

## Лекція 8.

### ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ДВИГУНОМ

#### Частина 3

#### **Система запалювання**

Електрична іскра між електродами свічки запалювання створює високотемпературну плазму. При наявності суміші відповідного складу в області свічки запалювання і при подачі системою запалювання достатньої кількості енергії електрична дуга створює фронт полум'я, який потім поширюється в камері згоряння самостійно.

Система запалювання повинна забезпечувати цей процес при будь-яких умовах роботи двигуна. За ідеальних умов, коли паливно-повітряна суміш нерухома, однорідна і має стехіометричний склад, для кожного окремого процесу запалювання потрібно кількість енергії, що дорівнює 0.2 мДж. У реальних умовах роботи двигуна потрібно значно більше енергії. Деяка частина енергії іскри перетворюється під час пробою, а частина, що залишилася - під час горіння іскри.

При збільшенні зазору між електродами іскра збільшується, проте одночасно потрібно більш висока напруга запалювання. При бідної паливно-повітряної суміші або на двигунах з наддувом також потрібен збільшений напруга запалювання. При даному рівні енергії тривалість іскри при збільшенні напруги запалювання зменшується. Як правило, більш тривала іскра стабілізує процес горіння палива: неоднорідність суміші в області свічки в момент запалювання може бути скомпенсована за рахунок збільшення тривалості іскри. Турбулентність паливно-повітряної суміші, подібна турбулентності, що має місце в режимі пошарового розподілу заряду палива, може викликати значне відхилення іскри, що приводить до згасання палаючого палива. Для повторного запалювання паливно-повітряної суміші потрібні багатоіскровою системи запалювання.

Необхідність в більш високій напрузі запалювання, більшої тривалості іскри і забезпеченні багатоіскрового запалювання викликала створення систем з більш високою енергією запалювання. Також недостатня енергія запалювання є причиною пропусків запалювання палива. Тому система запалювання повинна забезпечувати необхідну кількість енергії іскри при будь-яких умовах роботи двигуна.

Ефективне розпорошення палива і вільний доступ паливно-повітряної суміші до іскри підвищують займистість суміші і сприяє збільшенню тривалості і довжини іскри. Розташування та довжина іскри визначаються розмірами свічки запалювання. Продовжительність іскри залежить від типу і конструкції системи запалювання, а також від умов в камері згорання. Залежно від особливостей двигуна (впорскування палива у впускний трубопровід, пряме впорскування палива або наявність наддуву) необхідна енергія іскри становить від 30 до 100 мДж.

Початок згорання палива в двигуні внутрішнього згорання визначається моментом запалювання. Момент запалювання завжди вказується щодо верхньої мертвої точки поршня. Найраніший можливий момент запалювання визначається межею виникнення детонації, а найпізніший - межею займистості суміші або максимальної допустимої температурою відпрацьованих газів. Момент запалювання впливає на:

- крутний момент двигуна;
- склад відпрацьованих газів;
- витрати палива.

Швидкість поширення фронту полум'я в камері згорання збільшується при збільшенні заряду суміші в циліндрі і частоти обертання колінчастого вала. Для створення максимального крутного моменту двигуна максимальна швидкість згорання і, отже, максимальний тиск продуктів горіння повинні досягатися незабаром після проходження поршнем верхньої мертвої точки (див. рис. 1).



Рис.1 Характеристика тиску в камері згорання в залежності від моменту випередження запалювання і діаграма моменту запалювання в функції частоти обертання колінчастого вала і відносної величини заряду паливо-повітряної суміші.

