

Розділ 4. АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМ ЗАПАЛЮВАННЯ

4.1. Аналіз технічних рішень систем запалювання

4.1.1. Класифікація електричних систем запалювання за принципом дії

Основною класифікаційною ознакою є принцип дії й характер іскрового розряду [2]. Відповідно до цієї ознаки розрізняють: іскрові, дугові, комбіновані системи запалювання, системи накаливання й поверхневого розряду (рис. 4.1.1).

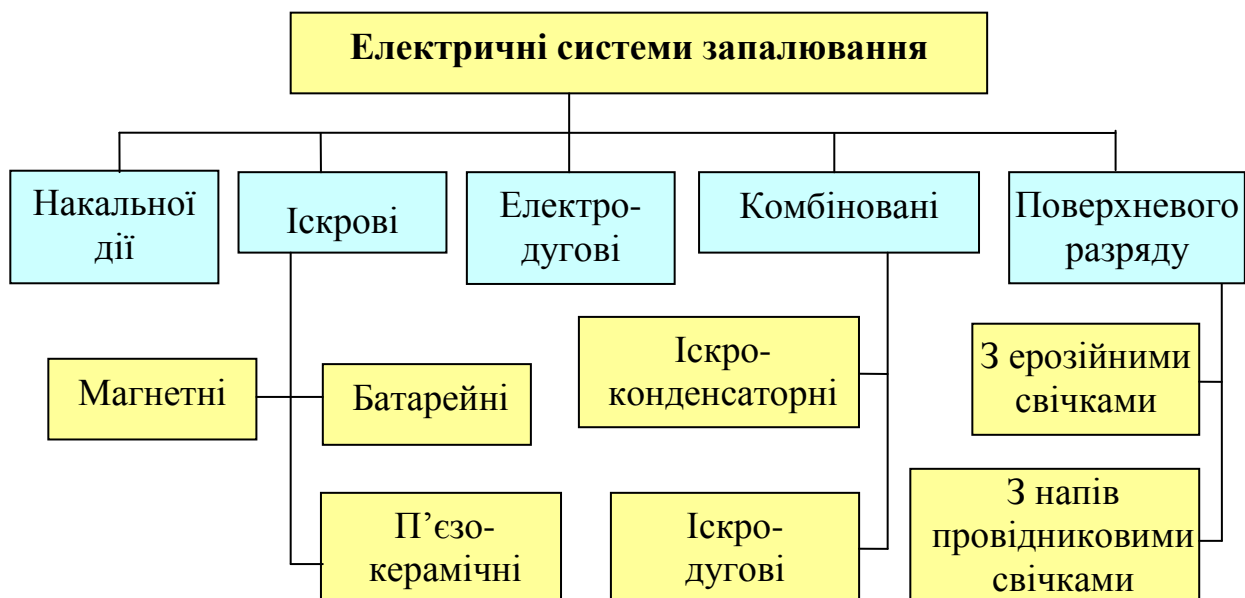


Рис. 4.1.1. Класифікація систем запалювання за принципом дії й характером електричного розряду

Тип системи запалювання обирається виходячи з характеристик двигуна, умов експлуатації, вимог до ваги і габаритів, економічних міркувань.

Паливна суміш у поршневих (карбюраторних та інжекторних) двигунах запалюється переважно електричною іскрою високої напруги на розрядній свічці від батарейних або магнетних систем запалювання.

Батарейні системи запалювання прості, мають низьку вартість і задовільні робочі характеристики, використовуються на ав-

томобільних, тракторних і мотоциклетних двигунах. Застосування батарейної системи для багатоциліндрових двигунів, які мають високі ступені стиску й свічі з значними іскровими проміжками, вимагають значного поліпшення робочих характеристик.

Система магнетного запалювання являє собою комбінований електромагнітний пристрій в конструкції якого поєднані генератор змінного струму зі збудженням від постійних магнітів, імпульсний трансформатор, переривник та розподільник високої напруги. На відзнаку від батарейних систем з накопиченням енергії в індуктивності процес утворення імпульсів високої напруги відбувається не під час розриву контактів (спадання струму у первинному колі) а в момент їх замикання (зростання струму короткого замикання). З підвищенням частоти обертання ротору магнето (колінчастого валу ДВЗ) підвищується напруга первинного кола, вироблювана генератором, та відповідно і амплітуда вторинної напруги. Завдяки цьому системи магнетного запалювання мають задовільні робочі характеристики в діапазоні середніх і високих швидкостей обертання, що дозволяє використовувати їх в авіаційних поршневих двигунах з великим числом циліндрів. Магнетні системи не потребують спеціального джерела живлення й тому знайшли застосування на тракторних, мотоциклетних і стаціонарних двигунах.

П'єзокерамічні системи характеризуються значною залежністю енергії іскрового розряду від швидкості обертання ДВЗ. Ця залежність обумовлена інерційністю деформування елементів конструкції механічного активізатору. Такі системи перспективні для застосування на ДВЗ з малою кратністю по частоті обертання.

Системи накульної дії мають малий ресурс надійної роботи, тому що при високих температурах внаслідок ерозії спіралі, відкладення нагару, і вигорання ізоляції свіча накульовання достроково виходить з ладу. Система споживає значний струм, і знайшла застосування в пристроях передпускового підігріву дизельних ДВЗ.

Електродугові системи крім перерахованих недоліків ще й складні по конструкції, тому як системи запалювання ДВЗ їх не використовують.

Комбіновані системи й системи з використанням поверхневого розряду використовуються в авіаційних реактивних двигунах. Ці

системи дозволяють значно поліпшити запальну здатність розряду при підвищених тисках і свічах шунтованих нагаром.

В *іскро-конденсаторних системах* запалювання основним є потужний розряд від зарядженого конденсатора, який підключено до вторинного кола котушки запалювання. Основному розряду передує іскровий пробій розрядного проміжку свічі від батарейної системи запалювання. Енергія одиночного розряду на свічі досягає декількох джоулів, розрядні струми – тисяч ампер. Система забезпечує до п'яти ємнісних розрядів за секунду із тривалістю розряду до 100 мкс. Недоліками таких систем є їхня підвищена складність та мала надійність.

В *іскро-дугових системах* електричний розряд являє послідовну комбінацію іскрового й дугового розрядів під дією змінного струму. Системи змінного струму прості й надійні, не мають переривників, дозволяють одержати безперервний розряд у потоці повітря при значних розрядних проміжках на свічці. Недоліком цих систем є необхідність мати джерело живлення змінного струму значної потужності.

Системи з ерозійними свічами прості по конструкції й застосовуються на газотурбінних двигунах з пусковими спалахувачами. Ерозійними називаються свічі робочою поверхнею яких служить поверхня ізолятора металізована часточками матеріалу електродів. Недоліками цих систем є порівняно мала енергетична здатність та чутливість до забруднення. Для утворення розряду на поверхні *напівпровідникової свічки* необхідно, щоб матеріал був неоднорідним і мав негативний температурний коефіцієнт електричного опору на провідному каналі. Під дією прикладеної напруги розрядний струм зосереджується у вузькому поверхневому каналі з підвищеною провідністю. При достатній енергії прикладеного імпульсу виникають умови, характерні для вибуху. Матеріал провідного каналу розігрівається й випаровується, на границі випарувань і навколишнього газу відбувається термоіонізація, електричний розряд розвивається далі за рахунок іонізованих часток що утворилися. Таким чином струм у провідному каналі передує електричному розряду під дією електричного поля, яке утворене на поверхні свічки.

