

УДК 629.11

МНОГОКАНАЛЬНАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

О.Ч. Ролич,

доцент БГУИР, канд. техн. наук, доцент

В.Е. Тарасенко,

зав. каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Разработана многоканальная система с гибкой структурой, позволяющая осуществлять принципы комплексного диагностирования. Обоснованы базовые интерфейсы взаимодействия центрального микроконтроллера системы с модулем данных: I2C, функционирующий в высокоскоростном режиме 400 кбит/с, 1-WIRE, SPI и I2S. Модуль данных имеет миниатюрные размеры, а система в целом характеризуется портативностью и автономностью.

Ключевые слова: двигатель, диагностика, система, сигнал, сенсор, архитектура, контроллер, блок, датчик.

A multi-channel system with a flexible structure has been developed, it allows to implement the principles of complex diagnosis. The basic interfaces for the interaction of the central microcontroller of the system with the data module are justified: I2C, operating in the high-speed mode 400 kbps, 1-WIRE, SPI and I2S. The data module has miniature size, and the system as a whole is characterized by portability and autonomy.

Keywords: engine, diagnostics, system, signal, sensor, architecture, controller, unit, sensor.

Введение

Современные машины и их двигатели существенно отличаются улучшенными эксплуатационными свойствами (повышенными скоростями движения, надежностью работы агрегатов и систем, экономичностью и т.д.). Улучшение эксплуатационных характеристик машин привело к усложнению их конструкции, повышению точности изготовления деталей и их сборки [1, 2]. Именно поэтому ранее существующие способы и методы контроля технического состояния дизельного двигателя сегодня не могут в полной мере удовлетворить техническую службу предприятий, так как необходимы современные диагностические комплексы, а также методики комплексного диагностирования. Качественное определение технического состояния узлов, агрегатов и систем современных двигателей возможно только при условии применения высокопроизводительного специализированного диагностического оборудования и современных методов контроля, обеспечивающих получение достоверных результатов.

Основные механические, молекулярные и электродинамические процессы, протекающие в системах, узлах и механизмах дизельных двигателей, сопровождаются излучением спектра частот, как правило, звукового (в том числе и прилегающих к нему инфра и ультразвука) и теплового диапазонов. Анализ сигналов дизельной аппаратуры в указанных частотных диапазонах позволяет в реальном времени проводить ее контроль и диагностику, судить о текущем состоянии, оценивать остаточный ресурс отдельных узлов и элементов.

Виброакустический и тепловой контроль осуществляется как контактными, так и бесконтактными способами. В первом случае уровень вибраций и распределение температурного поля измеряются установкой вибродатчиков (акселерометров и гироскопов) и датчиков температуры в местах непосредственного съема данных. Второй (бесконтактный) вариант подразумевает получение звуковых сигналов с помощью распределенной системы микрофонов и измерение температуры посредством тепловизионных камер (цифровых болометров), установленных дистанционно [3]. Бесконтактный контроль незаменим во время диагностики внутренних и труднодоступных узлов в течение их работы, без остановки дизеля. Объединение контактных и бесконтактных способов формирует целостную картину пространственно-временного распределения звукового давления и температуры отдельных узлов и механизмов при работе дизельного двигателя в масштабе реального времени.

Основная часть

Современный уровень развития микропроцессорной и сенсорной техники способствует разработке недорогой многоканальной системы диагностики дизельных двигателей на базе интегрирования виброакустического и тепловизионного каналов. Поэтому, целью работы является обоснование архитектуры интегрированной системы виброакустической и тепловой диагностики, позволяющей в последующем проводить оценку остаточного ресурса систем, узлов и механизмов дизельных двигателей в масштабе реального времени.

Предлагаемая архитектура многоканальной системы представлена на рисунке 1. Центральным ее

– тепловизионный сенсор Lepton FLIR с разрешением 160x120 пикселей и интерфейсами I2C для настройки, и SPI для передачи кадров в формате VoSPI [10].

