

УДК 537.5

Е. Г. ВОВК, А. А. ТРОПИНА

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина

АДАПТАЦИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ К ДВИГАТЕЛЯМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Приведен анализ схемотехнического решения для разработанного блока управления с целью адаптации системы зажигания на основе наносекундного импульсного разряда с применением дрейфовых диодов в режим восстановления к двигателям внутреннего сгорания. Разработанное схемотехническое решение позволяет осуществлять программный контроль параметров разряда при значительном снижении электромагнитных помех. Регулировка параметров разряда осуществляется с применением широтно-импульсной модуляции и встроенного цифро-аналогового преобразователя по принципу прямого доступа к памяти микроконтроллеров.

Ключевые слова: система управления, альтернативные системы зажигания, двигатель внутреннего сгорания, наносекундный импульсный разряд, микроконтроллер.

Введение

Альтернативные системы зажигания, т.е. системы зажигания на основе разряда, отличного от искрового, являются одними из перспективных объектов исследований, посвященных процессам воспламенения топливовоздушных смесей. В частности можно отметить интенсивное развитие систем зажигания на основе лазерного разряда, микроволнового разряда, наносекундного импульсного разряда, а также различные комбинации ультракороткого лазерного импульса с микроволновым разрядом или разрядом постоянного тока. Первоначально применение данных систем ограничивалось их использованием в авиационных двигателях [1, 2] не только для поджига, но также и для процесса стабилизации пламени в сверхзвуковом течении.

В последнее время начали активно разрабатываться концепции применения альтернативных систем зажигания в двигателях внутреннего сгорания. Одной из альтернатив равновесным разрядам искрового типа является наносекундный импульсный разряд. Ультракороткая длительность импульса не позволяет значительно нагреть топливно-воздушную смесь, однако при действии разряда формируется неравновесная плазма с высокоэнергетическими электронами и электронно- и колебательно-возбужденными частицами, что обеспечивает высокоэффективную инициацию процесса горения.

1. Анализ последних публикаций

С точки зрения физики разрядов все системы зажигания можно разделить на две группы (рис. 1): теплового типа, которые используют искровой или дуговой разряд и альтернативные системы зажигания на основе разрядов, отличных от искрового разряда. Альтернативные системы зажигания, в свою очередь, можно разделить на три группы:

- 1) системы зажигания на основе высокочастотного разряда [3, 4];
- 2) системы зажигания на основе лазерного разряда [5, 6];
- 3) системы зажигания на основе неравновесной плазмы наносекундного импульсного разряда и импульсного коронного разряда [7, 8].

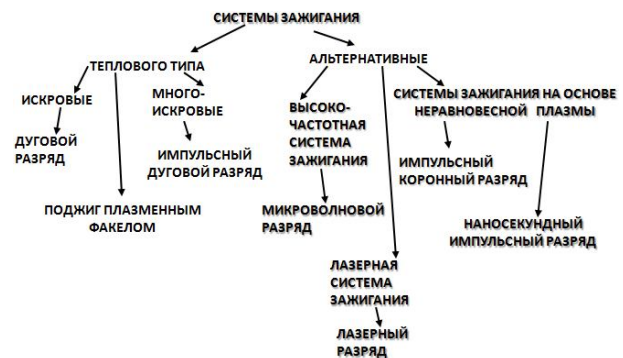


Рис. 1. Классификация систем зажигания с учетом физики разрядов.

Основной целью использования альтернативных систем зажигания является повышение эффективности процесса горения топливовоздушных смесей и снижение уровня токсичности выхлопных газов. Выполнение этих задач достигается с помощью организации воспламенения ультра-бедной топливно-воздушной смеси (ниже бедного предела воспламеняемости), путем организации объемного воспламенения, а также за счет стабилизации фронта пламени и увеличения скорости пламени.