Момент запалювання повинен бути зміщений у бік випередження в разі бідної паливно-повітряної суміші ( $\lambda > 1$ ), оскільки в цьому випадку має місце більш низька швидкість поширення фронту полум'я. Таким чином, установка моменту запалення залежить від частоти обертання коленчастого вала, величини заряду суміші і складу суміші (коефіцієнта надлишку повітря). Моменти випередження запалювання визначаються на випробувальному стенді, і в разі електронних систем управління двигуном зберігаються в програмній пам'яті блоку управління у вигляді таблиць (див. рис.1). Здійснюючи управління моментом випередження запалювання, електронні системи управління двигуном, крім зазначених, можуть враховувати й інші фактори (температура ДВЗ і ін.). Базовий момент випередження запалювання може бути змінений за допомогою додаткових корекцій для певних робочих точок або діапазонів, замінений відповідно спеціальними програмними

таблицями. В якості прикладів такої корекції можна привести корекцію моменту випередження запалювання для запобігання детонації, або при роботі двигуна з системою прямого вприскування палива на бідній суміші або під час прогріву. Прикладами використання спеціальних значень кута випередження запалювання або програмних таблиць блоку управління цифрової системи запалювання є корекція кута випередження запалювання в режимі пошарового розподілу заряду суміші і під час пуску двигуна. Остаточна реалізація залежить від архітектури блоку управління двигуном. Отже, запалювання повинно відбуватися до верхньої мертвої точки, і момент запалювання повинен зсуватися в бік випередження не тільки зі збільшенням частоти обертання колінчастого вала або зменшення заряду суміші, а й від інших чинників.

Момент випередження запалювання значно впливає і на склад відпрацьованих газів. При цьому різні критерії оптимізації, такі як склад відпрацьованих газів, витрата палива, динаміка автомобіля і т.д. .. не завжди можуть бути сумісні, тому визначити «ідеальний» момент випередження запалювання не завжди представляється можливим. Зміни моменту випередження запалювання часто викликають взаємно протилежні зміни витрати палива і складу відпрацьованих газів, тобто одне поліпшується, інше погіршується. При збільшенні випередження запалювання зростає потужність двигуна, знижується витрата палива, але також збільшується вміст у відпрацьованих газах вуглеводнів і особливо оксидів азоту. Крім того, збільшуючи випередження для підвищення потужності двигуна, матимемо роботу ДВЗ з детонацією, що призводить, як наслідок, до виходу з ладу двигуна.

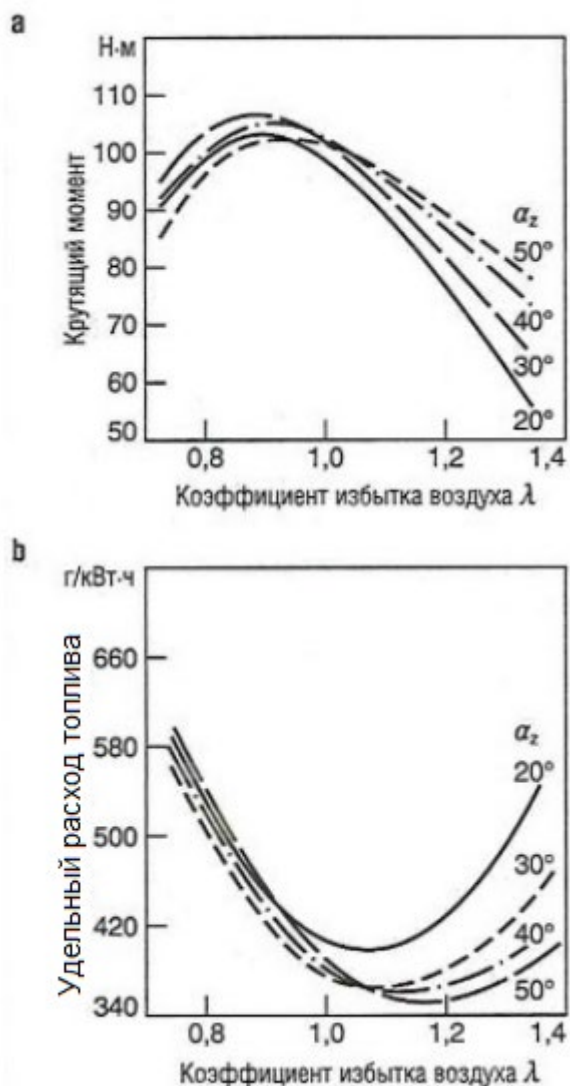


Рис.2. Вплив коефіцієнта надлишку повітря  $\lambda$  і кута випередження запалювання  $\alpha_z$  на крутний момент (а) і питома витрата палива (б)

Пізнніше запалювання призводить до підвищення температури відпрацьованих газів, що, в свою чергу призводить до пошкодження випускних клапанів.

