

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭСПЗУ В СОСТАВЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ЗАБОЙНОЙ СИСТЕМЫ

Гараев Р.А.¹, Иванова Т.А.²

¹Гараев Рашид Аюпович – кандидат физико-математических наук, доцент;

²Иванова Татьяна Александровна – кандидат технических наук, доцент,
кафедра вычислительной техники и защиты информации,
Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа

Аннотация: преобладающим вариантом при проведении буровых работ на больших глубинах является в настоящее время наклонно-направленное бурение. Реализация технологии требует размещения в буровом снаряде микропроцессорной телеметрической системы класса MWD (measurement while drilling) или LWD (logging while drilling) для передачи приемнику наземного оборудования скважины, как минимум, информации об ориентации бура с целью его отклонения в требуемом направлении в соответствии с желаемой траекторией. Важным элементом MWD/LWD может быть блок энергонезависимой памяти для хранения как информации о настройках системы, так и для накопления геофизической информации с целью последующего анализа. Описывается оригинальный вариант организации подобной памяти.

Ключевые слова: электрически стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство, файловая система, таблица размещения файлов, логические блоки.

Для успешной реализации технологии направленного бурения (наклонного и горизонтального) наземное оборудование должно постоянно получать информацию о положении и ориентации бурового снаряда на глубине [1]. Соответствующее внутрискважинное оборудование строится на базе современных микроконтроллеров (МК) и часто именуется телеметрическими забойными системами для измерений в скважине азимута и зенитного угла ствола. Другие системы имеют более сложные каротажные приборы в составе бурильной компоновки. Иными словами, в дополнение к инклинометрическим параметрам формируются еще различные каротажные данные, в т.ч. результаты спектрального гамма-каротажа, нейтронного и плотностного каротажа, каротажи сопротивления, акустические каротажы и пр. Системы первого типа именуются MWD (measurement while drilling), второго - LWD (logging while drilling).

На практике указанное скважинное оборудование обычно реализуется по модульному принципу и строится с использованием нескольких микроконтроллеров, связанных каким-либо интерфейсами. Часто они объединены в локальную сеть на базе общей шины RS-485 (см. рис. 1). Под модулем телесистемы здесь понимается МК, реализующий функции задатчика, т.е. ведущего узла на интерфейсе RS-485, проводящего опрос гамма модуля, инклинометра и иных потенциально возможных модулей с использованием, например, пакетов протокола Modbus.

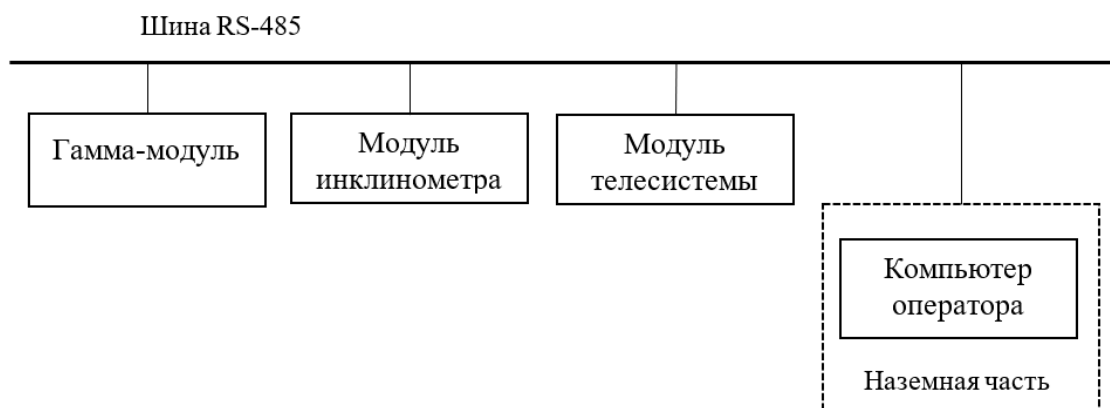


Рис.1. Сеть из основных компонент LWD с подключением компьютера оператора (только при наземном расположении скважинных модулей).