На рис. 4.1.2 наведено час-амплітудні характеристики електричних розрядів в системах побудованих за різним принципом дії.

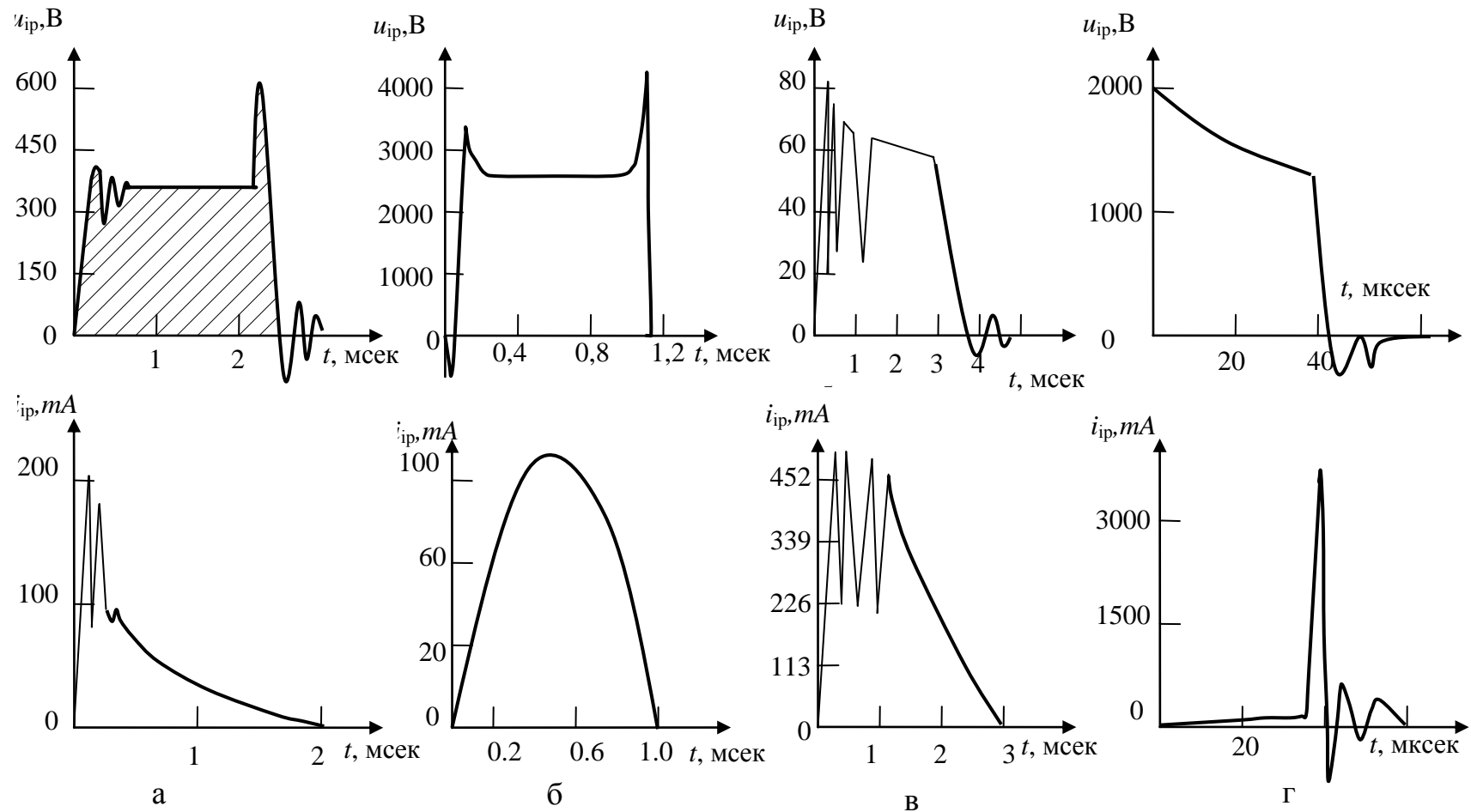


Рис. 4.1.2 Характеристики електричних розрядів систем запалювання: а – батарейної з накопиченням в індуктивності; б – високої напруги змінного струму; в – на ерозійну свічку; г – на напівпровідникову свічку

Ефективність кожної з перерахованих систем запалювання залежить не тільки від параметрів розряду й розрядного проміжку, але й від конструкції спалахувача, якості розпилу палива, тиску паливної суміші в зоні розряду й інших факторів.

4.1.2. Вимоги до систем запалювання та формулювання технічного завдання на розробку

Система запалювання є основною системою електрообладнання автомобіля з бензиновим двигуном. Алгоритм роботи й параметри іскрового розряду у свічах запалювання визначають режим й оптимальність роботи двигуна, його потужність й динамічні характеристики.

Виходячи з умов роботи ДВЗ до систем запалювання ставляться наступні вимоги:

- система запалювання повинна утворювати напругу достатню для пробоя іскрового проміжку свічки, забезпечуючи при цьому безперервне іскроутворення на всіх режимах роботи двигуна;
- іскра, що виникає між електродами свічки, повинна мати достатню енергію й тривалість для спалаху робочої суміші;
- момент запалювання повинен бути певно визначеним (оптимальним) й відповідати умовам (режимам) роботи двигуна;
- робота всіх елементів системи запалювання має бути надійною при високих температурах та механічних впливах, що виникають на двигуні в період експлуатації;
- зміна геометрії електродів свічок запалювання в результаті ерозії не повинна перевищувати допустимих значень.

Система, що проектується, повинна забезпечувати певне перевищення вторинної напруги U_{2m} над напругою пробоя $U_{пр}$ іскрового проміжку свічки запалювання в робочих умовах. Величина напруги пробоя визначається конструкцією свічки запалювання (величиною іскрового зазору, формою, матеріалом та розташуванням електродів), залежить від параметрів джерела електричної енергії (потужності заряду та швидкості зростання напруги) та від умов в іскровому проміжку (тиску та температури в камері згоряння на момент іскроутворення, складу робочої суміші, характеру та швидкості її руху).

На практиці величина коефіцієнту запасу по вторинній напрузі обирається виходячи з найгірших експлуатаційних умов та режимів (пуску, на максимальних обертах холодного ДВЗ, коли електроди підвернені ерозії та свіча покрита нагаром).

Згідно з держстандартом [23], до нормованих відносяться наступні параметри системи запалювання:

- фактична вторинна напруга, що розвивається на свічці запалювання. Основний параметр, що порівнюється з пробивною напругою для обраного двигуна й по який визначають придатність системи запалювання;

- струм розриву, що визначає енергію в котушці запалювання й термін служби комутуючих пристроїв;

- середній струм споживання, який вимірюється для аналізу зарядного балансу АКБ, вибору генератора й типу АКБ для системи електропостачання;

- напруга й струм іскрового розряду, які вимірюються для розрахунку енергії іскрового розряду;

- тривалість іскрового розряду визначає здатність запалення при граничних характеристиках паливної суміші й величини ерозії електродів свічки запалювання;

- максимальний індуктивний струм розряду – миттєве значення струму вторинного кола через іскровий проміжок після його пробою;

- енергія індуктивної складової іскрового розряду. Визначають розрахунковим шляхом як інтеграл добутку струму на напругу іскрового розряду. Цей параметр визначає здатність до спалахування іскри та якість згоряння паливної суміші в циліндрах, потужність що розвивається двигуном, коефіцієнт корисної дії перетворення теплової енергії в механічну й рівень токсичності відпрацьованих газів;

- час зростання напруги у вторинній обмотці котушки запалювання характеризує можливість системи запалювання забезпечувати іскровий пробій свічки запалювання, яка шунтована нагаром;

- індукована напруга в первинній обмотці котушки запалювання. Параметр використовується для визначення довговічності контактів переривника класичних систем і навантаження на електронні

ключі в транзисторних системах запалювання з накопиченням енергії в індуктивності;

- граничне навантаження на систему запалювання визначається як граничний опір, що шунтує свічу запалювання при якому вторинна напруга, що розвивається, знижується до 15 кВ.

