

В. Е. Тарасенко¹, О. Ч. Ролич², А. А. Жешко³

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

²ООО «ЮНИК ЛАБ»

Минская область, Минский район,

д. Королицевичи, Республика Беларусь

³РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: azeshko@gmail.com

ПРОГРАММНЫЙ ДРАЙВЕР ЦИФРОВЫХ ДАТЧИКОВ ВИБРАЦИИ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ МНОГОКАНАЛЬНОГО ПРИБОРА ИНТЕГРИРОВАННОГО ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО И ТЕПЛООВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Аннотация. Разработан программный многоканальный драйвер цифровых датчиков вибрации, входящих в состав многоканального прибора интегрированного виброакустического и теплового диагностирования. Создана возможность считывания и записи данных одновременно с трех датчиков вибрации. Выполнение данной операции позволяет реализовать временной период применяемого датчика MPU9150 / MPU9250 с предельной частотой обновления данных, равной 1 000 отсчетов/с. Датчик вибрации можно подсоединять «на ходу» при работающем приборе, а сохраняемый на USB flash-диске файл данных имеет стандартный общеизвестный wav-формат, легко обрабатываемый любым современным программно-математическим пакетом.

Ключевые слова: прибор, драйвер, диагностирование, датчик, вибрация, схема, файл.

V. E. Tarasenko¹, O. C. Rolich², A. A. Zheshko³

¹EI “Belarusian State Agrarian Technical University”

Minsk, Republic of Belarus

²ООО “UNIC LAB”

Minsk region, Minsk district,

vil. Korolishchevichi, Republic of Belarus

³RUE “SPC NAS of Belarus for Agriculture Mechanization”

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: azeshko@gmail.com

SOFTWARE DRIVER FOR DIGITAL VIBRATION SENSORS INCLUDED IN THE MULTICHANNEL INTEGRATED VIBROACOUSTIC AND THERMAL DIAGNOSTICS DEVICE

Abstract. A software multichannel driver for digital vibration sensors included in the multichannel device of integrated vibroacoustic and thermal diagnostics has been developed. The ability to read and write data simultaneously from three vibration sensors has been created. Performing this operation allows implementing the time period of the applied MPU9150 / MPU9250 sensor with a maximum data update rate of 1 000 readings/s. The vibration sensor can be connected “on the go” when the device is running, and the data file saved on the USB flash drive has a standard well-known wav format, easily processed by any modern software and mathematical package.

Keywords: device, driver, diagnostics, sensor, vibration, diagram, file.

Введение

В ходе выполнения комплекса научно-исследовательских работ по диагностированию автотракторных двигателей была разработана многоканальная система (прибор) интегрированного виброакустического и теплового диагностирования [1, 2]. Одним из этапов работы явилось созда-

ние программного драйвера (далее – ПД) цифровых датчиков вибрации многоканального прибора интегрированного виброакустического и теплового диагностирования. Драйвер предназначен для получения сигнала с выбранного пользователем цифрового датчика вибрации MPU9150 или MPU9250 с возможностью записи сигнала на USB flash-диск.

Исходя из назначения, ПД должен поддерживать следующие функции:

- обеспечение выбора пользователем необходимого датчика вибрации;
- определение целостности подключения датчика вибрации к прибору интегрированного виброакустического и теплового диагностирования (далее – прибор);
- информирование пользователя об отсутствии датчика вибрации в случае его неподключения к прибору, пропадания или ненадежности контакта;
- получение сигнала с выбранного пользователем подключенного датчика вибрации;
- детектирование активности flash-диска по USB-порту прибора;
- запись сигнала с датчика вибрации по команде пользователя на USB flash-диск.

Основная часть

Согласно полной принципиальной электрической схеме, к прибору можно подключить 8 цифровых акселерометрических датчиков вибрации MPU9150/MPU9250. Для этого задействованы все аппаратные I2C-порты базового микроконтроллера DD1 STM32F407VGT6:

- порт 1: PA8/I2C3_SCL, PC9/I2C3_SDA;
- порт 2: PB10/I2C2_SCL, PB11/I2C2_SDA;
- порт 3: PB6/I2C1_SCL, PB7/I2C1_SDA;
- порт 4: PB8/I2C1_SCL, PB9/I2C1_SDA.