Существенную роль в успешной работе указанной системы играет выбор канал передачи скважинной информации наверх, к наземному оборудованию (в направлении «забой - устье»). Самыми распространенными вариантами на сегодняшний день являются электропроводный, электромагнитный и гидроканал (через столб буровой жидкости). Первые два варианта имеют ощутимо большую скорость передачи, зато для гидроканала характерна низкая зависимость от свойств земной породы, конкретной

технологии бурения, он проще в реализации, к тому же обеспечивает работу на больших глубинах (5-7 км). Как результат гидроканал активно используется, даже несмотря на малую скорость передачи данных на уровне всего лишь долей бита в секунду (т.е. на передачу одного параметра реально может уходить вплоть до нескольких десятков секунд). Столь низкая скорость передачи приводит к использованию обычно симплексного, т.е. однонаправленного снизу-вверх канала. Как следствие, возможность изменения режима и тем более алгоритма работы MWD/LWD реализуется только путем периодического подъема бурового снаряда вместе с вычислителями системы на поверхность и подключения к ним компьютера оператора, например, через шину RS-485 (см. рис. 1). Компьютер при этом временно становится ведущим узлом на шине вместо модуля телесистемы (либо конкурирует с ним).

Всякого рода изменения режима/последовательности работы при этом должны фиксироваться в энергонезависимой памяти указанных модулей. Даже постоянное подключение всех МК системы к аккумуляторной батарее, хотя и позволяет записывать необходимые изменения прямо в ОЗУ микроконтроллеров, не обеспечивает безусловной надежности в процессе всех манипуляций с элементами телеметрической системы и бурового оборудования. Альтернатива в виде перезаписи нужных параметров непосредственно в память программ МК (фактически вместе с кодом управляющего ПО) представляется негибким, ненадежным и избыточным. Гораздо рациональней смотрится вариант с оснащением всех модулей или, хотя бы телесистемы, накопителем на базе флэш-ПЗУ, т.е. «твердотельным диском» (SSD) небольшого объема. Перезапись всех необходимых параметров при очередном подъеме на поверхность позволяет сразу радикально менять алгоритм работы телесистемы, а также состав и временные последовательности передачи необходимых геофизических и инклинометрических данных. Помимо этого, надо иметь в виду, что низкая скорость передачи данных снизу-вверх дает возможность передавать в реальном времени только минимально необходимую для текущего управления направлением бура информацию. Наличие же твердотельного накопителя позволяет хотя бы фиксировать любую дополнительную полезную информацию на глубине, а на поверхности ее быстро скачивать и анализировать «offline». Процедура доступа компьютера оператора к накопителю реализуется лишь при взаимодействии с МК телесистемы или иного модуля, оснащенного ЭСППЗУ и подключенного к общей коммуникационной шине. В этом отношении при выборе конкретной архитектуры накопителя важно выбрать решение, которое не было бы слишком ресурсоемким с точки зрения применяемых микроконтроллеров. Помимо этого, необходимо учитывать жесткие условия эксплуатации оборудования, прежде всего высокие температуры, требования низкого энергопотребления, компактности и, безусловно, необходимость импортозамещения. Аналогичные требования предъявляются, конечно, и к самим МК. С учетом этих обстоятельств приемлемым вариантом является выбор микроконтроллеров и микросхем ЭСППЗУ, выпускаемых Российской компанией АО «ПКС Милендр», например, МК 1986BE92У и флэш-ПЗУ типов 1636PP52У или 1636PP3/1636PP4 [2-4]. Указанные ЭСППЗУ характеризуются наличием последовательного интерфейса SPI (для 1636PP52У он единственный), что позволяет существенно снизить число связей между интегральными микросхемами (ИМС) на плате модуля и уменьшить габариты изделия. Информационная емкость – 1 Мбит (128К x 8) для 1636PP52У, 4 Мбит (512К x 8) для 1636PP3У и 16 Мбит (2М x 8) для 1636PP4У. Все ИМС, включая МК, имеют приемлемый рабочий диапазон температур – до 125 °С.