Під час проектування нових систем запалювання за основні енергетичні параметри обирають амплітуду вторинної напруги й енергію, що накопичується в магнітному полі котушки чи електричному полі конденсатора. Ця енергія з урахуванням коефіцієнта втрат (на дугу через контакти переривника, іскру на розподільнику, у сталі й міді котушки запалювання, на утворення корони на свічці, розсіювання на вторинному колі) може бути прийнята за основу при оцінці енергії іскрового розряду.

Основні вихідні данні, необхідні для розробки нової системи запалювання, визначаються характеристиками ДВЗ та паливної суміші. Додаткові дані залежать від мети проектування (підвищення надійності та компактності; зниження собівартості виготовлення та експлуатаційних витрат; поліпшення параметрів електричного розряду та ефективності спалахування паливної суміші; зниження потужності, що потребується; поліпшення функціональних показників керування). При цьому технічне завдання на розробку може формулюватися по різному:

- синтезувати систему запалювання для нового ДВЗ за визначеними атрибутами;
- виконати прив'язку елементів нової системи запалювання до конструкції ДВЗ, що існує;
- поновити промислову комплектацію системи запалювання (замінити окремі елементи системи на сучасні);
- поліпшити робочі характеристики системи згідно завдання;
- розробити новий (модифікований) апарат (пристрій) запалювання в структурі визначеної системи;
- розробити комутатор струму для визначеної силової частини системи;
- адаптувати програмне забезпечення нештатної мікропроцесорної системи запалювання (виконати чіп-тюнінг).

4.1.3. Структурний аналіз автомобільних систем запалювання

В завданні на проектування нової системи запалювання перш за все слід визначити її класифікаційні атрибути. Будь-яка батарейна система запалювання складається з накопичувача енергії, комутуючого пристрою, розподільника високої напруги, спалахувача. Додатково системи запалювання які застосовуються на автомобільних ДВЗ можна класифікувати за способом керування, регулювання кута запалювання, нормування часу накопичення енергії; структурою іскрового розряду та захисним виконанням (рис. 4.1.3).

Головною ознакою системи запалювання є спосіб накопичення енергії (в індуктивності чи ємності). З позицій досконалості конструкції (надійності та енергетичних показників) системи поділяють за способом комутації струму у первинному колі котушки запалювання (контактні або безконтактні).

На автомобільних двигунах широке розповсюдження знайшли системи запалювання з накопиченням енергії в магнітному полі котушки, що використовують контактні чи транзисторні переривники.

У тиристорних системах запалювання енергія для іскрового розряду зазвичай накопичується в конденсаторі, а в якості комутуючого елемента застосовується тиристор. У цих системах котушка запалювання не накопичує енергію, а лише перетворює напругу, яка індукується в результаті коливального процесу розряду ємності через первинну обмотку котушки запалювання.

Характерною рисою тиристорних систем запалювання є висока швидкість зростання вторинної напруги. Тому пробій іскрового проміжку свічі в таких системах надійно забезпечується навіть при забрудненому й покритому нагаром ізоляторі свічі. Крім того в тиристорних системах запалювання амплітуда імпульсів вторинної напруги підтримується практично постійною при зміні частоти обертання колінчастого вала двигуна, тому що конденсатор устигає цілком зарядитися на всіх швидкісних режимах роботи ДВЗ.

Тиристорні системи запалювання реалізуються за схемами з імпульсним або безперервним накопиченням енергії в ємності та здатні забезпечувати одно або багато іскровий розряд [15].



Рис. 4.1.3 Класифікація систем запалювання за загальними ознаками

В системах з імпульсним накопиченням конденсатор заряджається одним імпульсом прямокутної форми до кінцевої напруги, а потім настає пауза до моменту його розряду. У схемах з безперервним накопиченням – до конденсатору підводиться напруга протягом інтервалу між іскроутвореннями. Системи з імпульсним накопиченням дозволяють простими засобами стабілізувати напругу заряду накопичувального конденсатора, тобто зробити її незалежною від змін напруги живлення й інших дестабілізуючих факторів. Однак при малій пусковій частоті обертання вала двигуна в цих системах, внаслідок збільшення часу паузи, накопичувальний конденсатор встигає втратити частину заряду до моменту іскроутворення і напруга іскроутворення зменшується. Це накладає певні вимоги на значення струмів витоку в елементах вторинного кола (тиристорі, накопичувальному конденсаторі) і є недоліком систем з імпульсним накопиченням енергії.

Системи з безперервним накопиченням енергії позбавлені зазначеного недоліку. Ці системи практично нечутливі до витоків в елементах первинного кола й забезпечують незалежність напруги іскроутворення від частоти обертання вала двигуна.

Системи з накопиченням енергії в ємності мають порівняно малу тривалість індуктивної складової іскрового розряду (не більш 300 мкс), що приводить до погіршення займистості й згоряння робочої суміші в циліндрах двигуна на режимах часткових навантажень. Чисельними дослідженнями встановлено, що на режимах часткових навантажень і при роботі двигуна на збіднених робочих сумішах потрібна тривалість індуктивної складової іскрового розряду не менш 1,5...2,0 мсек, що досить просто реалізується в системах запалювання з накопиченням енергії в індуктивності [2, 6, 15].

Системам з контактним керуванням властиві недоліки, пов'язані зі зносом і розлаштуванням контактів, обмеженням швидкісного режиму через вібрацію та обмежену комутуючу здатність контактів. В безконтактних системах керуючий сигнал формується безконтактними датчиками, що дозволяє уникнути зазначених недоліків.

В системах запалювання першого покоління для регулювання кута випередження (моменту запалювання) використовувались механічні відцентровий і вакуумний автомати, що реалізують прості

залежності. Результуючий кут випередження запалювання визначається за методом суперпозиції (як сума кутів від двох факторів). Такий підхід не дозволяє отримати цілком оптимальні кути випередження в режимних діапазонах ДВЗ. Механічні автомати згодом зношуються, що приводить до похибок регулювання моменту іскроутворення, погіршенню процесу згоряння робочої суміші, зниженню ефективності перетворення енергії спалаху до механічної енергії обертання. Додаткові погрішності спричиняють люфти механічної передачі розподільника.

Застосування безконтактних датчиків та електроніки дозволяє цілком виключити механічні вузли, вимірну частину системи, реалізувати розподіл високої напруги на низьковольтному рівні (статичний розподіл), здійснити оптимальне керування моментом запалювання.

