

Плазменное зажигание — воспламенение конденсированным искро-дуговым разрядом

Смирнов Владимир Фёдорович

Россия, Тверская обл., г. Кимры

E-mail: svf7u@uz.ru

Web-sait: smirnov.ucoz.com

Обычное батарейное («классическое») зажигание имеет следующие недостатки:

1. Напряжение искрообразования уменьшается при увеличении оборотов двигателя (и числа его цилиндров) из-за уменьшения величины тока, накапливаемого катушкой вследствие сокращения времени замкнутого состояния контактов прерывателя.
2. Напряжение искрообразования уменьшается при малых оборотах (запуске) двигателя из-за дугового разряда между контактами прерывателя вследствие уменьшения скорости размыкания контактов. В этом случае напряжение на контактах возрастает быстрее, чем увеличивается электрическая прочность межконтактного промежутка.
3. Напряжение искрообразования уменьшается при загрязнении свечей зажигания, когда параллельно искровому промежутку или на изоляторе образуются токопроводящие мостики из нагара, создающие шунтирующее сопротивление $R_{ш}$, по которому протекает часть вторичного тока. Величина $R_{ш}$ обычно находится в пределах 3-6 МОм. При сильно загрязненных свечах ($R_{ш} = 0,25-0,5$ МОм) искрообразование и вовсе может прекратиться.
4. Напряжение искрообразования уменьшается при влаге на высоковольтных проводах вследствие увеличения электрической емкости, шунтирующей повышающую обмотку катушки.

Доминирующей системой электронного зажигания в настоящее время является ICI (Ignition Coil Inductor — Зажигание Катушкой

Индуктивности) — дальнейшее развитие «классического» зажигания. Систему электронного зажигания ICI называют ещё «транзисторной». Применение электронного коммутатора, датчика Холла и низкоомной катушки позволило исключить прерыватель, а вместе с ним и дуговой разряд между его контактами, бесполезно тративший энергию катушки при запуске и на низких оборотах. При этом стал ненужным и конденсатор, который снижал скорость нарастания ЭДС самоиндукции катушки, чтобы дать возможность контактам прерывателя разомкнуться раньше возникновения дугового разряда. В результате, значительно подросли напряжение на свече и энергия искрового разряда.

ICI система электронного зажигания позволяет поднять мощность разряда, однако не может значительно увеличить скорость нарастания напряжения по сравнению с обычным зажиганием. Относительно низкая скорость перемагничивания сердечника катушки обуславливает резкий рост тока первичной обмотки на высоких оборотах, из-за чего время

нарастания напряжения на запальной свече может занимать весь угол опережения, заходя даже в фазу быстрого сгорания. Как следствие, вторичное напряжение в катушке не успевает достигнуть напряжения пробоя, и энергия разряда, пропорциональная квадрату тока, резко снижается на высоких (более ~3000) оборотах двигателя. Моменты искрообразования и начальной фазы воспламенения становятся вероятностными и запаздывают, что обуславливает необходимость в установке раннего зажигания. В результате, при движении поршня к верхней мёртвой точке разгорающаяся воздушно-топливная смесь вызывает повышение давления, что создаёт силу противодействия, отнимающую мощность у двигателя. При этом топливно-воздушная смесь сгорает не полностью — наступает ограничение мощности и числа оборотов двигателя. Несколько лучшим решением этой проблемы, является применение сдвоенных и счетверённых катушек зажигания («модуль зажигания» с управлением от компьютера), где нагрузка распределена по частоте перемагничивания с одной катушки зажигания на две или четыре, тем самым, снижая частоту перемагничивания сердечника для одной катушки зажигания.

Непреодолёнными в ICI электронной системе зажигания оказались и указанные выше в пунктах 3 и 4 недостатки «классической» системы.

CDI (Capacitive Discharge Ignition – Ёмкостного Разряда Зажигание) —

тиристорно-конденсаторная система зажигания, основанная на накоплении энергии в ёмкости конденсатора, заряжаемого до напряжения 300-500 В от повышающего преобразователя DC/DC. При поступлении сигнала управления тиристор подключает заряженный конденсатор к первичной обмотке катушки зажигания. Катушка зажигания и заряженный конденсатор образуют ударный LC-контур. На резонансной частоте контура возникают затухающие колебания, энергия которых трансформируется повышающей обмоткой катушки в высокое напряжение, вызывающее искрообразование на запальных свечах.