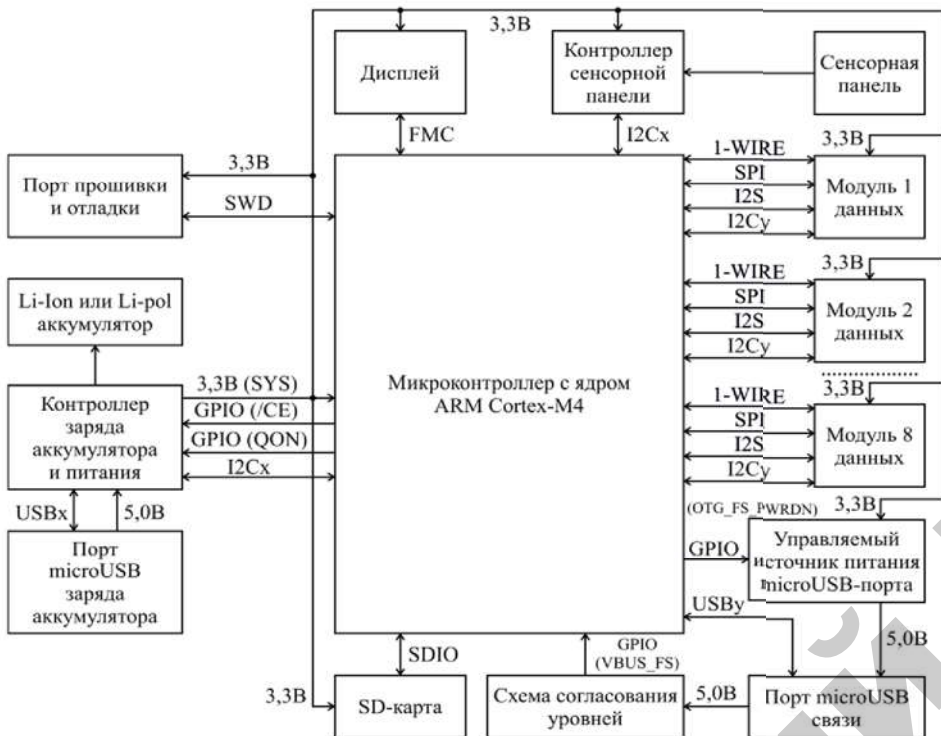


Рис. 1. Архитектура многоканальной системы виброакустической и тепловой диагностики дизельной аппаратуры

блоком выступает современный микроконтроллер STM32F407VGT6 с ядром ARM Cortex-M4. Микроконтроллер имеет в составе все базовые интерфейсы связи (I2C, SPI, I2S, UART/USART, 1-WIRE), присущие цифровым акселерометрам, гироскопам, датчикам температуры, тепловым сенсорам, и, как минимум, по два порта каждого интерфейса [4-9]. Кроме этого, благодаря блоку DMA прямого доступа к памяти, позволяющего конвейеризировать процессы управления периферией, на его основе, в связке с таймерами общего назначения можно дополнительно построить высокоскоростные программные интерфейсы, например, SWSPI (SoftWare SPI) и значительно расширить аппаратную периферию системы. Для ускорения работы с вещественными числами и быстрого автоматизированного анализа массивов данных, в ядро ARM Cortex-M4 встроен сопроцессор плавающей точки.

Считанные с датчиков отсчеты поступают на микроконтроллер с модуля данных с изображенной на рис. 2 структурой. Модуль данных интегрирует:

- контактный датчик DS18B20 температуры с выходным интерфейсом 1-WIRE;
- вибродатчик MPU6050 и тепловой сенсор AMG8833 разрешением 8x8 пикселей с интерфейсом I2C;
- MEMS-микрофон с частотно-импульсно модулированным выходным сигналом, передаваемым по шине I2S;

I2C, обращаясь к ней лишь в моменты изменения режима работы сенсора тепловизора.

В обобщенную транзакцию взаимодействия с модулем MPU6050, состоящего из MEMS акселерометра и гироскопа, входят 4 байта пакетов данных акселерометра и 4 байта пакетов данных гироскопа [11]. Для высокоскоростного режима функционирования шины I2C, обеспечивающего обмен между ведущим микроконтроллером и ведомым модулем MPU6050 со скоростью 400 кбит/с, отдельные транзакции, имеющие длину четыре байта, делятся не более 90 мкс, что соответствует частоте считывания данных 11,1 кГц. Предельные же частоты дискретизации для гироскопа и акселерометра равны соответственно 30 кГц (что существенно выше 11,1 кГц) и 1 кГц [11]. Поэтому в работе с гироскопом модуля MPU6050 обеспечивается избирательность функционирования пользовательского интерфей-

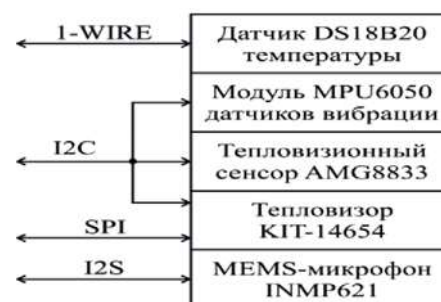


Рис. 2. Структура модуля данных

стью 400 кбит/с, отдельные транзакции, имеющие длину четыре байта, делятся не более 90 мкс, что соответствует частоте считывания данных 11,1 кГц. Предельные же частоты дискретизации для гироскопа и акселерометра равны соответственно 30 кГц (что существенно выше 11,1 кГц) и 1 кГц [11]. Поэтому в работе с гироскопом модуля MPU6050 обеспечивается избирательность функционирования пользовательского интерфей-

са системы, заключающаяся в приеме данных только от одного из датчиков (либо акселерометра, либо гироскопа) в пакетном режиме, позволяющем считывать их с частотой до 44,4 кГц, приемлемой как для акселерометра, так и для гироскопа.