Електронні системи управління моментом запалювання дають можливість точного регулювання кута випередження запалювання з огляду на велику кількість чинників. Проте, навіть за відсутності спеціальної системи контролю детонації повинні бути передбачені кошти обмеження гранично допустимих значень кута випередження запалювання. Це необхідно, щоб навіть в екстремальних умовах, що стосуються допусків виготовлення, зносу

двигуна, якості палива і т.д. ні в одному з циліндрів не могла виникати детонація. В результаті для цього доводиться знижувати ступінь стиснення і зрушувати момент випередження запалювання в сторону запізнювання, що призводить до збільшення витрати палива і зниження крутного моменту двигуна.

Виконати всі перераховані суперечливі вимоги до моменту запалювання і енергії запалювання, а також забезпечувати високу надійність системи запалювання може цифрова ЕСУД.

### **Модуль запалювання**

У сучасних автомобілях система запалювання майже завжди є частиною системи управління двигуном (ЕСУД). Для цієї мети до складу ЕСУД включений модуль запалювання в роботі якого беруть участь сигнали від багатьох датчиків, які використовуються і для роботи інших пристроїв ЕСУД. Автономні системи запалювання в даний час використовуються тільки в деяких випадках (бензогенератори, скутери і т.д.). У ЕСУД як правило, не застосовують високовольтні розподільники, схильні до відмов в умовах сирої погоди, а в основному застосовуються статичні системи розподілу з окремими котушками запалювання для кожного циліндра (іноді з однією котушкою на два циліндра). Також рідко, (зазвичай на малолітражних двигунах), використовуються системи запалювання на основі накопичення енергії в конденсаторі (так зване ємнісне або тиристорне запалювання). Спеціальні конструкції, такі як магнето, в основному збереглися на старій техніці. Надалі будемо розглядати тільки системи з використанням котушок запалювання (системи з накопиченням енергії в індуктивності).

### **Системи з накопиченням енергії в індуктивності**

Розглянемо схему системи з накопиченням енергії в індуктивності (рис.3).

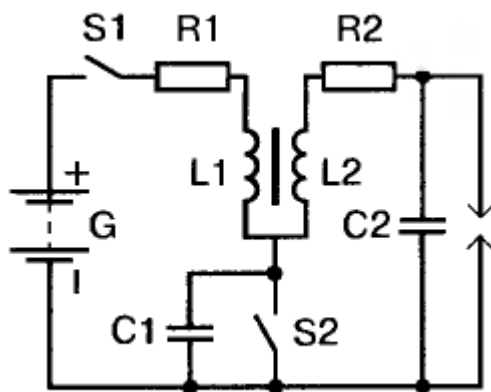


Рис.3. Схема системи з накопиченням енергії в індуктивності

Згідно із законом Ома, після включення замку запалювання S1 і замикання ланцюга ключем S2 (рис.3), значення наростаючого струму від джерела G в первинній обмотці котушки запалювання буде визначатися виразом:

$$i\dot{1} = \frac{U - E_1}{R_1},$$

де U - напруга джерела (бортсети), R1 - активний опір ланцюга первинної обмотки котушки запалювання, E1 - ЕРС самоіндукції або протівоедс первинної обмотки котушки запалювання, яка залежить від швидкості наростання струму і визначається виразом:

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

де L1 - індуктивність ланцюга первинної обмотки котушки запалювання,  $(di_1) / dt$  - швидкість наростання струму в первинній обмотці, отже,

маємо струм в первинній обмотці:

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

Рішення цього диференціального рівняння щодо струму первинної обмотки котушки запалювання дає вираз

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

де  $\tau = L_1 / R_1$  - постійна часу RL ланцюга,  $t$  - час, що минув від моменту включення.

