

Измерение радиального зазора в компрессорных машинах волоконно-оптическим методом

Стешakov Е.Г., Молокович И.Н.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва
e-mail: egsteshakov@ciam.ru

Представлено описание системы измерения радиального зазора в турбокомпрессорных машинах с использованием оптоволоконных пар. Система построена на базе промышленного микроконтроллера STM32F4. Подробно рассмотрены структура и функционал ключевого элемента системы – регистрации измеренных параметров в центральном хранилище на базе СУБД MS SQL SERVER EXPRESS. Указаны основные результаты испытаний системы на стендах ЦИАМ.

Ключевые слова: радиальный зазор, турбокомпрессор, оптоволоконная пара, клиент-серверные технологии, SQL, временная синхронизация.

Fiber optic method of tip clearance measurement in compressor

Steshakov E.G., Molokovich I.N.

CIAM, Moscow

The article presents a description of the tip clearance measurement system in turbomachines using fiber optic pairs based on the STM32F4 industrial microcontroller. The structure and functionality of a key element of the system are described in detail – registration of measured parameters in a central experimental database of the DBMS MS SQL SERVER EXPRESS. The article indicates the main results of system tests at the test facilities of Central Institute of Aviation Motors.

Keywords: tip clearance, compressor, turbomachine, fiber optic pair, client-server technologies, SQL, time synchronization.

Введение

Компрессор авиационного ГТД в процессе работы подвергается воздействию высоких центробежных, аэродинамических, тепловых и вибрационных нагрузок. Упругие и пластические деформации, тепловое расширение, аэроупругие колебания лопаток, малоцикловая и термоциклическая усталость, трещины, ползучесть и смятие контактных поверхностей приводят к непрерывному изменению радиального зазора между ротором и корпусом компрессора, что оказывает существенное влияние на газодинамическую устойчивость и эффективность всего ГТД.

Экспериментальное определение радиального зазора требует разработки специальной системы измерений. На основе опыта разработки емкостных, контактных и волоконно-оптических систем измерения радиального зазора при исследовании характеристик компрес-

соров в ЦИАМ сформировались требования к облику такой системы.

В основе разработанной системы измерения радиального зазора лежит принцип действия оптоволоконной пары, состоящей из двух параллельно расположенных оптических волокон, одно из которых излучает свет, другое – принимает. От источника излучения свет по оптическому кабелю освещает торцы рабочих лопаток в момент их прохождения мимо зонда. Часть света, отраженного торцом лопатки, попадает в принимающее волокно и передается в фотодетектор (рис. 1).

При проектировании системы был изучен мировой опыт за последние 10 лет. Анализ источников технической информации показал, что большинство решений по измерению радиальных зазоров в турбокомпрессорных машинах основано на емкостных, ультразвуковых и рентгеновских методах, а также методах вихревых токов. При этом оптические методы измерения просты

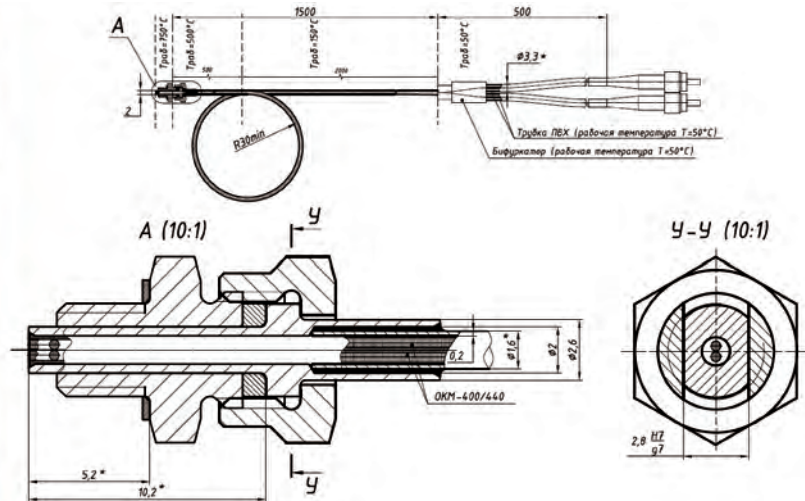


Рис. 1. Фотография и фрагмент чертежа оптоволоконного датчика, установленного над лопатками рабочего колеса КВД-7