Для включения акселерометра-датчика вибрации MPU9150/MPU9250 в шину I2C в нем в соответствии с документацией предусмотрена единственная линия AD0 вариации аппаратного адреса в I2C-шине. В связи с этим в одной шине I2C могут работать только два акселерометрических датчика MPU9150 / MPU9250, причем одному из них со значением AD0, равным нулю, устанавливается 7-битный бинарный логический адрес 1101000, а второму, с AD0 = 1, адрес 1101001. Поэтому порт 1 (I2C3 в составе PA8, PC9) электрически связан с двумя разъемами XP1/XP2 прибора (и принципиальной электрической схемы соответственно), к одному из которых подключается датчик с AD0 = 0, а ко второму – с AD0 = 1. Аналогично I2C-порт 2 (I2C2 в составе PB10, PB11) выведен на разъемы XP3/XP4 прибора, порт 3 (I2C1 в составе PB6, PB7) – на XP6/XP7, порт 4 (I2C1 в составе PB8, PB9) – на XP8/XP9.

Описанные подключения схематично изображаются фрагментом полной принципиальной электрической схемы, он приведен на рисунке 1.

Таким образом, подключение внешних датчиков вибрации MPU9150 или MPU9250 к прибору осуществляется по интерфейсу I2C через разъемы XP1–XP4 и XP6–XP9 типа DS1110-01-4. В связи с нюансом формата байта адреса применяемых датчиков вибрации к одной шине I2C возможно подключение только двух однотипных датчиков. Поэтому каждый I2C-порт базового микроконтроллера соединен с двумя разъемами внешних датчиков с таким расчетом, что к одной I2C-шине микроконтроллера подключаются два внешних датчика вибрации с адресами 0 и 1 соответственно.

Изображенный на рисунке 2 интерфейс пользователя для выбора датчика вибрации реализует все вышеперечисленные функции программного драйвера на пользовательском уровне.

В связи с относительно небольшим количеством датчиков вибрации, подключаемых к прибору, выбор пользователем необходимого датчика осуществляется круговым способом от единицы до девяти (девятый датчик LIS3D встроен непосредственно в корпус прибора и взаимодействует с базовым микроконтроллером по SPI-интерфейсу) и повторно по кругу с возвратом к единице, т. е. к первому датчику, с помощью кнопки «» в правом верхнем углу экрана. При нажатии на кнопку «» основные визуальные изменения претерпевают только номер акселерометра в центральной верхней зоне и первая часть имени wav-файла, что в центральной нижней зоне экрана.

