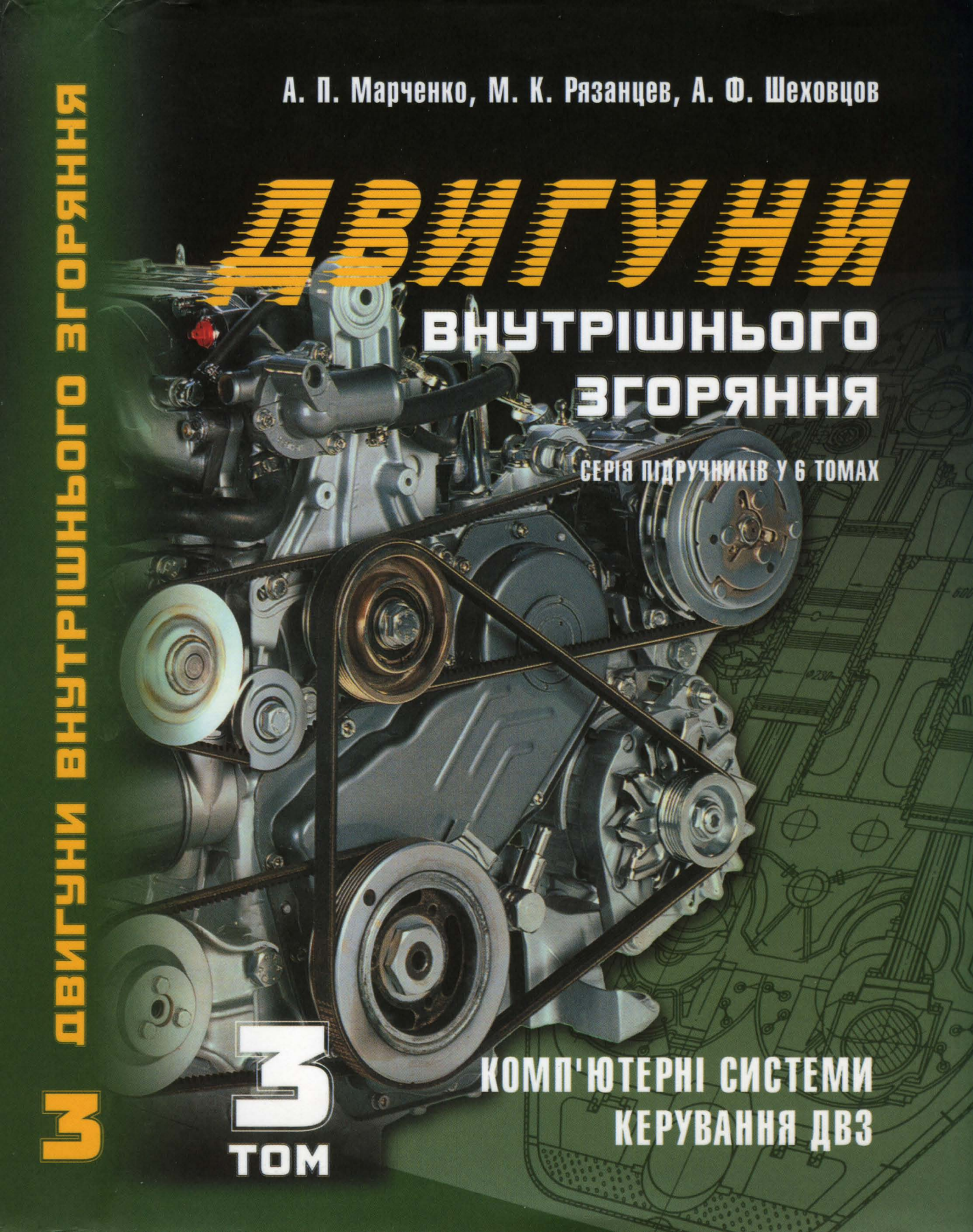
А. П. Марченко, М. К. Рязанцев, А. Ф. Шеховцов

ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

СЕРІЯ ПІДРУЧНИКІВ У 6 ТОМАХ

ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ



3 ТОМ

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВЗ

ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

3

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

А.П. МАРЧЕНКО
М.К. РЯЗАНЦЕВ
А.Ф. ШЕХОВЦОВ

ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

СЕРІЯ ПІДРУЧНИКІВ У 6 ТОМАХ

ТОМ 3

КОМП’ЮТЕРНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВЗ

За редакцією
проф. А.П. Марченка, заслуженого діяча науки України проф. А.Ф. Шеховцова

Затверджено Міністерством освіти і науки України як підручник для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за напрямом “Інженерна механіка” за спеціальністю “Двигуни внутрішнього згоряння”

Видавничий центр НТУ “ХПІ”
2004

ББК 31.365
М 64
УДК 621.432.3

Рецензенти: *С.А. Єрощенков*, д-р техн. наук, проф.,
Українська державна академія залізничного транспорту;
А.П. Кудряш, д-р техн. наук, проф.,
Інститут проблем машинобудування НАН України

Автори: А.П. Марченко, М.К. Рязанцев, А.Ф. Шеховцов

Гриф наданий Міністерством освіти і науки України,
лист № 1/11 – 4682 від 06.11.03 р.

М64 Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Т. 3. Комп'ютерні системи керування ДВЗ. / За редакцією А.П. Марченка, засл. діяча науки України проф. А.Ф. Шеховцова – Харків: Видавн. центр НТУ "ХПІ", 2004. – с.

ISBN

У підручнику викладено схеми і конструкції комп'ютерних систем керування ДВЗ із підсистемами, блоками та каналами керування, в тому числі паливо- й повітроподачею, рівнем токсичності, багатопаливністю, утилізацією вторинної теплоти, кліматичним пристосуванням, надійністю, експлуатаційними характеристиками двигунів. Обґрунтовано та наведено шляхи підвищення ефективності, стабільності системи керування, а також варіанти числених датчиків і виконавчих пристроїв.

Підручник призначений для студентів спеціальності "Двигуни внутрішнього згоряння". Він може бути корисним викладачам, аспірантам, інженерам-розробникам перспективних ДВЗ.

Schemes and constructions of ICE computer control systems with subsystems, blocks and channels of control including fuel - and airfeed, level of toxicity, multifuel, recycling of secondary heat, climatic adaptivity, reliability and operating characteristics of engines are described. The ways to increase efficiency and control system stability as well as variants of numerous sensors and operating devices are substantiated.

The textbook is intended for the students of "Internal Combustion Engines" speciality students. It may be useful for instructors, post-graduates, development engineers of long-range internal combustion engines.

Іл. 202 . Табл. 12. Бібліогр. 67 назв.

ББК 31.361

ISBN

© А.П. Марченко, М.К. Рязанцев,
А.Ф. Шеховцов, 2004 р.

ОСНОВНІ ТЕРМІНИ

Аварійний захист – комплекс блокувань й обмежень, що запобігатимуть катастрофічним відмовам двигуна, комп'ютерної системи керування.

Адаптивна система керування – система, програма керування якої адаптується до умов роботи ДВЗ (до змін експлуатаційних режимів, характеристик систем двигуна, параметрів навколишнього середовища, стану самої системи тощо). Адаптація системи відбувається за певним критерієм, наприклад, за максимальною паливною економічністю, мінімальною токсичністю відпрацьованих газів.

Активне регулювання – регулювання процесу безпосередньо за сигналами первинного датчика; **Пасивне регулювання –** непряме регулювання процесу за сигналами датчика вихідного параметра двигуна.

Алгоритм керування – логічна послідовність функціональних вимог щодо реалізації з необхідною точністю й швидкодією керуючих (командних) дій залежно від основних режимів роботи двигуна з урахуванням корегуючих факторів.

Безконтактний комутатор командних імпульсів – пристрій розподілу командних імпульсів за циліндрами двигуна відповідно до порядку їх роботи, характеризується відсутністю механічних елементів і спеціальних переривників, що подають стартові імпульси.

Біполярний пристрій – забезпечує формування командних імпульсів шляхом подачі імпульсів прямої та зворотної полярності на керований електромагнітний клапан форсунки.

Блок синтезу інформації – електронний пристрій, що перетворює інформацію датчиків у командну дію на виконавчий механізм.

Виконавчий пристрій системи керування – механічний (гідравлічний, пневматичний, електромагнітний та ін.) пристрій, що перетворює

командний сигнал, який видається комп'ютером системи керування, на переміщення органу керування процесом у двигуні.

Вимірювальний перетворювач – датчик, первинний вимірювач, сенсор.

Вихідні каскади комп'ютерної системи керування – електронні пристрої для підсилення сигналів, які видаються комп'ютером системи керування, наприклад, підсилювач потужності для керування електромагнітними клапанами форсунок.

Внутрішнє регулювання наддуву – регулювання, у результаті якого отримуються нові характеристики роботи лопатних машин.

Генератор тактових імпульсів – пристрій для збудження стартових імпульсів, які запускають електронну схему блока синтезу інформації й адекватних частоті спалахів у циліндрах двигуна.

Дискретне керування двигуном – керування, що базується на дозуванні палива за окремими робочими циклами ДВЗ.

Діагностування комп'ютерної системи керування – апаратурно забезпечений опит елементів системи за обраними діагностичними параметрами.

Зовнішнє регулювання наддуву – регулювання, яке характеризується таким зовнішнім впливом на режим роботи лопатних машин, у результаті якого змінюється положення робочих точок на характеристиках їхньої роботи при незмінності самих характеристик.

Імовірність безвідмовної роботи комп'ютерної системи керування – відношення кількості справних систем у поточний момент часу до такої кількості у початковий момент експлуатації партії двигунів з комп'ютерним керуванням.