Каждая из альтернативных систем зажигания имеет свои достоинства и недостатки. Одним из недостатков системы зажигания на основе лазерного разряда является высокая стоимость оборудования для генерации разряда, что ограничивает ее широкое применение в двигателях внутреннего сгорания. Недостатком систем зажигания на основе микроволнового разряда является необходимость создания зоны предварительной ионизации с помощью искрового разряда с последующим добавлением энергии микроволновым разрядом, что также усложняет общую конструкцию системы зажигания. Системы зажигания на основе наносекундного импульсного разряда страдают от электромагнитных помех.

В большинстве случаев монтаж и установка альтернативной системы зажигания на двигатель внутреннего сгорания сопровождается конструктивными изменениями и разработкой или усовершенствованием штатной системы управления. В частности, для проведения тестовых экспериментов требуется специализированное точное оборудование, которое позволит осуществить регулировку выдаваемых управляемых сигналов для исполнительных устройств системы зажигания в широком диапазоне и с высокой точностью. Разработанное схемотехническое решение и алгоритм работы блока управления альтернативной системой зажигания должен обеспечивать адаптацию работы системы под любой многоцилиндровый двигатель внутреннего сгорания с электронной системой управления. В случае альтернативной системы зажигания на основе наносекундного импульсного разряда дополнительно должна быть решена проблема устранения электромагнитных помех.

2. Цель работы

Целью исследования является разработка схемотехнического решения для адаптации альтернативной системы зажигания на основе наносекундного импульсного разряда с использованием дрейфовых диодов с резким восстановлением для многоцилиндрового двигателя внутреннего сгорания. Тестирование блока проводилось в лаборатории

двигателей внутреннего сгорания ХНАДУ на 4-цилиндровом двигателе MeM3-307. В качестве цифровой управляющей системы, обеспечивающей контроль параметров разряда, использовался микроконтроллер, программирование работы которого осуществлялось на языке C++.

3. Результаты исследования

Результаты предварительных экспериментов с системой зажигания на основе наносекундного импульсного разряда с использованием дрейфовых диодов с резким восстановлением, приведенные в работе [8], показали, что внедрение подобной системы зажигания тормозится необходимостью контроля угла опережения зажигания. Кроме того, для оценки влияния частоты и амплитуды импульсов на эффективность работы двигателя необходимы измерения энергии разряда. Таким образом, возникла потребность в разработке электронного блока управления разрядом.

Схемотехническое решение разработанного блока управления включает в себя 4 подсистемы:

- 1) система питания;
- 2) система обработки входных данных;
- 3) управляющая платформа;
- 4) система усиления выходных сигналов.

В качестве управляющей платформы была выбрана плата STM32F4 Discovery. Данная плата оснащена встроенным программатором и мощным 32-разрядным микроконтроллером с установленной дополнительной периферией. Для организации управления разработчику предоставляется на выбор 17 таймеров, в состав которых входят блоки захвата/сравнения, 16- или 32-битные счетчики и 16-битные делители тактовой частоты. Установка максимальной тактовой частоты внутренней шины данных микроконтроллера в 168 МГц позволяет сформировать на выходном порте микроконтроллера любые параметры ШИМ (широкоимпульсная модуляция), включая длительность периода. Использование аппаратных прерываний в таймерах позволяет свести алгоритм построения программного обеспечения микроконтроллера до минимума, обеспечивая снижение времени вычислений и срабатывания. При этом задержка длительности от начала получения входных данных до формирования управляющего импульса на выходном порту микроконтроллера составляет 24,78 мкс.

За этот период времени микропроцессорная система позволяет разделить сигналы управления с попарного срабатывания катушек зажигания блока управления двигателя MeM3-307 на раздельное управление для генератора наносекундного им-

пульсного разряда (учитывая задержку на включение систем обработки входных данных и систему усиления выходных каскадов). Дополнительно вычисляется скорость вращения коленчатого вала двигателя на основе принятых временных данных с датчика положения распределительного вала. В тестовом режиме разработанная программа позволяет обрабатывать сигналы от 0 до 25 тыс. мин⁻¹ и более. Формирование программной длительности управляющих импульсов для каждого цилиндра находится в пределах от 0,1 мкс до 6,5 мс с шагом регулирования в 0,1 мкс и с возможностью программной корректировки для компенсации задержки спада управляющего сигнала на выходе из системы усиления выходных сигналов.