Безконтактні системи запалювання з нормуванням часу накопичення енергії реалізуються шляхом введення в комутатор струму спеціального електронного регулятора часу накопичення. Нормування часу накопичення енергії дозволяє знизити потужність втрат у котушці й комутаторі при низьких і середніх частотах обертання вала двигуна при одночасному збільшенні струму розриву й відповідно енергії іскрового заряду, забезпечити оптимальний закон зміни вторинної напруги й енергії іскри в залежності від частоти обертання вала двигуна; стабілізувати вихідну напругу системи при коливаннях напруги живлення. Системи з електронним регулюванням кута випередження запалювання реалізуються на аналоговому цифровому або програмному (мікропроцесорному) рівні. Аналоговий спосіб відноситься до електронних систем запалювання більш раннього покоління. Цифрові регулятори являють собою невеликі, різні по складності обчислювачі, порядок роботи яких задається спеціальним алгоритмом. Мікропроцесорні (програмні) регулятори моменту запалювання реалізують алгоритм керування на підставі заздалегідь визначених значень оптимальних кутів запалювання для заданих режимів ДВЗ.

За структурою електричного розряду розрізняють одноіскрові та багатоіскрові системи. Перевагою багатоіскрових систем є значний час та енергія загального розряду, що дозволяє ефективно запалювати

лювати збіднені та перезбіднені паливні суміші при невеликих ступенях стиску в циліндрах двигуна.

Екранування елементів дозволяє знизити рівень радіохвильових завад, які утворює система запалювання під час іскрового пробою та захистити електроніку від шкідливої дії зовнішніх завад. Поряд з цим, екранування підвищує розподілену ємність вторинного кола, що приводить до зниження рівня вторинної напруги.

Відповідно до класифікаційної структури (рис. 4.1.3) розрізняють системи запалювання, що серійно випускаються (комплектуються) на даний час [1, 17, 20, 22]:

- контактна з механічним переривником і котушкою запалювання (класична);
- контактнo-транзисторна;
- контактнo-тиристорна з накопиченням енергії в ємності;
- безконтактна-тиристорна з накопиченням енергії в ємності й індукційним датчиком;
- транзисторна з накопиченням енергії в ємності з датчиком Холлу;
- безконтактна-тиристорна з накопиченням енергії в ємності з датчиком Холлу;
- безконтактна-транзисторна з накопиченням енергії в індуктивності й індукційному датчику;
- безконтактна-транзисторна з накопиченням енергії в індуктивності з датчиком Холлу;
- безконтактна;
- цифрова з механічним розподільником;
- цифрова зі статичним розподільником;
- мікропроцесорна система керування автомобільним ДВЗ.

4.1.4. Склад систем та критерії вибору елементів

Невід'ємними елементами будь-якої електричної системи запалювання є котушка та свічі запалювання [17]. Котушки сучасних систем запалювання різняться за конструкцією та характеризуються декількома атрибутами (рис. 4.1.4).

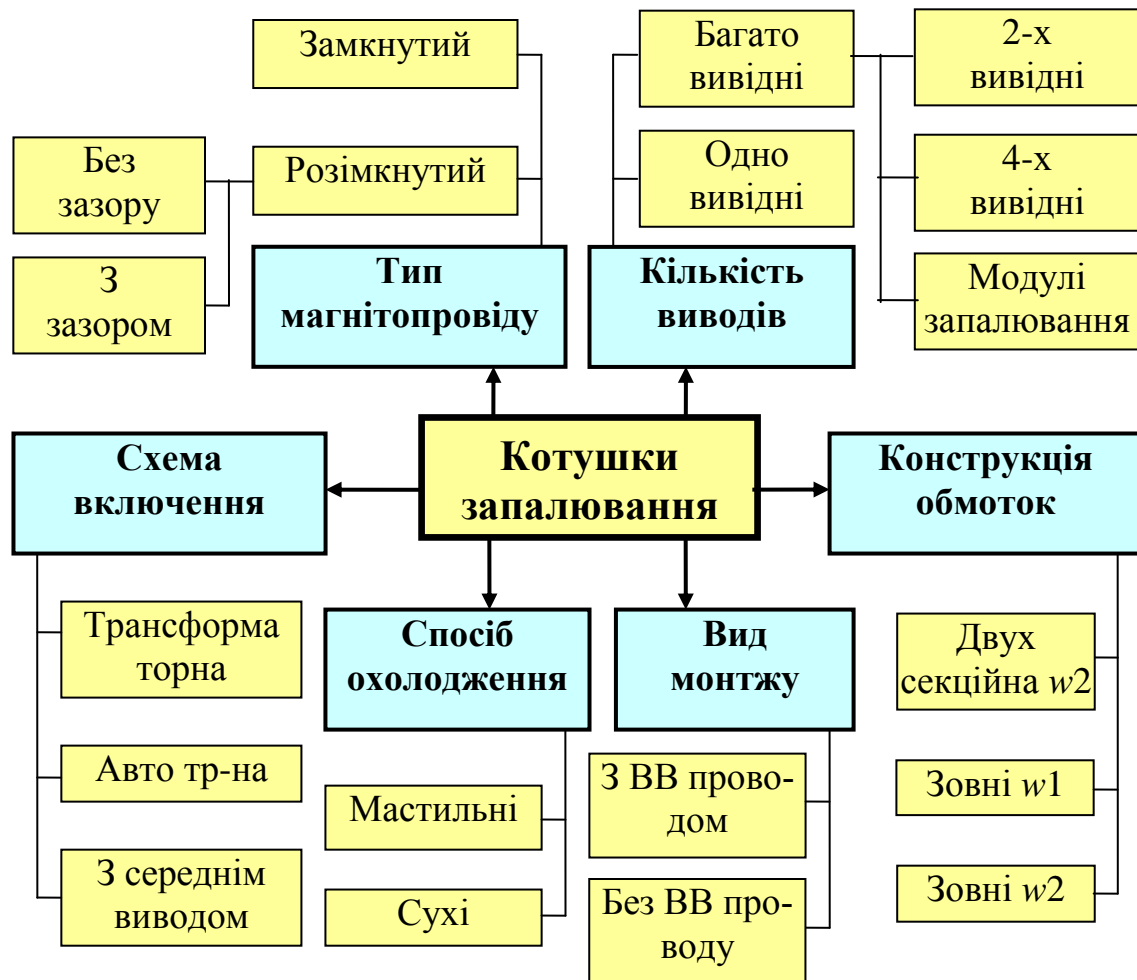


Рис. 4.1.4. Структурна класифікація котушок запалювання

Одновивідна котушка запалювання циліндричної конструкції (рис. 4.1.5, а) має магнітопровід (зовнішній 1, внутрішній 2) розімкнений по торцевих частинах (кришкою 7 та ізолятором 6). Первинна обмотка 3 намотана поверх вторинної 4 для кращого відводу тепла. Високовольтний вивід 5 вторинної обмотки поєднаний з сердечником який наближено до неї. Конструкція котушки герметична та заповнена трансформаторним мастилом для покращання діелектричної міцності та відводу тепла.