Імовірність стабільного функціонування комп'ютерної системи керування – відношення значення режимного параметра системи, усереднене для партії двигунів, до граничного значення цього параметра, визначеного паспортним полем допуску його паспортної зміни.

Канал керування – компонент системи керування, що представлений рядом: датчик – блок керування – виконавчий пристрій.

Командний параметр – параметр, регулювання якого дозволяє забезпечити ефект системи керування. Наприклад, у двигуні з іскровим запалюванням як головний командний параметр може призначатися масова ви-

трата повітря, якщо йдеться про паливну економічність як очікуваний ефект керування.

Комбінований датчик – вимірювальний перетворювач, у якому суміщені декілька первинних вимірювань; за приклад маємо градієнтний датчик для визначення перепаду температур.

Мультивібратор – самозбудний електронний пристрій, що генерує послідовність прямокутних імпульсів.

Мультиплікатор – електронний пристрій, що реалізує процес посилення електричного струму або напруги; характеризується відношенням значень вихідного та вхідного сигналів (коефіцієнтом підсилення).

Навантажувальна система керування – залежність складу горючої суміші від головного командного параметра при сталій частоті стартових імпульсів. **Швидкісна характеристика** системи керування – залежність складу горючої (робочої) суміші від частоти стартових імпульсів при незмінності значення головного командного параметру.

Надійність фізична системи керування – зумовлюється її безвідмовністю й ресурсними показниками. **Надійність параметрична системи керування –** зумовлюється стабільністю її робочих параметрів при тривалій експлуатації.

Нейтралізація відпрацьованих газів – комплекс заходів, які забезпечуватимуть суттєве зниження концентрації токсидів у відпрацьованих газах двигуна.

Нестатичний виконавчий пристрій системи керування – пристрій з рухомими елементами. **Статичний виконавчий пристрій –** такий, що не має рухомих елементів.

Неусталений (усталений) режим роботи двигуна, комп'ютерної системи керування – такий, що характеризується безперервною зміною (стабільністю) робочих циклів.

Оперативний запам'ятовуючий пристрій – складається з електронних приладів для зберігання інформації датчиків, констант і виконання проміжних обчислень. Звичайно входить до складу комп'ютера, виключення якого призводить до втрати інформації оперативного запам'ятовуючого пристрою.

Оптимальна надійність системи керування – рівень надійності системи, що відповідає найменшій повній її вартості за умови забезпечення заданих і сталих в експлуатації її робочих параметрів.

Оптимальне керування – таке, що забезпечує оптимум заданої цільової функції, наприклад, найменшої середньоексплуатаційної витрати палива.

Перехідний процес – процес переходу з одного експлуатаційного режиму на інший, визначений послідовністю неусталених режимів роботи двигуна.

Постійний запам'ятовуючий пристрій – такий, що складається з електронних приладів, які допускають запис та зберігання програмного забезпечення комп'ютерної системи керування, а також тарувальних характеристик. Звичайно, входить до складу комп'ютера, виключення якого не призводить до втрати інформації постійного запам'ятовуючого пристрою.

Пристрої сполучення з мікропроцесором – такі, що перетворюють сигнали датчиків у форму, зручну для зчитування комп'ютером.

Програма керування – функціональна залежність складу горючої (робочої) суміші від головного командного параметра при заданому рівні функціонала якості двигуна, наприклад, паливної витрати, токсичності викидів, надійності тощо.

Програмно-адаптивна система керування – система, при якій основна система керування автоматично корегується при її порушенні зі зміною умов експлуатації двигуна. Таке корегування здійснюється за певним критерієм (наприклад, детонацією, димінням, тощо). **Програмне (жорстке) керування** – керування без відхилень від основної програми керування.

Регулювання шляхом автоматичної зміни структури двигуна – забезпечується, наприклад, відключенням частини робочих циліндрів на часткових режимах експлуатації, або відключенням на цих режимах вентилятора системи охолодження, або відключенням форсажної камери.

Розосереджене (багатоточкове) керування двигуном – таке, що грунтується на дозуванні палива по окремих циліндрах. **Центральне керування двигуном –** керування, що базується на дозуванні палива, яке подається в загальний впускний тракт перед головкою циліндрів.

Самодіагностування системи керування – забезпечується включенням до її складу допоміжних каналів контролю режимних параметрів власне системи керування.

Самонастроювання системи керування – здійснюється за програмою автоматичного корегування режимних параметрів системи керування за результатами її самодіагностування.

Структурний аналіз системи керування – спрямований на визначення наявності у ній проміжних ланок, за кількістю та взаємовідносинами між якими судять про стабільність і надійність роботи системи.

Фазове керування – керування моментом початку зміни характеристики процесу.

Частотне керування – керування кратністю характеристики процесу.

ПРИЙНЯТІ СКОРОЧЕННЯ

АРТСД – автоматичне регулювання теплового стану двигуна
АС – сигналізатор аварійної ситуації
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
БСІ – блок синтезу інформації (мікропроцесорний блок керування)
ВП – виконавчий пристрій
ВИП – вимірювальний перетворювач
КБК – комп'ютерний блок керування
КПСК – комп'ютерна підсистема керування
КСК – комп'ютерна система керування
ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій
ПЗП – постійний запам'ятовуючий пристрій
ЕДК – електродинамічне керування
Ф/ЕДК – форсунка з електродинамічним керуванням
Н-Ф/ЕДК – насос-форсунка з електродинамічним керуванням
ЕМК – електромагнітне керування
Ф/ЕМК – форсунка з електромагнітним керуванням
Н-Ф/ЕМК – насос-форсунка з електромагнітним керуванням
ЕР – електронний регулятор

ПЕРЕДМОВА

Високі експлуатаційні характеристики енергоустановок з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) залежать не тільки від поліпшення конструкцій власне двигунів, але й від якості та рівня автоматизації їхніх систем керування, що обумовлено головною вимогою до сучасних ДВЗ – необхідністю безперервної адаптації процесів у двигунах до моделей їх експлуатації.

У цьому плані виділяється глобальний напрямок розвитку двигунобудування, що полягає у подальшому удосконаленні комп'ютерних систем керування (КСК) на основі розширення адаптивних (зворотних) зв'язків двигунів з умовами їх експлуатації та з оператором.

У пропонованому до вашої уваги підручнику вперше узагальнено багатющий досвід розробки і використання однієї з високих технологій у ДВЗ – комп'ютерних систем керування двигунами різних типів і призначень, накопичений моторобудівними фірмами, в тому числі України.

У ньому проаналізовано основні напрями розвитку КСК, зроблено висновок про те, що найкращі результати дає вбудування комп'ютерної системи ДВЗ у загальну систему керування силової установки. У такому разі забезпечуються не тільки економічні, але й динамічні якості установки, підвищується безпека та комфортність обслуговування.

При аналізі схем і конструкцій керування враховано тенденцію переходу до багатовимірних систем зі штучним інтелектом.

Сформульовані основні проблеми подальшого розвитку автоматизованих систем керування ДВЗ. Викладено схеми КСК двигунів різних типів та призначень, наведено конструкції основних датчиків, виконавчих пристроїв, електронної бази.

Особливу увагу приділено якості керування за науково обґрунтованими критеріями ефективності та стабільності роботи КСК ДВЗ при екс-

плуатації.

У кінці кожного розділу наведено контрольні запитання.

Використання даного підручника дає можливість студентам якісно виконувати курсові і дипломні проекти, аналізувати можливості підвищення технічного рівня перспективних ДВЗ українського виробництва до світових стандартів.

Передмова написана А.П. Марченко; глави 1,2,6 – А.Ф. Шеховцовим, глава 4 – А.П. Марченко; глава 7 – М.К. Рязанцевим; розділи 3.1, 5.2, 5.4, 7.6 – А.Ф. Шеховцовим; розділи 5.1, 5.3 – А.П. Марченко; розділи 3.2, 5.5 – М.К. Рязанцевим; глава 8 – А.П. Марченко та А.Ф. Шеховцовим.

Автори вдячні шановним рецензентам рукопису підручника професорам А.П. Кудряшу та С.А. Єрощенкову за важливі рекомендації щодо поліпшення його якості.

Автори висловлюють глибоку вдячність за допомогу при написанні підручника співробітникам кафедри двигунів внутрішнього згоряння НТУ "ХПІ" та головного конструкторського бюро моторобудівної галузі України ХКБД, м. Харків.

Особливу подяку автори висловлюють І.В. Риковій, Л.Т. Жиліній та І. Е. Усатій за велику роботу по комп'ютерному набору підручника.

Зауваження та пропозиції щодо поліпшення підручника просимо надсилати за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ", кафедра двигунів внутрішнього згоряння"; E-mail: dvs @ kpi. kharkov. ua.

Глава 1. КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ – ГЛОБАЛЬНИЙ ШЛЯХ ЗАПРОВАДЖЕННЯ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ДВИГУНОБУДУВАННЯ

Загально відомо, що саме на двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) припадає понад 80 % установленої потужності світових енергетичних установок [1]. Тому ДВЗ складають енергетичний фундамент автотранспорту, сільського господарства, будівництва, тепловозної тяги, судноплавства, військових засобів, тобто цілком забезпечують потреби найважливіших галузей народного господарства всіх країн.

Подальше вдосконалення ДВЗ дає і даватиме величезний техніко-економічний ефект, пов'язаний із запровадженням високих комп'ютерних технологій у моторобудування, перш за все, в керування двигунами.