по своей структуре и устойчивы к электромагнитным помехам. Их основными недостатками являются флуктуации света от источника, потери в волокне и изменение отражательной способности торцев лопаток в процессе работы (при касании лопаток о срабатываемое покрытие или образовании налета на их поверхности). Кроме того, возможно загрязнение оптических поверхностей зонда, обращенных в проточную часть. Технические решения, направленные на устранение указанных недостатков, изложены в патентах CN103438814, CN104697798 [1; 2]. Интересный подход, основанный на фазовом методе измерения расстояний, предложен в патенте CN204329900 [3]. В этом устройстве излучение двухчастотного лазера делится на опорный и измерительный лучи. Длина оптического пути опорного луча (от лазера до фотодетектора) постоянна. Длина оптического пути измерительного луча дополнительно включает в себя удвоенную величину радиального зазора, которую можно определить по сдвигу фазы между лучами. Загрязнение торцов лопаток в этом случае не влияет на точность измерений, однако использование дорогостоящего двухчастотного лазера приводит к высокой стоимости устройства.

В разработанной системе измерения зазоров ЦИАМ-ОСИРЗ-8К реализованы собственные методы, обеспечивающие достоверность и точность измерений, многоканальность и интеграцию в существующие стендовые автоматические информационно-измерительные системы (АИИС).

Система измерения радиальных зазоров ЦИАМ-ОСИРЗ-8К

К числу основных требований при проведении экспериментальных исследований авиационной техники относятся максимальная информативность и достоверность измерений в ходе испытаний, оперативность получения

информации, безопасность обмена и хранения данных. Оснащение стендов современными высокопроизводительными многоканальными системами измерений приводит к регистрации значительного объема информации и увеличению технических и временных затрат на обработку, передачу и хранение зарегистрированных данных. При этом существующие в ЦИАМ и предприятиях отрасли сетевые инфраструктуры АИИС, как правило, состоят из разнородных измерительных систем, данные от которых анализируются отдельно друг от друга, что осложняет оперативное взаимодействие широкого круга специалистов и выявление физических причин и явлений при экспериментальных исследованиях. Поузловая и комплексная доводка объектов авиационной техники требует структурированного подхода к работе с большими массивами разнородных данных, полученных с применением датчиков и преобразователей разного типа на различных режимах работы объекта.

В процессе многолетней работы по экспериментальным исследованиям компрессоров в ЦИАМ выполнялись сравнительные испытания и поэтапная доводка системы измерения радиальных зазоров с использованием оптоволоконных датчиков (рис. 2, [4]). При этом проводилось сопоставление результатов измерений емкостными, контактными и оптоволоконными датчиками. В рамках 7-й европейской исследовательской программы ESPOSA [5; 6] при верификации расчетных методов выполнено сравнение экспериментальных результатов, полученных с помощью системы измерения ЦИАМ и системы измерения фирмы SaipSense.

После доводки оптической и аналоговой частей системы измерения радиальных зазоров ЦИАМ-ОСИРЗ-8К основное внимание было уделено решению задач аналого-цифрового преобразования, обработки, передачи и хранения результатов измерений. Была поставлена задача разработать общий подход для управления массивом экспериментальных данных на основе использова-

ния клиент-серверных технологий с централизованными хранилищами данных на базе СУБД с открытым управляющим кодом T-SQL [7], поддержкой SQL запросов и обменом информацией на основе протоколов ODBC.

Централизованное хранение позволяет непосредственно в ходе эксперимента обеспечить единую временную синхронизацию всего массива экспериментальных данных с точностью до 10^{-8} с. Точность синхронизации определяется возможностями используемых серверов времени, а также эффективностью обработки переменных типа «дата – время» в СУБД (используемая СУБД Microsoft SQL SERVER EXPRESS имеет точность обработки переменных времени до 10^{-9} с).

Единая временная метка всех измеренных параметров позволяет синхронизировать экспериментальные данные в реальном времени и представить результаты испытаний в виде комплексных табличных структур для реализации любых пользовательских запросов. Для этого необходимо принять единый формат записи временных меток разнородными системами измерения.