Для різних систем запалювання котушки традиційної конструкції мають такі параметри:

- число витків первинної обмотки $w_1=220\dots360$;
- число витків вторинної $w_2=18\dots26\cdot 10^3$;
- коефіцієнт трансформації $k_T=60\dots120$;
- індуктивність первинної обмотки $L_1=3,6\dots10$ мГн;
- індуктивність вторинної обмотки $L_2=20\dots100$ Гн;

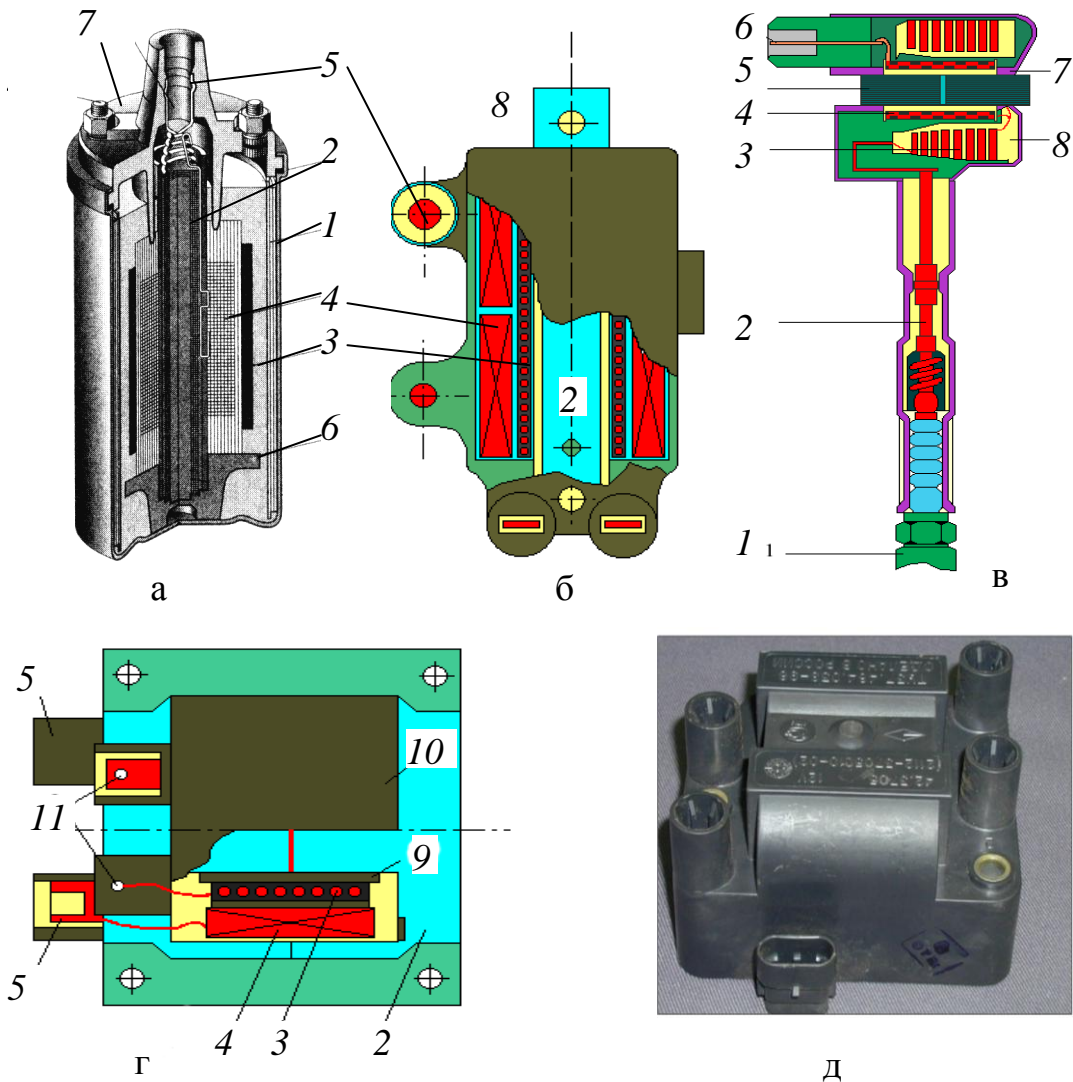


Рис. 4.1.5. Котушки запалювання: а – одно вивідна з розімкнутим магнітопроводом; б – двоховідна з розімкнутим магнітопроводом; в – автономна без високовольного проводу; г – двоховідна з замкненим магнітопроводом; д – модуль запалювання

- активний опір первинної обмотки $r_1=0,4...2$ Ом;
- активний опір вторинної обмотки $r_2=4...20$ кОм;
- допустимий струм розриву $I_p=2,7...7,4$ А.

Котушки контактних систем запалювання дозволяють забезпечити наступні вихідні характеристики:

- максимальну вторинну напругу $U_{2m}=18...20$ кВ;
- швидкість зростання напруги $dU_{2m}/dt=200...250$ В/мкс;
- тривалість іскрового розряду $t_{IP}=1,1...1,5$ мс;
- енергію іскрового розряду $W_{IP}=15...20$ мДж.

В котушках запалювання транзисторних (контактно-транзисторних, безконтактних) систем, число витків первинної обмотки (відповідно індуктивність) менше ніж в котушці контактної системи, а діаметр проводу більше (відповідно активний опір менше). Завдяки цьому зменшується залежність величини струму розриву від частоти обертання ДВЗ. Крім того, при однаковій кількості витків вторинної обмотки, коефіцієнт трансформації котушок транзисторних систем вище ніж у котушки контактної системи запалювання.

В мікропроцесорних системах запалювання з накопиченням енергії в індуктивності розподіл високої напруги по свічкам циліндрів двигуна здійснюється без високовольтного розподільника і частіше всього із застосуванням двохвивідних котушок запалювання (рис. 4.1.5, б, г). Такий спосіб називають статичним розподіленням. Система запалювання з двохвивідними котушками придатна для роботи на чотиритактному двигуні з будь-яким парним числом циліндрів. Спочатку двохвивідні котушки запалювання виготовлялися на базі традиційних одновивідних котушок з розімкнутим магнітопроводом та мастильним наповненням металевого корпусу, мали збільшені габарити і масу. Поява нових полімерних матеріалів з високими діелектричними властивостями, дозволила створити «сухі» двохвивідні котушки запалювання.

Двох вивідна циліндрична котушка запалювання (рис. 4.1.5, б) має розімкнутий магнітопровід і двосекційну вторинну обмотку 4. Вторинна обмотка розташована поверх первинної 3, що забезпечує надійну ізоляцію виводів високої напруги 5. Охолодження первинної обмотки відбувається через центральний стержень магнітопроводу 2 який виступає назовні і має отвір кріплення 8. Обмотки котушки залити компаундом і упресовані поліпропіленом.

Останнім часом розповсюдження знайшли *трансформатори запалювання* тобто двохвивідні котушки запалювання з замкненим магнітопроводом (рис. 4.1.5, г). В таких котушках вторинна обмотка 4 має каркасну секційну конструкцію, яка дозволяє зменшити вторинну ємність і посилити ізоляцію вторинної обмотки. Котушка має пластмасовий каркас 9 в якому вмонтовані обмотки. Обмотки залити епоксидним компаундом 10. Котушка в зборі з обмотками і виводами 5, 11 представляє монолітну конструкцію з високою стійкістю до механічних, електричних та температурних впливів. Сердеч-

ник котушки 2, набраний з тонких листків електротехнічної сталі складається з двох симетричних половин. В центральному стержні забезпечується прогалина 0,3...0,5 мм. Замкнений магнітопровід котушки (з зазором) дозволяє зменшити її габарити і вагу, підвищити ККД перетворення енергії, зменшити витрату обмоткового проводу, покращити параметри іскрового розряду.

Модуль запалювання (рис. 4.1.5, д) являє монолітний блок який містить дві двохвивідні котушки запалювання та два виконавчих транзисторних ключа, що комутують струм в первинних колах котушок запалювання. Така конструкція дозволяє вирішити питання пов'язані з надійністю та компактністю елементів системи запалювання. По-перше забезпечується електрична дистанція вихідних кіл підвищеної напруги виконавчих транзисторів (за межами конструкції електронного блоку керування). По-друге елементи високовольтних кіл залиті в діелектричний компаунд.