Практика переконливо свідчить, що високі експлуатаційні якості силових установок з ДВЗ суттєво залежать не лише від досконалості конструкцій власне двигунів, але і від якості їх систем керування. Це обумовлено головною особливістю ДВЗ – їх використанням у широкому спектрі експлуатаційних режимів при безперервних змінах останніх, коли двигуни працюють на неусталених режимах перехідних процесів скидання-накиду навантаження. Зазначені процеси займають до половини та й більше річного напрацювання, наприклад, чи не наймасовіших автотранспортних двигунів; при цьому параметри робочого процесу швидко змінюються, що значно ускладнює ефективне керування ДВЗ. Тобто керування не має бути пов'язане з фіксованим усталеним, наприклад номінальним, режимом роботи двигуна. Вкрай необхідною є безперервна адаптація робочого процесу двигуна до нестаціонарної моделі його експлуатації відповідно до зміни її умов.

Тому поряд з підвищенням жорсткості вимог до конструкцій ДВЗ неухильно підвищувалися й підвищуватимуться вимоги до систем керу-

вання ними.

У цьому плані слід виділити глобальний напрямок розвитку двигунобудування – створення та впровадження високих технологій у вигляді комп'ютерних систем керування процесами ДВЗ (КСК ДВЗ) з метою забезпечення найкращої експлуатаційної паливної та мастильної економічності двигунів за допустимих рівнів токсичності викидів, надійності, шуму, вібрацій та інших обмежень.

Пріоритет віддається комплексним КСК ДВЗ усіх типів і призначень, оскільки ефективність одночасного керування кількома процесами залежить від глибини взаємозв'язку характеристик останніх за глобальним критерієм кінцевого результату.

1.1. Суттєві переваги електронного керування двигунами

Комп'ютеризація керування двигунами постійно розширюється, що обумовлено принциповими і суттєвими перевагами КСК ДВЗ порівняно з регулюванням на механічній основі.

Принциповими є функціональні позитивні якості КСК ДВЗ, які грунтуються на електронній природі. Так, у мікропроцесорних систем швидкіша реакція на зміни поциклових параметрів робочих процесів двигунів і значно вища швидкодія формулювання й передачі командних сигналів при їх реалізації виконавчими механізмами.

По-друге, саме такі системи здатні забезпечувати багатофакторне керування. Стосовно двигунів, це дає можливість комплексної оптимізації керування при використанні поточної вхідної інформації по спектру первинних параметрів, а не тільки щодо одного впливаючого фактора, наприклад, частоти обертання колінчастого вала при однорежимному механічному регуляторі. До такого спектра параметрів можуть входити: тиск наддуву, циклова витрата палива, кут запізнення вприску (запалювання), компоненти токсидів у відпрацьованих газах, температури й напруження в деталях, зазори у з'єднаннях та багато іншого (до ста й більше вхідних факторів).

Нарешті, за допомогою КСК завжди простіше й ефективніше можуть вирішуватися складні проблеми, викликані необхідністю безперервної адаптації процесів у ДВЗ до нестаціонарної зміни експлуатаційних режимів двигунів, тобто до умов реалізації їх моделей при хаотичних змінах та-

ких режимів. Пояснюється це тим, що власні динамічні характеристики мікропроцесорного каналу адаптації відповідають найжорсткішим нестаціонарним динамічним параметрам процесів у двигунах, що адаптуватимуться, в умовах зовнішніх впливів на силову установку.

Сказане й обумовлює численні суттєві переваги застосування КСК для ДВЗ, що підтверджується їх практичним використанням на більшості двигунів провідних фірм світу, в тому числі в Україні.

Виділимо головні переваги комп'ютерних систем керування двигунами:

- реалізація найскладніших законів керування складом робочої (горючої) суміші при роботі двигуна на будь-якій експлуатаційній характеристиці за рахунок оптимального узгодження на кожному режимі, в кожному перехідному процесі надходження палива й повітря до циліндрів;
- суттєве поліпшення розподілу робочої (горючої) суміші поміж робочими циліндрами двигуна;
- можливість автоматизації змін практично всіх регулювальних параметрів на працюючому двигуні, перш за все, – кута випередження вприскування, фаз газорозподілу, рівня рециркуляції відпрацьованих газів, характеристик систем охолодження й мастильної тощо;
- можливість керування перехідними процесами двигуна, перш за все, їх тривалістю, закидами характеристик двигуна на останній фазі наїду навантаження;
- можливість автоматизації допоміжних функцій керування; йдеться про керування двигунами з перехідними структурами (включення, наприклад, форсажної камери на режимах перевантаження або відключення частини робочих циліндрів на недовантажених режимах роботи двигуна);
- можливість вбудування КСК ДВЗ до складу КСК СУ (силової установки), що забезпечує узгодження керування двигуном й силовим агрегатом; це сприяє оптимізації, наприклад, навантаження двигуна у залежно від умов експлуатації та специфіки систем саме силової установки;
- можливість вбудування діагностичного блока у КСК ДВЗ, що забезпечує автоматизацію профілактичних дій з попередження відмов двигуна під час експлуатації, тобто сприяє підтриманню заданого рівня його надійності.

Інші переваги КСК ДВЗ розглянуто нижче у тих розділах де висвітлюються конкретні функції таких систем керування.

Вище сказане дозволяє зробити висновок, що КСК ДВЗ забезпечують оптимізацію робочого процесу двигунів на всіх режимах (усталених, неусталених) їх роботи. За рахунок цього реально можна суттєво знизити експлуатаційні витрати палива й викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами, шумність, а також поліпшити пускові якості, динамічність і надійність транспортних та інших засобів.

Способи оптимізації зазначених найголовніших показників технічного рівня, а отже, конкурентоспроможності двигунів, як правило, суперечливі, про що мова йдеться нижче. Однак зауважимо, що тільки найвищі чутливість і швидкодія електронного (мікропроцесорного) керування дозволяють розв'язати подібні протиріччя й досягти не компромісних, а дійсно оптимальних експлуатаційних показників ДВЗ.

По суті це означає, що тільки КСК ДВЗ дозволяють реально оптимізувати керування двигуном за заданою комплексною цільовою функцією, наприклад, за середньо-експлуатаційніою витратою палива або за еколого-економічним критерієм [2] при забезпеченні потрібної надійності та інших важливих обмежень.

Сказане й дозволило наголосити вище, що комп'ютеризація керування ДВЗ потребує особливої уваги на тільки як висока технологія, але, перш за все, як найефективніший засіб підвищення якості й конкурентоспроможності енергетичних установок з двигунами порівняно з іншими.

1.2. Напрямки розвитку електронного керування двигунами

Останні десятиріччя характеризуються швидким інтенсивним впровадженням електронної техніки у засоби керування ДВЗ.

Масове впровадження перших модифікацій почалося з 60-х років минулого сторіччя. На початковому етапі мали поширення безконтактні транзисторні системи запалювання і системи вприскування палива з електронним керуванням у двигунах на легкому паливі (з іскровим запалюванням), що були розроблені на основі аналогової техніки.

З середини 70-х років XX ст. аналогова техніка почала швидко замінюватися цифровою, мікропроцесорні системи керування дістали пріоритетного розвитку.

Впровадження електроніки в керування двигунами визначалося необхідністю підвищення паливної економічності, у першу чергу, автомобільних ДВЗ, в умовах постійного зростання вимог до двигунів щодо зменшення викидів токсичних речовин.

Основні переваги КСК ДВЗ першого покоління полягали у можливості реалізації більш точних і складних законів керування випередженням запалювання та складом суміші з урахуванням додаткових контрольованих параметрів, а також у запобіганні обраних регулювань під час експлуатації.

Електронні системи запалювання мали підвищену надійність й дозволяли поліпшити енергетичні показники свічки запалювання. При цьому за рахунок керування часом накопичення енергії у первинній обмотці котушки запалювання забезпечувалася постійність високої напруги незалежно від частоти обертів колінчастого вала й напруги акумулятора. Оптимізація енергетичних характеристик та регулювань системи запалювання дозволило підвищити паливну економічність двигуна на режимах міського їздового циклу на 2...4 %.

Системи вприскування бензину з електронним керуванням забезпечували поліпшення розподілу суміші по циліндрах та більш точне дозування палива за робочими циклами, особливо при перехідних процесах. Усе це, разом з відключенням паливоподачі на режимах примусового холостого ходу, зменшувало викиди токсичних речовин майже на 50 % й витрати палива на 10 %. У 1984 році з 19 бензинових двигунів, що випускалися концерном GM, дев’ять було оснащено засобами електронного керування вприскуванням палива, причому вприскування застосовувалося, починаючи з чотирициліндрових двигунів літражем 1,8 л до двигунів літражем 6 л. Фірма Ford вприскуванням оснащувала 7 моделей автомобілів з 13 з літражами від 1,6 до 5,0 л [3]. Отже майже всі базові моделі мали модифікації з вприскуванням палива.

Наступний етап розвитку електронного керування двигунами (до 1985 року) – це перехід на мікропроцесорні системи керування – КСК ДВЗ.

У цих системах закони регулювання зберігаються у пам’яті системи керування комп’ютера у вигляді одно-, дво- та тривимірних матриць вибраних значень регулювань для ряду дискретних рівнів (2, 8, 16 і більше) навантаження, частоти обертів колінчастого вала, температури охолоджувальної рідини тощо і реалізуються за сигналами відповідних датчиків.

Для проміжних значень вхідних змінних рівні регулювань знаходяться інтерполяцією. Такі “програмні” системи дозволяють задіяти більш складні закони керування двигуном, хоча і за жорстким дотриманням заданої програми керування. Зрозуміло, що у такому разі неможливе реагування двигуна на відхилення експлуатаційних режимів від постійної програми керування. Цей недолік знижує ефект комп’ютерного керування, наприклад, щодо паливної економічності або токсичності викидів. Все ж таки спільне оптимальне керування кутом випередження запалювання й паливоподачею за допомогою програмних систем забезпечує підвищення паливної економічності на 10...12 %

На цьому завершимо огляд розвитку систем локального керування ДВЗ, перш за все – паливоподачею у них , або повітропостачанням.