При цьому струмі маємо енергію магнітного поля котушки запалювання:

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

Енергія магнітного поля в котушці запалювання при коливальному процесі переходить в енергію, накопичену в ємностях первинної та вторинної ланцюгів  $C_1$  і  $C_2$ . Ємність  $C_1$  - це в основному ємність конденсатора, підключеного паралельно ключу в первинному колі, а  $C_2$  - це в основному розподілена ємність між витками вторинної обмотки котушки запалювання. У момент, коли енергія в ємностях максимальна, в силу закону збереження енергії і без урахування втрат має місце рівність

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

де  $W_{C1} = \frac{C_1}{2} U_{1\max}^2$ ,  $W_{C2} = \frac{C_2}{2} U_{2\max}^2$  енергії запасені відповідно в ємностях  $C_1$  і  $C_2$ ,  $U_{1\max}$  і  $U_{2\max}$  - максимальні напруги первинної і вторинної обмоток котушки запалювання.



або

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

Оскільки котушка запалювання є трансформатором, ми можемо замінити  $U_{1\max} = \frac{w_1}{w_2} U_{2\max}$ , де  $w_1$  і  $w_2$  число витків відповідно первинної та вторинної обмоток котушки запалювання. Звідси отримуємо максимальну напругу вторинної обмотки котушки запалювання.

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

Введемо позначення для коефіцієнта трансформації котушки запалювання:  $K = w_2 / w_1$  і примножуючи чисельник і знаменник подкоренного вираження на  $K^2$ , отримаємо:

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

В останній вираз доданий множник  $\mu$ , який враховує втрати на активних опорах  $R_1$  і  $R_2$  первинної і вторинної обмоток котушки запалювання. Експериментально отримані для  $\mu$  значення лежать в межах 0,7 ... 0,8.

Максимальна вторинна напруга виникає при розмиканні ключа (переривника) S2. Якщо  $U_{2\max}$  перевищує напругу пробоя іскрового проміжку відбувається іскра (рис.4).

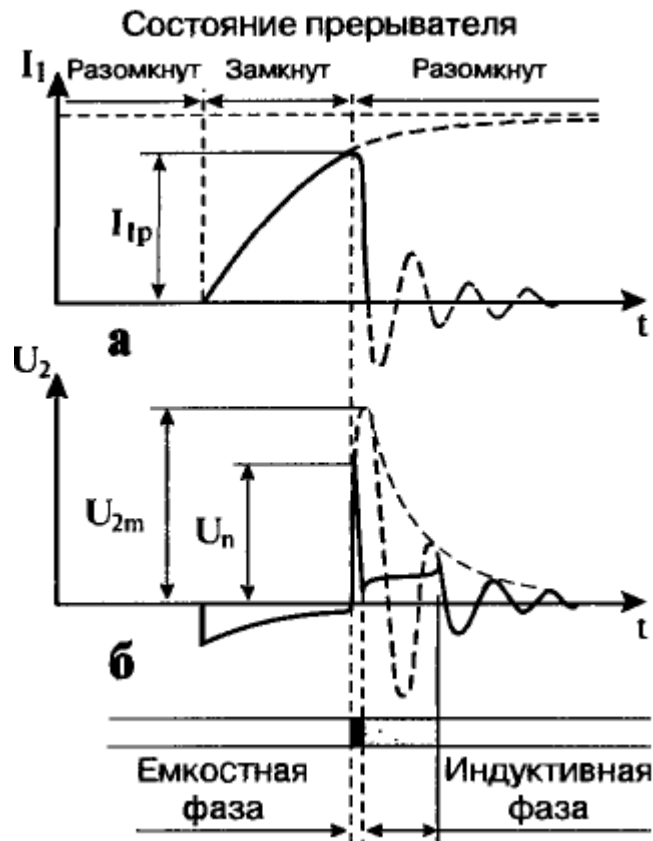


Рис.4. Часові діаграми для струму в первинному ланцюгу (а) і для вторинної напруги (б)

Пунктиром на рис.4 показані діаграми в разі недостатнього для пробою іскрового проміжку вторинної напруги.

Вимикач запалювання S1 включає систему в бортсети автомобіля. У деяких системах роль вимикача S1 грають контакти реле, керованого вимикачем запалювання. При обертанні вала двигуна відбувається включення ключа S2, і струм починає наростати в первинному ланцюзі котушки запалювання по експоненті, як це показано на рис. 4 а.

