

Лекция 8.

ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

Часть 3

Система зажигания

Электрическая искра между электродами свечи зажигания создает высокотемпературную плазму. При наличии смеси соответствующего состава в области свечи зажигания и при подаче системой зажигания достаточного количества энергии электрическая дуга создает фронт пламени, который затем распространяется в камере сгорания самостоятельно.

Система зажигания должна обеспечивать этот процесс при любых условиях работы двигателя. При идеальных условиях, когда топливно-воздушная смесь неподвижна, однородна и имеет стехиометрический состав, для каждого отдельного процесса зажигания требуется количество энергии, равное 0.2 мДж. В реальных условиях работы двигателя требуется значительно больше энергии. Некоторая часть энергии искры преобразуется во время пробоя, а оставшаяся часть - во время горения искры.

При увеличении зазора между электродами искра увеличивается, однако одновременно требуется более высокое напряжение зажигания. При бедной топливно-воздушной смеси или на двигателях с наддувом также требуется увеличенное напряжение зажигания. При данном уровне энергии продолжительность искры при увеличении напряжения зажигания уменьшается. Как правило, более продолжительная искра стабилизирует процесс горения топлива: неоднородность смеси в области свечи в момент зажигания может быть скомпенсирована за счет увеличения продолжительности искры. Турбулентность топливно-воздушной смеси, подобная турбулентности, имеющей место в режиме послойного распределения заряда топлива, может вызвать значительное отклонение искры, приводящее к погасанию горящего топлива. Для повторного зажигания топливно-воздушной смеси требуются многоискровые системы зажигания.

Необходимость в более высоких напряжениях зажигания, большей продолжительности искры и обеспечении многоискрового зажигания вызвала создание систем с более высокой энергией зажигания. Также недостаточная энергия зажигания является причиной пропусков зажигания топлива. Поэтому система зажигания должна обеспечивать необходимое количество энергии искры при любых условиях работы двигателя.

Эффективное распыление топлива и свободный доступ топливно-воздушной смеси к искре повышают воспламеняемость смеси и способствует увеличению продолжительности и длины искры. Расположение и длина искры определяются размерами свечи зажигания. Продолжительность искры зависит от типа и конструкции системы зажигания, а также от условий в камере сгорания. В зависимости от особенностей двигателя (впрыск топлива во впускной трубопровод, прямой впрыск топлива или наличие наддува) требуемая энергия искры составляет от 30 до 100 мДж.

Начало сгорания топлива в двигателе внутреннего сгорания определяется моментом зажигания. Момент зажигания всегда указывается относительно верхней мертвой точки поршня. Самый ранний возможный момент зажигания определяется пределом возникновения детонации, а самый поздний - пределом воспламеняемости смеси или максимальной допустимой температурой отработавших газов. Момент зажигания оказывает влияние на:

- крутящий момент двигателя;
- состав отработавших газов;
- расход топлива.

Скорость распространения фронта пламени в камере сгорания увеличивается при увеличении заряда смеси в цилиндре и частоты вращения коленчатого вала. Для создания максимального крутящего момента двигателя максимальная скорость сгорания и, следовательно, максимальное давление продуктов горения должны достигаться вскоре после прохождения поршнем верхней мертвой точки (см. рис. 1).



Рис.1. Характеристика давления в камере сгорания в зависимости от момента опережения зажигания и диаграмма момента зажигания в функции частоты вращения коленчатого вала и относительной величины заряда топливовоздушной смеси

Момент зажигания должен быть сдвинут в сторону опережения в случае бедной топливно-воздушной смеси ($\lambda > 1$), поскольку в этом случае имеет место более низкая скорость распространения фронта пламени. Таким образом, установка момента зажигания зависит от частоты вращения коленчатого вала, величины заряда смеси и состава смеси (коэффициента избытка воздуха). Моменты опережения зажигания определяются на испытательном стенде, и в случае электронных систем управления двигателем сохраняются в программной памяти блока управления в виде таблиц (см. рис.1). Осуществляя управление моментом опережения зажигания, электронные системы управления двигателем, кроме указанных, могут учитывать и другие факторы (температура ДВС и др.). Базовый момент опережения зажигания может быть изменен посредством дополнительных коррекций для определенных рабочих точек или диапазонов, заменен в соответствии со специальными программными таблицами. В качестве