Розробка цифрових систем керування, що використовують як вхідні сигнали відповідних датчиків, створила економіко-технічні передумови для поєднання цих систем у єдину комплексну КСК ДВЗ. Особливо швидкий розвиток комплексні КСК ДВЗ отримали в США і Японії.

Таким чином, створенням комплексних КСК відзначився наступний етап розробок комп’ютерних систем керування ДВЗ, який почався у 80-х роках минулого сторіччя і триває до цього часу. Потрібні будуть ще 5 – 10 років, аби у конструкціях комплексних КСК ДВЗ були реалізовані всі намічені резерви вдосконалення.

Перші комплексні КСК ДВЗ здійснювали керування паливоподачею й кутом випередження запалювання при програмному підході та використанні всього 5 – 7 датчиків. Однак вже й такі системи дозволяли реалізувати достатньо складні закони керування двигуном. Економія палива при цьому забезпечувалася як за рахунок складного регулювання подачі палива й випередження запалювання залежно від навантаження, частоти обертання колінчастого вала й збереження цих регулювань в експлуатації, так і в результаті корекції керування з урахуванням теплового стану двигуна, особливостей режиму роботи і зміни зовнішніх умов.

На рис.1.1 зіставлено кути випередження запалювання на межі детонації з оптимальними кутами випередження на недетонуючому паливі: 1 – при роботі двигуна по зовнішній характеристиці; 2 – з регулюваннями, що реалізуються у КСК ДВЗ типу Motronic; 3 – з полем регулювань при механічному автоматі випередження запалювання [3]. З рис.1.1 бачимо, що

електронні системи керування ДВЗ дозволяють суттєво наблизити кути випередження запалювання до гранично допустимих за умов детонації й поліпшити потужнісні та економічні показники двигуна.

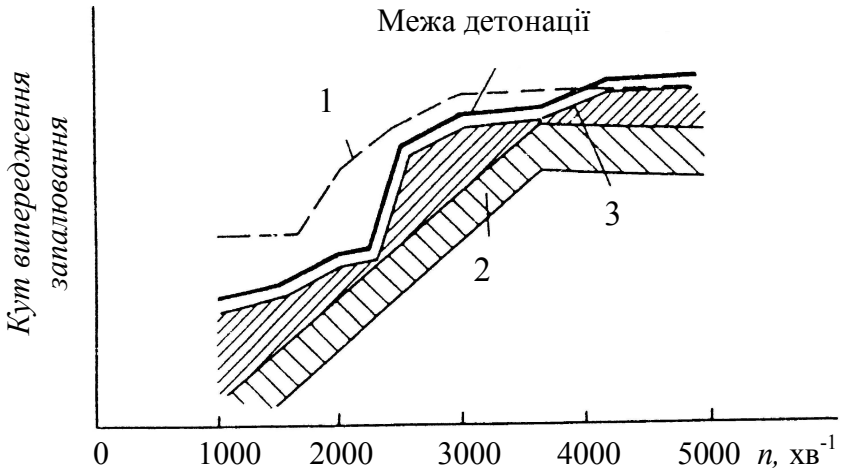


Рисунок 1.1 – Кути випередження по зовнішній швидкісній характеристиці у звичайній системі та в КСК ДВЗ типу Motronic

До введення законодавчого нормування токсичності відпрацьованих газів основна оптимізаційна задача при виборі регулювань систем двигуна формулювалася як пошук законів керування, що забезпечують найкращу паливну економічність на часткових режимах (навантаженнях) і максимум крутного моменту при повному відкритті дросельної заслінки. Як додаткові обмеження приймалися вилучення детонації на детонаційно-небезпечних режимах та забезпечення необхідних їздових якостей автомобіля (силової установки).

Після того, як було введено нормування токсичності відпрацьованих газів і випробувальні їздові цикли для оцінок токсичних та економічних показників, постановка оптимізаційної задачі змінилася. Такі фірми, як General Motors, Ford і Bosch, при пошуку законів керування для програмних КСК визначають регулювання на режимах їздового циклу, виходячи з забезпечення максимально можливої економічності двигуна за умови виконання норм на токсичні викиди за сумою режимів їздового циклу. Регулювання понад режими їздового циклу вибиралися, на основі попередніх

передумов. Такий підхід приводить до складних законів керування, точна реалізація яких можлива лише при використанні електронних систем керування. На рис. 1.2 як приклад наведено тривимірну матрицю оптимального кута випередження запалювання залежно від навантаження й частоти обертання, яку реалізовано у системі Motronic [3].

Аналіз показує, що на режимах їздового циклу кут випередження запалювання зменшується з метою зниження викидів C_nH_m та NO_x (токсичні компоненти відпрацьованих газів), а на режимах поза їздового циклу, де немає обмежень щодо токсичності викидів, кут випередження запалювання збільшується для отримання найкращої паливної економічності. Такий вибір регулювань дійсно повинен забезпечити найкращу паливну економічність двигуна під час експлуатації за умови виконання контрольних норм на токсичні викиди. Однак при використанні їздових циклів, що містять обмежену кількість режимів під час випробувань двигунів, такий підхід до регулювання в умовах експлуатації може не забезпечити зниження токсичних викидів, пропорційного зростанню "жорсткості" законодавчих обмежень щодо токсичності відпрацьованих газів автомобільних двигунів.

Оскільки метод нормування токсичності відпрацьованих газів з використанням їздових циклів побудований на "гладких" законах керування системами двигуна за навантажувальними і швидкісними характеристиками, використання мікропроцесорних засобів для реалізації складних законів керування дозволяє певною мірою формально дотриматись норм токсичності при збереженні високої паливної економічності автомобіля. Такий підхід до вибору регулювань з позицій фактичного зменшення токсичних викидів є досить ефективним, особливо у поєднанні з оснащенням автомобілів системами нейтралізації відпрацьованих газів та збільшенням кількості навантажувальних і шкідливих режимів, що входять до їздового циклу. З цим, можливо, пов'язаний перехід ФРН та інших країн на нормування токсичності автомобілів за американським їздовим циклом. Додаткове зменшення витрат палива й кількості токсидів забезпечується при використанні КСК ДВЗ для поліпшення керування пуском, прогрівом двигуна, а також при управлінні останнім при підключенні паливоподачі на режимах примусового холостого ходу тощо.

Впровадження електроніки в системи керування дизелями почалося значно пізніше, ніж у бензинових двигунах, але швидко розвивається останнім ча-

сом. Досягнуто суттєвих результатів, підтверджених масовою практикою, щодо більш точного підтримання частоти обертання колінчастого вала, перш за все на часткових режимах і на холостих ходах, підвищення усталеності роботи й паливної економічності, в тому числі під час перехідних процесів, зниження токсичності й димності викидів, поліпшення пуску.

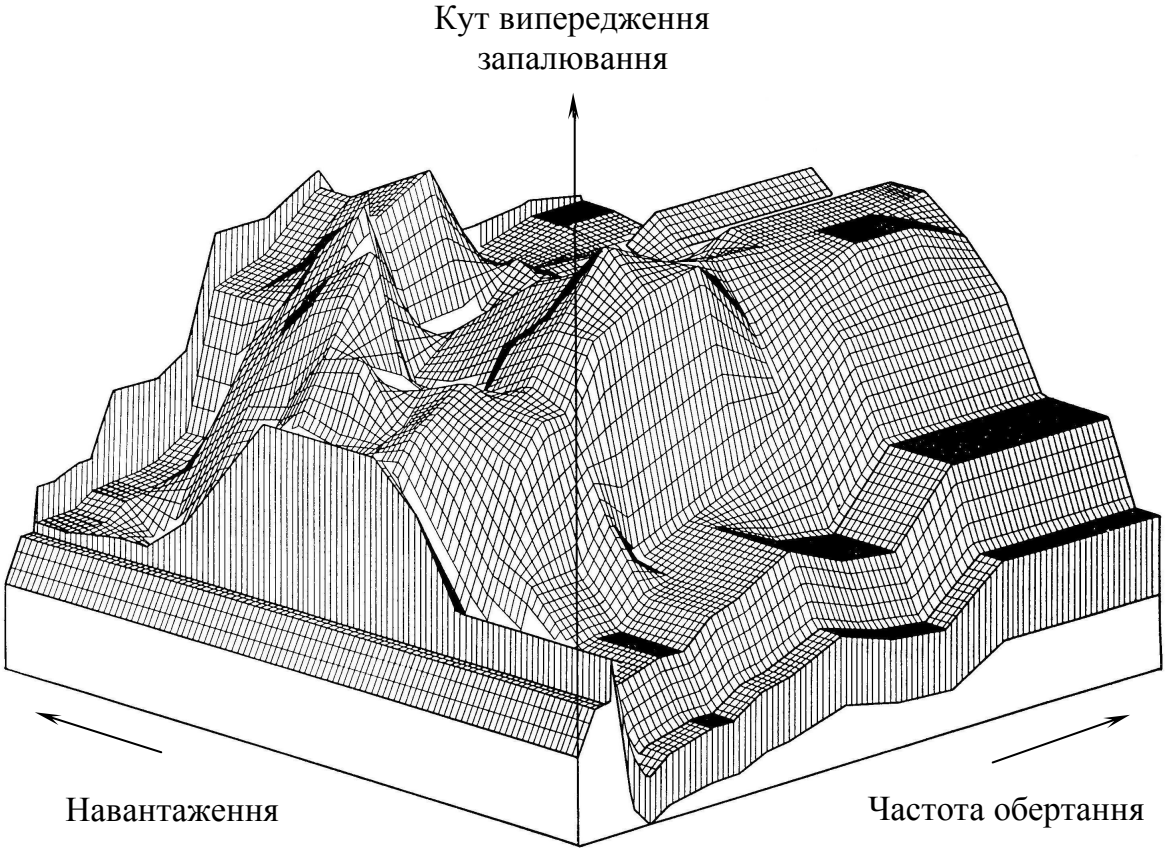


Рисунок 1.2 – Графічне зображення тримірної матриці випередження запалювання КСК ДВЗ типу Motronic

Розвиток комплексних КСК ДВЗ йде сьогодні за кількома напрямками.

