

УДК 622.012.2:621.31

Н.И. БУРАУ¹, А.М. ПАВЛОВСКИЙ¹, В.Н. ХАРИТОНОВ², Л.Л. ЯЦКО³¹Национальный технический университет Украины «КПИ»²ГП «Ивченко-Прогресс»³ОАО «НТК «Электронприлад»

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА AT91SAM7X

Рассматривается возможность использования микроконтроллера AT91SAM7X семейства ARM в качестве основного вычислительного ядра модуля автоматической защиты двигателя при обрыве вала силовой турбины. Приведены характерные особенности микроконтроллеров с ядром ARM. Разработана блок-схема модуля защиты двигателя, создан макет модуля. Разработано и протестировано технологическое программное обеспечение, предназначенное для приема аналоговых сигналов, преобразования и передачи в микроконтроллер, сохранения значений измерений в буферную переменную, формирования пакетов для выдачи во внешние цифровые системы сопрягаемых устройств.

Ключевые слова: обрыв вала, диагностика повреждений валов и защита двигателя, микроконтроллеры семейства ARM, модуль автоматической защиты двигателя.

Введение

Авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) являются сложными динамическими системами, состоящими из множества функционально связанных подсистем, узлов и блоков, которые во время эксплуатации подвергаются комплексному воздействию механических, аэродинамических, тепловых и др. нагрузок. Основными силовыми элементами конструкции ГТД являются роторы, разрушения элементов которых в полете как правило приводят к предпосылке летного происшествия. Приведенные в [1] данные свидетельствуют о значительном распространении усталостных повреждений роторных элементов, причем наиболее тяжелые последствия возникают при разрушениях валов и дисков роторов. Около трети разрушений вызываются вибрационными и тепловыми нагрузками силовых элементов, а половина из них случается на переходных (нестационарных) режимах эксплуатации.

Разрушение валов в эксплуатации происходит из-за развития трещин под влиянием изгибающих и скручивающих моментов [1]. Распространение усталостных трещин в валах связано с многоцикловой усталостью. Часто возникновение трещин в эксплуатации вызвано первоначальным повреждением материала по разным причинам, нарушением в условиях сопряжения в узлах соединений, технологическими факторами. Во многих случаях это обусловлено некачественным монтажом роторных элементов двигателя. Трещины в валах возникают также в торцевых шлицах (на фланцах, у основания

шлиц) и распространяются в сторону центрального отверстия вала. Часто трещины развиваются по окружности против направления вращения вала и приводят к обрыву и разрушению вала в полете.

Согласно требованиям к проектированию воздушных судов и силовых установок, возникающие внутренние разрушения элементов конструкции двигателя должны быть локализованными, т. е. отдельные части разрушенных элементов не должны выходить за пределы двигателя. Поэтому диагностика повреждений валов роторов и защита роторных элементов двигателя в случае разрушения вала (локализация разрушения) являются важными актуальными задачами в общей проблеме повышения надежности эксплуатации авиационной техники.

1. Формулирование проблемы

В соответствии с требованиями международных Авиационных правил AP-33 [2] и JAR-T850 в системе автоматического управления и контроля авиационных двигателей предусматривается экстренный останов двигателя в случае обрыва вала его силовой (свободной) турбины (СТ) для предупреждения не контролируемого увеличения частоты вращения СТ и возможных катастрофических последствий. Частота вращения роторных элементов ГТД изменяется от десятков до нескольких сотен оборотов в секунду. При обрыве вала происходит внезапное торможение одной части вала и неконтролируемое ускорение другой, что может привести к разрушению ротора и выбросу нелокализованных

фрагментов роторных элементов в окружном и осевом направлениях.

Способы обнаружения внезапного разъединения (обрыва) вала на рабочих режимах основаны на измерении и контроле изменения частоты вращения с использованием стандартного или избыточного количества датчиков, на определении разности в показаниях датчиков частоты вращения, расположенных в различных частях контролируемого вала [3-5]. Однако быстротечность процесса разрушения обуславливает жесткие требования ко времени идентификации повреждения, выработки и осуществления управляющих воздействий на клапан подачи топлива для аварийного останова двигателя. Как показали расчеты, например, в [3], в случае разрушения вала ротора СТ блок управления и контроля должен выдать команду на прекращение подачи топлива за время не более 0,03 с.

На сегодняшний день интенсивное развитие и внедрение в авиастроении микропроцессорной техники обеспечивает возможность существенной модернизации систем автоматического управления и диагностики (САУД) авиационных двигателей и повышения их надежности, эффективности, быстродействия. Так, использование в САУД элементов цифровой электроники позволяет увеличить скорость обработки данных на 15%, а при использовании в качестве основного вычислительного ядра современных микроконтроллеров скорость обработки возрастает на 30% по сравнению с аналоговыми системами.

Целью данной статьи является обоснование возможности и эффективности использования современного микроконтроллера AT91SAM7X семейства ARM в качестве основного вычислительного ядра модуля автоматической защиты двигателя (МАЗД) при обрыве вала СТ.

