

УДК 614.843

К.В. Корытченко<sup>1</sup>, А.В. Серпухов<sup>1</sup>, И.В. Цебрюк<sup>2</sup>, Д.В. Бизоньч<sup>1</sup>, Санчит Аджмани<sup>3</sup><sup>1</sup> Національний технічний університет «ХПІ», Харків<sup>3</sup> Національна академія Національної гвардії України, Харків<sup>3</sup> Компания Сомнио Глобал, Детройт, США

## ПАРАМЕТРЫ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В СИСТЕМЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЗАЖИГАНИЯ

Представлены результаты исследования параметров искрового разряда в системе высокоэнергетического зажигания. Исследовано коэффициент выделения запасенной электрической энергии в искровом промежутке, количество энергии, выделяемой в искровом промежутке за один импульс, сопротивление искрового промежутка и длительность выделения энергии в искровом промежутке за один импульс зажигания.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, искровой разряд.

### Введение

В области дизельного двигателестроения сложилась устойчивая тенденция увеличения удельной мощности двигателей. При этом, форсирование мощных двигателей турбокомпрессором, обеспечивающим предварительное повышение давления воздуха во впускном коллекторе, приводит к необходимости снижения степени сжатия двигателя, что вызвано наличием ограничений в допустимых термомеханических нагрузках в цилиндропоршневой группе. На пусковых оборотах степень повышения давления компрессора незначительно превышает единицу, а на пусковой частоте вращения коленчатого вала увеличиваются потери тепла через стенки камеры сгорания из-за увеличения времени теплообмена. Так как снижение степени сжатия приводит к уменьшению температуры топливоздушного заряда, достигаемой в цилиндре двигателя, то в условиях низких температур в сжатом заряде могут не достигаться условия для надежного воспламенения и быстрого сгорания топлива. В результате возникает проблема пуска мощных турбированных дизельных двигателей в условиях низких температур [1].

Тенденция снижения степени сжатия, как правило, имеет место при увеличении мощности двигателей. Например, в линейке двигателей John Deere имеем: 4024HF285 (2,4L) – степень сжатия равняется 18,2; 4045HFC09 (4,5L) – 17,8-17,0; 6068HFC93 (6,8L) – 16,5; 6090AFM75 (9L) – 16,0; 6135HF485 (13,5L) – 16,0. Поэтому проблема пуска дизельных двигателей особенно характерна для мощных дизельных двигателей. Также, проблема пуска возрастает в процессе износа двигателя из-за повышенной утечки воздушного заряда.

Наличие множества публикаций [1 – 6] по проблеме холодного пуска мощных дизельных двигателей отражает отсутствие приемлемого технического решения, обеспечивающего решение задачи быстро-

го и эффективного пуска. Это свидетельствует об актуальности задачи разработки системы, обеспечивающей надежное зажигание и быстрое сгорание дизельного топлива в процессе быстрого холодного пуска дизельного двигателя.

Решение проблемы пуска мощных дизельных двигателей может быть обеспечено за счет принудительного высокоэнергетического зажигания искровым разрядом.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования параметров искрового разряда, получаемых в новой разработанной системе высокоэнергетического зажигания.

### Экспериментальная техника исследования параметров системы высокоэнергетического зажигания

В основе системы высокоэнергетического зажигания использована электрическая схема, предложенная в работе [7]. Использование данной схемы (рис. 1) позволяет обеспечить высокий коэффициент выделения запасенной электрической энергии в искровом промежутке.

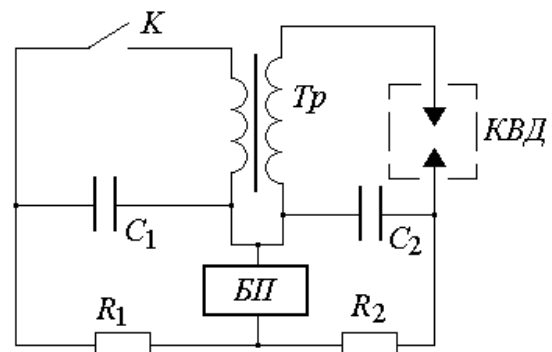


Рис. 1. Электрическая схема системы высокоэнергетического зажигания:  
БП – источник постоянного напряжения;  
КВД – камера высокого давления

Искровое зажигание в такой системе условно можно разделить на две стадии: стадия пробоя искрового промежутка и стадия выделения основной части энергии разряда на искровом промежутке в процессе развития импульсной дуги (разряда конденсатора  $C_2$ ).

