

УДК 621.431

EDN QPPKBV

**М.Ю. Ушаков**  
**ОПЫТ СОЗДАНИЯ БЛОКА**  
**УПРАВЛЕНИЯ БЕНЗИНОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрены вопросы организации накопления оперативной, отладочной и диагностической информации, необходимой для разработки микропроцессорной электроники, работающей в составе сложной механической системы. Результаты работы актуальны как для специалистов по электронике, так и для широкого круга лиц, работающих со сложными системами, в частности, с двигателями внутреннего сгорания.

**Ключевые слова:** блок управления, микроконтроллер, EEPROM, DATA FLASH, FRAM, накопление массивов измерений с постоянным временным шагом.

### Введение

При разработке электроники в составе сложных механических систем должны решаться задачи разного уровня: выбор элементной базы, разъем и корпус, выбор двигателя или класса двигателей. Важны также возможности самого блока управления (БУ): простое управление процессами в двигателе при его обычной работе или дополнительные возможности по записи/регистрации процессов с целями изучения или отладки. Серийные блоки управления лишены дополнительных возможностей, а любые самостоятельные модификации запрещены, поскольку могут повлиять на правильную работу подсистем снижения токсичности отработавших газов (ОГ). Разработка блока для массового применения, подразумевает, по сути, разработку двух блоков – облегченного для внедрения и т.н. «инженерного», с дополнительными возможностями. Однако, наряду с заводским производством, БУ производится частными разработчиками, что создает ряд правовых, инженерных и философских проблем. В данной статье рассмотрены некоторые технические вопросы создания БУ, а сам он рассматривается как наделенный дополнительными возможностями, не рассчитанными на массовое применение в серийных автомобилях.

Понятие «создание блока управления» включает не только разработку печатной платы и корпуса, но и разработку/отладку программы БУ и поддерживающей компьютерной. Трудоемкость разработки программного обеспечения на порядок превышает затраты на разработку «железа», а имеющееся «железо» штатных блоков исключает дополнительные возможности для исследователя. Имея собственную схему с набором подходящих компонентов, на следующих этапах еще провести модификацию схемы и платы.

### Разработки

Представленная разработка – результат последовательных модификаций нескольких версий устройства. Иными словами, несмотря на замену микроконтроллера (м/к), новая версия была логичным развитием предшествующей версии. Это обусловлено тем, что новые м/к одного класса и одного изготовителя обладают всеми возможностями прежних при увеличении производительности, размеров памяти, числа и вида периферийных модулей. В то же время цена либо остается прежней, либо снижается. В этой ситуации замена м/к на новый подразумевается, несмотря на затраты по переделке и платы, и ПО. Первоначальный вариант БУ базировался на м/к TMS320LF2407A от фирмы TEXAS INSTRUMENTS, крупнейшего разработчика и производителя разнообразной электроники и ПО. На тот момент времени в сравнении с конкурентом C509-L от SIEMENS/INFINEON наш м/к выгодно отличался наличием в самом м/к FLASH-памяти программ и доступностью розничной торговли.

## Общая концепция БУ

БУ – универсальный, с возможностью применения различных датчиков и исполнителей. Для каждого из них должны быть прописаны характеристики (в т.ч. и тарифовочные). Проект для однотипных комплектаций включает более 20 констант, таких как рабочий объем, число цилиндров (4, 6 или 8), тип и модель датчиков и исполнителей. Некоторые константы проекта определяют способ обработки и управления. Например, тип регулятора воздуха (с электроприводом) или регулятора дополнительного воздуха (в тандеме с механическим приводом дросселя) открывает для конкретного устройства соответствующие программные модули и силовое управление. Алгоритмы управления впрыском, зажиганием и частотой вращения холостого хода/ степенью открытия регулятора воздуха были разработаны заново. Может показаться, что задача для управления топливоподачей состоит лишь в определении циклового заряд воздуха и количества впрыскиваемого топлива. Действительно, в статических условиях нагружения двигателя с помощью датчика массового расхода воздуха (ДМРВ) удастся определить цикловой заряд воздуха. На переходных режимах (как и на всех прочих) ДМРВ показывает, сколько воздуха попадает в ресивер, т.е. за дроссельную заслонку, а не в конкретный цилиндр. Реально только часть впрыснутого топлива сразу попадает в цилиндр. Другая часть свежевпрыснутого топлива оседает на стенках впускной трубы. Какая-то часть топливной пленки попадает в цилиндр. Эти тонкости следует учитывать, другими словами – моделировать, и каждый разработчик это делает по-своему.