2. Решение проблемы

2.1. Особенности микроконтроллеров с ядром ARM

На сегодняшний день микроконтроллеры (МК) с ядром ARM (сокращение от названия английской компании Advanced RISC Machines) являются безусловным лидером рынка 32-х разрядных МК для встраиваемых систем. Архитектура ARM представляет собой промышленный стандарт, используемый крупнейшими мировыми компаниями - производителями полупроводниковой техники, такими как Altera, Analog Devices, Atmel, Intel, National Semiconductor, Texas Instruments и др [6]. Это позволяет разработчикам микропроцессорных систем различного назначения использовать как универсальное,

так и специально разработанное программное обеспечение при использовании различных типов уже существующих МК данного семейства, а также при переходе на новое ядро ARM.

Значительные функциональные возможности МК семейства ARM обусловлены дополнительными расширениями к базовой архитектуре, среди которых: 16-ти разрядный набор команд для оптимизации размера кода, улучшающий эффективность использования памяти программ; набор арифметических команд для цифровой обработки сигналов или опциональный сопроцессор, поддерживающий операции с плавающей запятой над данными с двойной точностью; расширение для аппаратной поддержки команд и приложений на языке программирования Java; расширение для повышения производительности при обработке аудио и видео сигналов.

2.2. Разработка модуля автоматической защиты двигателя

Для разработки МАЗД используем МК семейства ARM7 AT91SAM7X, в состав которого входят: ядро ARM7TDMI ARM Thumb; встроенная высокоскоростная флэш-память; встроенная высокоскоростная оперативная память SRAM; блок прямого доступа к памяти, значительно ускоряющий обмен данными между периферийными устройствами и памятью; усовершенствованный контроллер прерываний; отладочный порт; два параллельных контроллера ввода-вывода; коммуникационные каналы (USB, Ethernet MAC 10/100 base-T, USART, SPI).

На рис. 1 представлена функциональная блок-схема МАЗД. Аналоговые входные сигналы $x(t)$ подаются на входы предварительных усилителей-ограничителей, а после преобразований – на входы аналого-цифровых преобразователей (АЦП). В разработке используется АЦП AD7892 фирмы Analog Devices - высокоскоростной маломощный 12 битный АЦП с однополярным питанием +5В. АЦП содержит устройство выборки-хранения, быстродействующий преобразователь (1,47 мкс), источник опорного напряжения (2,5 В) и высокоскоростной интерфейс с возможностью изменения формата. Стандартные входные сигналы управления и малое время доступа к данным позволяет организовать простой и надежный интерфейс с МК.

Через шину данных при запросе МК сигналы заходят на порты МК, сохраняясь в массив данных, предназначенный для дальнейшей обработки с целью определения признака повреждения и принятия решения о прекращении подачи топлива. При настройках и отладках модуля сигнал через формирователь каналов обмена, используя CAN-интерфейс, подается в персональный компьютер, также через

формирователь каналов обмена происходит переграммированием средств Keil Software. Для синхронизации каскадов входных сигналов $x(t)$ могут быть использованы вспомогательные синхросигналы $y(t)$, которые подаются на таймерные входы МК. Индикаторные выходы МК через формирователи выходных команд формируют бинарные выходные сигналы $z(t)$.

Для создания модуля защиты, создания и отладки технологического программного обеспечения (ПО), проверки его работоспособности использовалась многоцелевая платформа для испытаний УКВ-500 разработки ОАО «НТК» «Электронприлад», включающая МК фирмы ATMEL AT91SAM7X256 и 2 внешних АЦП AD7892 фирмы Analog Devices.

программирование МК с использованием прибора УКВ-500 имеет 2 коммуникационных порта для перепрограммирования и для связи с управляющим пультом. Общий вид лабораторного макета представлен на рис. 2. Технологическое ПО написано на языке C с использованием вставок языка ASSEMBLER и программного пакета μ Vision Keil Software. Технологическое ПО предназначено для приема аналоговых сигналов по измерительным каналам, преобразования сигналов в АЦП и передачи по SPI в МК, сохранения значений измерений в буферную переменную (для обработки по соответствующим алгоритмам), а также формирования пакетов для выдачи во внешние цифровые системы сопрягаемых устройств.

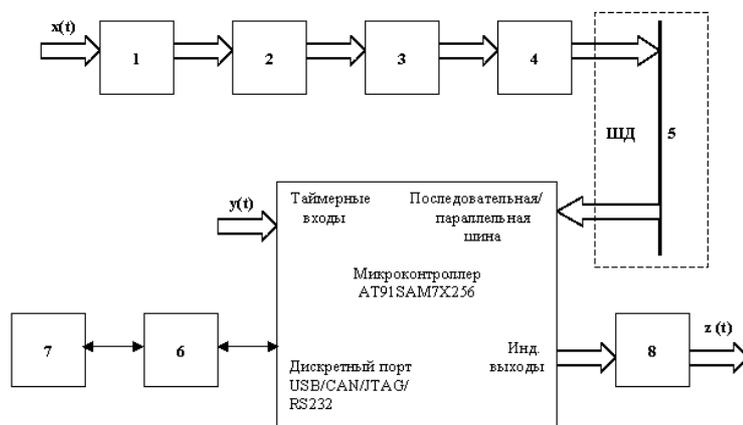


Рис. 1. Функциональная блок-схема модуля автоматической защиты двигателя на основе МК AT91SAM7X:
1 – блок предварительных усилителей; 2 – блок фильтров; 3 – блок согласующих усилителей; 4 – АЦП;
5 – шина данных; 6 – формирователь каналов обмена; 7 – блок обмена данными, ПК;
8 – формирователь выходных команд