Все перечисленные ЭСППЗУ используют двумерную матрицу типа NOR в отличие от обычно применяемых в SSD матриц NAND. Это, хотя и снижает информационную емкость ИМС, как минимум, повышает быстродействие, а кроме того, указанных объемов вполне достаточно для рассматриваемых приложений даже в варианте 128Кx8.

ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ДАННЫХ В НАКОПИТЕЛЕ

Привычным и удобным для оператора мог бы быть вариант создания на базе ЭСППЗУ накопителя с традиционной файловой системой. Учитывая скромный объем хранимой информации, хорошим выбором кажется использование файловой системы FA12, применяемой, например, на дискетах. Реально, особенно с учетом ограниченных ресурсов выбранного МК (объем ОЗУ – 32 Кбайт), подобный подход оказывается совершенно не рациональным. К примеру, полноценная реализация FAT [5] подразумевает возможность легко и быстро записывать новые файлы после удаления старых в блоки (сектора или кластеры секторов) диска, занятые прежде удаленными файлами. Эффективная реализация возможна лишь при наличии на носителе большого количества (сотни и тысячи) таких блоков малого размера (традиционно на дисках 512 байт на сектор). Для магнитного диска запись новой информации в блок просто заменяет старое содержимое. В случае ЭСППЗУ операции записи должно предшествовать стирание целого блока, выполняемое как одна неделимая операция, в результате все биты блока заполняются логическими единицами. Запись новой информации просто переводит отдельные логические единицы в нули. С одной стороны, при записи в рассматриваемые ЭСППЗУ возможен экономный по времени для операций записи/чтения произвольный доступ в любую нужную ячейку блока (для магнитного диска – только последовательный доступ ко всем ячейкам блока). С другой стороны, при разбиении матрицы ЭСППЗУ на слишком крупные минимальные физические блоки, к которым применима операция стирания,

эффективность использования памяти накопителя окажется низкой из-за необходимости применения крупных кластеров даже для коротких файлов. Попытка улучшить ситуацию за счет дробления крупных стираемых физических блоков на множество мелких, используемых для хранения частей файлов, потребует перед любой операцией изменения даже одного кластера:

- а) сохранять весь блок в ОЗУ,
- б) модифицировать там фрагмент из нужного кластера,
- в) стереть весь физический блок, а затем
- г) перезаписывать из ОЗУ в блок ЭСППЗУ модифицированную информацию, в которой будут внесены изменения, касающиеся только одного или нескольких кластеров.

Первый пункт может оказаться проблемным или невозможным при неудачном соотношении объема свободной ОЗУ МК и физического стираемого блока флэш-памяти. Все указанные соображения работают при указанных условиях и в случае анализа таких аспектов реализации FAT, как модификация каталогов (или хотя бы одного корневого каталога) и собственно таблиц FAT. Как известно [5] каталоги и цепочки записей о кластерах в FAT (FAT12) состоят из элементов размером 32 и 2 байта, соответственно. Они размещаются и актуализируются (модифицируются на носителе) порциями размером с логический блок (кластер/сектор). С учетом вышесказанного, при крупных размерах стираемого физического блока ЭСППЗУ работа с модификацией каталогов и таблиц FAT становится проблематичной.

Для рассматриваемых ИМС ЭСППЗУ характерны следующие размеры блоков:

- только 2 сектора по 64 Кбайт с возможностью стирания секторов (и всей памяти), а также записи вплоть до побайтной для 1636PP52У;
- 8 секторов по 2 Мбит, 1024 страницы по 16 Кбит, возможность стирания страницы, любой комбинации секторов и всей памяти, запись вплоть до отдельного байта для 1636PP4У;
- 2 сектора по 2 Мбит, 256 страниц по 16 Кбит, возможность стирания страниц, комбинации секторов и всей памяти для 1636PP3У.

Видно, что даже при наличии в ИМС стираемых страниц, их размер достаточно велик, кроме того ИМС 1636PP3У и 1636PP4У из-за наличия наряду с SPI и параллельного интерфейса не столь компактны, как 1636PP52У, при том, что емкости последней практически достаточно для большинства случаев.