Используя современную электронную базу и учитывая особенности протекания переходных процессов в электрической цепи с нелинейной нагрузкой в виде искрового промежутка, система высокоэнергетического зажигания была исполнена таким образом, что обеспечила стабильное зажигание искровых разрядов с частотой 200 Гц и более при энергии разряда около 1 Дж.

Исследования параметров системы высокоэнергетического зажигания проводились следующим образом. Для приближения условий исследования искрового разряда к условиям зажигания, возникающим в камере сгорания двигателя, была изготовлена камера (рис. 2) высокого давления 1, имеющая посадочные отверстия под свечи зажигания 2. Камера оборудовалась прозрачным окном 3 из стекла для визуального наблюдения за наличием (отсутствием) зажигания искрового разряда. Безопасное удаленное наблюдение за искровыми разрядами проводилось при помощи зеркала 4. Для создания высокого давления к камере использовался баллон со сжатым воздухом. Напуск воздуха проводился через редуктор высокого давления 5. После напуска сжатого воздуха в камеру его подача прекращалась. Текущее давление в камере измерялось с помощью манометра 6. Распределение искровых разрядов по свечам зажигания, для физического моделирования процесса зажигания в двигателе, осуществлялось при помощи распределителя 7 зажигания, оборудованного датчиком Холла. Сигналы с этого датчика использовались для запуска импульсов зажигания. Вращение вала распределителя осуществлялось двигателем 8 постоянного тока. Регулирование частоты вращения вала распределителя в диапазоне  $0-3000 \text{ мин}^{-1}$  проводилось за счет изменения напряжения питания с помощью регулируемого источника 9 напряжения. Мощность источника постоянного напряжения и постоянные времени  $R_1C_1$  и  $R_2C_2$  задавались таким образом, что с ростом частоты высоковольтных импульсов до  $3000 \text{ мин}^{-1}$  напряжение на конденсаторах снижалось не более, чем на 10 % от напряжения холостого хода.

Искровой разряд осуществлялся на свечу зажигания без встроенного сопротивления. Длина искрового промежутка составляла 1 мм.

Исследование электрических параметров системы зажигания осуществлялось с помощью высоковольтного компенсированного делителя напряжения ТЕКТРОНИХ Р6015А (1:1000), датчика тока компенсационного типа с токовым выходом

HONEYWELL CSNE151, работающего на эффекте Холла, RLC-метра типа E7-22, осциллографом RIGOL DS1052E. Импульсные трансформаторы изготавливались на тороидальных магнитопроводах размером 40/64-30 мм (табл. 1).



Рис. 2. Камера высокого давления

Таблица 1

Параметры трансформатора, используемого в системе высокоэнергетического зажигания

№	Параметр	Значение
1.	Коэффициент трансформации	61
2.	Активное сопротивление первичной обмотки	1,53 мОм
3.	Индуктивность намагничивания первичной обмотки	3,3 мкГн
4.	Индуктивность рассеяния первичной обмотки	0,3 мкГн
5.	Активное сопротивление вторичной обмотки	74,8 мОм
6.	Индуктивность намагничивания вторичной обмотки	11,29 мГн
7.	Индуктивность рассеяния вторичной обмотки	2,23 мГн
8.	Емкость между первичной и вторичной обмоткой	93 пФ

Длина разрядного промежутка составляла около 1 мм. Свеча вставлялась в камеру, в которой изменялось давление воздуха. Емкость нагрузки (до пробоя искрового промежутка) не превышала 30 пФ. На представленных ниже результатах осциллографического исследования (рис. 3), напряжение заряда конденсатора  $C_1$  равнялось 575 В.

