

Александр Шатохин, Петр Макарычев (МЭИ (ТУ))

РЕГИСТРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ 3-ФАЗНЫХ СЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В статье представлена информация о регистраторе напряжений на базе 32-разрядного ARM-контроллера STM32F103 производства STMicroelectronics, который позволит потребителю проводить длительную регистрацию исходных данных о фазных напряжениях в электрических сетях общего назначения.

Аномальные явления в сетях возникают эпизодически, и выявить их можно с помощью регистраторов, способных работать в течение длительных периодов времени без присмотра пользователей. Данные устройства должны обладать невысокой ценой, необходимыми метрологическими характеристиками, способностью работать от автономных источников, возможностью эксплуатации в жестких условиях окружающей среды и др.

В России в настоящее время действует стандарт [1], который дает формализованное описание т.н. показателей качества электрической энергии (ПКЭ): терминология, алгоритмы выделения из массивов оцифрованных данных, алгоритмы статистической обработки. Он же устанавливает и требования к точности измерений этих ПКЭ.

Опыт создания систем измерений (СИ) ПКЭ, удовлетворяющих в полной мере требованиям [1], показывает, что изделия получаются принципиально дорогими и малодоступными для широкого круга потенциальных потребителей. Мы пошли по другому пути.

В качестве модели для применения разрабатываемых нами СИ ПКЭ была выбрана деятельность специалистов-аудиторов, выполняющих работы по т.н. энерготехнологическому аудиту энергетического и электротехнического оборудования предприятий различного назначения. Условия проведения такого рода аудитов достаточно жесткие, длительность их проведения – большая при множестве объектов контроля. Применение современных дорогостоящих СИ часто избыточно, в ряде случаев – малоэффективно, затратно и имеет ограничения, например, по температурному диапазону применения.

Было решено существенно упростить как структурную схему (рис. 1), так и ее реализацию в создаваемых СИ ПКЭ.

1) Т.к. изделие должно осуществлять контроль ПКЭ в течение долгого времени, и присутствие пользователя при этом необязательно, то из структуры были исключены развитые средства взаимодействия с оператором (полноценные дисплей и клавиатура), которые ограничивают температурную область применения, усложняют, удорожают СИ, приводят в ряде случаев к существенному возрастанию тока потребления. В изделии сохранены только простые служебные органы взаимодействия (отдельные светодиоды и кнопки). Что касается полноценного отображения получаемой измерительной информации, то мы его выполняем позднее – в компьютере. Для этого актуальная информация в проектируемом изделии регистрируется в извлекаемой flash-карте, и проектируемое изделие становится, таким образом, регистратором.

2) Исключается интерфейсный адаптер.

3) Поскольку в последнее время появились недорогие современные микроконтроллеры на ARM-ядре Cortex-M3 со следующими актуальными для нас особенностями: оптимизированное потребление, большой объем внутренней памяти, высокая производительность, встроенный 12-разрядный АЦП, развитые коммуникационные возможности – стало возможным реализовать АЦП, процессор и устройство управления (рис. 1) в виде одной микросхемы.

Однако требования [1] выполняются в такой структуре далеко не в полной мере: погрешности измерений старших гармоник исследуемых сигналов могут быть в два раза больше требуемых по стандарту; может не соблюдаться ограничение на время преобразования. При этом основной алгоритм выделения ПКЭ из массива оцифрованных значений остается.

Главное реализуемое преимущество таких регистраторов – их относительно низкая цена и стимулируемая этим фактом широкая востребованность. Струк-

