УДК 621.43.044

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЗАЖИГАНИЕМ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ *SECU-3L* (Lite)

А. А. ШАБЕЛЬНИКОВ

Иинженер-программист, Киев, УКРАИНА
email: shabelnikov@secu-3.org

АНОТАЦІЯ *Розроблено блок керування запалюванням для двигуна внутрішнього згоряння. Система являє собою електронний пристрій на основі мікроконтролера з вбудованим датчиком абсолютного тиску та силовими драйверами котушок запалювання. За допомогою даних від датчиків положення коленчастого валу, абсолютного тиску та положення дросельної заслінки система керує кутом випередження запалювання, блокуванням стартера та відсічкою палива на примусовому холостому ходу. Пристрій може бути підключений до персонального комп'ютера для моніторингу, налагодження та діагностики через вбудований USB-інтерфейс із гальванічною розв'язкою. Використання системи дозволяє оптимізувати роботу двигуна та поліпшити його експлуатаційні показники.*
Ключові слова: *мікроконтролер, мікропроцесорне управління запалюванням, SECU-3, котушка запалювання, двигун внутрішнього згоряння, датчик положення коленчастого валу, датчик абсолютного тиску*

АННОТАЦИЯ *Разработан блок управления зажиганием для двигателя внутреннего сгорания. Система представляет собой электронное устройство на основе микроконтроллера со встроенным датчиком абсолютного давления и силовыми драйверами катушек зажигания. С помощью данных, полученных от датчиков положения коленчатого вала, абсолютного давления и положения дроссельной заслонки, система управляет углом опережения зажигания, а также блокировкой стартера и отсечкой топлива на принудительном холостом ходу. Устройство может быть подключено к персональному компьютеру для мониторинга, настройки и диагностики через встроенный USB-интерфейс с гальванической развязкой. Использование системы позволяет оптимизировать работу двигателя и улучшить его эксплуатационные характеристики.*
Ключевые слова: *микроконтроллер, микропроцессорное управление зажиганием, SECU-3, катушка зажигания, двигатель внутреннего сгорания, датчик положения коленчатого вала, датчик абсолютного давления*

IGNITION CONTROL SYSTEM FOR INTERNALCOMBUSTION ENGINES SECU-3L (Lite)

A. SHABELNIKOV

Software developer, Kiev, UKRAINE

ABSTRACT *The article dials with research and development of microcontroller based ignition control system for internal combustion engine. The aim of this work is to develop versatile system with flexible monitoring, tuning and diagnostics capabilities, with support of different synchronization options, sensors and actuators. The task is solved by designing a microcontroller based electronic device, developing embedded software for it and software for monitoring, tuning and diagnostics. Device also includes embedded manifold air pressure sensor and two ignition coil drivers. Signals from crankshaft position, manifold air pressure and throttle position sensors along with board voltage come in to the input of system. By means of mentioned data, system carries out calculations and controls ignition timing, producing control actions for ignition coils. Board voltage is used to control ignition coil's change time (dwell). Also, system controls idle cut-off valve, used to cut off fuel at the forced idle conditions and controls blocking of starter. Blocking of starter is used on cranking, to turn off starter when engine speed is above set threshold. Device can be connected to the personal computer for monitoring, tuning and diagnostics of system via embedded insulated USB interface, which makes connection safer. Software allows to change key settings and lookup tables of ignition timing in the real time, to perform inputs' and outputs' functions remapping. Embedded software and software for personal computer are open source.*
Using of this system allows to optimize working of engine and to increase its operational characteristics. Coolant and intake air temperature sensors are not used in this system, it will be carried out in the future. Also, support of multi spark mode can be added to the system.
Keywords*: microcontroller, microprocessor controlled ignition, SECU-3, ignition coil, engine, crankshaft position sensor, manifold absolute pressure sensor*

Введение

Сегодня во всем мире продолжают находиться в эксплуатации автотранспортные средства с механическими или сильно устаревшими электронными системами зажигания, которые не отвечают современным требованиям, в том числе и экологическим. Это, в первую очередь, обусловлено

© А. А. ШАБЕЛЬНИКОВ, 2015

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

низкой точностью регулирования угла опережения зажигания (УОЗ), нестабильностью динамических параметров системы, использованием устаревших технических решений, а также отсутствием возможности настройки системы.