В системах запалювання з накопиченням енергії в ємності котушка запалювання виконує функцію імпульсного трансформатора, який підвищує напругу. Це дозволяє використовувати *індивідуальні котушки запалювання* для кожної свічки окремо і монтувати їх безпосередньо на свічках (рис. 4.1.5, в). На рисунку позначено: 1 – свічка запалювання; 2 – вивід високої напруги; 3 – вторинна обмотка, що складається з декількох секцій; 4 – первинна обмотка; 5 – магнітопровід; 6 – вивід низької напруги; 7 – діелектрична заливка; 8 – каркас вторинної обмотки. В такій системі запалювання відсутні високовольтні проводи, які спричиняють радіоперешкоди [24].

В мікропроцесорних систем запалювання з фіксованим часом накопичення енергії в індуктивності також застосовуються індивідуальні котушки з замкненим магнітопроводом. Такий підхід дозволяє виключити «холосту» іскру (в порівнянні з двохвивідними котушками) та збільшити вторинну напругу і енергію іскрового розряду. Котушки, що працюють у складі сучасних електронних і мікропроцесорних систем запалювання з накопиченням енергії в індуктивності забезпечують такі вихідні характеристики:

- максимальну вторинну напругу $U_{2m}=30...35$ кВ;
- швидкість зростання напруги $dU_{2m}/dt=700...800$ В/мкс;
- тривалість іскрового розряду $t_{ip}=2,0...2,5$ мс;
- енергію іскрового розряду $W_{ip}=80...100$ мДж.

Високий рівень вторинної напруги і параметрів іскрового розряду сприяють покращенню показників економічності і екологічності автомобільного двигуна. Підвищення швидкості зростання вторинної напруги робить систему запалювання менш чутливою до утворення нагару на тепловому конусі іскрової свічки.

Свічки запалювання перетворюють електричну енергію системи в теплову енергію іскрового розряду для спалахування паливної суміші в циліндрі ДВЗ. При розробці свічок запалювання розглядається цілий ряд питань, що пов'язані з дослідженнями термохімічних та термодинамічних процесів в камері згоряння, фізичних та хімічних властивостей конструкційних матеріалів, розподілу напруженості електричного поля, процесів іонізації та утворення плазми. Тому в більшості випадків при синтезі нових систем запалювання звертаються до конструкцій свічок, які пропонуються ведучими виробниками [17].

Умови експлуатації свічок запалювання визначаються не кліматичною зоною експлуатації АТЗ, а температурним режимом ДВЗ (конструкцією двигуна, видом палива). Широкий діапазон робочих температур ($100 \dots 3000^\circ\text{C}$), перепад до зовнішньої температури ($-60 \dots +60^\circ\text{C}$), тиск в камері згоряння (до 10 МПа), електричні імпульси (амплітудою до 35 кВ), хімічний вплив продуктів згоряння та ерозія електродів під дією струму іскрового розряду обумовлюють складні експлуатаційні умови свічки запалювання. При виборі типу (марки) свічки запалювання звертають увагу на її конструктивні особливості та теплові властивості (рис. 4.1.6).

Перевищення температури теплового конуса та електродів свічки запалювання в циліндрі ДВЗ більш за $+900^\circ\text{C}$ веде до калільного запалювання. Тому, як основний параметр при виборі свічки для ДВЗ, розглядається її тепла характеристика, яка нормується калільним числом. В загальному випадку тепла характеристика свічки запалювання визначається теплопровідністю центрального електроду та ізолятора, площею та кривизною поверхні теплового конусу, формою запальної порожнини. Згідно держстандарту калільне число свічки (8, 11, 14, 17, 20, 23, 26) визначається відповідно до величини середнього індикаторного тиску при якому під час випробувань свічки на моторній установці в циліндрі ДВЗ спостерігається калільне запалювання.

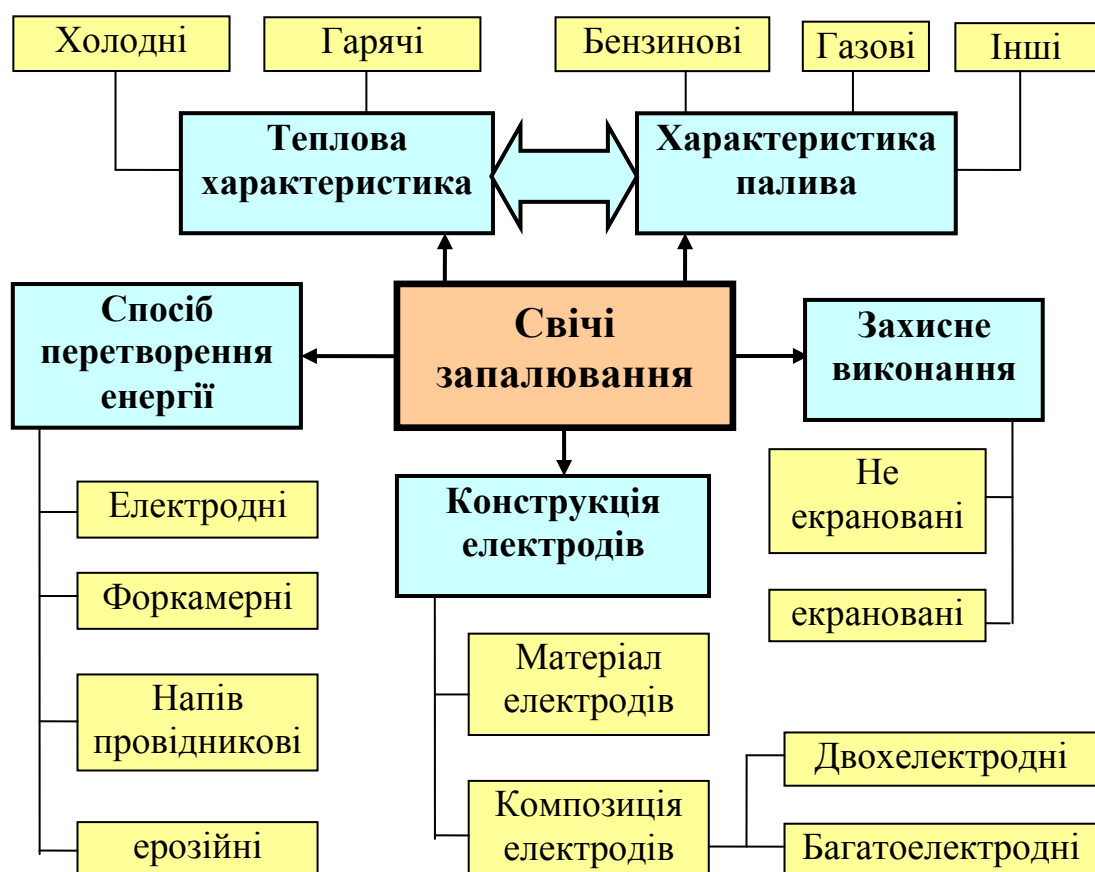


Рис. 4.1.6. Класифікація свічок запалювання

Умовно свічки запалювання поділяють на «гарячі» (з низьким калільним числом) та «холодні» (з високим калільним числом). Таким чином залежно від температури горіння палива, яке застосовується в ДВЗ (бензин, газ, рапсове мастило, біопаливо, комбіновані суміші) свічки запалювання можна розрізнити за призначенням.