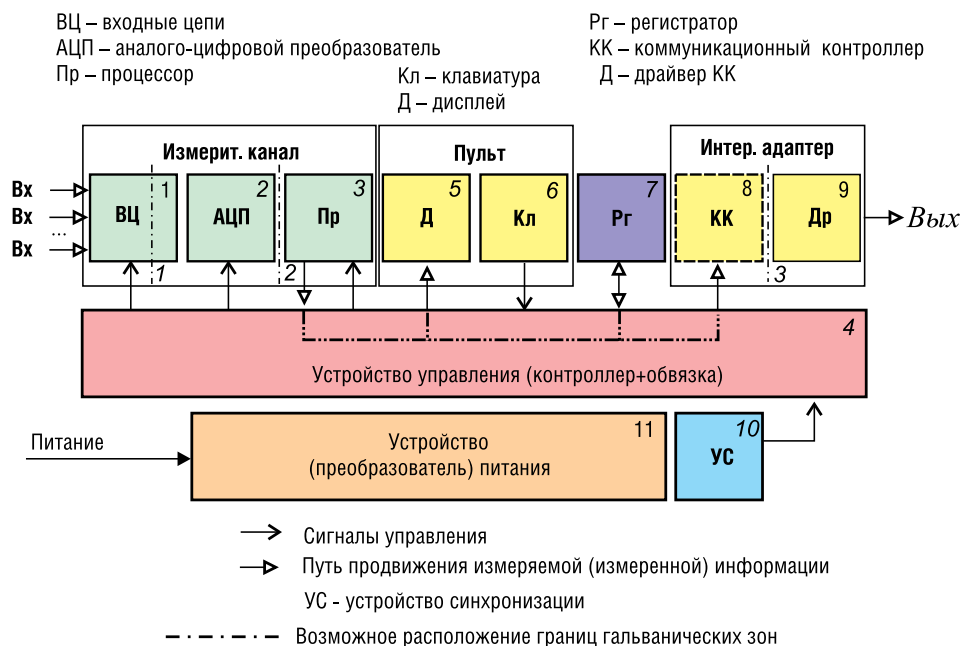


Рис. 1. Обобщенная структурная схема современных цифровых СИ

турная схема реализованного регистратора представлена на рис. 2.

Виды регистрации

Обработка данных в компьютере позволяет снизить требования к микроконтроллеру регистратора, задача которого в этом случае сводится к непрерывной оцифровке входных сигналов и трансляции получаемых кодов в карту памяти. Такая «бездумная» регистрация потребует карт большого объема и существенного времени на обработку массивов уже в компьютере. Этот режим регистрации назовем *непрерывным*.

С целью экономии энергии применяемых батарей и расширения длительности сеансов регистрации, регистратор может обрабатывать данные в программируемые заранее моменты времени. Регистрация при этом может осуществляться либо равномерно во времени, либо выборочно. Этот режим регистрации назовем *зондовым*.

Другой вид регистрации, который «экономит» память flash-карты, но требует больших энергетических затрат, назовем *сторожевым*. В этом режиме контроллер производит непрерывное преобразование поступающих данных, анализирует результаты преобразования и регистрирует только аномальные их значения. Заметим, что потребляемая от источника питания энергия может быть оптимизирована в случае, если использовать эффективный алгоритм выявления аномалий, не требующий высокой тактовой частоты микроконтроллера.

Технические характеристики реализованного регистратора P15КИНР01.01A

Конвертер (преобразователь) измерительный носимый с регистрирующими функциями, семейство Росомаха, версия 01.01, производственная ревизия А, корпус типа ОКW TOPTEC 154F обладает следующими характеристиками:

- Зондовый или непрерывный тип регистрации;
- Вид регистратора – SD/MMC flash-карта нормального размера;
- Объем регистрируемых данных до 2 Гб;
- Продолжительность *непрерывного* сеанса регистрации одни сутки;
- Продолжительность *зондового* режима регистрации до нескольких месяцев;
- Питание от двух батарей типа АА;
- Рабочий диапазон температур -10...40°C;
- Входное сопротивление не менее 1000 кОм;
- Габаритные размеры не более 82x155x37 мм³
- Масса не более 500 г.

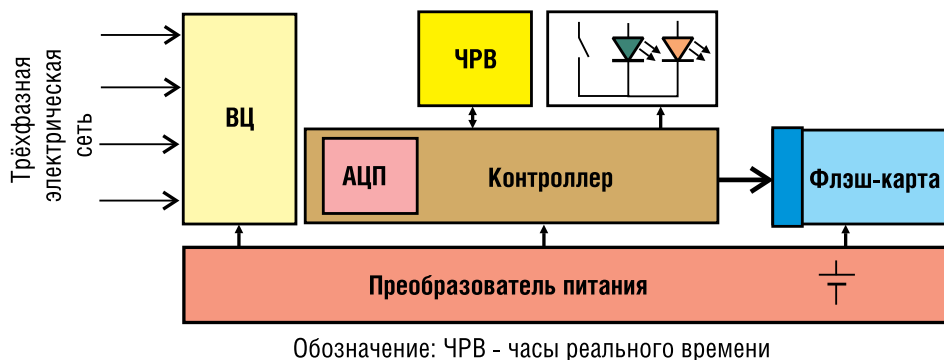


Рис. 2. Структурная схема реализованного регистратора значений фазных напряжений



Рис. 3. Регистратор P15КИНР01.01A

На рисунке 3 представлен вид разработанного регистратора со снятой крышкой.