В то же время как эксплуатационные, так и экологические характеристики этих автотранспортных средств (двигателей) можно заметно улучшить путем использования современных компьютерных систем и систем зажигания с повышенной энергией искрового разряда [1]. В частности, использование микропроцессоров для управления зажиганием позволяет не только существенно упростить аппаратную часть системы, но и применять сложные и сравнительно гибкие алгоритмы управления [2]. Об одной из таких систем идет речь в данной статье [3].

Цель работы

Целью работы является проведение исследований и разработка микропроцессорной системы управления зажиганием двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с открытыми исходными кодами программного обеспечения и открытой документацией на аппаратное обеспечение. При разработке системы используются недорогие и доступные на отечественном рынке комплектующие.

Изложение основного материала

Система управления зажиганием *SECU-3L* представляет собой переработанную версию предыдущей разработки автора − блока *SECU-3T* [4] и является программно совместимой с нею (речь идет как о встроенной программе, так и о программе для персонального компьютера). Встроенное программное обеспечение (ПО) записано в энергонезависимой памяти микроконтроллера системы, а ПО, выполняемое на персональном компьютере (ПК), предназначено для мониторинга, настройки и диагностики системы. Структурная схема системы показана на рис. 1.

Таким образом, система управления зажиганием *SECU-3L* состоит из датчиков, исполнительных устройств и блока электронного управления. Плата блока управления, в свою очередь, включает такие узлы: 8-ми разрядный микроконтроллер, дискретные входы, аналоговые входы, встроенный датчик абсолютного давления (ДАД), формирователь сигнала с датчика начала отсчета (ДНО) или датчика фаз газораспределения (ДФ), формирователь сигнала с датчика положения коленчатого вала (ДПКВ), интерфейс с ПК с гальванической развязкой, схему питания и защиты, два драйвера катушек зажигания, драйвер реле блокировки стартера и драйвер клапана экономайзера принудительного холостого хода (ЭПХХ). Все выходы (драйверы) и входы имеют встроенную защиту.

Рис. 1 − Структурная схема системы управления зажиганием SECU-3L

Печатная плата блока управления представлена на рис. 2. На ней установлен светодиод (*Check Engine*), который выводится на переднюю крышку корпуса и предназначен для сигнализации о неисправностях и ошибках в работе системы.

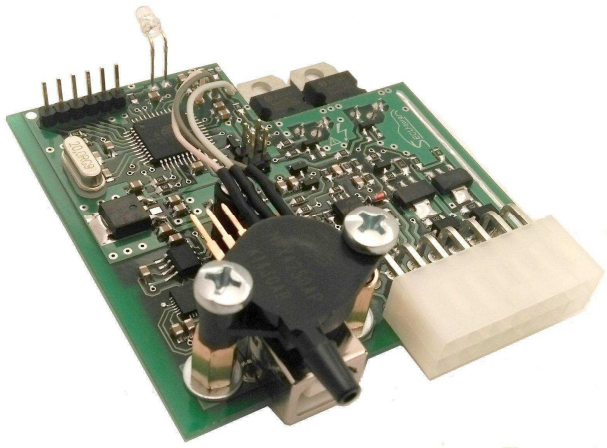

Рис. 2 − Внешний вид платы блока управления

Плата размещается в корпусе из алюминиевого профиля; внешний вид блока управления в собранном виде показан на рис. 3. На передней крышке видно штуцер ДАД, *USB*-разъем и разъем для подключения датчиков и исполнительных устройств. Светодиод выведен на заднюю крышку.