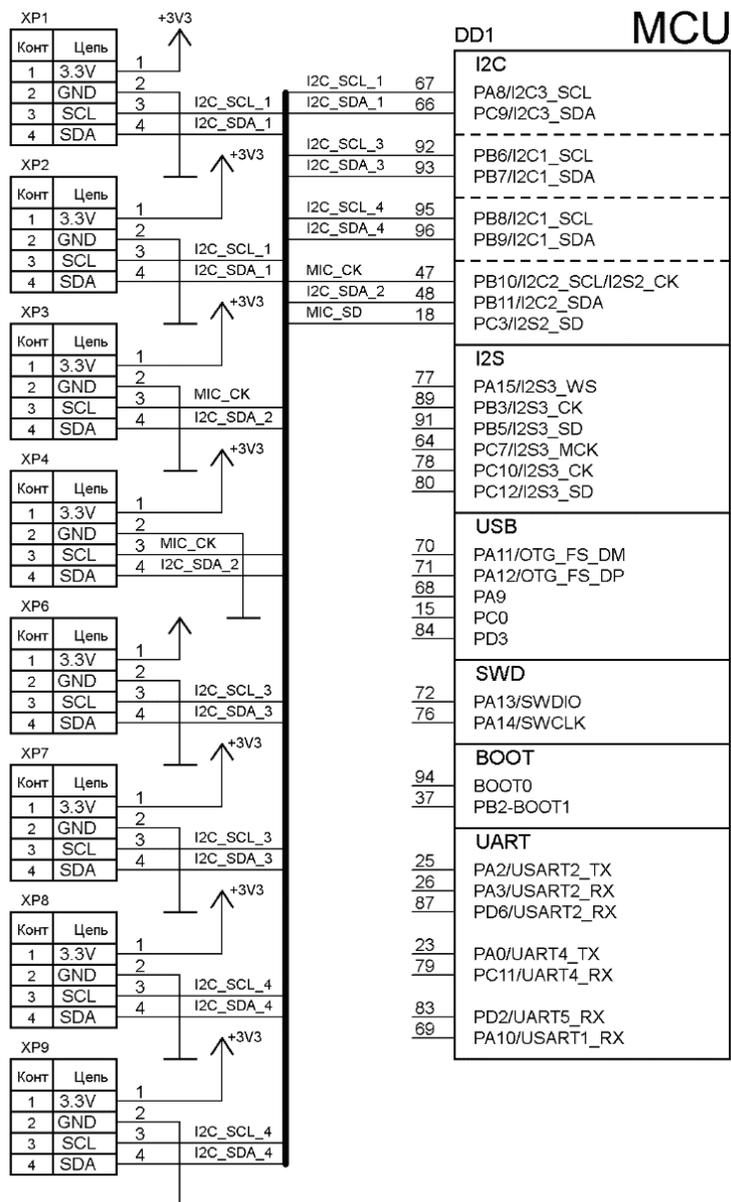


Рисунок 1 – Фрагмент полной принципиальной электрической схемы прибора относительно связи I2C-портов с базовым микроконтроллером DD1

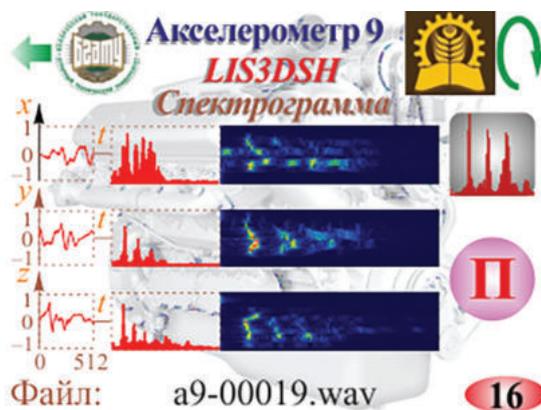


Рисунок 2 – Интерфейс пользователя выбора датчика вибрации, отображения его сигнала, сигнального аналитического ансамбля и записи сигнала на внешний USB flash-диск

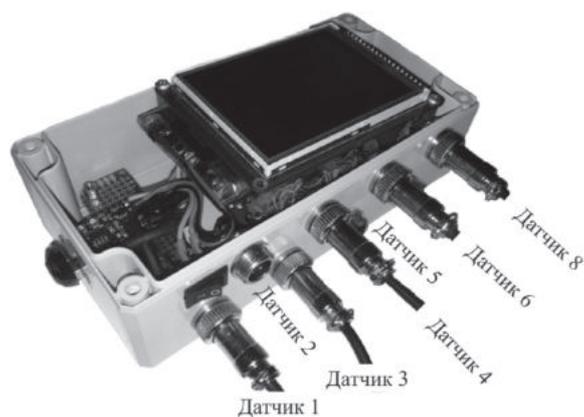


Рисунок 3 – Соответствие номеров датчика вибрации приборному разъему

В режиме анализа вибросигнала на экране, кроме кнопки «» выбора датчика вибрации и статического текста, также присутствуют области отображения сигнала по трем осям x , y , z и аналитического ансамбля в составе амплитудных спектров для спектрограммы, распределений отсчетов сигнала по уровням – для гистограммы, графиков отсортированных числовых отсчетов по возрастанию – для рангограммы. Переключение вида аналитического ансамбля от спектрограммы к гистограмме и рангограмме реализуется кнопкой «» (в правой зоне экрана немногим выше его середины) круговым способом. При этом слово «Спектрограмма» в центральной верхней области заменяется соответственно на «Гистограмма» и «Рангограмма». Для выбора окна анализа (прямоугольного, Хэмминга или Блэкмана) применяется кнопка круглой формы, расположенная непосредственно под кнопкой переключения вида аналитического ансамбля.