Принципиальная схема реализованного регистратора

Выбор микроконтроллера. Как было сказано, микроконтроллер выбран среди современных 32-разрядных ARM Cortex-M3. Это **STM32F103** европейской фирмы STM [2], которая раньше других вышла на рынок с этим продуктом. Привлекательной особенностью семейства STM32 является последовательно реализуемая фирмой концепция – создание в его рамках линеек с различными техническими акцентами: дешевые (*access*); с высокой производительностью (*performance*); с большими объемами памяти (*density*); с оптимизированными объемами памяти и периферии (*low&medium-density*); с расширенными коммуникационными возможностями (*connectivity*); со сверхмалым потреблением (*ultra-low-power*) и др. Разработчик имеет возможность использовать один из выбранных типов и, освоив его, устанавливать в спроектированную плату другое изделие с наиболее подходящими свойствами из того же семейства.

Важной особенностью микроконтроллеров STM32 для решаемой задачи является наличие прямого доступа АЦП к оперативной памяти. Используемый

объем оперативной памяти 12 КБ, памяти программ – 16 КБ.

Выбор компонентов входных цепей. Входные цепи (см. табл. 1) в регистраторе выполняют три функции: защиты измерительных каналов от перенапряжений, нормализации входных сигналов и низкочастотной фильтрации (рис. 4).

Защита реализована стандартным способом: на входе измерительного канала устанавливается варистор с плавким предохранителем, а на входе фильтра нижних частот – защитные диоды.

Нормализатор входных сигналов выполнен в виде пассивного делителя (R1, R2) с источником смещения Есм в половину диапазона преобразования встроенного однополярного АЦП. Некоторую проблему составляет выбор резистора R1. Этот резистор обеспечивает входное сопротивление регистратора (1000 кОм) и принимает на себя

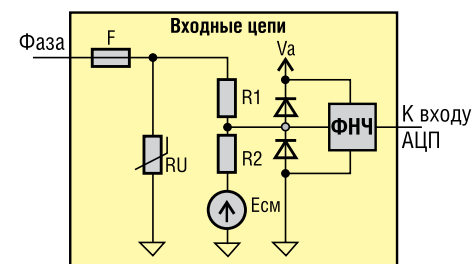


Рис. 4. Функциональная схема входных цепей

Таблица 1. Список основных примененных электронных компонентов

Тип	Назначение // Производитель
STM32F103C6	Микроконтроллер // STM
AD8542ARU	Два микромощных ОУ // Analog Devices
LTC3429ES6	Повышающий стабилизатор // Linear Technology
SPX5205M-3-3	LDO-стабилизатор // Exar-Sipex
SiT8002AI-33-33	MEMS-генератор // SiTime
C-00RX – 32,768 кГц	Кварцевый резонатор с гибкими выводами // Epson-Toyocom
CR 2025 PCB	Элемент резервного питания впаиваемый // Panasonic
BLM21AG601SN1D	Чип-феррит 0805 // Murata
BAV199	Два защитных диода // NXP
ESDA5V3L	Два TVS-диода // STM
BAS40-05	Два диода Шотки с общим катодом // NXP
IRLML6401	P-канальный МОП-транзистор // International Rectifier
DO1608-682	Индуктивность 6,8 мкГ/1,4 А // Coilcraft
CR0603	Чип-резисторы общего назначения, размер 0603 $\pm 5\%/100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ // Bourns
RT0603	Чип-резисторы прецизионные, размер 0603 $\pm 1\%/25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ // Yageo
MELF 0207	Чип-резисторы прецизионные, размер 0207 $\pm 1\%/25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ // Vishay
SIOV-Q20K300	Варистор диаметром 20 мм/600 В // EPCOS