Рассмотрим кратко принципиальную электрическую схему блока (рис. 4). Схема включает в себя следующие основные компоненты: ДАД (*PS1*); микроконтроллер (*U4*); микросхему интерфейса *USB* (*U1*); микросхему гальванической развязки (U3); микросхему с двумя компараторами для входов формирователей сигналов синхронизации (*U5*); микросхему *U6* для получения стабильного напряжения 5 В с защитой на диоде *VD8* и каскады на

транзисторах для управления исполнительными устройствами (*VT1*−*VT7*).

Рис. 3 − Блок управления в собранном виде

Сигналы с ДПКВ поступают на вход компаратора *U5:A*, включенного по дифференциальной схеме для подавления синфазных помех [5] и имеющего гистерезис приблизительно 100−150 мВ. На выходе компаратора сигнал представляет собой прямоугольные импульсы, идущие на специальный вход прерывания микроконтроллера *ICP1*. При этом сигналы с ДНО или ДФ поступают на вход схемы на *U5:B*. То есть данная схема работает аналогично схеме на *U5:A*, хотя есть и принципиальное отличие − наличие эмиттерного повторителя на транзисторе *VT8* и конденсаторов *C16* и *C18*. При этом напряжение на конденсаторах меняется в зависимости от частоты и амплитуды поступающих на вход импульсов.

Напряжение через диод VD9 и резистор R37 поступает на инвертирующий вход компаратора и, складываясь с напряжением, поступающим через резистор R40, меняет порог чувствительности схемы формирователя. Таким образом, меняется чувствительность от оборотов коленвала, что, в свою очередь, увеличивает стойкость системы к помехам.