Линейное нарастание напряжения на искровом промежутке отражает отсутствие насыщения сердечника трансформатора в процессе генерирования высоковольтного импульса, что свидетельствует о корректном расчете параметров импульсного трансформатора. Различие во времени начала развития разряда при изменении давления в КВД связано с изменением напряжения пробоя. Это вызвано тем, что наличие

паразитной емкости искрового промежутка ограничивает скорость нарастания напряжения на промежутке из-за увеличения времени заряда данной емкости до более высокого напряжения. Следует отметить, время задержки между началом подачи высокого напряжения с импульсного трансформатора и пробоем искрового промежутка составляло не более 1–2 мкс. Это позволяет с достаточно высокой точностью обеспечивать зажигание горючей смеси. Высокочастотные осцилляции разрядного тока после пробоя искрового промежутка приводят к появлению электромагнитных наводок, что требует включения в схему (рис. 1) демпфирующей цепочки для ограничения интенсивности электромагнитных помех.

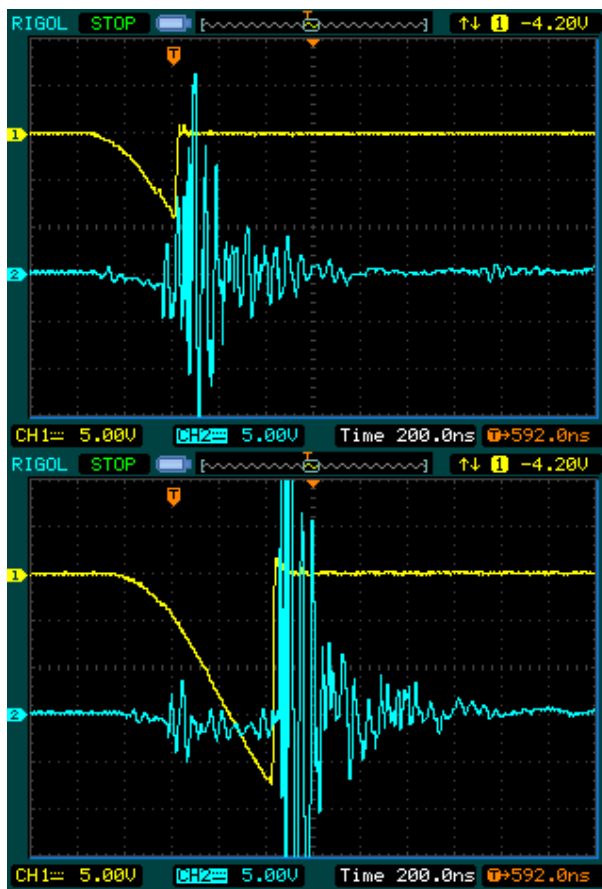


Рис. 3. Осциллограммы напряжения (1-й канал) на свече зажигания и тока (2-й канал), протекающего через свечу зажигания при давлении в КВД 200 кПа (слева) и 800 кПа (справа). Шкала: 1-й канал - 5 кВ/дел, 2-й канал - 500 А/дел

При давлении в камере, превышающем 2 МПа, искровой пробой промежутка длиной 1 мм не происходил. При этом, осциллограммы тока и напряжения имели вид (рис. 4). Амплитудное значение напряжения на свечах зажигания превышало 27 кВ, что соответствует уровню напряжения современных автомобильных систем зажигания.

В разработанной системе зажигания основное выделение энергии разряда в искровом промежутке

происходит при разряде конденсатора  $C_2$ . Выделение данной энергии происходит порциями с нарастающей задержкой между импульсами тока (рис. 5).

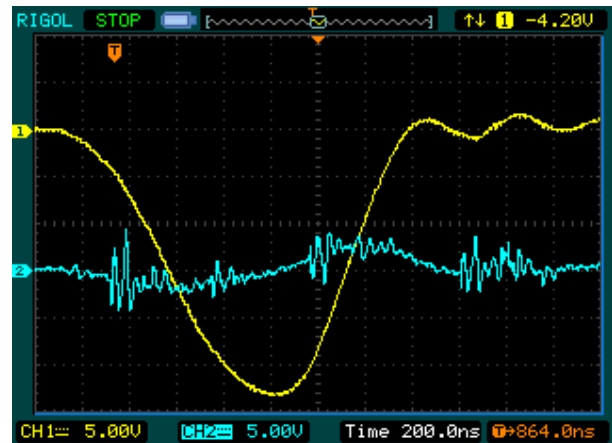


Рис. 4. Осциллограммы напряжения (1-й канал) на свече зажигания и тока (2-й канал), протекающего через свечу зажигания при давлении в КВД 2 МПа. Шкала: 1-й канал - 5 кВ/дел, 2-й канал - 500 А/дел