Перший напрямок – суттєве (у десятки разів) збільшення кількості змінних, що контролюються, а також підвищення точності їх вимірювань. Саме це дозволяє наблизити регулювання двигунів до оптимального з ура-

хуванням специфіки експлуатаційних режимів та зовнішніх умов.

Збільшення кількості контрольованих змінних пов'язане з розробками нових (на нових фізичних ефектах) і вдосконаленням існуючих датчиків для їх вимірювань. Провідні фірми Німеччини, США, Японії, Франції, Італії, Росії ведуть активні роботи у цьому напрямку. Ними розроблено оригінальні методи вимірювань концентрації O_2 у відпрацьованих газах, масової витрати повітря, величезної швидкості обертання сучасних турбокомпресорів, переміщень виконавчих механізмів керування паливоподачі й повітряпостачанням тощо. Однак проблема створення принципово нових датчиків залишається гострою.

Мова йде про датчики змінних і локальних зазорів у з'єднаннях ДВЗ, експлуатаційних характеристик токсидів у відпрацьованих газах, характеристик детонації, нестаціонарних параметрів робочого тіла у циліндрах та системах двигунів тощо.

Разом з цим збільшення кількості датчиків підвищує вартість КСК ДВЗ і, головне знижує їх надійність. Крім того, корекційна адаптація керування до багатьох зовнішніх впливів потребує (з урахуванням значної кількості змінних) підвищення швидкодії мікропроцесора та збільшення пам'яті, у якій зберігаються закони керування. Тому використання багатьох (сотні й більше) датчиків для підвищеної точності керування двигуном є чи не найголовнішим недоліком сучасних КСК ДВЗ.

Другий напрямок – розробка адаптивних, з зворотними зв'язками, КСК ДВЗ за вихідними показниками.

До таких КСК, що є значно поширеними, належать системи з блоками керування (КБК) стабілізацією стехіометричного складу суміші за сигналами датчиків концентрації кисню у відпрацьованих газах, що й забезпечує ефективну роботу каталітичних нейтралізаторів потрібної дії (трикомпонентних нейтралізаторів NO_x, CO, C_nH_m послідовно).

До подібних КСК з адаптуючими каналами відносять також КБК обмеження випередження запалювання за початком детонації. У таких системах за рахунок використання спеціальних датчиків і логічних операцій вдається забезпечувати адаптацію керування двигуном до іншого ряду умов, що змінюються. Йде інтенсивний пошук інших параметрів, які можна використати як командні сигнали зворотних зв'язків. Ведеться розробка конструкцій відповідних датчиків та виконуючих механізмів, які, зокрема,

реєструють умови перевантаження двигуна за літровою потужністю, теплове перевантаження деталей КШМ або зон безпосереднього контакту поверхонь тертя тощо.

Найбільш повної адаптації керування з урахуванням особливостей двигуна й умов його експлуатації можна досягти при використанням пошукових або екстремальних КСК ДВЗ, що забезпечують автоматичну багатопараметрову оптимізацію за комплексним вихідним параметром двигуна на кожному режимі роботи, а точніше, за будь-якою експлуатаційною характеристикою двигуна. Такі КСК ДВЗ далі називатимуться самонастроюваними.

Основна складність у створенні таких перспективних комп'ютерних систем керування двигунами, які саме й відповідатимуть поняттю високих технологій, пов'язана з відсутністю методів прямого вимірювання основних комплексних показників технічного рівня сучасних та перспективних ДВЗ, які відповідають багатофакторній оптимізації в тому числі – ККД, експлуатаційної питомої витрати палива, експлуатаційних концентрацій токсичних викидів у відпрацьованих газах, показників ефективності систем двигуна та їх основних агрегатів (турбокомпресора, нейтралізатора, проміжного охолоджувача наддувочного повітря, тощо). Дуже важливо мати методи й засоби прямого вимірювання параметрів робочого процесу в циліндрах двигунів, характеристик сумішоутворення й згоряння в них та ін. Датчики для вимірювання таких комплексних параметрів поки що не створено, хоча аналіз патентної літератури останніх 5–10 років свідчать про деякі результати їх інтенсивного пошуку [4].

Для побудови самонастроюваних систем сьогодні використовуються можливості побічної оцінки екстремальних значень економічних та потужнісних показників двигуна. Так, максимум витрат палива можуть бути визначений за тривалістю відкриття форсунки, що вприскує паливо. Такі приклади можна продовжити.

Переважна робота двигунів на перехідних режимах й висока швидкість змін режимів роботи також дуже утруднюють створення самостворюваних систем. Оптимальне їх керування у реальному масштабі часу потребує дуже високої швидкодії й, отже, чутливості систем. Але при підвищенні чутливості погіршується стабільність керування. Вихід з цього положення – розвиток КСК ДВЗ зі змінною структурою, у яких залежно від

умов роботи змінюються логіка керування й чутливість системи [1, 3]. Такий розвиток й означатиме підняття КСК ДВЗ на світовий рівень запровадження високих технологій у двигунобудування.

Необхідна швидкодія забезпечується використанням програмно-адаптивних (таких, що наближаються до власне адаптивних) КСК ДВЗ, де початковий рівень, від якого ведеться настройка системи, визначається програмою, що перебудовується. В останніх системах на основі періодичного контролю параметрів зворотних зв'язків визначаються оптимальні або граничні регулювання й відбувається безперервна перебудова (навчання) програми керування, що зберігається у постійній пам'яті комп'ютера. Елементи перебудови програм включені до перспективних КСК ДВЗ, що створені й створюються всесвітньо відомими фірмами Ford, Bosh, Toyota та ін. [3]. Звичайно поєднання програмного керування з адаптуванням на основі використання зворотних зв'язків для оптимізації керівництва чи перебудови (адаптації) програм по праву вважається перспективним високотехнологічним напрямком розвитку мікропроцесорних систем керування двигунами. У найближчі роки можна чекати не тільки подальших розробок подібних систем, а й значного розширення їх використання на ДВЗ різних призначень.

Третій напрямок – вдосконалення виконавчих пристроїв КСК ДВЗ. Отримали подальшого розвитку конструкції виконавчих пристроїв паливних підсистем керування, запалювання, турбонаддуву, нейтралізації, блока керування рециркуляцією відпрацьованих газів у тракт вприскування (EGR) та ін. (Тут і далі наведено іноземні скорочення термінології, пов'язаної з комп'ютерними системами керування ДВЗ). У них поряд з електропневматичними або електрогідравлічними засобами починають розроблятись виконавчі пристрої – форсунки з більш швидкодіючим електродинамічним, п'єзоелектричним приводами. Розробляються принципово нові малогабаритні електродвигуни тощо [3].

Четвертий напрямок – суттєве розширення функцій керування двигунами. Сучасний автотранспортний двигун працює на усталених і неусталених режимах при змінах у широких діапазонах його навантаження, частоти обертання колінчастого вала й теплового стану. Якщо у бензиновому двигуні керувати тільки дросельною заслінкою, складом суміші й випередженням запалення, а у дизелі – тільки цикловою паливоподачею та випе-

редженням вприскування, як це прийнято у класичній (механічній) схемі керування, то не можна забезпечити високі економічні й динамічні показники автомобіля, особливо з урахуванням існуючих обмежень токсичності відпрацьованих газів.

Компромісний вибір розмірності двигуна, ступеня стиску, інших конструктивних параметрів і характеристик робочого процесу, необхідний для отримання результатів, що задовольняють суперечливим вимогам щодо потужності й крутного моменту, паливної економічності й токсичності викидів двигуна у всьому полі режимів, не дозволяє на кожному режимі забезпечити найкращі принципово можливі показники.

Тому в останні роки значно зріс інтерес до способів і заходів керування роботою двигуна, його систем, перш за все, паливо- і повітропостачання, які б дозволяли оптимізувати основні показники кожного експлуатаційного режиму.

До таких засобів і способів, які вже використовуються або проходять ретельні перевірки, можна віднести введення рециркуляції (ERG), використання керованого наддуву при одночасному зменшенні робочого об'єму двигуна, відключення частини циліндрів або робочих циклів на режимах малих (часткових) навантажень, керування розслоєнням заряду, подачею вторинного повітря до нейтралізатора, кількістю джерел запалювання, роботою схеми вторинного використання теплоти (утилізації енергії відпрацьованих газів) та ін. [3]. У стадії НДР знаходяться двигун із керованими фазами газорозподілу, ступенем стиску та розширення, керованим ступенем турбулізації заряду в камері згоряння, зі змінним ходом поршня та ін. Деякі з цих шляхів впливу на робочий процес двигуна відомі давно, але саме поява електронних систем керування й електрокерованих виконавчих пристроїв відкриватиме нові можливості їх реалізації.