примеров такой коррекции можно привести коррекцию момента опережения зажигания для предотвращения детонации, или при работе двигателя с системой прямого впрыска топлива на бедной смеси или во время прогрева. Примерами использования специальных значений угла опережения зажигания или программных таблиц блока управления цифровой системы зажигания является коррекция угла опережения зажигания в режиме послойного распределения заряда смеси и во время пуска двигателя. Окончательная реализация зависит от архитектуры блока управления двигателем. Следовательно, зажигание должно происходить до верхней мертвой точки, и момент зажигания должен сдвигаться в сторону опережения не только по мере увеличения частоты вращения коленчатого вала или уменьшения заряда смеси, но и от других факторов.

Момент опережения зажигания оказывает значительное влияние и на состав отработавших газов. При этом различные критерии оптимизации, такие как состав отработавших газов, расход топлива, динамика автомобиля и т.д., не всегда могут быть совместимы, поэтому определить «идеальный» момент опережения зажигания не всегда представляется возможным. Изменения момента опережения зажигания часто вызывают взаимно противоположные изменения расхода топлива и состава отработавших газов, т.е. одно улучшается, другое ухудшается. При увеличении опережения зажигания возрастает мощность двигателя, снижается расход топлива, но также увеличивается содержание в отработавших газах углеводородов и особенно оксидов азота. Кроме того, увеличивая опережение для повышения мощности двигателя, будем иметь работу ДВС с детонацией и, что приводит, как следствие, к выходу из строя двигателя. Позднее зажигание приводит к

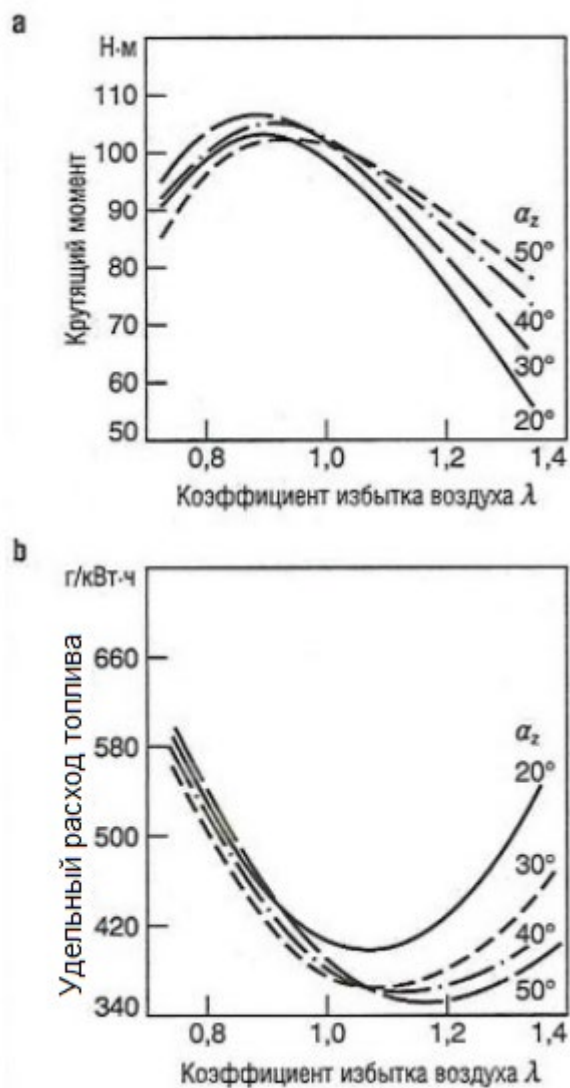


Рис.2. Влияние коэффициента избытка воздуха λ и угла опережения зажигания α_z на крутящий момент (а) и удельный расход топлива (б)

повышению температуры отработавших газов, что, в свою очередь приводит к повреждению выпускных клапанов.