Учет реальных особенностей применения флэш-накопителя в рассматриваемой задаче позволяет резко снизить ресурсоемкость операций записи и модификации хранимой информации. На практике при эксплуатации в составе MWD / LWD – систем не предполагается большого разнообразия типов хранимой во флэш-накопителе информации. Так, особенно важно хранить там управляющие последовательности [6] вида "Inc:12:p Azm:12:p aTFA:6:p MagF:12:p Grav:12:p" или более сложные вида "2{3{aTFA:6:p}1{gama:8:p}}BatV:8:p 2{3{aTFA:6:p}1{gama:8:p}} Temp:8:p Bat2:1:n", определяющие порядок передачи по гидроканалу информации со стороны контроллера телесистемы. Изменение и сохранение подобных последовательностей в накопителе при подъеме бура на поверхность является одной из наиболее частых операций. Кроме того, в накопителе должны сохраняться сведения о различных уставках, порогах, таймаутах, счетчиках повторов и т.п. Наконец, значительную часть объема может занимать информация (в виде нескольких разнотипных массивов с нарастающим объемом), сохраняемая во время бурения для последующего анализа после подъема на поверхность. Все подобные информационные ресурсы могут быть представлены не в виде «полноценных» файлов традиционного вида, а в форме информационных блоков (см. рис. 2) переменного размера, снабженных простыми заголовками и хвостовиками с проверочным кодом, например, Cyclic Redundancy Code (CRC).

siz0	<i>размер области данных в блоке</i>	Заголовок блока (4 байта)
siz1	<i>копия предыдущего поля</i>	
<u>type</u>	<i>тип блока, определяющий его структуру и смысл информации</i>	
<u>attrib</u>	<i>атрибуты блока</i>	
data	<i>Полезная информация</i>	Область данных (до 122 байт)
CRC	<i>Циклический контрольный код</i>	Хвостовик

Рис. 2. Предлагаемая структура информационного блока в ЭСППЗУ.

В блоке защита при помощи CRC для повышения скорости поиска нужного блока по массиву памяти применяется только к полям type, attrib и данным. В этой связи первое поле продублировано. Присутствующие в системе FAT элементы типа загрузочной записи, каталогов, таблиц FAT отсутствуют, т.е. в матрице ЭСППЗУ сразу после стирания находятся лишь байты с кодом FFh, а затем по мере заполнения памяти, начиная с нулевого адреса, появляются все новые и новые блоки с описанной структурой, вплоть до постепенного заполнения всей флэш-памяти. Вместо использования традиционных имен файлов для поиска нужного блока применяется просмотр заголовков блоков с анализом полей type и attrib. Переход от начала одного блока к началу другого реализуется за счет использования поля «размер области данных в блоке». Поле «тип блока», помимо смысла хранимой информации, описывает и состояние блока. Перевод поля type с некоторым исходным значением в состояние 0 означает, что данный блок перестал быть актуальным, например, был заменен «свежим» блоком с аналогичной по смыслу информацией, т.е. обнуление типа «удаляет» блок, реально не меняя его информационную часть. Напомним, что изменение содержимого битов любого байта памяти из состояний лог. 1 в лог. 0 возможно, в отличие от обратного перехода из 0 в 1, для которого потребуется стирание, как минимум целого сектора (1636PP52У) или страницы (1636PP3/4У). Очевидно, что значение типа FFh недопустимо, поскольку такой код содержат байты памяти сразу после физического стирания памяти. Нетрудно заметить, что при такой технологии новый аналогичный по смыслу «удаленному» блок размещается уже в области с большим адресом. Таким образом, при достаточно продолжительном повторении процедуры записи однотипных блоков адрес новой копии постепенно достигнет верхнего края адресов флэш-ПЗУ и дальнейшее использование ЭСППЗУ для записи станет возможно только после стирания, как минимум, сектора или всей ИМС. В итоге, при использовании не слишком больших информационных блоков большую часть времени операции поиска, чтения и записи, даже с заменой однотипных блоков новыми, будут выполняться без необходимости реального стирания секторов/страниц или всего массива памяти. Редкие операции очистки всей памяти ИМС или сектора/страницы при почти полном заполнении флэш-ПЗУ должны выполняться при взаимодействии с компьютером оператора, когда полезная информация из стираемых секторов сначала может быть перекачана в память компьютера. Таким образом, требование к объему свободного ОЗУ МК значительно снижаются.