Для формирования временных меток предлагается использовать подход формирования POSIX-времени, принятого в Unix-системах, которое определяется количеством секунд, прошедших с некоторого фиксированного момента (00:00:00 UTC 1 января 1970 г.). Такая метка имеет целочисленный формат и инвариантна относительно национальных форматов записи даты и времени. Временной меткой, удобной для синхронизации экспериментальных данных, может служить количество наносекунд, прошедших, например, с 1 января 2015 г. Для уменьшения разрядности используемых целых чисел и поддержки ранних версий MS SQL в системе измерения зазоров ЦИАМ-ОСИР3-8К используется временная метка в виде двух стандартных знаковых

четырёхбайтных целых чисел (BIGINT), каждое из которых имеет положительный диапазон изменения до 2^{31} [7]. Первое число определяет количество секунд, прошедших с момента отсчета (01.01.2015), второе – количество наносекунд, прошедших от начала записанной в первом поле секунды. Такой формат позволяет хранить временной отрезок продолжительностью более 60 лет с точностью до 10^{-9} с.

Система измерения радиальных зазоров ЦИАМ-ОСИР3-8К спроектирована с учетом принципиального использования сетевых клиент-серверных технологий на основном режиме работы. В каждом канале измерения размещен отдельный вычислительный процессор на базе промышленного контроллера STM32. Такая архитектура обеспечивает модульность системы и позволяет фактически неограниченно увеличивать число каналов. Многоканальность системы измерения, позволяющая определять также овализацию ажурных корпусов ГТД, являлась одним из ключевых требований при ее разработке. Отсутствие устройств промежуточного хранения данных обеспечило возможность работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в каждом канале на предельной частоте до 8 МГц. Структурная схема и фотографии платы измерительного канала и блока системы ЦИАМ-ОСИР3-8К с восьмью каналами и платой сбора данных показаны на рис. 3.

Обработка измеренного аналогового сигнала проводится на частоте ядра процессора (168 МГц), а полученные результаты немедленно отправляются в централизованное хранилище данных по протоколу Ethernet.

В разработанной системе использован промышленный контроллер STM32, основанный на 32-битном ядре ARM Cortex-M4 [8]. Семейство ARM Cortex представляет собой полноценное процессорное ядро

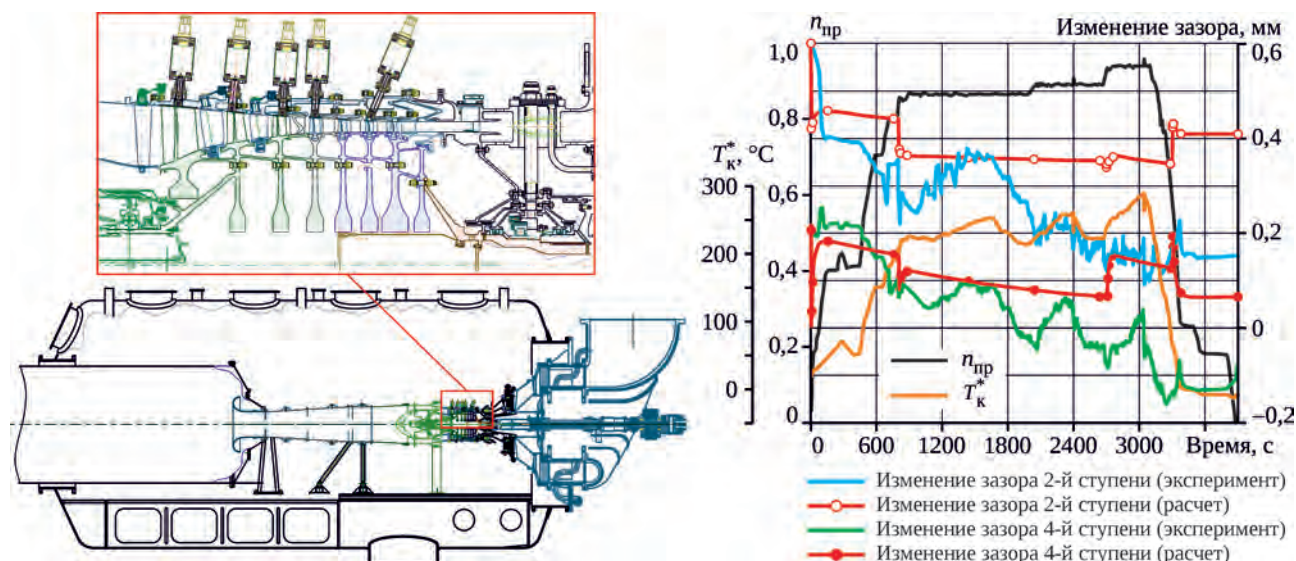


Рис. 2. Измерение радиальных зазоров в компрессоре КВД-7 на стенде ЦЗ ЦИАМ: схема установки датчиков в вертикальной плоскости и сопоставление измеренных и расчетных зазоров при испытаниях на напорных ветках 87, 90 и 94%