Тепловой сенсор AMG8833 разрешением 8 x 8 пикселей предназначен для бесконтактного и дистанционного считывания распределения тепла в объекте исследования, и способен передавать поток видеоданных с частотой 10 кадр/с [6]. Так как отдельный кадр в AMG8833 представлен 64-элементной матрицей общим размером немногим более 128 байт, указанная кадровая частота соответствует относительно невысокой скорости шины I2C, равной 12 кбит/с. Следует отметить, что при работе I2C на стандартной скорости 100 кбит/с, в паузе между кадрами AMG8833 можно формировать совместные выборки от акселерометра и гироскопа модуля MPU6050 с целью их накопления, последующего анализа и принятия решений.

Тепловизор KIT-14654, связанный с центральным микроконтроллером отдельным интерфейсом SPI, тактируется меандром частотой в диапазоне от 10 МГц до 24 МГц. Он обеспечивает в формате VoSPI передачу кадров разрешением 160 x 120 пикселей со скоростью 26 кадр/с. Каждый двухбайтный яркостный элемент кадра тепловизора кодируется в оттенках серого, и программой микроконтроллера таблично преобразуется в цветной формат путем применения палитры «rainbow» или «colormap» [1].

Цифровой миниатюрный MEMS-микрофон INMP621, считывающий сигналы звукового давления работающей дизельной аппаратуры, передает центральному микроконтроллеру результирующий битовый поток аудиоданных в PDM-формате по интерфейсу I2S [8]. Однобитная импульсно-плотностная (PDM) модуляция получила широкое распространение в электронике и цифровой обработке сигналов, благодаря высокому быстродействию технических решений, ее реализующих, помехоустойчивости, соотношению сигнал – шум, простоте схемотехнической реализации с единственной линией данных [12, 13]. PDM-формат повсеместно используется в генерации и обработке аудио сигналов, и микрофон INMP621 его всецело поддерживает.

Пользовательский интерфейс контроля и управления системой диагностики дизельной аппаратуры представлен на рисунке 1 дисплейным модулем, взаимодействующим с центральным микроконтроллером по интерфейсу FMC (Flexible Memory Controller), и сенсорной панелью, управляемой по шине I2C.

Следует отметить, что в предлагаемой авторами архитектуре присутствуют две независимые шины I2Cx и I2Cy. К одной из них (I2Cx) подключен контроллер устройства ввода пользовательских данных, т.е. сенсорной панели, и контроллер заряда аккумуляторной батареи. Вторая шина I2Cy служит для подключения модулей данных, а именно: датчиков вибрации и тепловых сенсоров.

Полученные выборки, массивы данных, файлы могут быть сохранены для последующего анализа

либо на SD-карту, соединенную с центральным микроконтроллером интерфейсом SDIO, либо на внешний USB-накопитель, подключенный к системной шине USBу через microUSB-порт связи посредством переходного OTG-кабеля.

Благодаря управляемости источника питания USB-порта связи, система может выступать как «ведущим» USB HOST для подключения к ней стандартных внешних носителей информации, так и в качестве «ведомого» USB DEVICE для связи с компьютером и передачи ему накопленных файлов и выборок. В случае «ведомого» центральный микроконтроллер, приняв высокий уровень напряжения на линии питания USBу, когда VBUS_FS = 1 (рис. 1), посредством сигнала OTG_FS_PWRDN оставляет выключенным «Управляемый источник питания microUSB-порта», т.е. неактивным повышающий преобразователь напряжения 3,3В → 5,0В. «Схема согласования уровней» при этом служит для понижения входного, стандартного для USB-шины напряжения 5,0В до значения 3,3В, являющегося рабочим для центрального микроконтроллера и, соответственно, номинальным напряжением для его портов ввода-вывода. В роли «ведущего» центральный микроконтроллер, путем управления линией OTG_FS_PWRDN и, в свою очередь, повышающим источником 3,3В → 5,0В подает 5,0 В на microUSB-порт связи, позволяя запитать таким образом внешнее устройство, в частности, USB FLASH-диск с целью записи в него данных, следующих по шине USBу.