Для отображения полученных данных и сформированных выходных управляющих импульсов к данному микропроцессорному устройству реализована возможность подключения нескольких устройств, в частности, внешнего LCD TFT дисплея с разрешением в 320x240 точек и диагональю в 3,2 дюйма с подключённым резистивным сенсорным экраном. Кроме того, микроконтроллер оснащен USB2.0 аппаратным интерфейсом для передачи данных [9]. Дополнительно существует возможность разработки специализированного программного обеспечения для отображения значений измеряемых параметров в режиме реального времени на экране персонального компьютера и возможность подключения разработанного блока к диагностической CAN-шине моторного отсека, для считывания данных с блока управления двигателя.

Система питания блока управления подключена к бортовой сети транспортного средства от источника постоянного напряжения в 12-15В. Для формирования управляющих импульсов разной амплитуды и питания логических микросхем установлены линейные стабилизаторы с фиксированным выходным значением на 3,3В. и 5В. В зависимости от специфики применения схемотехническое решение конструкции системы питания содержит защиту от ошибочной полярности подключения, систему фильтрации питания с применением электролитических, керамических конденсаторов, а также систему ферритовых помехоподавляющих сердечников и бусинок в зависимости от напряжения питающей цепи.

Система обработки входных данных представлена оптопарой 4N25. Использование оптопары позволяет преобразовывать сигналы скорости вращения распределительного и коленчатого вала, а также управляющий сигнал с блока управления двигателя на катушки зажигания, с 5 В или 12 В до логического уровня напряжения микроконтроллера (до 3,3 В). Применение входных каналов захвата/сравнения

таймера микроконтроллера позволило обрабатывать сигнал по фронту спада или возрастания, а также позволило применить к сигналу встроенную аппаратную фильтрацию и задать любую логическую зависимость между 4 входящими каналами одного таймера. Каждый из каналов сравнения/захвата сопровождается вызовом прерывания. Входные порты микроконтроллера толерантны 5 В, поэтому в альтернативных системах зажигания, которые не создают электромагнитных помех в электрических цепях, допускается применение 5 В логического сигнала на входе микроконтроллера при условии добавления в цепь ограничивающего резистора на 470 Ом-1 кОм.

Для измерения аналогового сигнала в микроконтроллере предусмотрено три 12-разрядных АЦП (аналогово-цифровой преобразователь), обеспечивающих в сумме 24 канала для измерения аналогового сигнала с различными настройками и порядком обработки сигнала. Кроме того, для каждого канала АЦП существует возможность применения режима прямого доступа к памяти. Такая методика измерения сигнала позволяет достаточно точно измерять энергию зажигания каждого канала, а вся выборка измеряемых данных будет получена без использования вычислительного ядра микроконтроллера.

Еще одна подсистема блока управления представляет собой систему усиления выходных сигналов, которая позволяет преобразовывать выходной сигнал с порта микроконтроллера до требуемого уровня сигнала для управления исполнительным механизмом альтернативной системы зажигания. Для защиты от электромагнитных помех на выходе применялись оптопары. Оптимальным вариантом для включения оптопары от порта микроконтроллера является включение в цепь маломощного биполярного транзистора, который позволяет коммутировать усиленный сигнал (на входе оптопары) с большой частотой, не нагружая при этом порт микроконтроллера. На выходе оптопары были установлены логические микросхемы серии 7400. Применение оптопар для обработки входных и выходных сигналов для разрабатываемого блока управления позволило запитать управляющую платформу отдельным питанием, тем самым максимально ограничить воздействие электромагнитных помех.