CDI устройства отвечают большинству требований, предъявляемых к системе зажигания. По сравнению с ICI их отличает большая экономичность, ведь ток через катушку течёт только в момент искрообразования. Однако из-за повышенного уровня импульсных помех CDI системы трудно использовать на автомобиле. В основном их устанавливают на высокооборотных двигателях спортивных автомобилей и 2-х тактных импортных двигателях, где уровень помех не имеет определяющего значения. На данный момент в автомобильной промышленности практически отсутствуют CDI системы зажигания.

В CDI системах зажигания вопрос о скорости нарастания высокого напряжения не стоит вообще: 1 - 3 микросекунды (в зависимости от типа катушки) против 30-60 микросекунд — в транзисторных системах, что позволяет точно задать момент искрообразования вне зависимости от условий пробоя искрового промежутка, состояния топливно-воздушной смеси и т. п. Выделение большого количества энергии за малый промежуток времени позволяет иметь устойчивое искрообразование со значительными шунтирующими нагрузками, такими как, присутствие на изоляторе свечи копоти, нагара из металлосодержащих соединений, влаги на высоковольтных проводах и случая, когда залило свечи. Мощность разряда легко увеличить простым увеличением ёмкости коммутирующего конденсатора (даже с применением обычных катушек зажигания можно поднять мощность искры многократно и убить всех зайцев сразу).

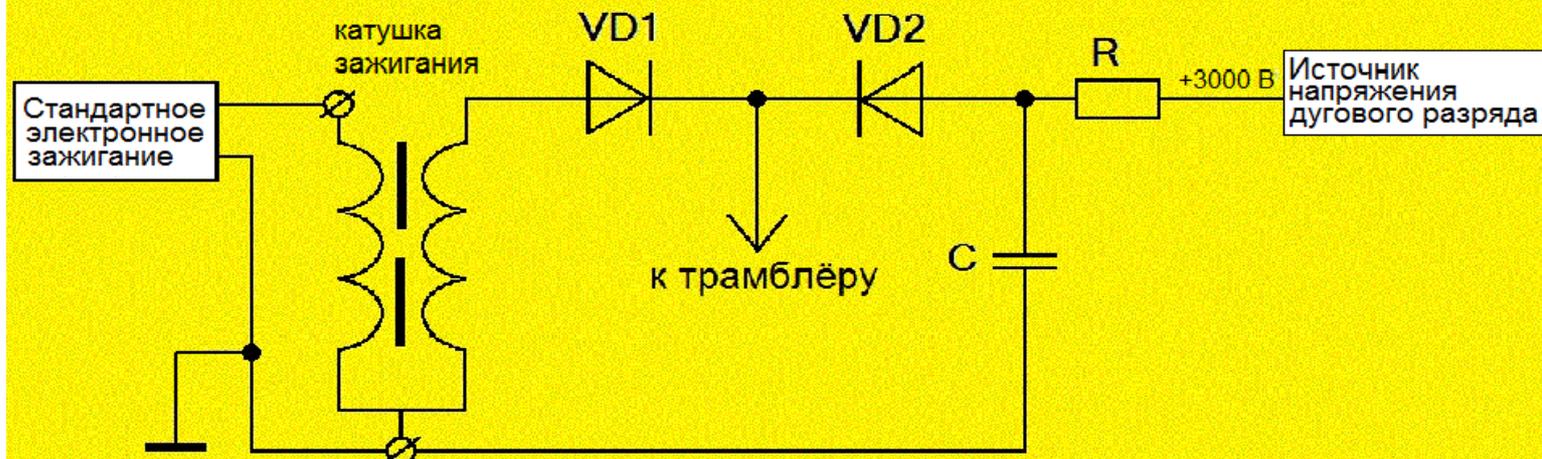
CDI системы зажигания незаменимы в следующих случаях:

- Очень высокая степень сжатия – значительно увеличивает напряжение пробоя искрового промежутка и влияние различных шунтирующих нагрузок становится

весьма заметным.

- Высокие обороты двигателя – даже небольшие задержки момента искрообразования приводят к потере мощности, кроме того, большая турбулентность в камере сгорания приводит к эффекту "сдувания" искры, когда искра в буквальном смысле сдувается только возникнув или не возникает вообще.
- Использование бензинов с ферроценовыми антидетонаторами — вызывают токопроводящие отложения на свечах, делая искрообразование затруднительным или даже невозможным.
- Двигатели, работающие на спирту и спиртовых смесях – как правило имеют высокую степень сжатия и спирты труднее воспламеняются, нежели бензин.
- Двигатели, работающие на газу – требуют значительно более мощную систему зажигания, чем бензиновые, поскольку газ значительно хуже воспламеняется и медленнее горит, чем бензин.
- Часто имеется более 2-х вышеперечисленных пунктов одновременно, например в спортивных автомобилях, где присутствуют высокие степени сжатия, высокие обороты, высокооктановые бензины и применяются спирты. В двигателях предназначенных для работы на газу очень высокие степени сжатия (11 и выше) + плохо воспламеняемый и медленно горящий газ. Ну а в мороз двигатель заводится всегда, главное чтобы аккумулятор смог его проверить.