Электронные системы управления моментом зажигания дают возможность точного регулирования угла опережения зажигания с учетом большого числа факторов. Тем не менее, даже при отсутствии специальной системы контроля детонации должны быть предусмотрены средства ограничения предельно допустимых значений угла опережения зажигания. Это необходимо, чтобы даже в экстремальных условиях, касающихся

допусков изготовления, износа двигателя, окружающих условий, качества топлива и т.д. ни в одном из цилиндров не могла возникать детонация. В результате для этого приходится снижать степень сжатия и сдвигать момент опережения зажигания в сторону запаздывания, что приводит к увеличению расхода топлива и снижению крутящего момента двигателя.

Выполнить все перечисленные противоречивые требования к моменту зажигания и энергии зажигания, а также обеспечивать высокую надежность системы зажигания может цифровая ЭСУД.

Модуль зажигания

В современных автомобилях система зажигания почти всегда представляют собой часть системы управления двигателем (ЭСУД). Для этой цели в состав ЭСУД включен модуль зажигания в работе которого принимают участие сигналы от многих датчиков, которые используются и для работы других устройств ЭСУД. Автономные системы зажигания в настоящее время используются только в некоторых случаях (бензогенераторы, скутеры и т.д.). В ЭСУД как правило не применяют высоковольтные распределители, подверженные отказам в условиях сырой погоды, а в основном применяются статические системы распределения с отдельными катушками зажигания для каждого цилиндра (иногда с одной катушкой на два цилиндра). Также редко, (обычно на малолитражных двигателях), используются системы зажигания на основе накопления энергии в конденсаторе (так называемое емкостное или тиристорное зажигание). Специальные конструкции, такие как магнето, в основном сохранились на старой технике. В дальнейшем будем рассматривать только системы с использованием катушек зажигания (системы с накоплением энергии в индуктивности).

Системы с накоплением энергии в индуктивности

Рассмотрим схему системы с накоплением энергии в индуктивности (рис.3).

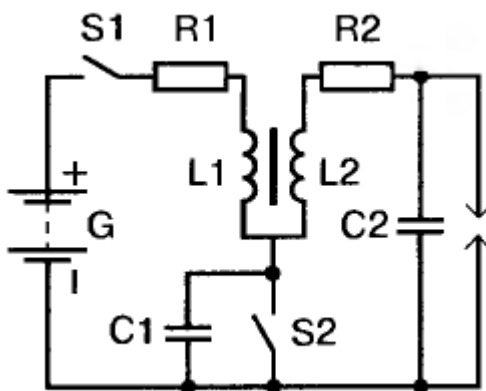


Рис.3. Схема системы с накоплением энергии в индуктивности

По закону Ома, после включения замка зажигания S1 и замыкания цепи ключом S2 (рис.3), значение нарастающего тока от источника G в первичной обмотке катушки зажигания будет определяться выражением:

$$i_1 = \frac{U - E_1}{R_1},$$

где U – напряжение источника (бортсети), R_1 – активное сопротивление цепи первичной обмотки катушки зажигания, E_1 – ЭДС самоиндукции или противоЭДС первичной обмотки катушки зажигания, которая зависит от скорости нарастания тока и определяется выражением:

$$E_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt},$$

где L_1 – индуктивность цепи первичной обмотки катушки зажигания, $\frac{di_1}{dt}$ – скорость нарастания тока в первичной обмотке, следовательно, имеем ток в первичной обмотке:

$$i_1 = \frac{U - L_1 \frac{di_1}{dt}}{R_1}$$

Решение этого дифференциального уравнения относительно тока первичной обмотки катушки зажигания дает выражение

$$i_1 = \frac{U}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (1)$$

где $\tau = \frac{L_1}{R_1}$ - постоянная времени RL цепи, t - время, прошедшее от момента включения.