практически все входное напряжение, которое с учетом общепринятого запаса для подобных изделий принято рассчитывать как $2,5 \times 220 \text{ В} = 550 \text{ В}$. Требуемая номинальная или прецизионная мощность, таким образом, не превысит 100 мВт. Точность выбираемого номинала не обязана быть выше $\pm 1\%$, т.к. мультипликативная погрешность может быть компенсирована путем калибровки. Расчетное значение для температурного коэффициента для указанного выше температурного диапазона – $25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Важным требованием к выбираемому R1 для малогабаритного регистратора является минимизация его размеров.

После долгих поисков было принято решение использовать в качестве R1 два последовательно включенных резистора типа MELF 0207-560 кОм компании Vishay. Дополнительным полезным свойством этих резисторов является «терпимость» к высоковольтным импульсным напряжениям перегрузки.

Низкочастотная фильтрация входных сигналов осуществляется в два этапа: с помощью двухполюсного аналогового фильтра, а затем – посредством цифрового фильтра, реализуемого программно в микроконтроллере (см. далее).

Использование цифрового фильтра позволило снизить метрологические требования к пассивным компонентам аналогового фильтра. Точность выбранных номиналов резисторов не обязана превышать $\pm 1\%$, а конденсаторов $\pm 5\%$.

Актуальные требования к используемым в ФНЧ операционным усилителям: рабочая полоса частот $0 \dots 1 \text{ МГц}$; скорость нарастания больше $500 \text{ мВ}/\mu\text{с}$; малый входной ток; способность работать от однополярного напряжения; потребление меньше $100 \text{ мкА}/\text{канал}$. Как вариант был выбран двухканальный усилитель AD8542.

Основной алгоритм работы регистратора

Временная диаграмма, поясняющая работу регистратора в состоянии «Регистрация данных», представлена на рис. 5. Регистрация данных выполняется регулярно с периодом T_p , равным двум секундам. Значение этого периода обеспечивается часами реального времени (RTC), встроенными в микроконтроллер (МК).

Сначала выполняется сбор данных в течение 200 мс. При этом системная частота микроконтроллера устанавливается на максимум (72 МГц). На данном интервале необходимо одновременно преобразовывать в код мгновенные напряжения по четырем каналам. Встроенный в микроконтроллер АЦП1 строго реализовать это действие не позволяет. Однако благодаря широкому спектру режимов работы и запуска АЦП1 можно «практически точно» реализовать отмеченное действие. В данном слу-

чае используется прерывистый режим функционирования АЦП1, который компания-производитель МК назвала Discontinuous mode [3]. Этот режим, иллюстрируемый рис. 6, используется для последовательного преобразования в код напряжений ограниченной (до восьми) группы каналов АЦП1. Эта группа является частью последовательности каналов преобразования, заданной в регистре специальных функций микроконтроллера ADC_SQR1. Как видно из рис. 6, после очередного запуска группа регулярных преобразований выполняется без задержек. Число каналов в группе и их последовательность программируется. В данном случае числа совпадают и равны четырем. Запуск группы осуществляется с помощью сигнала TIM3_TRGO таймера TIM3. При выбранной тактовой частоте АЦП1 (9 МГц) длительность цикла преобразования T_c составляет примерно 1,55 мкс.

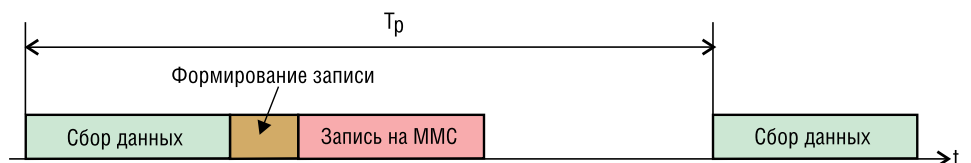


Рис. 5. Временная диаграммы регистратора в состоянии «Регистрация данных»