Соответствие номеров датчика вибрации, отображаемого после слова «Акселерометр», приборному разъему представлено на рисунке 3. Все датчики с нечетными номерами подключаются к разъему нижнего ряда в порядке слева направо, датчики с четными номерами – к верхнему разъему.

Нарушение контакта с датчиком, его отключение или отсутствие сопровождается появлением в строке с названием датчика, что под словом «Акселерометр», слова «контакт?» на красном фоне.

Программа прибора постоянно контролирует активность USB-порта, и при детектировании подключения к нему flash-диска в правой нижней экранной зоне активируется кнопка (в неактивном виде она отображается как «»), предоставляющая возможность записи сигнала в wav-файл диска. Имя файла генерируется автоматически и указывается в центре нижней зоны экрана, а в активированной кнопке разрешения записи файла на диск пишется примерный его объем в гигабайтах, ГБ: 4, 8, 16, 32.

Запись сигнала с датчика вибрации на USB flash-диск осуществляется по нажатию пользователем ранее активированной кнопки разрешения записи файла на диск, что в правом нижнем углу экрана, с указанным на ней примерным объемом диска. В процессе записи файла данная кнопка незначительно видоизменяется, к ней добавляется контурное кольцо ярко красного цвета, означающее процесс записи сигнала на диск. Также запись сопровождается очевидной цветовой динамикой в виде ежесекундной смены палитр визуализируемых графиков и аналитического ансамбля. Кнопка разрешения записи файла на диск работает в триггерном режиме, и повторное ее нажатие завершает процесс записи.

В программном модуле получения сигнала датчика вибрации сигнальные отсчеты от датчика вибрации параллельно поступают в модуль экранной отрисовки сигнала и в модуль подготовки его к записи на USB flash-диск.

Так как датчик вибрации взаимодействует с микроконтроллером по интерфейсу I2C в контексте ARM-архитектуры для STM-микроконтроллера, лежащего в основе прибора, используется следующая структура `mru9x50_port_t`.

В ней выделяются три блока настраиваемых параметров: для линии ввода-вывода общего назначения, соответствующей сигналу SCL тактирования I2C-интерфейса, для линии ввода-вывода общего назначения, соответствующей сигналу SDA данных I2C-интерфейса, и непосредственно для I2C-интерфейса.

Так, в рамках порта 1: PA8 / I2C3_SCL, PC9 / I2C3_SDA поля приведенной структуры принимают значения:

```
- i2c_scl_gpio_port = GPIOA, i2c_scl_gpio_pin = GPIO_Pin_8, rcc_i2c_scl_gpio_ahb_clk = RCC_
  ANHB1Periph_GPIOA, i2c_scl_af = GPIO_AF_I2C3, i2c_scl_af_source = GPIO_PinSource8;
- i2c_sda_gpio_port = GPIOC, i2c_sda_gpio_pin = GPIO_Pin_9, rcc_i2c_sda_gpio_ahb_
  clk = RCC_AHB1Periph_GPIOC, i2c_sda_af = GPIO_AF_I2C3, i2c_sda_af_source = GPIO_PinSource9;
- rcc_ahb_i2c_gpio_periphClockCmd = RCC_AHB1PeriphClockCmd, i2c_port = I2C3, rcc_i2c_
  apb_periph = RCC_APB1Periph_I2C3, rcc_apb_i2c_periphClockCmd = RCC_APB1PeriphClockCmd.
```

В программе прибора все настройки для каждого I2C-порта объединяются в массив `mpu9x50_config []` структурированного типа `mpu9x50_port_t`, в котором индекс элемента соответствует порядковому номеру датчика вибрации.

Константа `ACCEL_QUANTITY = 9` определяет предельное количество датчиков вибрации (акселерометров), которые можно подключить к прибору.

В структуре `mpu9x50_port_t` последнее поле `i2c_addr` адреса датчика в шине I2C определяется, согласно документации на MPU9150 / MPU9250 и биту AD0, перечислением `eI2C_ADDR`.