Отладочный и диагностический инструментарий включает в себя «черный ящик» (ЧЯ), который регистрирует не менее 40 текущих параметров с поисковой / пооборотной / поцикловой периодичностью и записи т.н. протокола – редких событий, например, ошибок. Оба потока информации маркируются абсолютным номером такта и при вращении двигателя непрерывно перезаписываются, затирая самые старые фрагменты. Физически данные записываются в две EEPROM-микросхемы с весьма разными и специфическими свойствами. Доступ к записям осуществляется через подключенный компьютер с собственной программой. С помощью компьютера можно непосредственно наблюдать за системой, а также вмешиваться в ее работу. Цикловой заряд воздуха определяем по ДМРВ как универсальное решение для любого ДВС. Датчик абсолютного давления в ресивере (ДАД) также возможен к применению и рассматривается как дополнительный источник информации. Из-за малой серийности корпус БУ заимствован от МИКАС 7.1 /Январь 5.1. Корпус состоит из двух алюминиевых деталей, собирается на винтах, что важно для многократной сборки / разборки (рис.1). Разъем как неотъемлемая часть конструктива имеет 55 одинаковых силовых контактов. Печатная плата размерами 113×157мм при двустороннем монтаже вмещает до 380 компонентов. Первым двигателем, на котором велась отработка базовых алгоритмов, был двигатель на стенде ЗМЗ-4062.

Первый вариант БУ позволял обслуживать две катушки зажигания и четыре форсунки, что вполне соответствовало текущим задачам отработки базовых алгоритмов. Печатная плата была выполнена двусторонней, а м/к с внешней параллельной памятью для ЧЯ – на небольшой мезонинной платке, подключаемой к основной плате через 60-ти контактный разъем. Впоследствии примененный м/к был заменен.

Вторая версия – замена м/к на TMS320F2808 от той же фирмы TEXAS INSTRUMENTS. Переделки оказались в основном программными, поскольку аппаратно была переделана только микроконтроллерная плата. Параллельная FRAM память прототипа записей ЧЯ емкостью в 64 КБ заменена на последовательную EEPROM DATA FLASH с 8.25МБ AT45DB642D фирмы ATMEL. Уникальность и удобство этой микросхемы в том, что для перезаписи страницы не требуется предварительное ее стирание. Кроме того, структура страницы 1024 +32 байта, куда вписывались медленно изменяющиеся переменные. Всего в таком ЧЯ регистрировалось около 40 переменных, а емкости хватало на 30-70км пробега автомобиля.