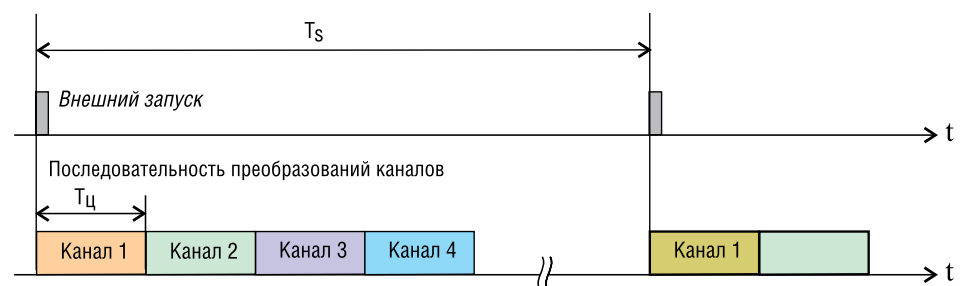


Рис. 6. Последовательность преобразования каналов

Поскольку верхняя частота спектра не превышает 2,3 кГц, то можно считать, что выборки по разным каналам производятся практически одновременно. Первые три канала служат для получения цифровых отсчетов фазных напряжений. Четвертый канал позволяет измерить специально введенное смещение в первых трех каналах, чтобы обеспечить униполярное напряжение на входе АЦП1. Код этого смещения при формировании записи вычитается из цифровых отсчетов фазных напряжений.

Для устранения наложения спектров применена двухступенчатая фильтрация. Сначала входной сигнал каждого из трех каналов проходит через аналоговый фильтр Баттерворта третьего порядка, схема которого представлена на рис. 7.

Для развязки динамического входа АЦП1 и выхода операционного усилителя фильтра служит фильтр первого порядка (R4-C7) с небольшой постоянной времени. С целью ослабления влияния отклонения параметров элементов фильтра от номинальных значений частота среза фильтра Баттерворта выбрана примерно 5 кГц. Однако в этом случае не обеспечивается достаточное подавление в полосе заграждения фильтра. Поэтому применена вторая ступень фильтрации в цифровой форме с избыточной частотой дискретизации на входе фильтра и децимацией на выходе.

Был выбран трехкаскадный СИС-фильтр с децимацией из-за его простой реализации [4]. Структурная схема этого фильтра представлена на рис. 8, где I – цифровой интегратор; R – операция децимации (прореживание отсчетов с коэффициентом R); С – гребенчатый фильтр, представляющий в данном случае цифровой дифференциатор первого порядка. Входная частота дискретизации F_s СИС-фильтра составляет 60 кГц, коэффициент децимации равен восьми. Амплитудно-частотные характеристики аналогового фильтра, цифрового фильтра и их результирующая АЧХ представлены на рис. 9.

Недостаток СИС-фильтра – неплоская АЧХ в полосе пропускания. Эта проблема может быть решена двумя путями. Во-первых, применяют цифровой корректирующий фильтр, который подключается к выходу СИС-фильтра и работает на частоте F_s/R . С целью упрощения программного обеспечения регистратора использован второй подход, основанный на свойстве всех цифровых фильтров – стабильности АЧХ. Поскольку накопленные на ММС-карте цифровые значения сигналов затем считываются в компьютер, то в нем влияние спада АЧХ цифрового фильтра может быть скомпенсировано или путем дополнительной корректирующей филь-

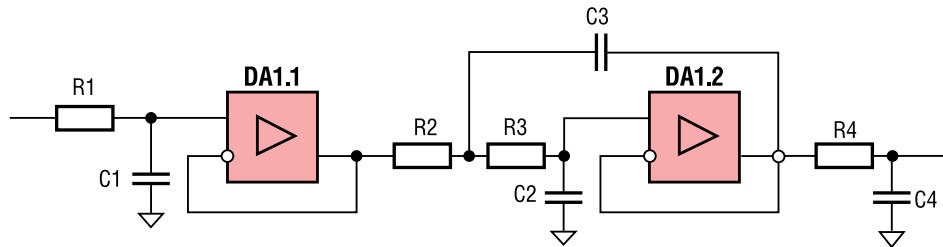


Рис. 7. Электрическая принципиальная схема аналогового фильтра

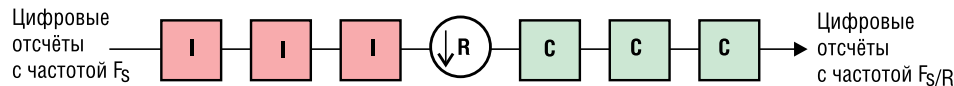


Рис. 8. Структурная схема трехкаскадного СИС-фильтра

трации, или путем соответствующего масштабирования гармоник сигнала.