Синхронно с действиями пользователя по выбору датчика вибрации программа прибора переключает I2C-порты функцией `mpu9x50_init ()` их переинициализации.

Функция `mpu9x50_init ()` зависит от единственного параметра `accelNum` – номера текущего, выбранного пользователем датчика вибрации, принимающего значение от 0 до (`ACCEL_QUANTITY - 1`), с круговым поведением, соответствующим каждому нажатию пользователем на кнопку «» в правой верхней экранной зоне. Значение (`accelNum + 1`) отображается справа от слова «Акселерометр».

Непосредственное чтение цифровых отсчетов и в целом работа с I2C-портом осуществляется с помощью функций `MPU9x50_I2C_ReadDeviceBuffer()`, `MPU9x50_I2C_ReadDeviceRegister ()` и `MPU9x50_I2C_WriteDeviceRegister ()`.

Приведенные функции реализуют I2C-протокол записи и чтения регистров текущего выбранного пользователем датчика вибрации. Поэтому в них имеются общие, характерные для I2C программные блоки, в частности, генерирования состояний старта, послыки первого байта с адресом датчика и контроля таймаута I2C-операции.

Функции `MPU9x50_I2C_ReadDeviceBuffer()`, `MPU9x50_I2C_ReadDeviceRegister()` и `MPU9x50_I2C_WriteDeviceRegister()` возвращают оценку успешности их выполнения – элемент перечисления типа `ErrorStatus`:

```
typedef enum {ERROR = 0, SUCCESS = !ERROR} ErrorStatus;
```

При неуспешном выполнении данных функций в течение 16 обращений подряд к ним принимается решение о потере контакта с датчиком с одновременным отображением на экране слова «контакт?» на ярко-красном фоне под словом «Акселерометр». В этом случае необходимо проверить контакт с датчиком вибрации или подключить его к соответствующему разъему, или перейти на страницу к следующему, уже подключенному датчику. Восстановление контакта детектируется по истечении четырех подряд обращений к вышеперечисленным функциям.

Исходя из заявленной в документации на акселерометры MPU9150/MPU9250 предельной частоты съема данных, равной 1 000 отсчетов/с, блок с функциями `MPU9x50_I2C_ReadDeviceBuffer()`, `MPU9x50_I2C_ReadDeviceRegister`, `MPU9x50_I2C_WriteDeviceRegister` выполняется каждую миллисекунду по прерыванию таймера TIM1 общего назначения.

Результирующие отсчеты от акселерометра, считываемые в процедуре `ACCEL_TIM_IRQHandler()` обработки прерывания таймера TIM1, попадают в две очереди, одна из них связана с графическим отображением сигнала, вторая – с записью на USB flash-диск.

Очереди, предназначенные для корректной транспортировки сигнальных отсчетов от блока приема сигнала к блокам его визуализации и записи на диск, объединяются в массив `g_FIFOxyzt[]`.

В структуре LIS3DSH_OutXYZTypeDef отдельные поля, соответствующие x , y и z проекциям ускорения, имеют идентичный двухбайтный знаковый тип short. Поле t отведено под температуру датчика.

Организация очередей – стандартная циклическая, когда каждая очередь из массива g_FIFOxyzt[] работает по принципу кольцевого буфера. Соответственно, для каждой из них вводятся индексы ее начала g_iBegin и конца g_iEnd:

При непосредственном получении сигнального отсчета функцией MPU9x50_I2C_ReadDeviceBuffer() он считывается в структуру accelXYZT типа LIS3DSH_OutXYZTypeDef и впоследствии записывается в очереди g_FIFOxyzt[DEST_GRAPH] и g_FIFOxyzt[DEST_FLASH].

В процессе чтения очередей используется функция FIFO_GetNextData(), получающая отсчет из указанной параметром queueNum очереди (queueNum может принимать значение DEST_GRAPH или DEST_FLASH), записывающая его по адресу pResultXYZT, и возвращающая успешность считывания при непустой очереди либо ERROR, если очередь пустая.