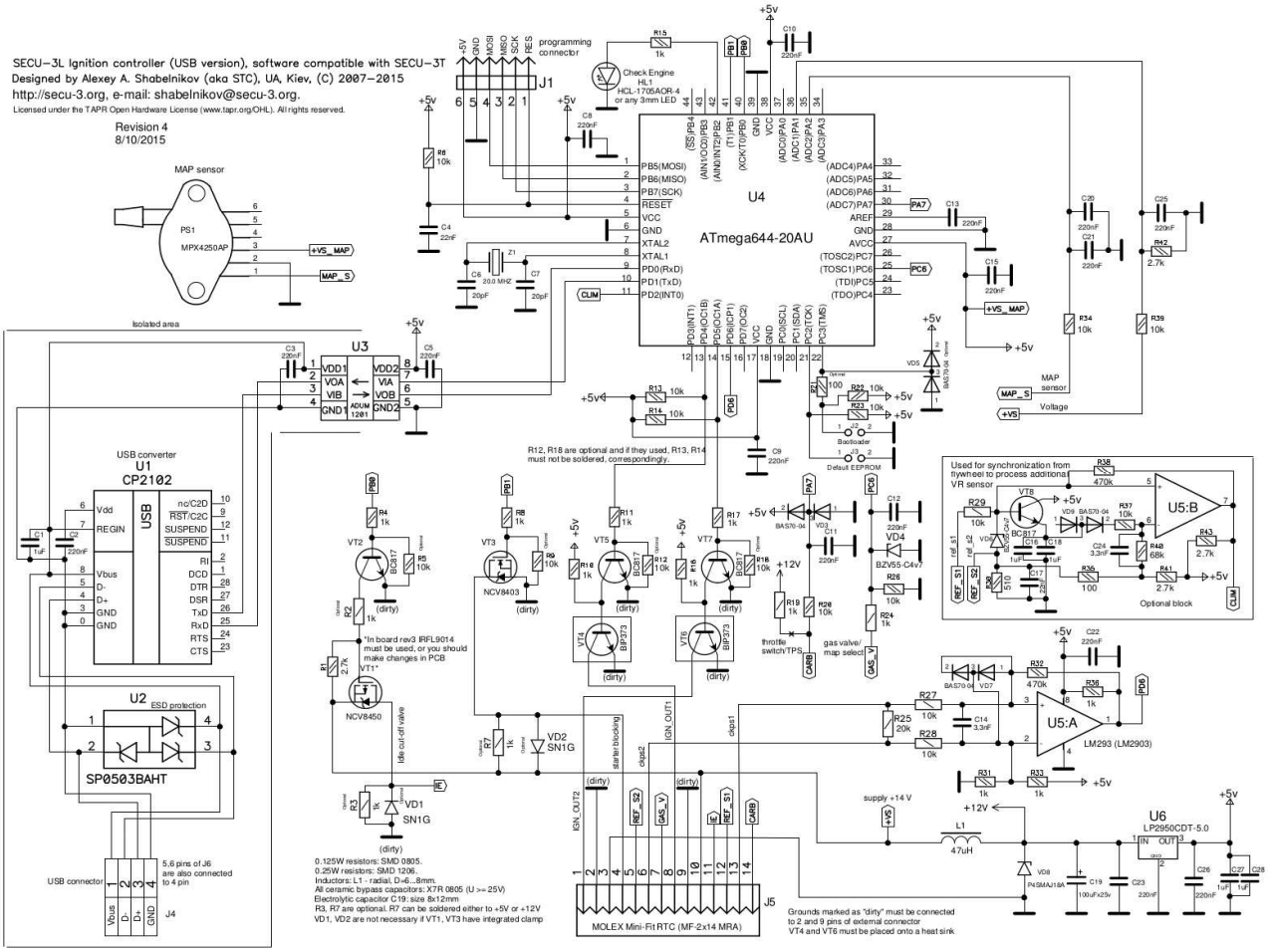

Рис. 4 − Принципиальная электрическая схема блока управления зажиганием

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Выходной сигнал с компаратора *U5:B* поступает на вход прерывания микроконтроллера *INT0*. Сигнал с ДАД *PS1* поступает на RC-цепь, образованную резистором *R34* и конденсаторами *C20 и C21,* где происходит предварительная фильтрация сигнала. Дополнительная фильтрация сигнала осуществляется в программном обеспечении (*moving average*) [6]. Аналогичным образом происходит и измерение напряжения бортовой сети. Напряжение поступает на делитель напряжения на резисторах R39 и R42, выход которого зашунтирован конденсатором C25.

Вход для датчика положения дроссельной заслонки (ДПДЗ) (или концевого выключателя дроссельной заслонки) образован элементами *R19*, *R20*, *C11* и *VD3*. Резистор *R19* устанавливается на плату только в случае использования данной системы на карбюраторном двигателе (положение дроссельной заслонки определяется концевым выключателем). Вход для переключения наборов таблиц (помечен на схеме как *GAS_V*) включает элементы *R24*, *R26*, *V D4* и *C12*.

В схеме имеется один выход с верхним плечом, предназначенный для управления клапаном экономайзера принудительного холостого хода (ЭПХХ). Узел образован транзисторами *VT1* и *VT2.* Диод *VD1,* совместно со встроенным диодом транзистора *VT1,* защищают выходной транзистор от выбросов напряжения (индуктивная нагрузка). Транзистор *VT3,* защищенный диодом *VD2*, управляет реле блокировки стартера.

Стоит отметить, что использованные в данной схеме транзисторы *VT1* и *VT3* имеют встроенную защиту и не нуждаются в диодах *VD1* и *VD2*, соответственно. Упомянутые диоды нужны только в случае применения обычных, незащищенных транзисторов.

Для управления катушками зажигания используются специализированные драйверы (транзисторы *VT4* и *VT6*) [7]. Последние имеют встроенную защиту от короткого замыкания и перегрева. Первый канал управления катушкой зажигания образован транзисторами *VT4* и *VT5*, а второй − транзисторами *VT6* и *VT7*. Для индикации ошибок (Check Engine) предназначен светодиод *HL1*.

На плате имеются перемычки *J2* и *J3*, контакты которых подключены к линиям портов микроконтроллера. Первая перемычка предназначена для аварийного запуска встроенного загрузчика (*boot loader*), а вторая − для принудительной загрузки резервной копии параметров из памяти программ в электрически стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ЭСППЗУ). Не смотря на то, что контакты *J2* и *J3* не выведены на внешний разъем, они могут быть использованы как выходы для альтернативных функций.