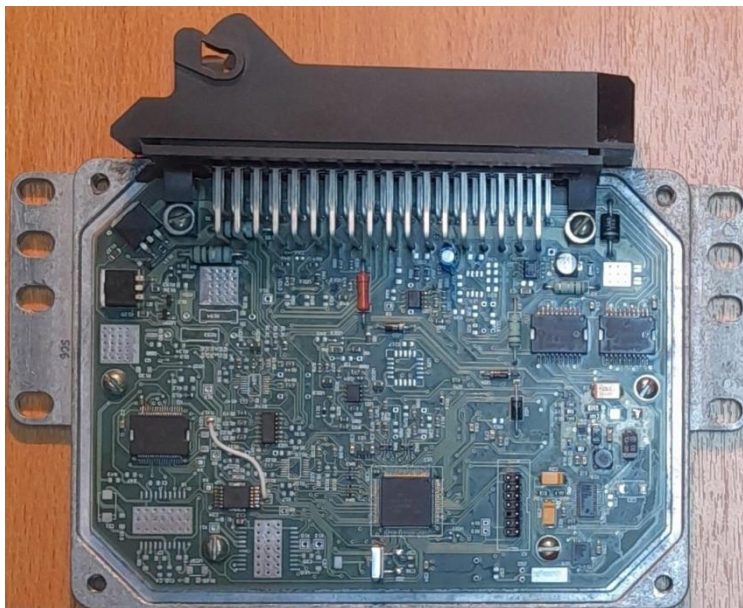


Рис. 1. БУ ver. 5 без верхней крышки

Протокол и настройки записываются в последовательную EEPROM типа FRAM с неограниченным числом перезаписей. Свойства этого типа памяти: запись не страничная, а любыми порциями вплоть до 1 байта, при отключении питания информация не пропадает. Фирма-разработчик и производитель применяемых нами микросхем уже трижды меняла наименование/принадлежность. Сначала это была самостоятельная RAMTRON, попавшая потом под CYPRESS. Ныне вся линейка FRAM продуктов от CYPRESS принадлежит INFINEON. Емкость применяемых FRAM микросхем может составлять от 8KB до 256KB. Самый малый объем вмещает помимо зоны системных настроек и адаптации характеристики ДМРВ 483 строки протокола (каждая строка 16 байтов). Увеличение размера с 8 до 16 KB приводит к увеличению строк протокола чуть более чем в 2 раза. С некоторых пор при относительно больших размерах FRAM-памяти помимо протокола стали возможны иные записи (массивы с датчиков детонации, положения коленвала при выбеге, ДМРВ и т.д., всего до 8 типов). После экспериментальных проверок м/к, когда аппаратные возможности позволяли обслуживать уже до 4 каналов зажигания и до 6 форсунок, появилась следующая версия. Плата была выполнена 4-слойной без мезонинной надстройки. Переделана система питания, требующая трех источников с +5, +3,3 и +1,8 В. 5-вольтовый источник выполнен импульсным, а остальные – линейными. Такое решение уменьшает рассеивание и длительно противостоять провалам питающего напряжения. В отличие от версий МИКАС и «Январь», в данной версии выключенном состоянии питание на м/к не подается. При выключении зажигания БУ сам через некоторое время отключает свое питание.

Разработка новой генерации актуализировала вопрос выбора инструментария при обработке детонации. Классическим решением было использование специальной микросхемы – детектора детонации. Поставщики электронных компонентов заявили, что HIP9010 от HARRIS/INTERSIL снимается с производства, но альтернативная модель еще не предложена. Вместо м/с детектора детонации было решено непосредственно оцифровывать сигнал с датчика детонации и распознавать/обработать детонацию цифровыми методами.

Цифровая обработка сигналов неминуемо потребует привлечение быстрого преобразования Фурье, а это в свою очередь диктует, чтобы цифровые отсчеты сигнала были с равными интервалами по времени. Задача нетривиальная, если учесть, что в нашем м/к один аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который в одном прерывании позволяет получать 16 отсчетов с любого из 16 входных аналоговых каналов. На перенос измеренных значений в

массивы потребуется какое-то время, и процесс измерения будет остановлен. Далее представлено авторское решение задачи.

Из шестнадцати последовательных измерений АЦП четыре подключаем к каналу детонации (например, 1...5...9...13...). Остальные 12, обозначенные точками подключаем к другим сигналам. В этой серии аппаратно гарантируется равномерность по времени между отсчетами. 17-й замер, т.е. фактически снова 1-й будет отсутствовать по причине остановленного АЦП, поскольку, то, что намеряли, требует переноса в буферы-массивы. Следующий момент запуска цикла из 16 замеров следует подогнать так, чтобы временной разрыв был кратен интервалу между замерами детонации (1 и 5 или 5 и 9 и т.д.). Рекомендованное условие: пропуск замера детонации должен быть один. Но если программа не успела за этот промежуток, то следует организовать уже два пропуска для сохранения постоянной временной сетки. Итак, в идеале имеем 4 равноотстоящих по времени замера, далее, гарантированный пропуск, и, снова 4 замера, пропуск и т.д.: 1...5...9...13...x...1...5...9...13...x...1...5... Другая картина, менее привлекательная: 1...5...9...13...x...x...1...5...9...13. Пропущенные отсчеты, обозначенные «x» получаем аппроксимацией. Линейная аппроксимация хорошо срабатывает за редкими исключениями, требующими специальных решений.

Итак, имеется исходный сигнал с датчика детонации, который можно представить в графическом виде. В благоприятных условиях наличие детонационного сгорания очевидно. Доказательством того, что это именно детонация, могут служить сравнительные записи с другим углом опережения зажигания на том же режиме по наполнению и частоте вращения. Позднее выяснилось, что визуально распознавать детонацию небольшой интенсивности при наличии сопоставимого шума двигателя достаточно трудно и этот вопрос требует специального исследования. Здесь заметим лишь, что обработка сигнала детонации выполнена с использованием математического сопроцессора CLA м/к TMS320F28069.