Рис. 5. Осциллограммы тока, протекающего через свечу зажигания, при использовании конденсатора  $C_2$  ёмкостью 2,2 мкФ (слева) и 0,5 мкФ (справа). Шкала по току: слева - 500 А/дел, справа - 200 А/дел

Приведенные результаты получены при давлении в КВД, равном 2 МПа. Напряжение заряда кон-

денсатора  $C_2$  равнялось 1,2 кВ. Возрастание задержки между импульсами связано с процессом перематничивания и насыщения сердечника импульсного трансформатора. Разряд носит затухающий характер. С увеличением ёмкости конденсатора  $C_2$  происходит возрастание количества импульсов тока.

Время задержки между началом пробоя искрового промежутка и резким нарастанием тока разряда конденсатора  $C_2$  зависит от полярности высоковольтного импульса и полярности заряда конденсатора  $C_2$ . В случае, если ток разряда конденсатора  $C_2$  обеспечивает доведение сердечника трансформатора в насыщение после генерирования высоковольтного импульса, то данное время задержки сокращается. В представленных результатах (рис. 6), при изменении полярности заряда конденсатора  $C_2$  ёмкостью 2,2 мкФ, заряжаемого до напряжения 1,2 кВ, происходило изменение данной задержки с 16 мкс до 24 мкс.

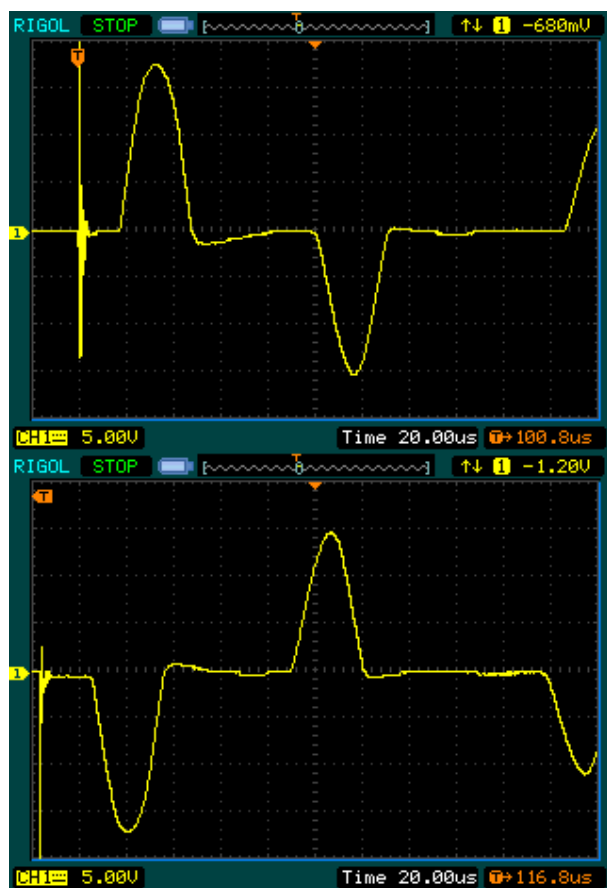


Рис. 6. Осциллограммы тока, протекающего через свечу зажигания, при изменении полярности заряда конденсатора  $C_2$ . Шкала по току – 500 А/дел

Также возможно получение аperiodического разряда при разряде конденсатора  $C_2$  (рис. 7). Использовался конденсатор ёмкостью 2,2 мкФ, заряжаемый до напряжения 600 В.

Измерено количество энергии разряда, выделяемой в искровом промежутке, путем обработки результатов измерения тока и падения напряжения на

промежутке (рис. 8). Данные осциллограмма получены при  $C_2 = 2,7$  мкФ и напряжении заряда 600 В.