Встроенная программа записывается в микроконтроллер путем подключения специального программатора (*STK200/300*) к разъему на плате (*J1*). Программатор встроен в основную программу и необходим только для записи загрузчика, то есть используется один раз после изготовления устройства (или для обновления загрузчика). Все дальнейшие действия выполняются с помощью специальной программы *SECU-3 Manager*, развитие и разработка которой происходит синхронно со встроенной программой.

Кратко рассмотрим алгоритм синхронизации и выработки импульсов зажигания с использованием ДПКВ и синхродиска 36−1 (36 зубьев, один из которых отсутствует) на примере 4-х цилиндрового, 4-х тактного двигателя, зажигание попарно-параллельное (Wasted Spark) [7; 8]. ДПКВ и синхродиск показаны на рис. 5. В рассматриваемом примере ДПКВ установлен таким образом, что в момент прохождения первого зуба до верхней мертвой точки (ВМТ) 1-го или 4-го цилиндра остается 70°. ВМТ в цилиндрах 2 или 3 будет через 180° или 36 / 2 = 18 зубьев.

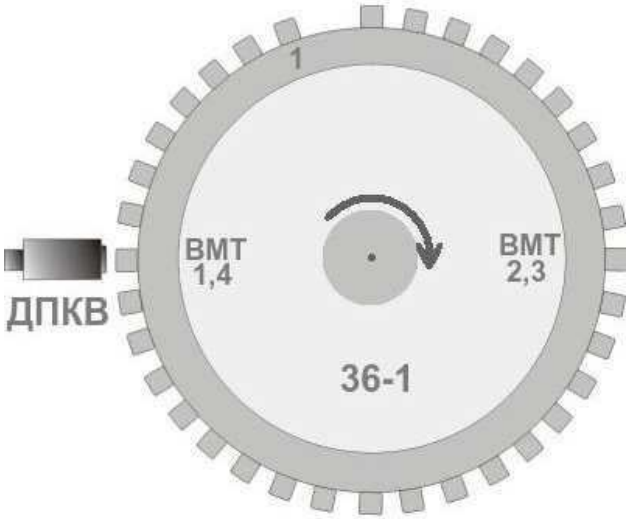

Рис.5 − ДПКВ и синхродиск 36-1

ДПКВ представляет собой магнитный сердечник, на который намотано достаточное количество витков провода. При прохождении мимо сердечника датчика зубьев (синхродиск выполнен из стали) в обмотке ДПКВ меняется магнитный поток, и как следствие, возникает переменная электродвижущая сила (ЭДС). По экранированному кабелю сигнал поступает в блок управления, где он преобразуется в прямоугольные импульсы и подается на вход прерывания микроконтроллера. Вид сигнала с ДПКВ (ЭДС) показан на рис. 6.

Закрашенными кругами показан переход напряжения через ноль при возникновении прерывания. Таким образом, прерывание возникает в моменты времени, когда напротив ДПКВ находится центр зуба. Временной интервал между соседними зубьями равен *t,* а временной интервал между последним и первым зубом равен *2t.*

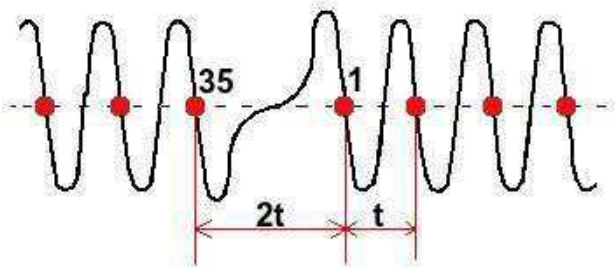

Рис. 6 − Вид сигнала с ДПКВ

В момент запуска двигателя встроенная программа пытается найти 1-й зуб. Для этого в обработчике прерывания сохраняется текущее значение таймера, и из него вычитается предыдущее значение. Результат соответствует времени *t* и тоже сохраняется. Текущее значение *t* сравнивается с предыдущим и, если предыдущее значение превосходит текущее более чем в 1,5 раза, считается, что найден 1-й зуб (произошла так называемая синхронизация).