П'ятий напрямок – забезпечення оптимальних режимів роботи двигуна залежно від умов руху та інших видів використання силових установок. Йдеться про спільну автоматизацію керування двигуном і трансмісією, двигуном і навісними агрегатами тощо.

Вже у ранніх розробках фірм Ford, Bosch, Toyota та інших спеціальний датчик фіксував положення важеля коробки передач та з урахуванням цього здійснювалося регулювання двигуна на холостому ході. Пізніше фірмою Toyota було введено блокування включення вищих передач до мо-

менту прогріву двигуна й автоматизовано керування коробкою передач. На автомобілях фірм Ford, General Motors, Chrysler, Renoult та інших електронні системи керування використовуються для автоматизації переключення передач у механічних і гідромеханічних коробках передач. Наприклад, у КСК Ford водій тільки встановлює на селекторі бажану передачу, а керування зчепленням і переключенням передач є автоматизованим. Система Bosch дозволяє водію задати три режими керування: рух з максимальною економічністю, рух з максимальною динамікою (запасом крутного моменту, найшвидшим зрушенням з місця тощо) і, нарешті, ручне керування при русі автомобіля по складних (небезпечних) ділянках трас.

Для подальшого поліпшення паливної економічності та підвищення комфортабельності руху фірмами Bosch і Chrysler введено оптимізацію регулювання систем двигуна та керування дроселем у момент переключення передач. Наприклад, у системі Chrysler безпосередньо перед переключенням передачі подача палива дещо змінюється, але так, що водій таке ледь помічає. Подібна система дозволяє поліпшити комфортабельність й економічність автомобіля. При цьому пробіг автомобіля з цією зазначеною системою зріс на 1,25...1,7 км/л.

Таким чином, п’ятий напрямок розвитку КСК ДВЗ по суті визначає створення комплексного керування силовим агрегатом.

Шостий напрямок – підвищення надійності функціонування власне КСК ДВЗ. Йдеться про фізичну й параметричну надійність, які в електронній системі керування є нероздільними, оскільки фізична надійність керування втрачає сенс без дотримання необхідного терміну стабільної роботи цієї системи.

Це пов’язано з дуже високими вимогами, які ставляться до працездатності електроніки двигунів.

Так, за даними фірми Delco Electronics, елементна база комп’ютерних систем керування при лабораторних випробуваннях має перевірятися при змінах температури навколишнього середовища від – 40 до +125 ºС; вона (елементна база КСК) повинна тривалий термін витримувати температуру +85 ºС; працювати при температурі +35 ºС й 5 % концентрації HCl. Елементи КСК повинні витримувати ударне вібраційне навантаження з частотою 10...35 Гц з прискоренням 20g.

Надійність сучасних мікропроцесорних систем керування є достатньо високою. За даними [3], електронні системи вприскування автомобіля Lincoln мали інтенсивність відмов 1,5 % на 20 тис. км пробігу, тоді як для аналогічних неелектронних систем цей показник значно гірший і сягає 8 %. Однак і сьогодні задача підвищення працездатності КСК ДВЗ залишається актуальною. Для її практичного вирішення в сучасних мікропроцесорних системах керування значно розширюються функції їхнього діагностування, самодіагностування й захисту, функції блокування.

Передбачено контроль заряджения акумуляторної батареї та корекція керування для забезпечення нормальної роботи двигуна при зниженні напруги живлення. КСК ДВЗ запам'ятовують результати контрольних перевірок і виводять їх при обслуговуванні двигуна на спеціальні контрольні прилади. У разі виходу з ладу окремих датчиків або блоків керування (каналів керування) передбачено перехід на резервні ланки, що й дозволяє зберігати можливість керованого руху силової установки.

Сьомий напрямок – вирішення ряду теоретичних питань, створення спеціальних дослідницьких і випробувальних методів, обладнання, приладів для прискорення розробки та вдосконалення КСК ДВЗ нових поколінь.

Значна увага приділялася і приділятиметься науковому обґрунтуванню алгоритмів ефективного керування і відповідних комп'ютерних програм, визначенню оптимальних законів керування (калібруванню), що зберігатимуться у пам'яті систем. Вирішення таких питань ускладнено необхідністю знаходження оптимальних сполучень двох, трьох і більше регулювальних параметрів (щодо паливоподачі, повітропостачання, токсидів, надійності двигуна та ін.) для кожного часткового режиму, які входять до їздового циклу або до моделі експлуатації двигуна конкретного призначення за умови виконання норм та різних обмежень.

На основі широкого обговорення проблем оптимального керування двигунів сформувався комплексний і багатоетапний підхід до вибору потрібних ефективних законів керування. Розвинуто декілька варіантів його реалізації.

У першому з варіантів такого підходу закони керування обираються за результатом розрахункової оптимізації з використанням експериментального визначення (апроксимації) математичних моделей економічних та екологічних характеристик двигуна залежно від режимних і регулюваль-

них параметрів. Подібний математичний експеримент і дозволяє обрати калібровки у квазістатичній постановці.

При розрахунковому моделюванні нескінченний спектр експлуатаційних режимів роботи двигуна конкретного призначення, так звана карта потужності, замінюється матрицею режимів – рядом дискретних сполучень частоти обертання n колінчастого вала двигуна і крутного моменту $M_{кр}$, для кожного з яких визначено час роботи (наприклад, річне напрацювання).

Звичайно, використовують матриці режимів, які складаються із 10...40 режимів [3]. Сумарні викиди палива й токсичні викиди, що визначаються при реалізації матриці режимів, практично є еквівалентними показникам автомобіля при виконанні їздового циклу. Оптимальні регулювання з урахуванням токсичності відпрацьованих газів вибираються тільки для сполучень n та $M_{кр}$, які складають матрицю режимів. Такий підхід розвивався фірмами General Motors, Ford та Bosch, причому було показано, що для їздових циклів (з помірним прискоренням) квазістатичні моделі, що отримані під час стендових випробувань двигуна, дають результати, близькі до фактично одержаних при неусталених активних режимах роботи двигуна під час виконання їздового циклу. Основні розбіжності показників двигунів з іскровим запалюванням у статиці й динаміці пов’язані з невідповідністю складу суміші, що забезпечується законом паливоподачі, та суміші, яка потрапляє до циліндрів з урахуванням осідання частини палива на стінці впускного тракту. Для такого урахування при виборі регулювань на перехідних режимах експериментально знайдено передавальні функції випускних систем. Слід накреслити, що метод заміни широкого поля режимів роботи двигуна матрицею вибірних характеристик експлуатаційних режимів отримав в останні роки поширення.

На кафедрі ДВЗ НТУ “ХПІ” ще раніше було розроблено метод прогнозування експлуатаційних імовірнісних показників ДВЗ на базі використання моделей експлуатації двигунів конкретних призначень [5]. По суті, було запропоновано моделі експлуатації тракторних, комбайнових, автомобільних дизелів, на основі яких можна науково обґрунтувати калібровки (оптимальні закони керування) широкого класу швидкохідних двигунів. Приклади їх наведено на рис.1.3 – 1.5 [2, 5].

Для отримання вірогідних емпіричних математичних моделей прогнозування показників ДВЗ рядом провідних фірм розроблено високопродуктивні автоматизовані стендові установки. Так, на установці концерну General Motors для отримання моделей, що описують показники двигуна в залежності від п'яти параметрів (складу суміші, випередження запалювання, рециркуляції відпрацьованих газів, частоти обертання колінчастого валу та навантаження) витрачено 12 год, причому вимірювання проведено на більш ніж 2000 експериментальних точках.

Другий варіант підходу до вибору законів керування ДВЗ грунтується на експериментальному пошуку оптимальних регулювань у стендових умовах або на автомобілі. Спочатку вибір регулювань також проводили на усталених режимах, що входять до матриці режимів. Потім для цих цілей були створені спеціальні стендові установки, які дозволяють імітувати роботу двигуна при перехідних процесах при виконанні їздового циклу. На таких установках для керування стендом й режимами роботи двигуна під час випробувань, а також для пошуку оптимальних регулювань застосовувались універсальні обчислювальні та керуючі машини. Послідовне поліпшення законів керування під час перехідних процесів досягалося використанням ітеративних процедур. Розроблено ряд різноманітних прикладів і процедур, що забезпечують пошук оптимальних колібровок (законів керування) в режимі розділу часу та в реальному масштабі часу.

Слід наголосити [3], що вибір регулювань повинен проводитися після відпрацювання конструкцій датчиків, виконавчих пристроїв та алгоритмів керування, які буде задіяно у реальній КСК ДВЗ. Тільки у такому разі й можуть бути знайдені регулювання, дійсно наближені до оптимальних.

У подальшому фірмами Fiat, Bosch, Ford, Renoult та іншими для пошуків законів керування були створені спеціалізовані налагоджувальні комплекси, що можуть використовуватись як у стендових умовах, так і при заключному регулюванні двигуна на автомобілі [3]. У таких комплексах звичайно застосовується КСК ДВЗ з датчиками й виконавчими пристроями у сполученні з допоміжними мікропроцесорними системами або з системами, які розширюють функціональні можливості основної КСК і такі, що допускають перепрограмування. Фактично описані комплекси працюють як самонавчальні.