На этапе сбора данных осуществляется дискретизация по четырем каналам с частотой 60 кГц. Порции цифровых отсчетов АЦП1 накапливаются в небольшом циклическом буфере канала прямого доступа к памяти (ПДП). Когда половина буфера заполнится, вырабатывается прерывание, которое используется для считывания накопленных отсчетов и их обработки цифровым фильтром, с выхода которого данные поступают в буфер регистрации. На этом интервале параллельно заполняется вторая половина циклического буфера ПДП. Когда она заполнится, вырабатывается прерывание, используемое аналогичным образом. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не заполнится буфер регистрации, содержащий отсчеты по трем кана-

лам. Отметим, что отсчеты в буфер регистрации поступают с частотой 7,5 кГц. Четвертый канал обрабатывается особым образом: его цифровые отсчеты не подвергаются цифровой фильтрации, а используются для измерения среднего значения смещения.

По окончании сбора данных системная частота МК снижается до 8 МГц с целью уменьшения потребляемой мощности от источника питания. На этапе формирования записи из накопленных в буфере цифровых отсчетов вычитается смещение, и запись дополняется значениями текущего времени, коэффициентами преобразования по каждому каналу и частотой дискретизации F_s .

Далее сформированная запись переписывается на ММС-карту. Важным параметром для этой карты является длительность программирования бло-

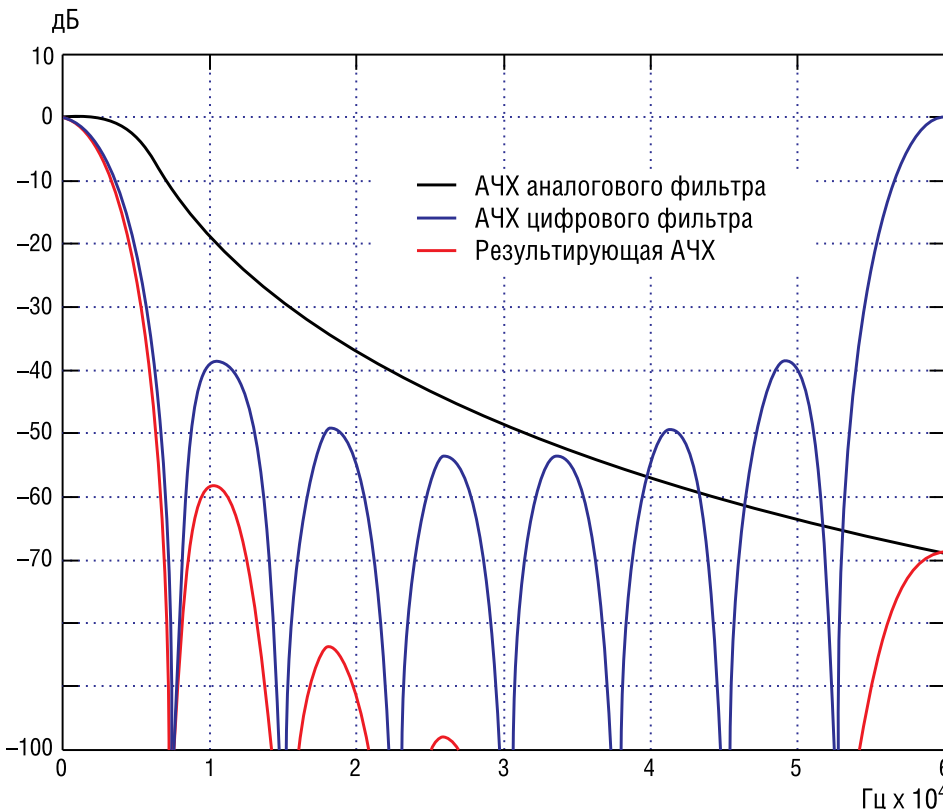


Рис. 9. АЧХ аналогового и цифрового фильтров и их результирующая АЧХ

ка Tprog, которая определяется тремя параметрами: TAAC, NSAC и R2W_FACTOR [5]. Эти значения можно получить при считывании регистра CSD MMC-карты. Значения этих параметров достаточно широко варьируются для разных типов карт. Оценить Tprog можно по следующей формуле:

$$(T_{PROG})^{R2W_FACTOR} = 2 \times \left(TAAC + \frac{100 \times NSAC}{F_{SPI}} \right), \quad (1)$$

где Fspi — частота интерфейса SPI, используемого для связи с MMC-карт.