В момент прерывания на 35-м зубе производится запуск специально выделенного таймера, который срабатывает через время *t* и инициирует вызов обработчика прерывания ДПКВ. Таким образом, происходит восстановление отсутствующего 36-го зуба. При этом при каждом прерывании номер текущего зуба увеличивается. К номерам зубьев, в свою очередь, привязываются различные события, что значительно увеличивает точность при неравномерном вращении коленчатого вала (особенно на пуске и низких оборотах).

Момент времени зажигания вычисляется следующим образом. Максимально возможный УОЗ принят равным 60°. За 70° до ВМТ (на 1-м или 19-м зубе) начинается отсчет УОЗ, и текущее значение УОЗ равно 70°. На каждом зубе из текущего значения вычитается *Dpc* = 10° (360° / 36 зубьев = 10°), и результат сравнивается с заданным значением УОЗ.

Если разница (*Ad*) между текущим и заданным значениями УОЗ меньше 2-х зубьев, то запускается отдельно выделенный таймер на время, равное (*Ad* * t) / *Dpc*. По истечении этого времени закрывается транзистор, через который происходило накопление энергии в соответствующей катушке зажигания (КЗ), и в цилиндре происходит искровой разряд. Причем, если отсчет начинался на 1-м зубе, то закрывается транзистор *VT4*, а если на 19-м зубе, то транзистор *VT6*.

Начало накопления энергии в катушке зажигания (открытие соответствующего транзистора) происходит за определенное время до искрового разряда в соответствующем цилиндре [9]. Это время определяется напряжением бортовой сети: в общем случае, чем меньше напряжение, тем больше времени нужно катушке, чтобы накопить необходимую энергию. При этом данная зависимость является нелинейной. Описанная зависимость задается таблично с последующим использованием линейной интерполяции. Управление накоплением энергии КЗ реализовано аналогичным образом, как и УОЗ, с привязкой к зубьям синхродиска.

Рассмотрим, каким образом рассчитывается угол опережения зажигания (УОЗ) в различных режимах работы двигателя [9]. Функции зависимости УОЗ от оборотов коленчатого вала и давления воздуха во впускном коллекторе заданы таблично с использованием линейной интерполяции.

Тогда на пуске имеем:

$$\text{УОЗ} = START(RPM) + OctCorr.$$

На холостом ходу (ХХ):

$$\text{УОЗ} = IDLE(RPM) + IDLREG(RPM) + OctCorr.$$

В рабочем режиме:

$$\text{УОЗ} = WORK(RPM, MAP) + OctCorr,$$

где: *START* − таблица УОЗ на пуске; *IDLE* − таблица УОЗ на холостом ходу; *WORK* − таблица УОЗ под нагрузкой; *IDLREG* − коррекция УОЗ от регулятора оборотов ХХ; *RPM* − обороты коленчатого вала (мин$^{-1}$), *MAP* − абсолютное давление во впускном коллекторе (кПа), *OctCorr* − значение коррекции УОЗ (константа).

Переход с пускового режима на рабочий происходит при превышении заданных оборотов (как правило, 500−800 мин$^{-1}$). Переход с режима ХХ в рабочий режим и наоборот производится по ДПДЗ или срабатыванию концевого выключателя дроссельной заслонки (для большинства карбюраторных двигателей). Расчет УОЗ производится в основном цикле программы, причем, его значение ограничивается установленными пределами, а результат передается в подпрограмму обработки прерывания ДПКВ.