Программная реализация интерфейса пользователя для сохранения сигнала датчика вибрации на USB flash-диске обеспечивает детектирование подключения к прибору USB-диска, определение его объема, ввод имени файла для записи данных, управление кнопкой старта либо остановка процесса записи, разбиение длительного потока данных на последовательность файлов.

USB-драйвер прибора как host-машины работает по прерыванию «USB On The Go FS global interrupt». Соответствующая процедура обработки прерывания реализует USB-протокол нижнего, т. е. аппаратного уровня: непосредственное детектирование ядром микроконтроллера подключения устройства по USB, его опрос и идентификация. В случае идентифицированного MSC-устройства, к которому относится flash-диск, взаимодействие по USB переключается на функциональный уровень, оперирующий структурой USBH_Usr_cb_TypeDef из указателей на соответствующие функции.

Наибольшую информативность в приведенной структуре имеет функция USBH_USR_MSC_Application(), на которую ведется основной упор. В ней программа обращается к файловой FAT-системе flash-диска, считывает ее параметры и анализирует емкость и защищенность от записи – соответственно поля MSCCapacity, MSPageLength и MSWriteProtect структуры типа MassStorageParameter_TypeDef.

Для разрешенного к записи диска его емкость отображается внутри кнопки запуска непосредственной записи – кнопки овальной формы в правом нижнем углу экрана, которая становится активной в момент идентификации flash-диска. Визуальная активация кнопки в зависимости от подключенного flash-диска на программном уровне осуществляется сменой на экране в строго определенной его области заранее сгенерированных массивов соответствующих изображений одинаковых размеров: gImage_FlashDiskNone[4104], gImage_FlashDisk4GB[4104], gImage_FlashDisk8GB[4104], gImage_FlashDisk16GB[4104], gImage_FlashDisk32GB[4104], которые хранятся во flash-памяти программ базового микроконтроллера.

Запись на диск файла с числовыми массивами от датчика вибрации, как и ее остановка, инициируется нажатием на данную кнопку, которая в программе именована как usbFlashButtonPressed.

Процесс записи файла на USB flash-диск отчетливо заметен пользователю за счет сопровождающей ее анимации в виде смены палитры динамических образов, а именно, цвета textColor отображаемых графиков и палитры ColorMap (функцией FRAME_SetColorMap(bBlink)) аналитического ансамбля на экране каждые 500 мс.

В целях недопущения перехода во время записи файла на flash-диск к иному датчику или визуальной странице кнопки «» возврата и «» выбора датчика отключаются и удаляются с экрана до момента завершения записи по инициативе пользователя.

Имя файла для хранения числовых массивов, получаемых от текущего датчика вибрации, имеет формат вида aN -xxxxx.wav, где первый символ a фиксированный и означает акселерометр (accelerometer) как датчик вибрации, N – номер текущего датчика вибрации, который в программе именован как accelNum, $N = (\text{accelNum} + 1)$, xxxxx – порядковый десятичный номер файла (отдельный x принимает значение от 0 до 9).