У момент, необхідний для подачі іскрового імпульсу на запалювання, ключ S2 розриває ланцюг, після чого виникає коливальний процес, пов'язаний з обміном енергією між магнітним полем котушки і електричним полем в ємностях C1 і C2. Амплітуда коливань напруги  $U_2$ , прикладеної до електродів свічки, убуває по експоненті, як показано на рис. 4 пунктиром. Однак інтерес представляє лише перша напівволна напруги, тому що, якщо її максимальне

значення  $U_{2\max}$  перевищує напругу пробою іскрового проміжку, виникає необхідна для запалювання іскра. Вплив нагару на свічках на іскроутворення значно знижується зі збільшенням швидкості наростання вторинної напруги. У сучасних системах ця швидкість лежить в межах 200 - 700 В / мкс.

Після пробою іскрового проміжку вторинна напруга різко зменшується (див. рис. 4). При цьому в іскровому проміжку спочатку іскра має ємкостну фазу, пов'язану з розрядом ємностей на проміжок, а потім індуктивну, під час якої в іскрі виділяється енергія, накопичена в магнітному полі котушки. Ємнісна складова іскри (місткість фаза) зазвичай короткочасна (1 - 3 мкс), іскра дуже яскрава, має блакитнувате світіння. Сила струму в ємнісній фазі іскри велика, незважаючи на малу кількість електрики протікає в цій фазі. Індуктивна складова (індуктивна фаза) відрізняється значною тривалістю (1,5 - 2 мс), невеликою силою струму, відносно великою кількістю електрики (а значить і великою кількістю енергії) і неяскравим червоним світлом. Енергія ємнісний фази знаходиться в межах 5 ... 15 мДж, а індуктивної фази - 50 ... 100 мДж. Індуктивна фаза розряду слід відразу слідом за ємнісний і являє собою тліючий розряд в догорають газах тієї частини енергії магнітного поля котушки запалювання, яка залишилася в ній після завершення ємнісний фази розряду. У нормально працюючому двигуні робоча суміш в камері згорання запалюється під час ємнісний фази розряду, коли температура в іскровому проміжку свічки запалювання досягає максимальних значень (10000°K і більше). Однак індуктивна фаза відіграє більш значну роль при низьких оборотах і на перехідних режимах роботи двигуна. В таких умовах індуктивна фаза розряду, що має велику тривалість і енергію, надає більш істотний вплив, ніж місткість фаза, на характеристики двигуна (економічність, потужність, токсичність). Однак ємнісна фаза визначає стійкість і ефективність роботи двигуна внутрішнього згорання, а також є основним засобом стабільності і точного управління моментом запалювання в циліндрах двигуна.

Слід зазначити, що ємнісна фаза супроводжується високочастотними коливаннями, які можуть створювати радіоперешкоди.

Осцилограма вторинного напруги, відповідна рис. 4, є ознакою нормальної роботи системи запалювання. Про нормальну роботу свідчить і вид іскри між електродами свічки. У справної системі вона має яскраве ядро, оточене полум'ям червонуватого кольору.

### **Регулювання часу накопичення енергії**

Для накопичення необхідної енергії магнітного поля, як впливає з виразів (1) і (2), а також з рис.4 необхіден достатній час. У класичному контактному запаленні, в якому постійний кут замкнутого стану контактів, домагаються, щоб час замкнутого стану контактів був таким, щоб на максимальних обертах ДВЗ енергія іскри не сильно зменшувалася, однак при цьому на низьких і середніх оборотах ток йде в такій системі через первинну обмотку котушки запалювання значну частину часу марно, не збільшуючи накопичену енергію, а тільки нагріваючи котушку. Вирішити цю проблему змогли тільки в електронних системах запалювання, спочатку в аналогових, таких, як були застосовані в автомобілях ВАЗ 2108, ВАЗ2109, ЗАЗ «Таврія», а згодом і в цифрових ЕСУД.