Функция линейной интерполяции, записанная на языке программирования Си, выглядит следующим образом:

```
int16_t simple_interpolation(int16_t x, int16_t a1, int16_t a2, int16_t x_s, int16_t x_l, uint8_t m) {
return ((a1 * m) + (((int32_t)(a2 − a1) * m) * (x − x_s)) / x_l);}
```

Функция принимает на вход аргумент *x*, два соседних значения функции (*a*1, *a*2), значение аргумента, соответствующее *a*1, длину отрезка по оси аргумента между значениями функции *a*1 и *a*2, множитель (*m*) для повышения точности вычислений (так как используются числа с фиксированной запятой).

Внешний вид программы *SECU-3 Manager,* которая используется для настройки параметров системы, таблиц УОЗ и диагностики, представлен на рис. 7.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

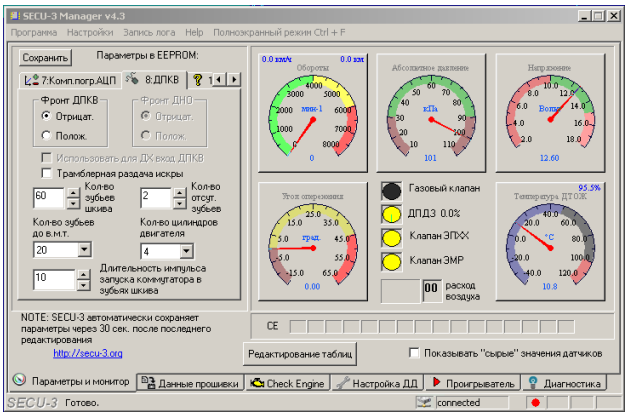

Рис. 7. – Интерфейс программы SECU-3 Manager

Обсуждение результатов

Разработана система управления зажиганием ДВС, которая обладает следующими основными возможностями и преимуществами:

– поддержка 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 8-ми цилиндровых двигателей;

– два канала управления катушками зажигания, позволяющих обойтись без высоковольтного распределителя на 2-х и 4-х цилиндровых двигателях;

– все выходы системы имеют температурную защиту и защиту от короткого замыкания;

– переключение между 2-мя выбранными наборами таблиц, что полезно при использовании газобаллонного оборудования (ГБО);

– блокировка стартера для более комфортного запуска двигателя (система сама выключит стартер по достижении заданных оборотов);

– управление клапаном ЭПХХ (для карбюраторных двигателей);

– различные способы синхронизации: от датчика Холла (трамблер бесконтактной системы зажигания); от ДПКВ. При этом можно использовать синхродиски с 16...200 зубьями, как с отсутствующими зубьями, так и без них (в этом случае используется дополнительный датчик, называемый ДНО);

– возможность переназначения функций всех входов и выходов для альтернативных функций;

– конфигурирование и настройка через USB-интерфейс с гальванической развязкой;

– настройка таблиц и параметров системы в реальном времени;

– бесплатное ПО с открытыми исходными кодами [3].

В результате у нас получилась относительно простая система в компактном исполнении, которая заменит старый трамблер или вышедшую из строя родную систему электронного зажигания автомобиля. Разработанная система подходит также для мотоциклов или может использоваться там, где требуется управление зажиганием ДВС.

Благодаря возможностям гибкой настройки параметров импульса зажигания могут быть использованы различные внешние драйверы зажигания (коммутаторы) и даже такие, принцип действия которых основан на накоплении энергии не в индуктивности, а в конденсаторе [10; 11].

Выводы

Таким образом, нами разработана система управления зажиганием для двигателей внутреннего сгорания *SECU-3L*, создано к ней встроенное программное обеспечение и ПО для мониторинга, настройки и диагностики, выполняемое на ПК.

Как видно по структурной схеме системы, в ней отсутствует датчик температуры охлаждающей жидкости и датчик температуры воздуха. По этим датчикам тоже можно было бы корректировать УОЗ, но это бы усложнило систему и ее установку. По аналогичным причинам отсутствует и датчик детонации.

В будущем планируется доработать встроенное ПО для поддержки других способов синхронизации, применяемых на различных типах двигателей. Также планируется добавить многоискровой режим, который будет использован при запуске двигателя.