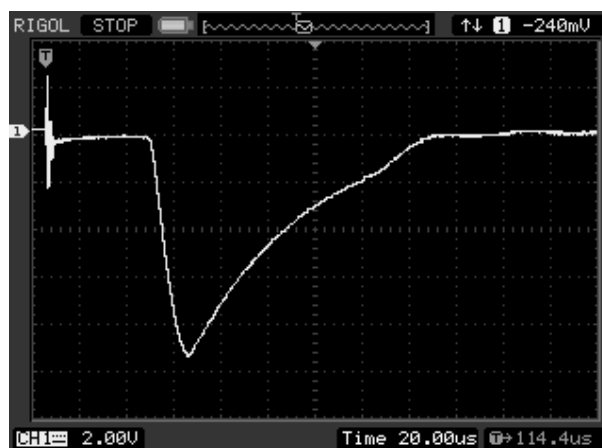


Рис. 7. Осциллограмма тока, протекающего через свечу зажигания, при аperiodическом разряде конденсатора  $C_2$ . Шкала по току – 200 А/дел

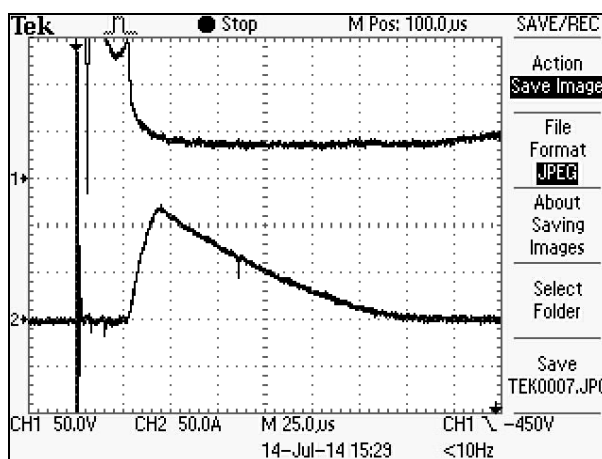


Рис. 8. Осциллограмма напряжения (1-й канал) и тока (2-й канал) в искровом промежутке

Получено, что в искровом промежутке выделяется около 290 мДж энергии при полной энергии разряда около 486 мДж. В тестируемой системе зажигания коэффициент выделения запасенной электрической энергии в искровом промежутке составил около 60 %. Установлено изменение сопротивления искрового промежутка (рис. 9) в процессе развития разряда конденсатора  $C_2$ . Минимальное значение данного сопротивления составило около 0,3–0,4 Ом.

Высокий коэффициент выделения запасенной электрической энергии в искровом промежутке достигнут за счет того, что активное сопротивление вторичной обмотки значительно меньше минимального сопротивления искрового промежутка. По количеству энергии, выделяемой в искровом промежутке за один импульс, разработанная система зажигания превосходит известные аналоги. Для сравнения, энергия разряда современных систем зажигания составляет около 50 мДж.

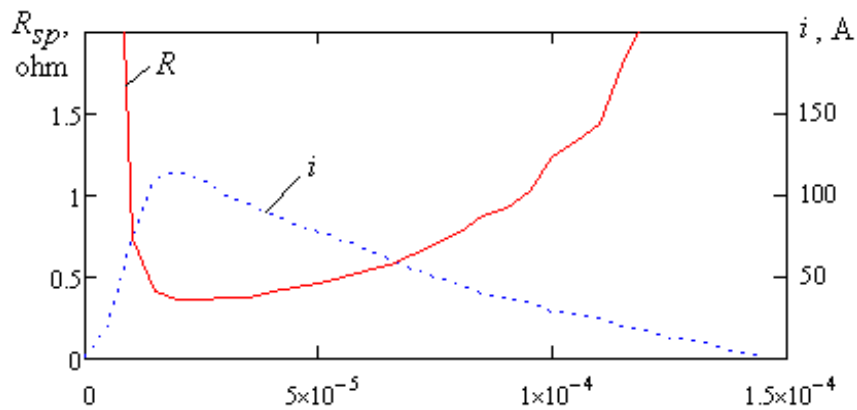


Рис. 9. Изменение сопротивления искрового промежутка в процессе разряда конденсатора  $C_2$

Полное время горения разряда составило 0,1–0,15 мс, что удовлетворяет требованиям обеспечения надежного зажигания для высокооборотистых двигателей внутреннего сгорания [8].