Плазменное зажигание



Плазменное зажигание (рисунок) состоит из стандартного электронного зажигания (желательно CDI) и заторможенного релаксационного генератора плазмы, состоящего из источника питания +3000 В, разрядной RC-цепи, ёмкость C которой — накопитель заряда для конденсированного дугового разряда в запальной свече, которую подключает трамблёр к моменту искрообразования в нужном цилиндре. Алгоритм формирования плазмы задаётся схемой логического сложения 2ИЛИ на высоковольтных ($U_{обр.} > 30 \text{ кВ}$, $I_{ср.} > 0,3 \text{ А}$) диодах VD1, VD2 (Каждый диод — последовательная цепь, набранная из дискретных высоковольтных диодов или столбов, на требуемое обратное напряжение. Например, можно использовать телевизионные демпферные диоды (столбы) типа КЦ109А, которых потребуется по 5 штук. Ещё лучше — диоды КД226Д, но их потребуется по 50 штук.).

В плазменном зажигании **самостоятельный** искровой разряд стандартного электронного зажигания используется для инициализации — первоначального пробоя искрового промежутка запальной свечи и создания канала проводимости, по которому потечёт ток **несамостоятельного** дугового **конденсированного** (заряд конденсатора C непосредственно превращается в энергию плазмы) разряда.

При возникновении высокого напряжения на вторичной обмотке катушки диод $VD1$ открывается, а $VD2$ — закрывается. Напряжение между электродами свечи повышается, возникает **самостоятельный** иницирующий искровой разряд. Его вольт-амперная характеристика падающая. Поэтому по мере прогрева плазмы напряжение на искровом промежутке будет уменьшаться вплоть до 1500-900 В. Однако уже при напряжении менее 3000 В диод $VD2$ откроется, а $VD1$ — закроется, и на свечу начнёт поступать заряд ёмкости C . Начинается самое главное — возникает **несамостоятельный** конденсированный дуговой разряд, во время которого температура под «шубой» плазмы в шнуре дуги повышается (~ 40 000°C), а напряжение разряда резко уменьшается, что позволяет ёмкости C наиболее полно и интенсивно отдать свой заряд. К концу разряда возникает состояние, когда заряд ёмкости C израсходован и напряжение на нём мало, а ток, текущий по сопротивлению R , не способен поддерживать существование термодинамически неравновесной газоразрядной плазмы и плазма начинает исчезать (деионизироваться) быстрее, чем увеличивается напряжение на ёмкости C (явление гистерезиса). После угасания дугового разряда начинается новый цикл релаксационного процесса — накопление заряда ёмкостью C для следующего дугового разряда и т. д.

Плазменное зажигание можно выполнить на базе конденсаторного CDI зажигания, разместив дополнительно на трансформаторе преобразователя обмотку для источника питания +3000 В. При этом выпрямитель выгодно выполнить по схеме удвоения напряжения — тогда потребуется вдвое меньше витков. Общая мощность преобразователя должна быть не менее 80 ВА. В самом простом случае (минимум электроники) преобразователь можно выполнить по схеме автогенератора Ройера, который теоретически обладает свойством автоматической защиты при коротких замыканиях выхода. В этом случае при открытом тиристоре (искрообразование) генерация будет прекращаться, а через транзисторы преобразователя будет течь лишь ток запуска. Резистор R , видимо, не понадобится, т. к. его функцию будет выполнять конечное выходное сопротивление преобразователя.