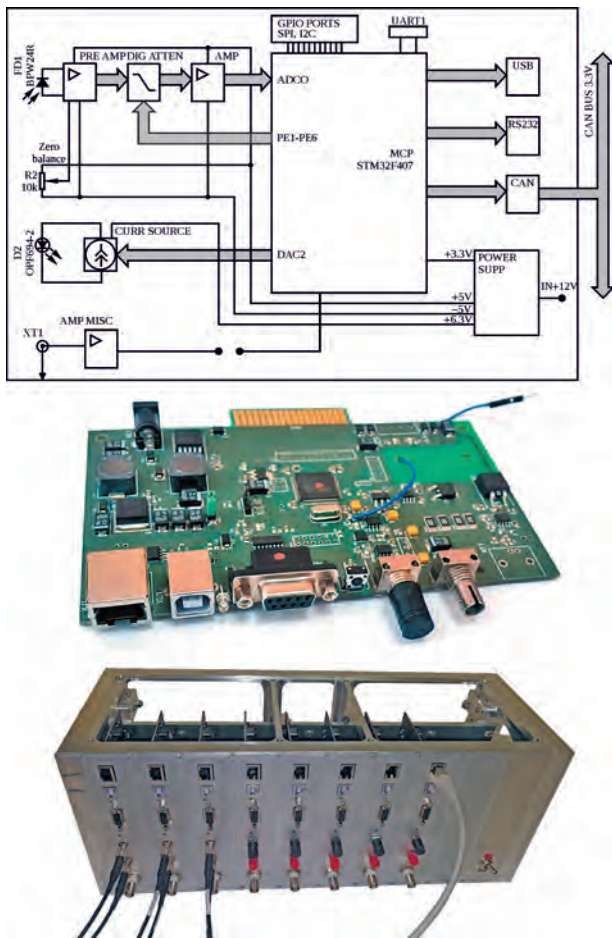


Рис. 3. Структурная схема, фотографии платы измерительного канала и блока системы ЦИАМ-ОСИРЗ-8К

со стандартным центральным процессорным устройством и системной архитектурой. Процессор этого семейства является надежным, недорогим и подходит для решения широкого круга технологических задач.

Стандартизованное микроконтроллерное ядро Cortex-M4 включает в себя: систему прерываний, системный таймер, систему отладки, карту памяти и множество шин, позволяющих увеличивать производительность за счет параллельного выполнения операций. Программное обеспечение для осуществления измерения радиальных зазоров целиком реализовано в памяти процессора. Это позволило полностью использовать потенциал микроконтроллера, включив только необходимые для системы измерения зазоров процессорные прерывания и периферию: аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), прямой доступ к памяти, таймер и шину передачи данных [8; 9].

Использование клиент-серверных технологий позволило также реализовать принцип разделения устройств на «записывающие» и «читающие». Так как данные с измерительного устройства сразу записываются в центральное хранилище, то отпадает необходимость тратить

значительную часть ресурсов на визуализацию измеренных данных оператору, как это реализовано, например, в регистраторе-анализаторе MIC-355М производства НПП «МЕРА».

Для предоставления данных измерения неограниченному количеству удаленных операторов используются дополнительные «читающие» устройства, которые параллельно и независимо считывают всю совокупность измеренных данных из центрального хранилища. При таком подходе количество операторов, подключенных к АИИС и АСУ ТП (автоматической системе управления технологическими процессами), не влияет на производительность системы измерения. Для управления и разграничения доступа используются стандартные возможности СУБД (MS SQL), а данные от разнородных измерительных систем синхронизируются между собой с упомянутой выше точностью в темпе эксперимента, что обеспечивает более высокий качественный уровень проведения эксперимента.

Для иллюстрации преимуществ такого подхода на рис. 4 показаны результаты измерения радиальных зазоров при испытаниях модели вентилятора на стенде ЦЗ-А ЦИАМ. Благодаря наличию синхронизированных данных о радиальных зазорах и параметрах вентилятора вдоль напорной ветки выявлены фактические зазоры над лопаткой на границе устойчивости, что важно для верификации методики аэродинамического проектирования. Анализ результатов показывает необходимость учета изменения зазора при дросселировании компрессора.