Питание системы осуществляется как от внешнего источника (например, от компьютера или от батареи типа «Power Bank») через «Порт microUSB заряда аккумулятора» (рис. 1), так и автономно от внутренней литий-ионной (Li-Ion) или литий-полимерной (Li-pol) аккумуляторной батареи. Рабочее напряжение блоков и модулей системы составляет 3,3 В. За преобразование входного напряжения в диапазоне от 2,5 В до 5,0 В в 3,3 В, контроль и стабилизацию питания отвечает «Контроллер заряда аккумулятора и питания». В частном случае, в его качестве может выступать микросхема BQ24295, способная управлять зарядом аккумуляторной батареи и передавать параметры текущего ее состояния (ток и уровень заряда, напряжение на аккумуляторе, температуру окружающей среды) центральному микроконтроллеру по шине I2C. Контроль питания системы предусмотрен и извне, например, с помощью компьютера, подключенного к шине USBx, путем считывания параметров состояния аккумуляторной батареи из «контроллера заряда аккумулятора и питания».

Стандартизированный порт SWD прошивки и отладки предназначен для обновления программного обеспечения и внутрисхемной пошаговой отладки работы центрального микроконтроллера и функционирования системы в целом.

Заключение

Предложена архитектура интегрированной многоканальной системы диагностики дизельной аппаратуры,

объединяющей до восьми универсальных модулей данных, состоящих из виброакустических и тепловых датчиков. Система полностью цифровая, с управляемой частотой тактирования ядра микроконтроллера до 216 МГц, повышенной помехоустойчивостью каналов связи, оптимальным соотношением стоимости к вычислительной способности.

Обоснованы базовые интерфейсы взаимодействия центрального микроконтроллера системы с модулем данных: I2C_u, функционирующий в высокоскоростном режиме 400 кбит/с (в отличие от I2C_x, для которого достаточно стандартной скорости 100 кбит/с), 1-WIRE, SPI и I2S. Благодаря MEMS-технологии, применяемой в изготовлении виброакустических датчиков, модуль данных имеет миниатюрные размеры, а система в целом характеризуется портативностью и автономностью.

Система позволяет диагностировать неисправности и вычислять остаточный ресурс узлов дизельной аппаратуры в масштабе реального времени, параллельно отображая на дисплее динамику изменения сигналов (спектрограммы и/или скейлограммы), обрабатывая пользовательские запросы и формируя протокол изменения картины состояния дизельного двигателя на SD-карте или внешних USB-носителях информации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Северный, А.Э. Руководство по техническому диагностированию при техническом обслуживании и ремонте тракторов и сельскохозяйственных машин / А.Э. Северный, Д.С. Буклагин, В.М. Михлин [и др.]. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 252 с.

2. Система технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин по результатам диагностирования. – М.: Информагротех, 1995. – 64 с.

3. Ролич, О.Ч. Тепловой контроль работы двигателя на основе статистического анализа сигналов болометра / О.Ч. Ролич, В.Е. Тарасенко, В.С. Ивашко // Изобретатель. – 2019. – № 2-3. – С. 40 – 44.

4 Жмудь, В.А. Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике / В.А. Жмудь, К.А. Кузнецов,

Н.О. Кондратьев, В.Г. Трубин, М.В. Трубин //Автоматика и программная инженерия. – 2018. – №3 (25). – С. 9 – 22. – [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-3-2018-1.pdf>. Дата доступа: 02.08.2019.

5. Инфракрасная камера AMG8833 IR 8x8 MLX90640 32x24 [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <http://expresscoupon.ru/i/33007682212.html#--> Дата доступа: 02.08.2019.

6. Infrared Array Sensor Grid-EYE (AMG88) [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/477934/PANASONIC/AMG8832.html>. – Дата доступа: 02.08.2019.

7. DS18B20 Programmable resolution 1-wire digital thermometer [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://tec.org.ru/bd/4/497_DS18B20-MAXIM.pdf. – Дата доступа: 02.08.2019.

8. INMP621 wide dynamic range microphone with PDM digital output [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://belchip.by/sitedocs/30127.pdf>. – Дата доступа: 02.08.2019.

9. SparkFun KIT-14654 FLIR radiometric Lepton® development kit [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://ru.mouser.com/new/sparkfun/sparkfun-kit-14654-lepton-dev-kit/>. – Дата доступа: 02.08.2019.

10. FLIR LEPTON® Engineering Datasheet [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-lepton-engineering-datasheet.pdf>. – Дата доступа: 02.08.2019.

11. MPU-6000 and MPU-6050. Product Specification. Revision 3.4 [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. – Дата доступа: 02.08.2019.

12. Сигма-дельта АЦП [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/adc/adc_5_2.htm. – Дата доступа: 02.08.2019.

13. Park, S. Principles of Sigma-Delta Modulation for Analog-to-Digital Converters. – Motorola, 1993. – 70 p.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 20.09.2019

“Агропанорама” – научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 2-е полугодие 2019 года: для индивидуальных подписчиков - 19,86 руб., ведомственная подписка - 21,63 руб.