Величина ёмкости C — десятки нанофард (определяет требуемую мощность источника питания +3000 В). Однако, как показывает опыт, не следует гнаться за рекордными значениями ёмкости C и мощности источника +3000 В. Мощный дуговой разряд не только вызывает эрозию электродов свечей (испарение металла в анодном и катодном пятнах), но и разогревает их. На высоких оборотах разогрев усилится, а условия отвода тепла ухудшатся, что может вызвать калильное зажигание. С таким явлением ограничения скорости в 150 км/час я столкнулся на ВАЗ 2108 в 90-х при использовании штатной низкоомной катушки и обычных свечей в мощном конденсаторном CDI зажигании собственной разработки. Поиск причины увенчался успехом только после того, как на испытательном стенде (свечи — в воздухе) при имитации соответствующих высоких оборотов я увидел, как от электродов свечей идёт дым. А ведь это было, по сути, ещё только иницирующее зажигание. Видимо имеет смысл в плазменном зажигании использовать иницирующее зажигание системы CDI минимальной мощности, а в дуговом — подобрать ёмкость C на высоких оборотах по отсутствию калильного эффекта.

Мощный плазменный разряд способен интенсивно прогреть (через состояние сильно

ионизированной плазмы) и воспламенить сжатую топливно-воздушную смесь сразу в большом объёме. При этом неопределённость и задержка момента воспламенения уменьшаются, а значит, угол опережения зажигания может быть уменьшен. Последнее обстоятельство особенно благоприятно для высокооборотных двигателей, ведь раннее зажигание вызывает повышение давления разгорающейся воздушно-топливной смеси при движении поршня к верхней мёртвой точке, что создаёт силу противодействия, отнимающую мощность у двигателя, повышающую его температуру, увеличивающую нагрузку на все детали двигателя. Таким образом, плазменное зажигание позволяет повысить обороты, поднять мощность и КПД двигателя — улучшить топливную экономичность, снизить нагрев, вибрацию и шумность, увеличить ресурс двигателя.

В плазменном зажигании необходимо использовать запальные свечи без встроенного помехоподавляющего резистора! Помехоподавляющий резистор в бегунке трамблёра необходимо переключить переключателем! Высоковольтные провода — со сплошной медной жилой в силиконовой изоляции! В противном случае что-нибудь из только что перечисленного обязательно перегорит!

К сожалению, исключение помехоподавляющих элементов из цепи дугового разряда сразу превращает плазменное зажигание в генератор мощных импульсных помех. Дело в том, что падающая вольт-амперная характеристика искро-дугового разряда представляет собой двухполюсник отрицательного сопротивления. Такой двухполюсник нейтрализует сопротивление потерь в распределённых цепях высоковольтных проводов, заставляя их генерировать и излучать электромагнитные волны на резонансных частотах (на схожем принципе в доламповое время строились искровые и дуговые радиопередатчики [6, с. 8-11]). Борьба с указанным явлением чрезвычайно сложно. Можно использовать взамен разрядной ёмкости C формирующие LC-линии, например, простейшую из них — добавив последовательно с ёмкостью C индуктивность L . Характеристическое (волновое) сопротивление данной цепи ограничит амплитуду и скорость нарастания тока. Дополнительно полезно использовать ранее выпускавшийся отечественной промышленностью провод с высокой погонной индуктивностью и не очень большим сопротивлением, состоящий из тонкой проволоки, навитой спиралью на центральную ферромагнитную жилу, который назывался "ПВВП". При этом ток разряда будет проходить по спиральной траектории, что сконцентрирует магнитное поле вдоль оси провода. Однако самым действенным представляется размещение всех элементов разрядных цепей плазменного зажигания прямо на запальных свечах — в виде индивидуальных модулей с управлением по оптическим линиям от компьютера.

Плазменное зажигание позволяет снизить расход топлива и содержание вредных веществ в отработавших газах за счёт использования бедных смесей с соотношением воздух/топливо более 17. При этом отпадают проблемы детонации, а степень сжатия можно повысить даже при использовании низкооктанового топлива, причём становится возможным воспламенение бедных смесей с соотношением воздух/топливо, достигающим 27. При плазменном зажигании можно осуществить качественное регулирование бензинового двигателя, при котором количество подаваемого воздуха остается неизменным, а регулирование мощности двигателя производится только регулированием количества подаваемого топлива. Естественно, что подобное регулирование лучше осуществлять с помощью компьютера, программа которого будет учитывать замедление воспламенения и сгорания бедных смесей.

Источники информации:

1. Бошественное зажигание
2. Классическая батарейная система зажигания
3. Электронное "конденсаторное" зажигание (CDI)
4. Сверхмощная система зажигания
5. Повышение топливной экономичности бензиновых двигателей увеличением энергии источника искрового зажигания. Басс Борис Абрамович. – Диссертация на соискание учёной степени канд. техн. наук.
6. Радиопередающие устройства под редакцией Б. П. Терентьева. М., «Связь», 1972.
7. Плазменное зажигание