Список литературы

1 **Dale, J. D.** Application of high energy ignition systems to engines / **J. D. Dale, M. D. Checkel, P. R. Smy** // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 1997. – V. 23, № 5-6. – P. 379-398.

2 **Борщенко, Я. А.** Электронные и микропроцессорные системы автомобилей: учеб. пособ. / **Я. А. Борщенко, В. И. Васильев** // Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2007. – 207 с.

3 **МПСЗ SECU-3** / *Ignition and fuel injection ECU* [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://secu-3.org/. – Название с экрана.

4 **Шабельников, А. А.** Электронный блок управления двигателем внутреннего сгорания *SECU-3* / **А. А. Шабельников** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – № 22. – С. 90-95.

5 **Хоровиц, П.** Искусство схемотехники = The Art of Electronics : в 3-х т. / **П. Хоровиц, У. Хилл.**; Т. 1 // пер. Б. Н. Бронин. – Москва : Мир, 1993. – 371 с.

6 **Smith, S. W.** The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing / **Steven W. Smith** // 2-nd ed. – San-Diego: California Technical Publishing, 1999 – 650 p.

7 **Reif, K.** Gasoline Engine Management: Systems and Components (Bosch Professional Automotive Information) / **Konrad Reif** // *Wiesbaden: Springer Vieweg*, 2015. – 354 p.

8 **Banish, G.** Engine Management: Advanced Tuning / **Greg Banish** / North Branch: CarTech. – 2007. – 128 p.

9 **Гирявец, А. К.** Теория управления автомобильным бензиновым двигателем / **А. К. Гирявец.** // М.: Стройиздат, 1997. − 161 с.

10 **Wangwiwatthana, C.** Gasoline engine multi spark ignition system / **C. Wangwiwatthana, N. Kaewraungrit, J. Parnklang** // *In Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS '07)*, October 2007. − P. 1499-1502.

11 **Tzeng, C. B.** Microcomputer based smart engine ignition control system for motorcycles / **C. B. Tzeng, T. S. Wey, T. Y. Su** // *In Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA '08)*, November, − 2008. − P. 215-221.

Bibliography (transliterated)

1 **Dale, J. D., Checkel, M. D., Smy, P. R.** Application of high energy ignition systems to engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1997, **5-6**(23), 379-398.

2 **Borshhenko, Ja. A., Vasil'ev, V. I.** Electronic and microprocessor systems of automobile: educational. *Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta*, 2007, 207 p.

3 **MPSZ SECU-3** / Ignition and fuel injection ECU [Web]: Available at: http://secu-3.org/

4 **Shabelnikov, A. A.** Electronic control unit for internal combustion engine SECU-3. *Visnik Nacional'nogo tehnichnogo universitetu «HPI». Cerija: Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi*, 2015, **22,** 90-95.

5 **Horowitz, P., Hill, W.** The Art of Electronics: v 3-h t. per. B. N. Bronin. Moskow: Mir, 1993, **1**, 371 p.

6 **Smith, S. W.** The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing 2-nd ed. *San-Diego: California Technical Publishing*, 1999, 650 p.

7 **Reif, K.** Gasoline Engine Management: Systems and Components (Bosch Professional Automotive Information). *Wiesbaden: Springer Vieweg*, 2015, 354 p.

8 **Banish, G.** Engine Management: Advanced Tuning. *North Branch: CarTech*, 2007, 128 p.

9 **Girjavec, A. K.** Theory of control of automobile gasoline engine. Moskow: Strojizdat, 1997, 161 p.

10 **Wangwiwatthana, C., Kaewraungrit, N., Parnklang, J.** Gasoline engine multi spark ignition system. *In Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS '07)*, 2007, 1499-1502.

11 **Tzeng, C. B., Wey, T. S., Su, T. Y.** Microcomputer based smart engine ignition control system for motorcycles. *In Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA '08)*, November 2008, 215-221.

Поступила (received) 15.10.2015