При этом токе имеем энергию магнитного поля катушки зажигания:

$$W = \frac{L_1 i_1^2}{2} \quad (2)$$

Энергия магнитного поля в катушке зажигания при колебательном процессе переходит в энергию, запасенную в емкостях первичной и вторичной цепей C_1 и C_2 . Емкость C_1 – это в основном емкость конденсатора, подключенного параллельно ключу в первичной цепи, а C_2 – это в основном распределенная емкость между витками вторичной обмотки катушки зажигания. В момент, когда энергия в емкостях максимальная, в силу закона сохранения энергии и без учета потерь имеет место равенство

$$W = W_{C1} + W_{C2}$$

где $W_{C1} = \frac{C_1}{2} U_{1\max}^2$, $W_{C2} = \frac{C_2}{2} U_{2\max}^2$ энергии запасенные соответственно в емкостях $C1$ и $C2$, $U_{1\max}$ и $U_{2\max}$ – максимальные напряжения первичной и вторичной обмоток катушки зажигания.

Или

$$\frac{L_1 i_1^2}{2} = \frac{C_1}{2} U_{1\max}^2 + \frac{C_2}{2} U_{2\max}^2$$

Поскольку катушка зажигания является трансформатором, мы можем заменить $U_{1\max} = \frac{w_1}{w_2} U_{2\max}$, где w_1 и w_2 число витков соответственно первичной и вторичной обмоток катушки зажигания. Отсюда получаем максимальное напряжение вторичной обмотки катушки зажигания.

$$U_{2\max} = i_1 \sqrt{\frac{L_1}{C_1 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 + C_2}}$$

Введем обозначение для коэффициента трансформации катушки зажигания: $K = \frac{w_2}{w_1}$ и умножая числитель и знаменатель подкоренного выражения на K^2 , получим:

$$U_{2\max} = i_1 K \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + K^2 C_2}} \mu$$

В последнее выражение добавлен множитель μ , который учитывает потери на активных сопротивлениях R_1 и R_2 первичной и вторичной обмоток катушки зажигания. Экспериментально полученные для μ значения лежат в пределах $0,7 \dots 0,8$.

Максимальное вторичное напряжение возникает при размыкании ключа (прерывателя) S2. Если $U_{2\max}$ превышает напряжение пробоя искрового промежутка происходит искра (рис.4).

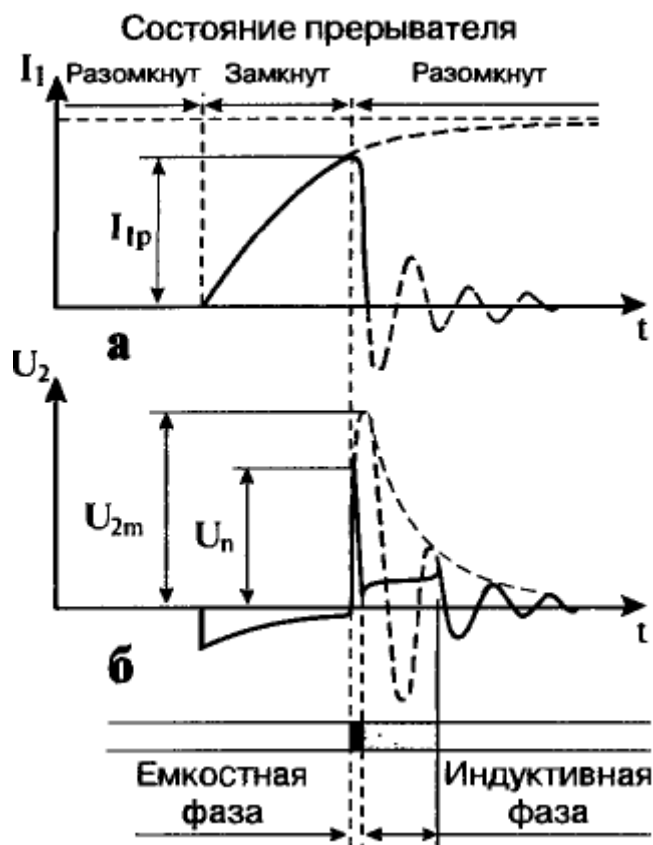


Рис.4. Временные диаграммы для тока в первичной цепи (а) и для вторичного напряжения (б)

Пунктиром на рис.4 показаны диаграммы в случае недостаточного для пробоя искрового промежутка вторичного напряжения.