Рис. 2. Общий вид лабораторного макета: 1 – генератор сигналов;
2 и 3 – источники питания постоянного тока; 4 – УКВ-500; 5 – источник питания лабораторной установки;
6 – универсальный управляющий пульт; 7 – программатор ATMEL SAM-ICE

Заключение

Разработанный модуль предназначен для реализации алгоритмов обнаружения обрыва вала силовой турбины и защиты двигателя. Реализация разработки позволит:

- повысить надежность и быстрдействие выявления обрыва и своевременного оперативного воздействия на функцию подачи топлива;

- упростить систему защиты за счет использования только штатных датчиков информации.

Модуль является универсальным и может быть

использован для модернизации САУД авиационных двигателей, реализации многоуровневых алгоритмов обработки информации и распознавания состояния двигателей в эксплуатации.

Литература

1. Шанявский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях / А.А. Шанявский. – Уфа: Монография, 2003. – 803 с.
2. Авиационные правила, часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов / Межгосударственный авиационный комитет. - М.: ОАО «Авиаиздат», 2004. – 44 с.
3. Яцко Л.Л. Комплексна діагностика технічного стану роторів авіаційних двигунів на стаціонарних та нестационарних режимах: автореф.

дис.... канд. техн. наук: 05.11.13 / Яцко Ласло Ласлович, НТУУ «КПІ». – К., 2008. – 20 с.

4. United States Patent 6 283 095, Current Intern. Class F02C 009/28, Shaft decouple logic for gas turbine engine / Thompson et al.; Assignee: Pratt & Whitney Canada Corp. – Appl. No 09/725,090; Filed 29.11.2000; Issue 25.09.2001

5. Пат. 32219 Україна, МПК F02C 9/0, Спосіб захисту газотурбінного двигуна / Кравченко І.Ф., Разладський О.О., Харитонов В.М., Різник С.Б., Врублевський Ю.В., Сігарев С.Е.; Власник ДП «Івченко-Прогрес». – № u200714528; заявл. 24.12.2007; опубл. 12.05.2008, Бюл. №9. – 7 с.

6. Микроконтролери семейства ARM (ARM 7 и ARM 9). Обзор [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: www.phyton.ru/pages/pages41.html. – заголовок с экрана.

Поступила в редакцию 16.05.2011

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

РОЗРОБКА МОДУЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ЗАХИСТУ ДВИГУНА НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА AT91SAM7X

Н.І. Бурау, О.М. Павловський, В.М. Харитонов, Л.Л. Яцко

Розглядається можливість використання мікроконтролера AT91SAM7X сімейства ARM як основного обчислювального ядра модуля автоматичного захисту двигуна у випадку обриву вала силової турбіни. Наведено характерні особливості мікроконтролерів з ядром ARM. Розроблено блок-схему модуля захисту двигуна, створено макет модуля. Розроблено та випробувано технологічне програмне забезпечення для прийому аналогових сигналів, їх перетворення та передачі в мікроконтролер, зберігання значень вимірювань у буферну змінну, формування пакетів даних для видачі у зовнішні цифрові системи спряжених пристроїв.

Ключові слова: обрив вала, діагностика пошкоджень валів та захист двигуна, мікро контролери сімейства ARM, модуль автоматичного захисту двигуна.

DEVELOPMENT OF MODULE OF ENGINE AUTOMATIC PROTECTION ON BASIS OF MICROCONTROLLER AT91SAM7X

N.I. Bouraou, A.M. Pavlovskij, V.N. Kharitonov, L.L. Yatsko

The opportunity of use of microcontroller AT91SAM7X of family ARM as the basic computing kern of the module of automatic protection of the engine is considered at breakage of the shaft of the power turbine. Prominent features of microcontrollers with kern ARM are given. The block diagram of the module of protection is developed, the breadboard model of the module is created. The technological software intended for reception of analog signals, transformations and transfers to the microcontroller, preservations of values of measurements in a buffer variable, formations of packages for delivery in external digital systems of integrated devices is developed and tested.

Key words: breakage of the shaft, diagnostics of damages of shafts and engine protection, microcontrollers of family ARM, the module of automatic protection of the engine.

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.

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.

Харитонов Виктор Николаевич – инженер-конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина; e-mail: 03510@ivchenko-progress.com.

Яцко Ласло Ласлович – канд. техн. наук, заместитель главного конструктора ОАО «НТК «Электронприлад», Киев, Украина, e-mail: iatsko@mail.ru.