EEPROM DATA FLASH фирмы ATMEL, как было сказано, вполне устраивала. Однако долгое время линейка DATA FLASH никак не пополнялась, а на рубеже 2010-2011 гг. производство было передано фирме ADESTO. Новые продукты слегка модифицировали и сделали программно-несовместимыми с прежними устройствами (например, AT45DB642E взамен AT45DB642D). Однако инженерное сообщество не приняло таких нововведений и фирма ADESTO ушла с рынка.

Альтернатива DATA FLASH – обыкновенная или стандартная EEPROM с постраничной записью и секторным стиранием. До недавнего времени подходящие по всем параметрам микросхемы этого типа отсутствовали. Суть проблемы в том, что непосредственно процедура записи производится страницами по 256 или 512 байтов в зависимости от конкретного исполнения. Предварительно страница должна быть стерта. Стирание производится не страницами, а секторами, размеры которых сильно разнятся и могут составлять 4, 32, 64 и даже 256 КБ. Скорость стирания секторов большего размера (в КБ/с) заметно выше и пока идет стирание, запись процессов идет в буфер оперативной памяти (ОЗУ). Важно не допустить переполнение буфера, что может быть решено достаточно просто: в оценке предельной скорости поступления данных как отношение размера буфера к максимальному времени стирания сектора.

Изыщество и простота понимания проблемы не позволяют также легко и полностью решить задачу. Снятая с производства AT45DB642D для ориентира позволяла гарантированно обеспечить скорость стирания на уровне 25 КБ/с, т.е. в спецификации должна быть указана именно минимальная скорость стирания. Не все производители указывают эту величину, называя только типичную, которая выше в 5-8 раз. От ведущего производителя NOR EEPROM MICRON только с 2017 г. стала доступна MT25QL512 с малыми размерами стираемых секторов. Только при размере буфера в 32 КБ достигается приемлемая скорость стирания в 32 КБ/с. Если же взять размер сектора стирания и буфер по 4 КБ, то скорость стирания снизится более чем втрое и окажется неприемлемой. Таким образом, скорость записи при вынужденной замене микросхемы EEPROM едва достигла исходного уровня.

Решения повышения скорости существуют, но они довольно затратны и громоздки. Первое – размер буфера. Сама величина должна совпадать со степенью двойки, т.е. за величиной 32 следует 64, что проблематично для текущего микроконтроллера с его 100 КБ ОЗУ. Второе – использование две микросхемы EEPROM вместо одной. Размер записей ЧЯ при этом может увеличиться вдвое, а может остаться тем же или даже сократиться и не быть постоянной величиной. В одном случае запись ведем в разные микросхемы по очереди: по мере заполнения/записи сектора в одной переключаемся на запись в другую и стираем очередной сектор в первой. Возможен более скоростной вариант, когда пишем процесс только в одну микросхему, которая была стерта полностью. Тут надо подгадать момент, когда начать стирание. Третье – использование микросхемы EEPROM с большими размерами сектора стирания (256КБ). У подобных микросхем прослеживается тенденция к небольшому увеличению скорости стирания.

Ниже приведена таблица с наиболее важными параметрами используемых нами микроконтроллеров серии C2000. Набор периферии, качество и количество определяют предельный круг решаемых задач (число цилиндров/форсунок, каналов зажигания и пр.)

**Таблица 1.**  
**Параметры м/к серии C2000**

	TMS320LF2407A	TMS320F2808	TMS320F28069	TMS320F28P650SH
Год начала выпуска	2000	2004	2010	2023
Макс. частота, МГц	40	100	90	200
FLASH, КБ	64	128	256	768
ОЗУ, КБ	5	36	100	244
Матем. сопроцессор	-	-	CLA	CLA, TMU
АЦП, разрядность	10	12	12	12/16
Макс. число каналов АЦП	16	16	16	19
модулей PWM	6	6+4	8+3	18+7
Потребл. мощность при 20/40 МГц, мВт	250 / 315	210 / 305	250 / 340	- / -
Корпус, контактов	144	100	100	100, 176
Цена за 1 в партии 1000 шт., \$	10.5 / 11.2 / -	- / 10.7 / 13.6	8.1 / - / 10.6	- / 7.1 / 8.7 *

