Compressors — A Comparison Between Various Approaches // Journal of Turbomachinery. 2000. 122(2).
2. Ланин А.И., Старцев А.Н., Стешаков Е.Г., Орехов И.К., Лебедев А.О. 7-ступенчатый экспериментальный компрессор высокого давления. Результаты испытаний // Насосы. Турбины. Системы. 2017 (2):20-29.
3. Третьяков С.А. Controller Area Network (CAN). Электроника. Минск. 1998.
4. Матюшов Н.В. Начало работы с микроконтроллерами STM8. Изд. Солон-Пресс. 2016.

*Стешаков Евгений Геннадьевич — начальник сектора 10201,
Молокович Игорь Николаевич — ведущий инженер-испытатель,
Иванов Сергей Витальевич — ведущий конструктор ФГУП «ЦИАМ».*
Контактный телефон +7(495) 362-24-46.
E-mail: inmolokovich@ciam.ru