Внедрение системы измерения радиальных зазоров ЦИАМ-ОСИРЗ-8К

С целью внедрения разработанной системы измерения радиальных зазоров в стендовые АИИС и АСУ ТП выполнены измерения на стендах ЦИАМ ЦЗ-А, РС-1Д и УК-2. При этом были решены следующие задачи:

- измерение среднего радиального зазора над рабочими лопатками вентилятора на стенде ЦЗ-А;
- измерение вытяги диска на гибком вале на стенде РС-1Д;
- определение всплытия подшипника скольжения на стенде УК-2.

Решение разнородных задач позволило уточнить требования к параметрам системы измерения и клиентской части программного обеспечения. Так, при решении задачи измерения вытяги диска на гибком вале потребовалось увеличить диапазон измерения зазора с 0,8 мм до 5 мм и включить в программное обеспечение возможность изменять объем выборки для расчета среднего зазора от 64 000 до 4 096 000 измерений (при частоте 12-разрядного ЦАП до 8 МГц).

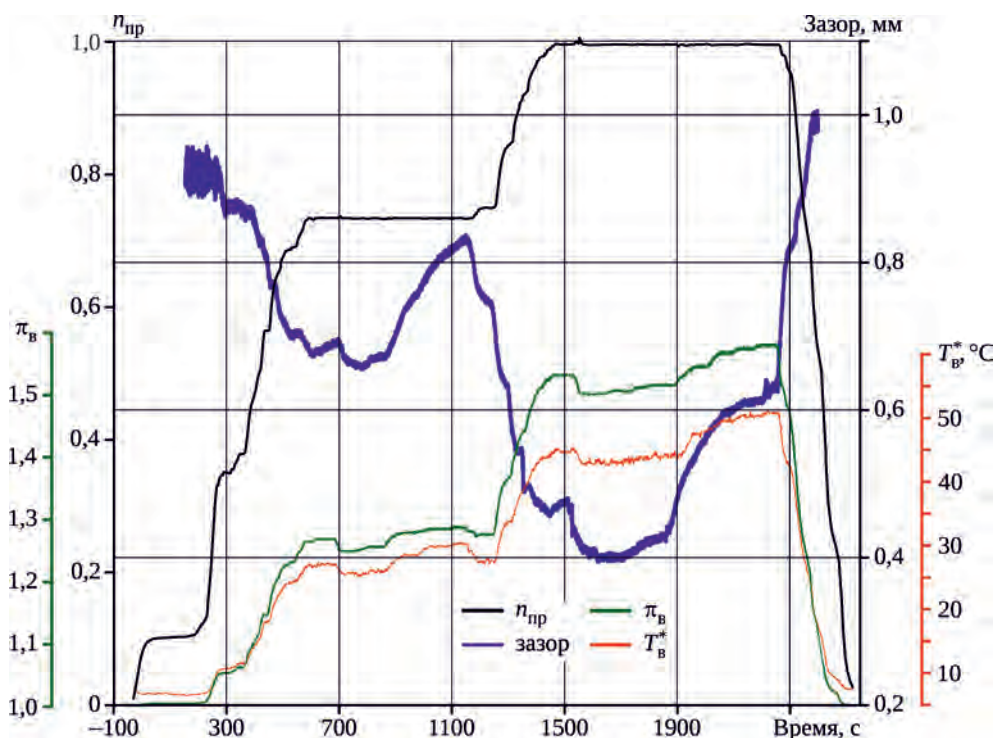


Рис. 4. Графики изменения параметров вентилятора и среднего радиального зазора над рабочими лопатками при испытаниях на стенде Ц-ЗА ЦИАМ

Испытания системы в стендовых условиях позволили выявить следующие недостатки: электромагнитные наводки в металлизированном покрытии оптических волокон, неудобство монтажа датчиков. Работа по устранению этих недостатков ведется в настоящее время.