Что касается атрибута в заголовке блока, жестко определены лишь два бита из восьми, остальные зарезервированы для дальнейшего использования, например, для целей расширенной интерпретации типов. На данный момент 7-й бит - признак продолжения массива данных в следующем блоке такого же типа в случае использования информационных фрагментов, не уместящихся в одном блоке или постоянно растущих массивов (картажные данные и т.п.). Значение 0 в 7-м бите означает, что это - последний блок в цепочке однотипных, единица – промежуточный. Единичное значение 6-го бита трактуется как признак блока, который еще не заполнен до конца, т.е. продолжает заполняться, при этом CRC еще не сформирован и длина блока формально указывается как 7Fh. Нулевое значение бита означает, что блок заполнен и CRC сформирован.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотренные принципы организации информации в ЭСППЗУ успешно реализованы в виде соответствующей библиотеки функций на языке Си при разработке управляющего ПО для MWD-системы

на базе МК 1986BE92У и флэш 1636PP52У. Наряду с базовыми низкоуровневыми операциями, ориентированными на чтение/запись байтов и последовательностей байтов, а также стирания секторов и всей ИМС ЭСПЗУ, в библиотеке представлены функции для работы с информационными блоками, представленными на рис. 2:

- seek4Blk2R - поиск очередного неудаленного блока для чтения и формирование смещения до следующего;
- rdBlk – считывание тела (полезная информация) блока с проверкой CRC;
- seekFree – поиск начальной точки для записи блока;
- wrBlk2Free – запись нового блока с указанного смещения с формированием CRC;
- mdfBlkHdr – запись/модификация заголовка блока;
- rplceBlk – замена блока заданного типа на аналогичный с новым содержимым ("перезапись").

Библиотека в виде соответствующих заголовочного файла и файла на языке Си, а также все необходимые вспомогательные файлы, включая функцию расчета CRC, размещена в открытом репозитории [7] и может быть использована без ограничений заинтересованными разработчиками.

Список литературы

1. Бескабельные измерительные системы для исследований нефтегазовых скважин (теория и практика) / А.А. Молчанов, Г.С. Абрамов. — М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2004. — 516 с.
2. Спецификация микроконтроллеров серии 1986BE9х и K1986BE9х. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ic.milandr.ru/upload/iblock/65a/z76ysnhw675i5cdkbciklitx70gwifr2/1986BE9X.pdf/> (дата обращения: 10.02.2022).
3. Микросхема ЭППЗУ Flash-типа с последовательным интерфейсом 1636PP52У, K1636PP52У, K1636PP52УК. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ic.milandr.ru/> (дата обращения: 10.02.2022).
4. Микросхема ЭСПЗУ с параллельным/последовательным вводом/выводом информации Flash-типа 16 МБит, 1636PP4У, K1636PP4У, K1636PP4УК, K1636PP4Н4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ic.milandr.ru/upload/iblock/ea4/rzp71s3f7mfxvqc978375gjhbehugpq6/1636PP4У.pdf/> (дата обращения: 16.03.2023).
5. Мешков В. Архитектура файловой системы FAT. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://samag.ru/archive/article/24/> (дата обращения: 16.02.2023).
6. Kripa Nidhi, David Erdos. Advanced Mud Pulse Telemetry: M-Ary Encoding for MWD Tools [Chapter 2]. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.erdosmiller.com/advanced-mud-pulse-telemetry-mary/> (дата обращения: 16.02.2023).
7. Гараев Р.А. Библиотека для работы с отечественной ИМС ЭППЗУ (флэш 128К x 8) 1636PP52 по интерфейсу SPI в системе на базе отечественного микроконтроллера (МК) K1986BE92QI (MILANDR) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://github.com/garaevra22/miscella/tree/main/K1986BE92%2B1636%D0%A0%D0%A052\(Milandr\)](https://github.com/garaevra22/miscella/tree/main/K1986BE92%2B1636%D0%A0%D0%A052(Milandr)) (дата обращения: 16.03.2023).