Выключатель зажигания $S1$ включает систему в бортовую сеть автомобиля. В некоторых системах роль выключателя $S1$ играют контакты реле, управляемого выключателем зажигания. При вращении вала двигателя происходит включение ключа $S2$, и ток начинает нарастать в первичной цепи катушки зажигания по экспоненте, как это показано на рис. 4 а.

В момент, необходимый для подачи искрового импульса на зажигание, ключ $S2$ разрывает цепь, после чего возникает колебательный процесс, связанный с обменом энергией между магнитным полем катушки и электрическим полем в емкостях $C1$ и $C2$. Амплитуда колебаний напряжения U_2 , приложенного к электродам свечи, убывает по экспоненте, как показано на

рис. 4 пунктиром. Однако интерес представляет лишь первая полуволна напряжения, т.к., если ее максимальное значение $U_{2\max}$ превышает напряжение пробоя искрового промежутка, возникает необходимая для зажигания искра. Влияние нагара на свечах на искрообразование значительно снижается с увеличением скорости нарастания вторичного напряжения. В современных системах эта скорость лежит в пределах 200 - 700 В/мкс.

После пробоя искрового промежутка вторичное напряжение резко уменьшается (см. рис. 4). При этом в искровом промежутке сначала искра имеет емкостную фазу, связанную с разрядом емкостей на промежуток, а затем индуктивную, во время которой в искре выделяется энергия, накопленная в магнитном поле катушки. Емкостная составляющая искры (емкостная фаза) обычно кратковременна (1 – 3 мкс), искра очень яркая, имеет голубоватое свечение. Сила тока в емкостной фазе искры велика, несмотря на малое количество электричества протекающего в этой фазе. Индуктивная составляющая (индуктивная фаза) отличается значительной продолжительностью (1,5 – 2 мс), небольшой силой тока, относительно большим количеством электричества (а значит и большим количеством энергии) и неярым красноватым свечением. Энергия емкостной фазы находится в пределах 5... 15 мДж, а индуктивной фазы — 50...100 мДж. Индуктивная фаза разряда следует сразу вслед за емкостной и представляет собой тлеющий разряд в догорающих газах той части энергии магнитного поля катушки зажигания, которая осталась в ней после завершения емкостной фазы разряда. В нормально работающем двигателе рабочая смесь в камере сгорания воспламеняется во время емкостной фазы разряда, когда температура в искровом промежутке свечи зажигания достигает максимальных значений (10000°К и более). Однако индуктивная фаза играет более значительную роль при низких оборотах и на переходных режимах работы двигателя. В таких условиях индуктивная фаза разряда, имеющая большую длительность и энергию, оказывает более существенное влияние, чем емкостная фаза, на характеристики двигателя (экономичность, мощность, токсичность). Однако

емкостная фаза определяет устойчивость и эффективность работы двигателя внутреннего сгорания, а также является основным средством стабильности и точного управления моментом зажигания в цилиндрах двигателя.

Следует отметить, что емкостная фаза сопровождается высокочастотными колебаниями, которые являются источником радиопомех.

Осциллограмма вторичного напряжения, соответствующая рис. 4, является признаком нормальной работы системы зажигания. О нормальной работе свидетельствует и вид искры между электродами свечи. В исправной системе она имеет яркое ядро, окруженное пламенем красноватого цвета.

Регулировка времени накопления энергии

Для накопления необходимой энергии магнитного поля, как следует из выражений (1) и (2), а также из рис.4 необходимо достаточное время. В классическом контактном зажигании, в котором постоянный угол замкнутого состояния контактов, добиваются, чтобы время замкнутого состояния контактов было таким, чтобы на максимальных оборотах ДВС энергия искры не сильно уменьшалась, однако при этом на низких и средних оборотах ток идет в такой системе через первичную обмотку катушки зажигания значительную часть времени бесполезно, не увеличивая накопленную энергию, а только нагревая катушку. Решить эту проблему смогли только в электронных системах зажигания, вначале в аналоговых, таких, как были применены в автомобилях ВАЗ 2108, ВАЗ2109, ЗАЗ «Таврия», а впоследствии и в цифровых ЭСУД.