В ходе выполнения работ на стенде Ц-ЗА была отработана принципиальная возможность синхронизации разнородных экспериментальных данных на основе клиент-серверных технологий. Синхронизация выполнена между результатами измерения зазоров и данными, полученными переносным регистратором динамических параметров МИС-355М (НПП «МЕРА»), имеющим сетевой интерфейс для работы в локальных сетях. Совместно с сотрудниками предприятия «МЕРА» разработано специализированное программное обеспечение для записи результатов измерений регистратора МИС-355М в центральное хранилище данных с применением временных меток описанного выше формата. Подтверждена техническая возможность синхронизации данных измерений в реальном времени с частотой опроса до 200 кГц по каждому из каналов измерений.

Заключение

В системе измерения радиальных зазоров ЦИАМ-ОСИР3-8К реализована возможность интеграции со стендовыми автоматическими информационно-измерительными системами и системами автоматического управления технологическими процессами на основе SQL-запросов и клиент-серверных технологий. В системе принят единый формат временной метки для записи в центральное хранилище данных. Технически обоснована возможность синхронизации разнородных экспериментальных данных с точностью до 10^{-8} с.

Основные параметры системы измерения радиальных зазоров ЦИАМ-ОСИР3-8К:

- датчики на основе оптоволоконной пары;
- максимально допустимая температура корпуса в месте установки датчика 750°C ;
- неограниченная масштабируемость по числу измерительных каналов;
- скорость вращения лопаток до 650 м/с;
- точность измерения зазора $\pm 0,01$ мм в диапазоне 0...1,6 мм и $\pm 0,1$ мм в диапазоне 2,5...6 мм.

Литература / References

1. Optical Fiber Measurement Method and Device of Blade Tip Clearance: patent CN 103438814(A) / Xunfeng Li, Xiulan H., Keyong Ch., Xiaoming Zh., Jun C.; Institute Of Engineering Thermophysics Chinese Academy Of Sciences.
2. System and Method for Three-Dimensional Characterization of Blade Tip Gaps and Dynamic Detection of Optical Fibers of Aero-Engine: patent CN 104697798 / Xiaodong Zh., Siying X., Hang N. et al.; Xi'an Jiaotong University.

-
3. Blade Tip Clearance Measurement System Based on Large-Frequency Difference Dual-Frequency Laser Phase Distance Measurement: patent CN 204329900 / Jiajia J., Haotian G., Ye de Chao Li et al.
 4. 7-ступенчатый экспериментальный компрессор высокого давления. Результаты испытаний / А.И. Ланшин, А.Н. Старцев, Е.Г. Стешаков, И.К. Орехов, А.О. Лебедев // Насосы. Турбины. Системы. 2017. № 2 (23). С. 20–29.
7-stupenchatyi eksperimental'nyi kompressor vysokogo davleniia. Resul'taty ispytaniy. [7-stage Experimental High Pressure Compressor. Test Results]. A.I. Lanshin, A.N. Startsev, E.G. Steshakov, I.K. Orekhov, A.O. Lebedev. Pumps. Turbines. Systems. 2017. No. 2(23). P. 20–29.
 5. Steshakov E., Starcev A. Results of Tip Clearances Measurement in Centrifugal Compressor. Grant no. ACP1-GA-2011-284859-ESPOSA. Deliverable no. ESP-D2.1.5-1. December 3, 2015.
 6. Steshakov E., Drogin M. Implementation and Verification of Clearance Changes in Centrifugal Compressor on the Results of Experiments. Grant no. ACP1-GA-2011-284859-ESPOSA. Deliverable no. ESP-D2.1.5-1. January 14, 2016.
 7. Фленов М.Е. Transact-SQL: наиболее полное руководство. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 565 с. (В подлиннике®).
Flenov M.E. Transact-SQL: naibolee polnoe rukovodstvo [Transact-SQL: the Most Comprehensive Guidebook]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg publ., 2006. 565 p. (In the original®).
 8. RM0090. Reference manual: STM32F405/415, STM32F407/417, STM32F427/437 and STM32F429/439 advanced ARM®-based 32-bit MCUs / STMicroelectronics. 2016. URL: <http://www.st.com>.
 9. Матюшов Н.В. Начало работы с микроконтроллерами STM8. М.: Солон-Пресс, 2016. 208 с. (Радиоэлектроника).
Matiushov N.V. Nachalo raboty s mikrokontrollerami STM8 [Getting Started With STM8 Microcontrollers]. Moscow: Solon-Press publ., 2016. 208 p. (Radioelektronika [Radioelectronics]).

Материалы получены редакцией 23.09.2019