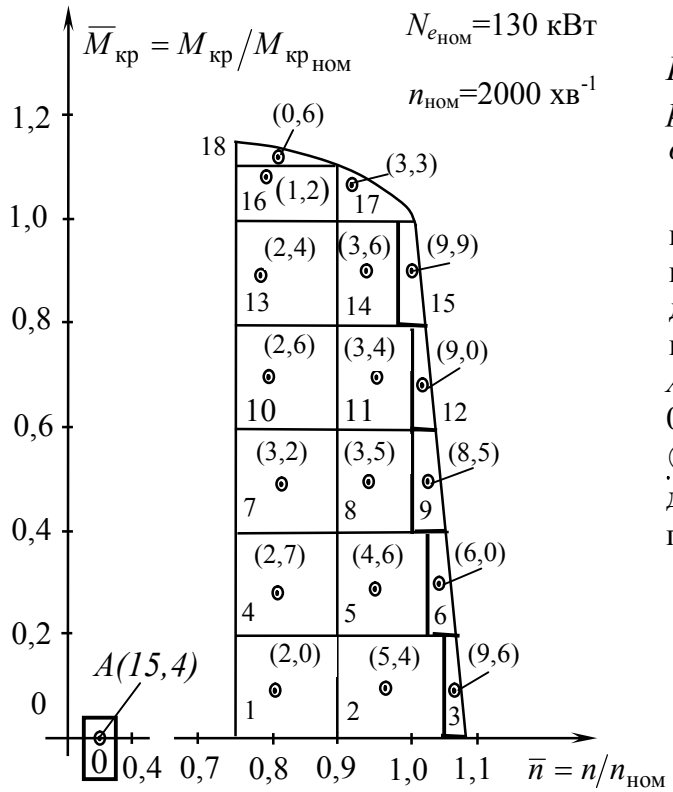


Рисунок 1.3 – Полігони імовірнісних режимів роботи тракторного дизеля СМД-62:

┌ – полігони з Р > 5 %; у дужках подані значення Р(%), де Р – імовірність річного сумарного напрацювання двигуна у експлуатаційному конкретному полігоні;
А – режим холостого ходу;
0 – 18 – номери полігонів;
⊙ – центри полігонів; N_e – потужність двигуна; "ном" – позначка номінального режиму

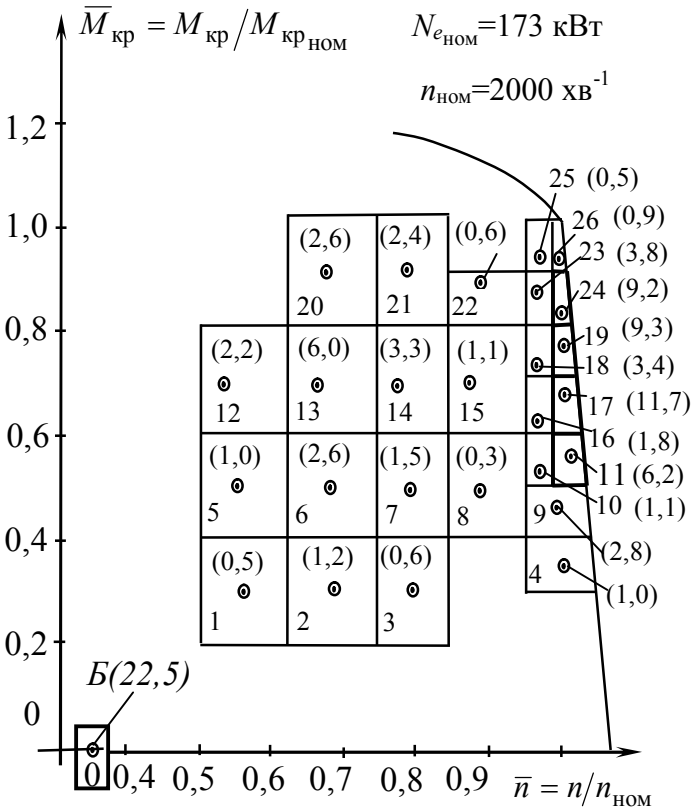


Рисунок 1.4 - Полігони імовірнісних режимів роботи комбайнового дизеля СМД-31А:

Б – режим холостого ходу;
0–26 – номери полігонів; решта позначень відповідають рис. 1.3

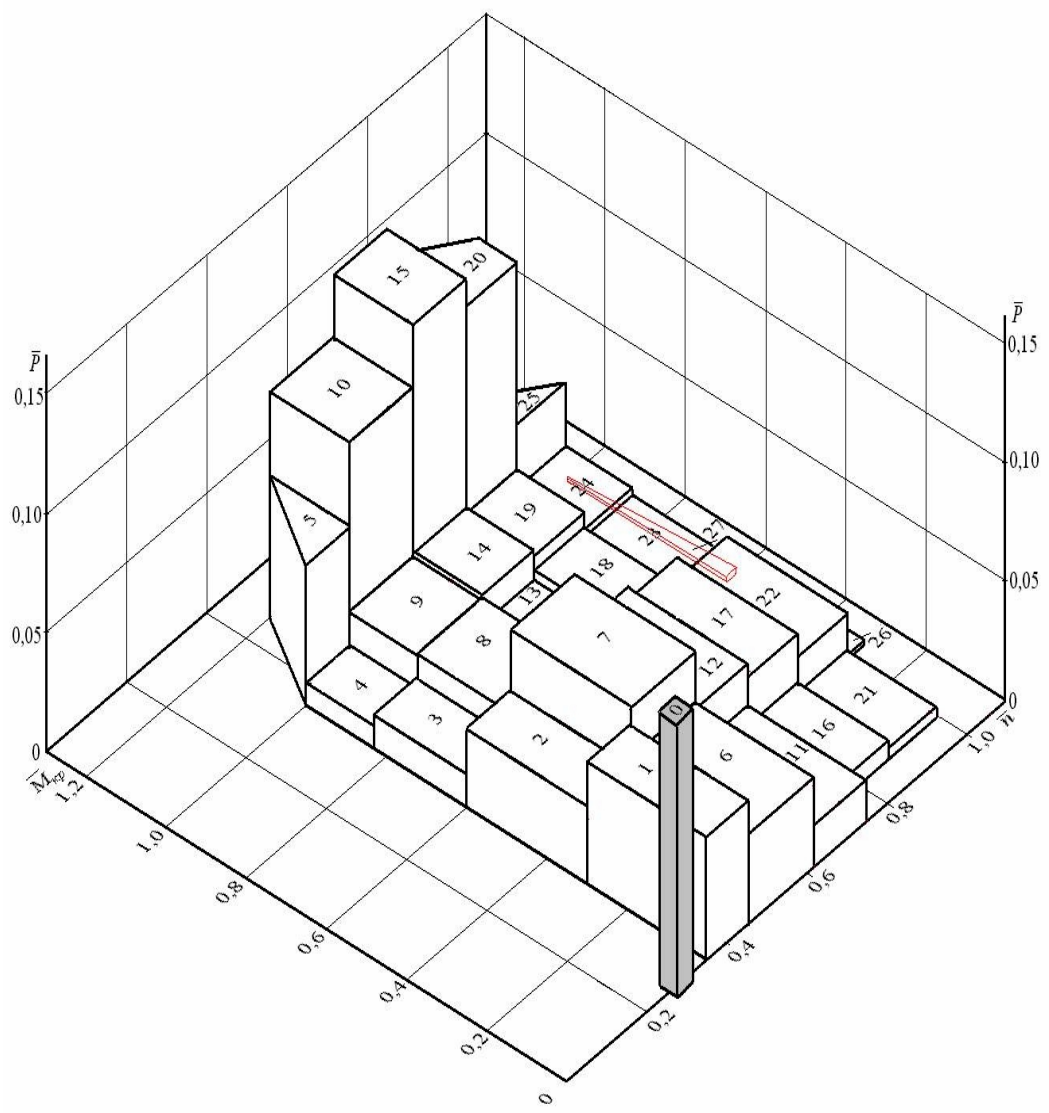


Рисунок 1.5 – Імовірнісні характеристики полігонів експлуатації дизеля вантажного автомобіля при русі по міському й міжміському циклах(позначення відповідають рис. 1.3)

В останні роки особливо актуальним стало питання щодо часу розробки алгоритмів, програм та законів керування. Об’єм функцій систем, отже, складність алгоритмів і програм керування, зростатимуть. Тому для їх розробки потрібно все більше часу. Для кожної модифікації двигуна необхідна своя калібровка КСК, що змушує фірми розробляти десятки калібровок для кожної КСК. Разом з цим електронна техніка й можливості комп’ютерних систем керування ДВЗ швидко удосконалюються. В наслідок життєвий цикл випуску систем до їх морального старіння стає невеликим, що з технічної та економічної точок зору є невиправданими. Подов-

ження терміну виробництва систем може бути досягнуто шляхом проектування мікропроцесорних систем з великою надмірністю (надлишковістю), що дозволятиме змінювати алгоритми й розширяти функції керування, а також шляхом скорочення часу розробки алгоритмів і програм.

Фірмою Ford та деякими іншими створено спеціальні технології розробки алгоритмів і програмного забезпечення, які містять такі етапи: вибір, розробку, аналіз та затвердження стратегії керування; розробка алгоритму; складання і редагування програми керування; трансляція програми на мову мікропроцесора. Процедура розробки програмного забезпечення включає: підготовчі операції; розрахункове моделювання програм та КСУ ДВЗ на ЕОМ обчислювального центру; розробку керування розподілом часу; програмування мікропроцесора.

Нарешті, підкреслимо, що оптимізація на базі емпіричних математичних моделей використовується при відпрацюванні алгоритмів керування і для першого наближення до оптимальних регулювань, а експериментальні методи оптимізації – на стадії остаточного доведення КСК ДВЗ.

Розглянуті етапи та напрямки розвитку електронного керування двигунами збагачують двигунобудівників багаторічним досвідом з електронізації керування ДВЗ. Поряд з цим виникає можливість підсумувати й виділити невирішені ще проблеми подальшого розвитку КСК ДВЗ і впровадження їх на вітчизняних силових установках з перспективними модифікаціями двигунів.