### Вывод

В результате исследования параметров искрового разряда в системе высокоэнергетического зажигания установлено, что разработанная система обеспечивает высокий коэффициент выделения запасенной электрической энергии в искровом промежутке.

Количество энергии, выделяемой в искровом промежутке за один импульс, достигает 290 мДж, что позволяет обеспечить надежное зажигание смесей паров дизельного топлива с воздухом [9].

Полученные результаты дают основание считать, что система высокоэнергетического зажигания может быть использована для решения проблемы пуска мощных дизельных двигателей за счет принудительного зажигания.

### Список литературы

1. Thesis of the degree of Doctor of Philosophy. David James MacMillan Influences on the Cold Start Behaviour of a Diesel Engine at Reduced Compression Ratio / University of Nottingham, May 2009. – 243 p.

2. Weib M. Forced ignition: Minimum ignition energy, Flame propagation and the influence of the Markstein number on flame phenomena / M. Weib, N. Zarzalis. – Safekinex workshop, Saint Denis La Plaine, November, 2006.

3. A High-Energy Continuous Discharge Ignition System for Dilute Engine Applications / T. Alger, J. Gingrich, C. Roberts, B. Mangold, M. Sellnau. – SAE international, 2013-01-1628, 04/08/2013.

4. Keim C. Брукс Революционная технология от компании Altronic LLC / Keim C. Брукс // Турбины и дизели. – 2010. – № 5. – С. 8–12.

5. Influence of modern diesel cold start systems on the cold start, warm-up and emissions of diesel engines / B. Last, H. Houben, M. Rottner, I. Stotz. – BERU AG, Mörkestrasse 155, 71636 Ludwigsburg, Germany. – 2008. – 24 p.

6. All about glow plugs [Electronic resource] / Technical Information. – No. 04. – Available to: www.beru.com.

7. Балагуров В.А. Аппараты зажигания / В.А. Балагуров. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.

8. Randeberg Erlend. Electric spark ignition of sensitive dust clouds in the sub 1 mJ range / Thesis of the degree of Doctor of Scientiarum // Department of physics and technology, University of Bergen, Norway. – March, 2006. – 46 p.

9. Дзюбенко А.А. Управление параметрами искрового разряда системы зажигания ДВС / А.А. Дзюбенко // Вісник автомобільно-дорожнього інституту. – 2009. – № 1(8). – С. 69 – 73.

Поступила в редколлегию 11.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Стаховский, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

### ПАРАМЕТРИ ІСКРОВОГО РОЗРЯДУ В СИСТЕМІ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАПАЛЕННЯ

К.В. Коритченко, А.В. Серпухов, І.В. Цебрюк, Д.В. Бізонич, Санчит Аджмані (Sanchit Ajmani)

Представлені результати дослідження параметрів іскрового розряду в системі високоенергетичного запалення. Досліджено коефіцієнт виділення запасеної електричної енергії в іскровому проміжку, кількість енергії, що виділяється в іскровому проміжку за один імпульс, опір іскрового проміжку і тривалість виділення енергії в іскровому проміжку за один імпульс запалення.

**Ключові слова:** дизельний двигун, іскровий розряд.

### PARAMETERS OF A SPARK DIGIT ARE IN SYSTEM OF HIGH-ENERGY LIGHTING

K.V. Korytchenko, A.V. Serpukhov, I.V. Cebryuk, D.V. Bizonych, Sanchit Ajmani

The results of research of parameters of a spark digit are presented in the system of the high-energy lighting. The coefficient of selection the stocked electric energy is investigational in a spark interval, amount of energy, selected in a spark interval for one impulse, resistance of a spark interval and duration of selection energy in a spark interval for one impulse of lighting.

**Keywords:** diesel engine, spark digit.