В електронних системах регулюють не тільки кут розмикання ключа, а й кут замикання ключа, забезпечуючи на будь-яких обертах необхідний час накопичення енергії магнітного поля. Для цього час накопичення енергії вибирається таким, щоб в момент розмикання ключа  $S_2$  струм у первинній обмотці котушки завжди мав задане значення. Це дозволяє шляхом вибору часу накопичення енергії виключити вплив зміни напруги в бортсеті і вплив зміни опору первинної обмотки котушки при її нагріві. Регулювання часу накопичення енергії істотно зменшило як витрату електроенергії, так і нагрівання котушок запалювання, що дозволило зменшити габарити котушок запалювання, відмовитися від масляного охолодження та дозволило перейти до розподілу запалювання по циліндрах на низьковольтній стороні. Схема

низьковольтного розподілу запалювання в сучасних ЕСУД для чотирициліндрового двигуна наведена на рис. 5.

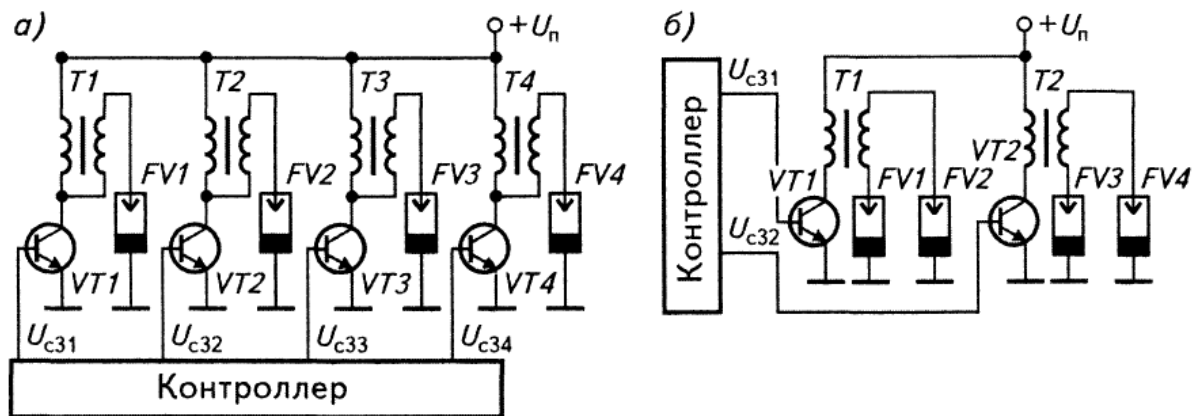


Рис. 5. Схема низьковольтного розподілу запалювання для чотирициліндрового двигуна. а) з 4 котушками, б) з 2 котушками

У разі розподілу з двома котушками іскроутворення відбувається одночасно в двох циліндрах: в циліндрі з тактом «робочий хід» (робоча іскра) і в циліндрі з тактом «випуск» (холоста іскра). Збільшене число котушок зменшує час перебування під струмом кожної котушки, тобто при двох котушках час перебування під струмом зменшується вдвічі, при чотирьох - вчетверо. Це забезпечило можливість не тільки відмовитися від ненадійного високовольтного розподільника, а й, в остаточному підсумку, розташувати котушки безпосередньо на свічках (коли число котушок збігається з числом циліндрів). Таке розташування котушок дозволило підвищити надійність системи запалювання, відмовитися від високовольтних проводів, а також істотно зменшити електромагнітні перешкоди.

У сучасних автомобілях система запалювання є надійною і практично не потребує постійного обслуговування, на відміну від автомобілів з контактною системою запалення. Заміні підлягають через 30 - 40 тисяч км при черговому технічному обслуговуванні тільки свічки, для виключення

вірогідності їх відмов. Для досягнення такого рівня надійності важливу роль зіграло крім регулювання часу накопичення енергії, вилучення механічних контактів і механічних автоматів регулювання випередження запалювання, а також високовольтного розподільника запалювання. Крім того, в перших електронних системах запалювання електронні ключі були на біполярних транзисторах і були недостатньо надійними. У сучасних системах застосовують електронні ключі на IGBT транзисторах, які працюють весь термін служби автомобіля.