В электронных системах регулируют не только угол размыкания ключа, но и угол замыкания ключа, обеспечивая на любых оборотах необходимое время накопления энергии магнитного поля. Для этого время накопления энергии выбирается таким, чтобы в момент размыкания ключа S_2 ток в первичной обмотке катушки всегда имел заданное значение. Это позволяет путем выбора времени накопления энергии исключить влияние изменения напряжения в бортовой сети и влияние изменения сопротивления первичной

обмотки катушки при ее нагреве. Регулировка времени накопления энергии существенно уменьшило как расход электроэнергии, так и нагрев катушек зажигания, что позволило отказаться от масляного охлаждения и уменьшить габариты катушек зажигания. Это также позволило перейти к распределению зажигания по цилиндрам на низковольтной стороне. Схема низковольтного распределения зажигания в современных ЭСУД для четырехцилиндрового двигателя приведена на рис. 5.

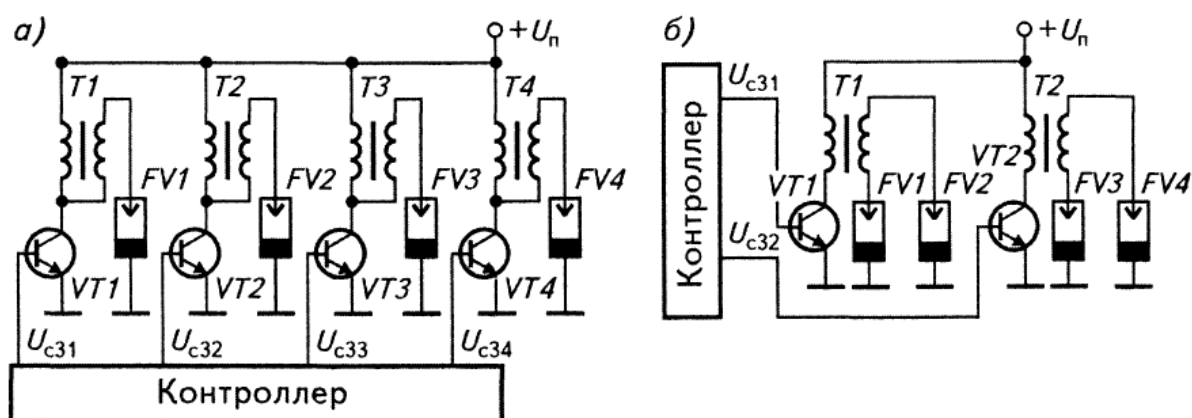


Рис. 5. Схема низковольтного распределения зажигания для четырехцилиндрового двигателя. а) с 4 катушками, б) с 2 катушками

В случае распределения с двумя катушками искрообразование происходит одновременно в двух цилиндрах: в цилиндре с тактом «рабочий ход» (рабочая искра) и в цилиндре с тактом «выпуск» (холостая искра). Увеличенное число катушек уменьшает время нахождения под током каждой катушки, т.е. при двух катушках время нахождения под током уменьшается вдвое, при четырех – вчетверо. Это обеспечило возможность не только отказаться от ненадежного высоковольтного распределителя, но и, в конечном счете, расположить катушки непосредственно на свечах (когда число катушек совпадает с числом цилиндров). Такое расположение катушек позволило повысить надежность системы зажигания, отказаться от высоковольтных проводов, а также существенно уменьшить электромагнитные помехи.

В современных автомобилях система зажигания является надежной и практически необслуживаемой, в отличие от автомобилей с контактной системой зажигания. Замена подлежат через 30 - 40 тысяч км при очередном техническом обслуживании только свечи, для исключения вероятности их отказов. Для достижения такого уровня надежности важную роль сыграло кроме регулировки времени накопления энергии, исключение механических контактов и механических автоматов регулировки опережения зажигания, а также высоковольтного распределителя зажигания. Кроме того, в первых электронных системах зажигания электронные ключи были на биполярных транзисторах и были недостаточно надежными. В современных системах применяют электронные ключи на IGBT транзисторах, которые работают весь срок службы автомобиля.