Некритичными для решения поставленных задач оказались максимальная тактовая частота и размер памяти программ и таблиц (FLASH). Первоначально хватало всего 20 МГц, а с введением обработки детонации частота тактирования была увеличена вдвое. Используемый размер FLASH-памяти до сих пор не превышает 100 КБ. Разрядность АЦП в 10 битов признана недостаточной, хотя в дальнейшем выросла до 12 разрядов и для подтверждения точности введены средства коррекции линейности преобразования. Быстродействие АЦП также некритично и минимально составляет величины значительно меньше 1 мкс на измерение. В перспективных м/к (TMS320F28P650xx) имеются три АЦП с выбором разрядности между 12 и 16 битами. Наличие нескольких АЦП упростит выбор и обработку аналоговых сигналов, число которых у нас может достигать до 18. При замене EEPROM с DATA FLASH на обычную потребовался большой буфер, располагаемый в ОЗУ. Для TMS320F28069, несмотря на общий размер в 100 КБ, выделить под буфер ЧЯ более 32 КБ не получается, а в перспективных м/к TMS320F28P650SH можно выделить уже два буфера по 64 КБ.

В табл. 1 цена м/к приведена для трех исполнений: industrial (-40...+85 °C), S (-40...+125°C) и Q1 Automotive (-40...+125 °C). Звездочкой помечена цена перспективных TMS320F28P650xx, она указана для двухядерных вариантов. Минимальная цена одноядерных исполнений фирмой изготовителем названа в 5,85 \$.

Линейка м/к TMS320F2837xS/D – это одно-двухядерные м/к, появившиеся в 2014 г. По внутрифирменной классификации это м/к третьего поколения серии C2800 с напряжением питания ядра 1,2 В вместо 1,8 В, что снижает потребляемую мощность и позволяет работать на частотах до 200 МГц. Предлагаются корпуса с числом контактов 100 и 176. Парадоксально, но факт – для нашей конфигурации 100-контактный корпус TMS320F2837xS/D не сможет заменить TMS320F28069, т.к. часть периферийных сигналов останутся неподключенными (на кристалле периферия есть, а контактов не хватает). Использовать 176-контактный корпус из-за нехватки всего нескольких линий кажется нелогичным. К тому же цена м/к в таком корпусе значительно выше. Обновленная линейка в лице TMS320F28P650SH/DK – полная аналогия упоминаемых TMS320F2837xS/D. Однако в 100-контактном корпусе теперь отсутствует проблема недостающих контактов под дискретные порты ввода/вывода.

### Реализация БУ

При использовании БУ на реальных двигателях накоплен колоссальный опыт, приобретенный при разработке алгоритмов в частности отраженный в публикациях [1, 2]. БУ применяется при замене системы механического впрыска на электронный [3].

С использованием БУ получены экспериментальные данные двух кандидатских диссертаций. Автором подготовлены курсы лекций по электронному управлению ДВС для студентов автомобильных специальностей НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

### Выводы

1. Оригинальный БУ бензиновым двигателем находится в процессе непрерывного совершенствования. Меняется и его элементная база, в частности, произведена замена DATA FLASH на обычную EEPROM. Замена м/к продиктована возможностью решения новых задач и подстегивается снижением его цены.

2. Рассмотрены нюансы в задаче накопления массивов измерений с постоянным временным шагом (при записи детонационного сигнала).

### Библиографический список

1. **Ушаков, М.Ю.** Вариант адаптации системы топливоподачи бензинового двигателя с впрыском // Безопасность транспортных средств в эксплуатации. Материалы 79-й международной научно-технической конференции ААИ, 3-4 октября 2012 г.
2. **Ушаков, М.Ю.** Повышение стабильности показаний датчика массового расхода воздуха в коротком измерительном тракте ДВС // Транспортные системы. 2017. № 2(5). С. 34-43.
3. Альтернативные системы впрыска вместо KE-Jetronic. Polytronic - свое электронное управление ДВС. // Форум клуба oldmerin.net [Электронный ресурс] URL: <https://www.oldmerin.net/board/index.php?showtopic=119534> (дата обращения: 28. 01. 2024).