В автомобільних ДВЗ розповсюдження знайшли іскрові електродні свічки в яких відбувається електричний розряд в газовому діелектричному проміжку між металевими електродами. Тепловий контакт енергії електричного розряду з паливною сумішшю відбувається безпосередньо в зоні (на траєкторії) переміщення носіїв електричного заряду, що утворюють струм розряду.

Традиційна конструкція свічки запалювання (рис. 4.1.7, а) складається з контактної голівки 1, ізолятора 2, струмопровідного герметика 3, корпусу 4, центрального електроду 5, бокового електроду 6, прокладки 7. Між центральним електродом та контактною голівкою в корпусі свічки встановлюють, резистор 9, що подавляє радіозавади.

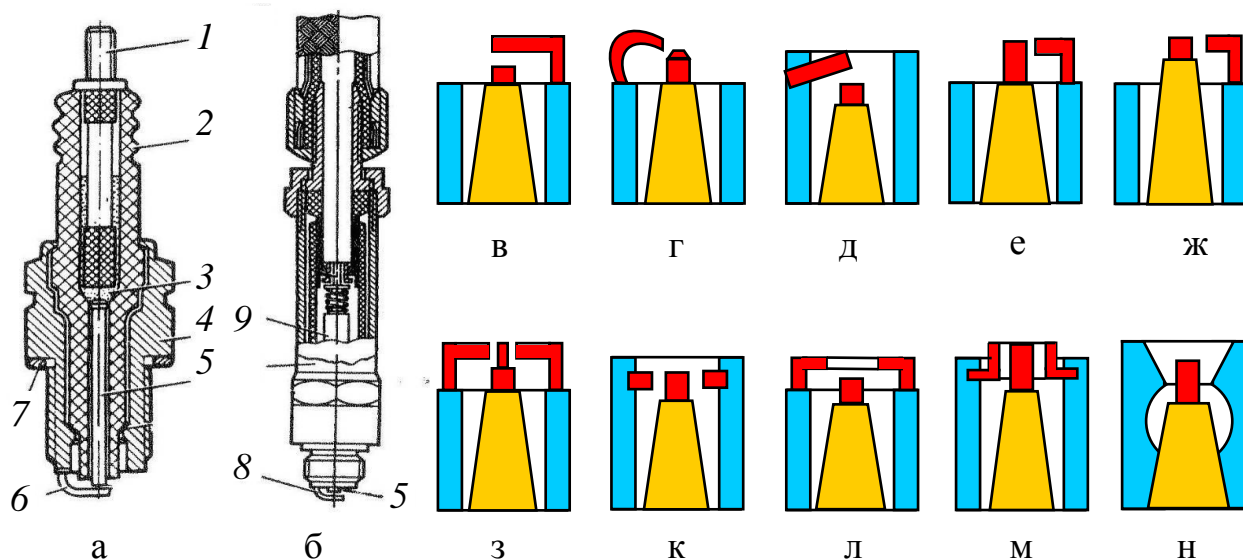


Рис. 4.1.7. Конструкції свічок запалювання: а – неекранована; б – екранована; в – з торцевим електродом; г – з гакоподібним електродом; д – з тангенціальним електродом; е – з боковим електродом; ж – з виступаючим тепловим конусом; з – з парними сплющеними електродами; и – з поглибленими боковими електродами; к – з підковоподібним електродом; л – з кільцевим електродом; м – з форкамерою

Екрановані свічки запалювання (рис. 4.1.7, б) мають металевий кожух для пониження рівня радіочастотного випромінювання.

Теплопровідність електродів та доступність паливної суміші в іскровий проміжок свічки запалювання багато в чому залежить від форми та розташування бокових електродів (рис. 4.1.7, в – е). З метою поліпшення процесу охолодження нижньої частини свічки (газами, що всмоктуються в циліндр) та розширення її температурного діапазону застосовують конструкцію з виступаючим конусом (рис. 4.1.7, ж). Для забезпечення надійного іскроутворення та збільшення ресурсу (стійкості до ерозії) на свічках встановлюють декілька бокових електродів (рис. 4.1.7, з – к) або електроди ускладненої конструкції (рис. 4.1.7, л, м). Пробивна напруга свічки запалювання в основному визначається композицією розрядника (формою, кількістю, взаємним розташування електродів). Форма перерізу електродів, виходячи з технологічних міркувань обирається круглою, прямокутною або трикутною. Останнім часом виробниками пропонуються свічки з форкамерою (рис. 4.1.7, н). Принцип перетворення енергії в таких свічках полягає в наступному. Під дією імпульсу високої напруги по кільцю мінімального іскрового зазору відбувається

електричний розряд. Як наслідок спалахує паливна суміш, що заповнює порожнину форкамери. Розширення газів при спалахуванні приводить до утворення факелу полум'я через сопло свічки (як у реактивних двигунів). Завдяки такому ефекту підвищується динаміка та якість згорання палива в циліндрі ДВЗ.

Важливу роль відіграє правильний вибір матеріалу електродів. Масовий (боковий) електрод зазвичай виготовляють з сплаву МН5, центральний – з сплаву 13Х25Т або ніхрому Х20Н80. Для кращого відводу тепла та розширення температурного діапазону, в свічках для форсованих ДВЗ застосовують мідний або срібляний центральний електрод з покриттям. Застосування платинових електродів (якщо не враховувати підвищену вартість свічки) дозволяє зменшити діаметр (покращити доступ суміші), підвищити строк експлуатації та знизити рівень пробивної напруги свічки запалювання.

Вибір свічки запалювання проводять по її параметрам які наводяться в паспорті на виріб (калійному числі, посадочному розмірі, робочому зазорі, опорі ізоляції) та додержуються таких рекомендацій. Для помірною теплового режиму низькооберткових ДВЗ застосовують гарячі свічки з подовженим вузьким тепловим конусом. Для напруженого теплового режиму, високої ступені стиску швидкохідних ДВЗ використовують холодні свічки з коротким товстим тепловим конусом.

Оцінку температурного стану свічки проводять по верхній границі теплової характеристики на режимі максимальної потужності двигуна при номінальній частоті обертання та кутах випередження, що перевищують оптимальні значення на п'ять градусів. Придатність по нижній границі теплової характеристики перевіряють на режимі холостого ходу. Якщо ДВЗ переважно працює на режимах холостого ходу і малих навантажень та при цьому спостерігаються перебої в запалюванні, встановлюють більш «гарячі» свічки (з меншим калільним числом) [17].

4.1.5. Порівняльний аналіз робочих характеристик систем запалювання

На етапі вибору типу системи запалювання розглядають її технічні та експлуатаційні характеристики. Працездатність систем за-

палювання на експлуатаційних режимах оцінюють по її робочих характеристиках [18, 20, 22].

Частота іскроутворення (швидкісний діапазон системи) визначається періодом циклу накопичення енергії (властивостями елемента накопичення) та залежить від способу комутації струму в первинному контурі системи. Період робочого циклу ДВЗ визначається конструктивними особливостями двигуна (числом циліндрів $z_{ц}$, тактністю $z_{т}$) та залежить від частоти обертання колінчастого валу n . Таким чином, необхідна частота іскроутворення системи визначається швидкісним діапазоном ДВЗ

$$f_{ip} = \frac{nz_{ц}}{30z_{т}}, \quad (4.1.1)$$

На рис. 4.1.8 наведені швидкісні робочі характеристики батарейних систем запалювання, які порівнюються за амплітудою імпульсів вторинної напруги U_{2m} .