Минимальное значение Tprog,min в основном определяется TAAC и R2W_FACTOR. Оценки показывают, что Tprog,min может находиться в диапазоне от единиц до сотен миллисекунд. В данном регистраторе буфер записи имеет емкость примерно 9 КБ, чтобы можно было работать с относительно медленными MMC-картами. Уменьшение емкости буфера возможно, если использовать достаточно быстродействующие карты и осуществлять запись и накопление данных поблочно на этапе сбора данных.

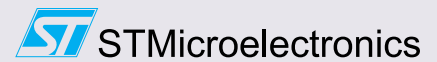
По окончании записи МК переходит в режим «Sleep» для дальнейшего уменьшения потребления от источника питания. Периодически (через 10 мс) он выводится из этого состояния прерыванием системного таймера, обработчик прерывания которого сканирует клавиатуру и управляет индикацией.

Литература

- ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»
- Староверов К. Микроконтроллеры на основе ARM Cortex-M3. Новости электроники №1 2008
- www.st.com/RM0008 Reference manual/ STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx advanced ARM-based 32-bit MCUs. Doc ID 13902 Rev 9 (June 2009). 995 pp.
- Eugene B. Hogenauer, “An economical class of digital filters for decimation and interpolation,” IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 155-162, April 1981.
- Samsung MultiMediaCard. Product Datasheet. Version 0.3/ September 2005.

Получение технической информации,
заказ образцов, поставка –
e-mail: mcu.vesti@compel.ru

STM32 Value Line



Компания **STMicroelectronics**, один из ведущих производителей микроконтроллеров в мире, анонсировала начало производства нового 32-битного дешевого микроконтроллера, использующего преимущества индустриального STM32-ядра и разработанного для недорогих приложений.

Микроконтроллеры семейства **STM32F100 («Value line»)** предназначены для применений, где мощность 16-битного микроконтроллера уже недостаточна, а богатый набор функционала обычных 32-битных микроконтроллеров избыточен. Линейка микроконтроллеров STM32F100 базируется на современном 24 МГц ARM Cortex-M3-ядре с периферией, оптимизированной для применения в типичных приложениях, где использовались 16-битные микроконтроллеры. Производительность этой линейки на 24 МГц, вкупе с нулевыми задержками при доступе ко встроенной флеш-памяти, составляет 30 DMIPS, что превосходит большинство 16-разрядных микроконтроллеров. Линейка включает следующую периферию – до 12-ти 16-битных таймеров с расширенными функциями, высокоскоростные 12-битные АЦП и ЦАП; протокол SEC (Consumer Electronics Control), включенный в HDMI стандарт. STM32F100 – это не только дешевый и оптимизированный микроконтроллер на ядре Cortex-M3, но и доступ к богатой среде разработки микроконтроллеров семейства STM32, которая включает в себя бесплатные библиотеки для всей периферии, управление моторами и сенсорными клавиатурами. Вдобавок, при работе с микроконтроллерами STM32F100 всегда есть возможность легко перейти на микроконтроллеры с более высокой функциональностью, если это требуется. На данный момент общая номенклатура STM32 состоит из пяти семейств и составляет более 110 позиций, предоставляя широкий выбор для разнообразных приложений.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ STM32W

для беспроводной передачи данных
об энергопотреблении

- Встроенный радиоканал ZigBee 2,4 ГГц
- Малопотребляющая архитектура
- Применяется в беспроводных АСКУЭ

Москва
Тел.: (495) 995-0901
Факс: (495) 995-0902

Санкт-Петербург
Тел.: (812) 327-9404
Факс: (812) 327-9403

Компэл
www.compel.ru