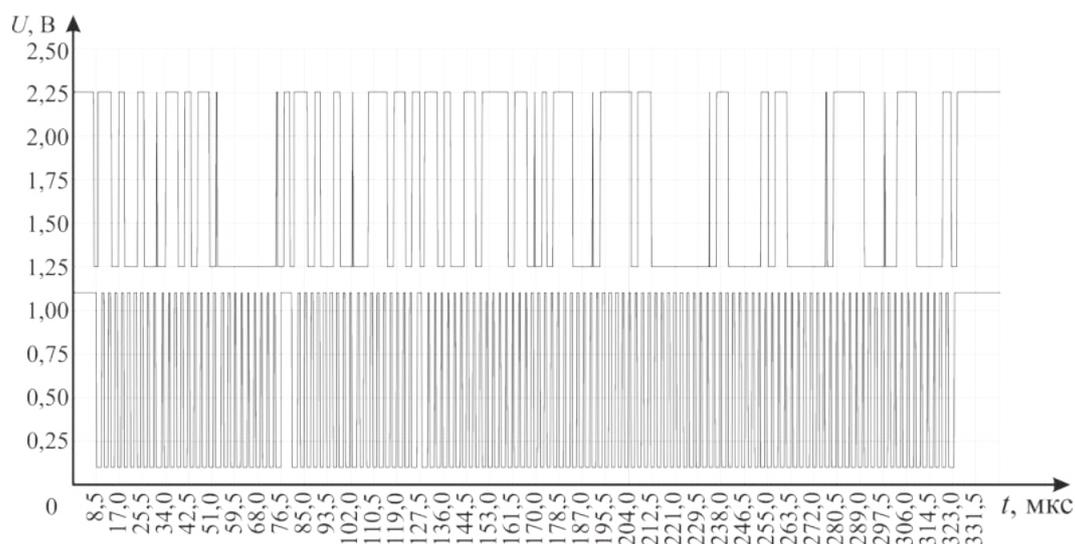


Рисунок 4 – Осциллограмма кадра считывания данных по I2C с акселерометра MPU9150 / MPU9250

Генерируемый таким образом файл wav-формата сохраняется в корневой папке flash-диска, а автоматически формируемое его имя в указанном виде *aN-xxxxx.wav* отображается пользователю прибора в нижней экранной строке по центру.

Порядковый десятичный номер считывается из бинарного файла counter.dat, расположенного в корневой папке flash-диска, и имеющего размер 4 байта. Содержимое файла counter.dat представляет бинарное 32-битное целое число беззнакового типа. В случае отсутствия counter.dat на диске он создается автоматически и в него записывается 4-байтное нулевое значение. За перечисленные действия с файлом counter.dat отвечает функция IncAndSet_file_counter().

При длительной записи файла он разбивается на последовательность wav-файлов примерным размером 1 МБ каждый. Размер отдельного файла определяется макроконстантой WAV_DATA_SIZE_MAX.

При разбиении файла на последовательность имя текущего генерируемого файла в целях удобства для пользователя автоматически отображается на экране.

Взаимодействие базового микроконтроллера прибора с датчиком вибрации осуществляется по интерфейсу I2C со скоростью 400 кб/с. Согласно документации на датчик вибрации, в качестве которого выступает акселерометр MPU9150 или MPU9250, предельная частота считывания данных равна 1000 Гц, что соответствует периоду 1 мс.

На рисунке 4 представлена осциллограмма кадра считывания данных по I2C с акселерометра MPU9150 / MPU9250, где верхний график изображает сигнал линии SDA данных, а нижний – линии SCL тактирования.

Кадр считывания включает три транзакции, первая из которых состоит из трех байтов с направлением записи в датчик вибрации, вторая – из двух байтов также с записью в датчик, а третья – из 9 байт непосредственного чтения. Совокупные 14 байт, передаваемые на скорости 400 кб/с, соответствуют примерно $(14 * 9 / 400\ 000) = 315$ мкс, а с учетом межтранзакционных пауз – около 330 мкс. В связи с этим следует заметить, что за предельный для MPU9150/MPU9250 период опроса в 1000 мс прибор способен считывать данные сразу с трех акселерометров и сохранять их на USB flash-диске в wav-формате.

Заключение

Основной вывод по разработке программного многоканального драйвера цифровых датчиков вибрации, входящих в состав многоканального прибора интегрированного виброакустического и теплового диагностирования, состоит в возможности считывания и записи данных одновременно с трех датчиков вибрации. Выполнение данной операции допускает временной период

применяемого датчика MPU9150/MPU9250 с предельной частотой обновления данных, равной 1 000 отсчетов/с.

Также следует отметить, что датчик вибрации можно подсоединять «на ходу» при работающем приборе, а сохраняемый на USB flash-диске файл данных имеет стандартный общеизвестный wav-формат, легко обрабатываемый любым современным программно-математическим пакетом.

Список использованных источников

1. Ролич, О. Ч. Многоканальная интегрированная система виброакустической и тепловой диагностики дизельных двигателей / О. Ч. Ролич, В. Е. Тарасенко // Агропанорама. – Минск, 2019. – № 5 (135). – С. 42–45.

2. Тарасенко, В. Е. Исследование вибрации форсунок с помощью многоканальной системы с гибкой структурой / В. Е. Тарасенко, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. темат. сб. / РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2020. – Вып. 54. – С. 185–191.