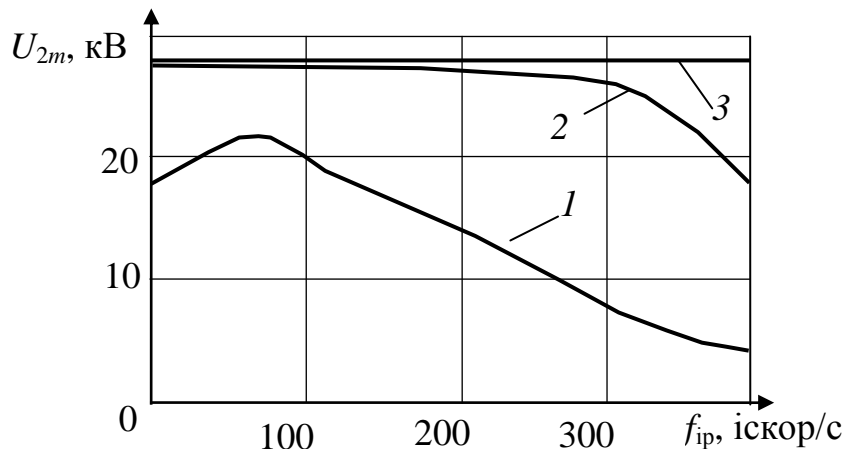


Рис. 4.1.8 Швидкісні робочі характеристики системи запалювання

Найбільше зниження напруги при збільшенні частоти іскроутворення відбувається в контактній системі запалювання (крива 1) через зменшення струму розриву в первинній обмотці котушки запалювання. Максимальна частота іскроутворення контактної системи запалювання обмежена періодом накопичення енергії (індуктивністю первинної обмотки котушки запалювання) і не перевищує 300 іскор у секунду при заданій напрузі пробією іскрового проміжку.

Контактно-транзисторні системи запалювання (крива 2) внаслідок чіткого розриву, збільшеного струму первинного кола та меншої індуктивності накопичувача, розвивають більш високу вторинну напругу й при однакових параметрах іскрового проміжку забезпечують безперебійне іскроутворення з частотою розрядів до 350 іскор у секунду.

В тиристорних системах з накопиченням енергії в ємності (крива 3) вторинна напруга практично не залежить від частоти робочого циклу, тому що накопичувальна ємність (конденсатор) заряджається до максимальної напруги значно швидше ніж відбувається зростання струму в індуктивному накопичувачі. Частота іскроутворення таких систем перевищує 600 іскор у секунду.

Шунтування іскрового проміжку свічки запалювання внаслідок забруднень і нагару на ізоляторі приводить до зниження вторинної напруги. Найбільш стійкою до шунтування іскрового проміжку є тиристорна система запалювання (рис. 4.1.9, крива 3) завдяки швидкому зростанню вторинної напруги (рис. 4.1.10, крива 3). Більш за інші втрачається напруга за рахунок шунтування іскрового проміжку в контактній системі запалювання (рис. 4.1.9 - крива 1).

Вторинна напруга тиристорної системи запалювання зростає приблизно в десять разів швидше, ніж у контактній і контактно-транзисторній системах. Тому в ній полегшено пробій іскрового проміжку при забруднених (покрытих нагаром) свічах.

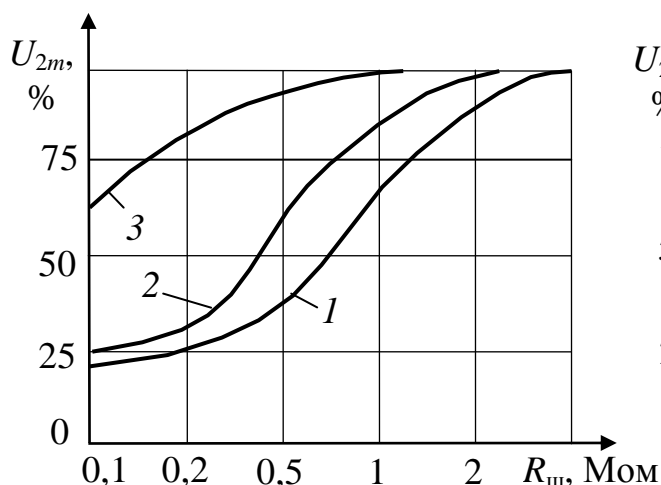


Рис. 4.1.9. Зовнішні робочі характеристики систем запалювання

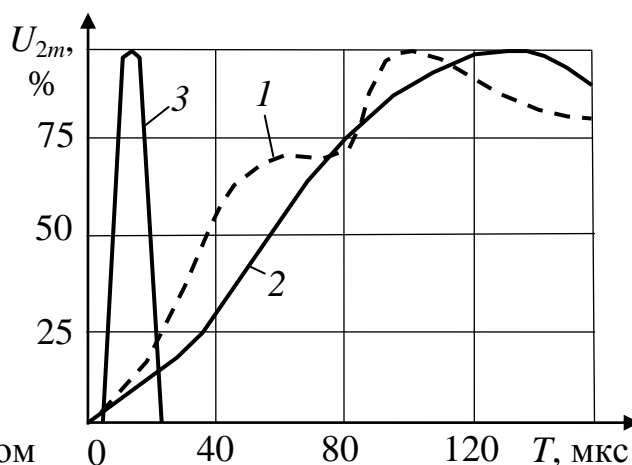


Рис. 4.1.10. Швидкість зростання вторинної напруги систем запалювання

Поряд з цим, тривалість розряду в іскровому проміжку тиристорної системи значно менше (близько 300 мкс) чим у системах з накопиченням енергії в індуктивності (близько 1 мс). Тривалість іскрового розряду на свічці характеризує його енергію і впливає на якість згоряння робочої суміші та склад вихлопних газів. Припустима тривалість іскрового розряду для бензинових стехометричних сумішей становить 0,2...0,6 мс. При меншій тривалості розряду погіршується пуск двигуна, при більшій – інтенсифікується ерозія електродів свічки запалювання.

Системи з імпульсним накопиченням енергії в ємності мають найбільшу швидкість зростання високої напруги та найменшу тривалість іскрового розряду (десятки мікросекунд). Це погіршує запалення і згоряння робочої суміші на середніх навантаженнях та приводить до підвищення витрат палива і токсичності відпрацьованих газів. Для усунення зазначених недоліків треба оптимізувати момент запалювання і збільшувати іскровий зазор. Такий підхід потребує підвищення вторинної напруги. В системах з накопиченням енергії в індуктивності тривалість індуктивної фази іскрового розряду підраховується в мілісекундах.

З позицій енерговитрат система запалювання характеризується потужністю, яка споживається системою на експлуатаційних режимах та мінімальною напругою живлення при якій підтримуються її робочі характеристики. Найбільшу потужність споживає контактно-транзисторна система запалювання (в робочому швидкісному діапазоні від 60 до 40 Вт). В контактній системі споживана потужність становить 18...20 Вт при пусковій частоті та зменшується до 7...9 Вт на максимальних обертах. Тиристорна система з імпульсним зарядом ємності навпаки збільшує споживану потужність з 4 Вт при пуску до 28 Вт при максимальній частоті обертання ДВЗ. При безперервному заряді ємності витрати потужності збільшуються відповідно до 22 й 28 Вт.