На рис. 2 изображен разработанный блок управления для адаптации альтернативной системы зажигания, представленной в виде наносекундного импульсного разряда на основе дрейфовых диодов с резким восстановлением, на двигатель МеМЗ-307 с дополнительно установленным датчиком вращения распределительного вала.

Разработанный блок управления был испытан на 4-цилиндровом двигателе МеМЗ-307. Было полу-

чено, что разработанное схемотехническое решение позволяет осуществлять программный контроль параметров разряда при значительном снижении электромагнитных помех.

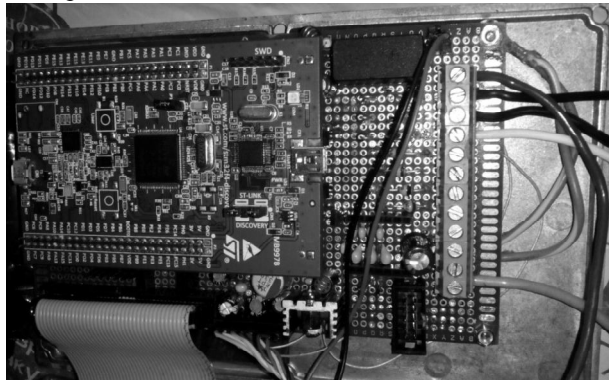


Рис. 2. Блок управления для адаптации альтернативной системы зажигания к работе двигателя МеМЗ-307

Настройка и регулировка выходных параметров генератора наносекундного импульсного разряда при помощи микропроцессорной системы осуществляется с применением ШИМ и встроенного 2-х канального ЦАП (цифро-аналогового преобразователя) по принципу прямого доступа к памяти микроконтроллеров. Такая методика организации алгоритма работы программы задействует в процессе управления только один микроконтроллер, который берет на себя функции управления всей системой зажигания по заданным параметрам с возможностью их изменения в процессе управления.

Так, в генераторе наносекундного импульсного разряда с использованием дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ), система изменения частоты срабатывания выходного сигнала была заменена обычной широтно-импульсной модуляцией с применением драйвера для выходного транзистора (рис. 3).

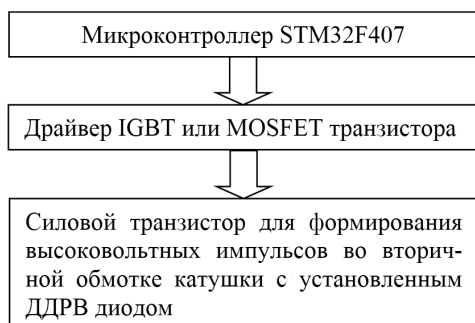


Рис. 3. Система для изменения частоты срабатывания выходного сигнала генератора

Таким образом, данный подход позволяет изменить частоту выходного сигнала и минимизировать погрешность в процессе управления. При этом микросхема измерения падения напряжения (на сопротивлении открытого канала MOSFET) может параллельно использоваться для измерения тока нагрузки на катушке внутри генератора наносекундного импульсного разряда.

Выводы

Предложено схемотехническое решение для адаптации системы зажигания на основе наносекундного импульсного разряда к работе многоцилиндрового двигателя внутреннего сгорания.

Разработанное схемотехническое решение позволяет осуществлять программный контроль параметров разряда при значительном снижении электромагнитных помех.

Литература

1. *Nonequilibrium plasmas and its applications for combustion and hypersonic flow control [Text] / N. B. Anikin, E. I. Mintousov, S. V. Pancheshnyi, D. V. Roupasov, V. E. Sych, A. Yu. Starikovskii // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. – Nevada, 2003. – P. 1053.*
2. *Non-premixed plasma-assisted combustion of hydrocarbon fuel in high-speed airflow [Text] / A. Klimov, V. Bittiurin, I. Moralev, B. Tolkunov, A. Nikitin, A. Velichko, I. Bilera // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. – Nevada, 2006. – P. 617.*
3. *Measurements of combustion properties in a microwave enhanced flame [Text] / E. Stockman, S. Zaidi, R. Miles, C. Carter, M. Ryan // Combustion and Flame. – 2009. – Vol. 156. – P. 1453-2461.*
4. *Microwave and direct-current discharges in high-speed flow: fundamentals and applications to ignition [Text] / V. M. Shibkov, A. A. Aleksandrov, V. A. Chernikov, A. P. Ershov, L. V. Shibkova // Journal of Propulsion and Power. – 2009. – Vol. 25. – P. 123-137.*
5. *Weinrotter, M. Laser ignition in engines [Text] / M. Weinrotter, H. Kopecek, E. Wintner // Laser physics. / Institut für Photonik, Technische Universität Wien. – Wien, 2005. – Vol. 15 – P. 947-953.*
6. *Dearden, G. Laser ignited engines: progress, challenges and prospects [Text] / G. Dearden, T. Shenton // Optics express. – 2013 – Vol. 21. – P. A1113-A1125.*
7. *Nanosecond plasma ignition for improved performance of an internal combustion engine [Text] /*

C. D. Cathey, Tao Tang, T. Shiraishi, T. Urushihara, A. Kuthi, M. A. Gundersen // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2007. – Vol. 35. – P. 1664-1668.

8. Тропина, А. А. Система зажигания на основе наносекундного импульсного разряда [Text] / А. А. Тропина, А. П. Кузьменко, Д. В. Вильчинский // *Вестник двигателестроения : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, ХНАДУ. – Харьков, 2014. – Вып. 2. – С. 117-121.*

9. Методика передачи данных через порт USB в микроконтроллерах на базе ядра Cortex M4 в системах измерения и управления на транспорте [Text] / С. А. Сериков, А. Н. Борисенко, А. Б. Богаевский, Е. Г. Вовк // *Вестник Национального технического университета «ХПИ» : сб. научных трудов / М-во образования и науки Украины, НТУ «ХПИ». – Харьков, 2014. – Вып. 15. – С. 132-137.*

Поступила в редакцию 26.04.2015, рассмотрена на редколлегии 18.06.2015

АДАПТАЦІЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ СИСТЕМ ЗАПАЛЮВАННЯ ДЛЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Є. Г. Вовк, А. А. Тропина

Наведено аналіз схемотехнічного рішення для розробленого блоку управління з метою адаптації системи запалювання на основі наносекундного імпульсного розряду з застосуванням дрейфових діодів з різким відновленням до двигунів внутрішнього згоряння. Розроблене схемотехнічне рішення дозволяє здійснювати програмний контроль параметрів розряду при значному зниженні електромагнітних завад. Регулювання параметрів розряду здійснюється із застосуванням широтно-імпульсної модуляції і вбудованого цифро-аналогового перетворювача за принципом прямого доступу до пам'яті мікроконтролерів.

Ключові слова: система управління, альтернативні системи запалювання, двигун внутрішнього згоряння, наносекундний імпульсний розряд, мікроконтролер.

ADAPTATION OF ALTERNATIVE IGNITION SYSTEMS FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Ye. G. Vovk, A. A. Tropina

The analysis of circuit solutions for the developed control unit in order to adapt the ignition system on the basis of a nanosecond pulsed discharge with drift step recovery diodes to internal combustion engines has been presented. Developed schematic solution allows programmatic control of the discharge parameters with a significant reduction of electromagnetic noise. Adjusting the discharge parameters is carried out with the use of the pulse width modulation and the integrated digital-to-analog converter according to the principle of direct access to memory of microcontrollers.

Key words: control system, alternative ignition systems, internal combustion engine, nanosecond pulsed discharge, microcontroller.

Вовк Евгений Геннадиевич – асп. кафедры прикладной математики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, Украина, e-mail: jake_vovk@ukr.net.

Тропина Альбина Альбертовна – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой прикладной математики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, Украина, e-mail: albina.tropina@fulbrightmail.org.