Відзначимо такі вкрай актуальні проблеми:

- перш за все, вирішування фундаментальних питань теорії процесів у ДВЗ, у тому числі нестаціонарних з метою вдосконалення програмно-адаптивного забезпечення КСК;
- розробку нових датчиків для комплексних вимірювань, у тому числі з використанням нових фізичних ефектів; йдеться про датчики безпосереднього вимірювання поточних характеристик робочого тіла у циліндрах та системах двигуна (тиск і температура; коефіцієнт надлишку повітря, залишкові гази; перекисні сполуки; динаміка згоряння; крупномасштабна турбулентність тощо). Дуже важливо також розробляти датчики реєстрації вихідних комплексних параметрів ДВЗ, зокрема питомої втрати палива, питомої токсичності викидів. Актуальним є відпрацьовування і

принципово нових виконавчих пристроїв, у першу чергу для більш точного і стабільного дозування паливоподачі поциклово;

- підтягування КСК дизелями до високого рівня КСК двигунами з іскровим запалюванням;
- термінове відпрацьовування КСК двигунами на альтернативних паливах та багатопаливними з урахуванням підвищення попиту на них;
- глибокі дослідження КСК з оптимальним керуванням за комплексними критеріями мінімальної експлуатаційної втрати палива, найнижчої експлуатаційної токсичності викидів;
- розробку нових, більш ефективних і стабільних нейтралізаторів відпрацьованих газів та відмову від використання дефіцитних дорогоцінних металів;
- при створенні вітчизняних КСК ДВЗ обов'язкове використання уніфікованих їх елементів, у тому числі розроблених кращими світовими фірмами;
- постійне розширення адаптуючих можливостей нових КСК ДВЗ з урахуванням постійних змін експлуатаційних режимів та профілактичного запобігання можливих відмов силового агрегату;
- перехід на обов'язкове вбудування засобів діагностування у КСК ДВЗ.

Вітчизняні вчені [5, 6 та ін.] розробили теоретичні основи для вибору параметрів систем електронного керування ДВЗ. У національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ"), Національному транспортному університеті (НТУ, м. Київ), Інституті проблем машинобудування НАН України (ІПмаш НАН України, м. Харків) та інших наукових закладах розроблено математичні моделі процесів тепловиділення, вторинного використання енергії викидів, нестаціонарного теплообміну, утворення токсидів у циліндрах ДВЗ, тривалої міцності теплонавантажених деталей ЦПГ тощо. Проведено комплексну ув'язку параметрів зазначених процесів у двигунах з метою забезпечення глобального експлуатаційного ефекту керування ними за еколого-економічним критерієм при заданому рівні надійності й обмеженнях щодо токсичності, шумності, вібрацій, тощо.

Відкриття нової спеціалізації в НТУ "ХПІ" "Комп'ютерні системи керування ДВЗ" сприятиме створенню в Україні необхідного потенціалу

розробників КСК для вітчизняних двигунів різних типів і призначень, а також вирішенню наведених вище проблем, пов'язаних з цим.

1.3. Перспективи розширення використання КСК ДВЗ

Зроблені у свій час прогнози щодо використання комп'ютерних систем керування двигунами цілком підтвердились, а отримані результати перевищили найсміливіші очікування.

Електронізація і комп'ютеризація стали невід'ємними показниками високого технічного рівня сучасних транспортних та інших автономних силових установок.

Сучасна силова установка автомобіля (трактора, тепловоза, судна, військового засобу тощо) являє собою об'єкт, здатний автоматично адаптуватися як до умов експлуатації, так і до дій (впливів) зовнішнього середовища. Один або кілька комп'ютерів забезпечують у різних умовах експлуатації оптимальне керування трансмісією, двигуном, гальмівними пристроями та іншими агрегатами автомобіля.

Наведем приблизну номенклатуру елементів КСК автомобіля високого класу. До неї входять:

- комплекс комп'ютерів керування;
- канал інтелектуального ділового спілкування;
- канал контролю біологічних характеристик у салоні;
- локаційні адаптивні канали, що попереджують про можливість наїзду ззаду та підтримують курс і дистанцію;
- канал контролю й екологічної безпеки автомобіля;
- адаптивні канали КСК ДВЗ;
- засоби освітлення шляху, що не засліплюють водіїв зустрічного транспорту;
- канали, що забезпечують оптимальний теплообмін силового агрегату з зовнішнім середовищем та комфорт у салоні;
- блок самодіагностування та інформації про технічний стан автомобіля й двигуна;
- протиугінний пристрій (автоматизований);
- телебачення й радіотелефонний зв'язок.

Така КСК ДВЗ дозволяє забезпечувати поліпшення економічних й динамічних показників автомобіля. Керування ним стає легким, практично не залежить від індивідуальних якостей водія.

Оптимальність дозування палива, кута запалювання та інших параметрів знижує і токсичність викидів.

Ультразвукові й радіолокаційні пристрої запобігають зіткненням, наїздам, різко скорочуючи кількість дорожніх пригод.

Отже маємо приклад перспективного використання КСК ДВЗ.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що у найближчі роки використання КСК ДВЗ розшириться до багатовимірних адаптивних систем мікропроцесорного керування двигунами з елементами штучного інтелекту, здатних вступати у діалоговий обмін інформацією з оператором транспортної чи іншої силової установки [1, 7].

Метою поєднання штучного інтелекту (КСК ДВЗ) з біогенним інтелектом людини є досягнення найвищого рівня керування цими складними системами.

Сьогодні достатньо фундаментально вивчено робочі цикли двигунів і процеси, що їх складають. Це дозволяє достовірно виявити вплив різних факторів на паливно-екологічні й динамічні показники ДВЗ, що і становить основу дуже складної багатофакторної оптимізації робочого циклу двигуна. Складність взаємозв'язків впливових факторів з урахуванням протирічь між ними (наприклад, між економічністю і токсичністю), постійне підвищення жорстких вимог до ДВЗ призводять до того, що сучасні програмно-адаптивні і адаптивні системи керування на базі мікропроцесорної техніки за своїми можливостями можуть і не задовольнити ці вимоги достатньою мірою.

Ситуація ускладнюється і тому, що на всі ці об'єктивні фактори накладаються ще й суб'єктивні, роблячи поки що не досить керованою складну багатопланову систему "двигун–автомобіль–середовище–водій". Численні ДТП тільки підкреслюють недосконаліть керування транспортними засобами з ДВЗ, коли біогенетичний і штучний інтелекти недостатньо поєднані.

Таким чином необхідною умовою розвитку електронних систем керування ДВЗ є комплексне поєднання можливостей біоінтелекту водія зі штучним інтелектом силової установки. Від використання первинних сиг-

налів мозку людини залежить час між прийняттям рішень та їх реалізацією (за умови, як тренування людини, так передачі багатьох функцій керування двигуном (і автомобілем) від водія до КСК ДВЗ (якомога адаптованої).

Сказане означає, що у перспективі найбільш доцільною формою керування робочими циклами ДВЗ та всією силовою установкою стане використання біосистем у комплексі з системами штучного інтелекту [7]. За рівнем інтелекту КСК ДВЗ можна віднести до низького, середнього або високого.

До систем з низьким рівнем інтелекту належать КСК ДВЗ з жорсткими програмами дій, у крайньому разі програмно-адаптивні системи, тобто такі, в яких зберігається основна програма керування. При її порушенні виконується автоматично її відновлення (корекція) за критеріями детонації, димлення тощо.

До систем із середнім рівнем інтелекту відносяться адаптивні багатовимірні керуючі комплекси, що мають можливість розпізнання складних образів, наприклад, специфіки дороги при реагуванні на них завдяки адаптації процесів у ДВЗ до змін умов руху.

І, нарешті, система високого інтелекту, крім обов'язкового й точного розпізнання конкретних образів, повинна мати властивість спілкування з оператором на діалоговій мові за допомогою синтезатора розмови.

Якщо сучасні КСК ДВЗ оцінити за наведеною класифікацією, то їх в основному треба віднести до систем з низьким рівнем інтелекту.

Звичайно, виникає питання, який рівень інтелекту є необхідним для КСК ДВЗ і чи не є надмірними вимога або бажання підвищити рівень їхнього інтелекту.

Виходимо з того, що КСК ДВЗ середнього рівня інтелекту має бути адаптивною багатовимірною КСК, яка забезпечує без втручання водія найвигідніші у даних реальних умовах експлуатації двигуна його енергетичні екологічні, й економічні характеристики.

Система високого інтелекту в даній ситуації повинна повторити всі ці функції, але, на відміну від систем середнього рівня інтелекту, до того ж має розуміти мовні контакти водія, їх практично оцінювати і за допомогою синтезатора вести з ним інтелектуальну розмову (діалог) і пояснювати свої дії, якщо вони суперечать командам водія. Якщо останній наполягає на виконанні його команд, то система високого інтелекту зобов'язана попереди-

ти його про наслідки їх виконання, крім випадків, коли виконання команд водія призведе до аварії. У таких кризових ситуаціях система має працювати незалежно від дій водія. Крім того, система високого рівня повинна вміти безпомилково розпізнавати свого власника (по образу, голосу), бути з ним виключно коректною та старанно, в тому числі на свій розсуд чи за його проханням, інформувати про технічний стан двигуна й автомобіля. Підкреслимо, що у сучасних автомобілях частину зазначених функцій виконує дорожній комп'ютер, але діалогове спілкування відсутнє. Основу систем високого інтелекту становитимуть комп'ютери з декількома мікропроцесорами, великим обсягом довготермінової та оперативної пам'яті, а також складні системи синтезу мови, сприйняття і запам'ятовування відеоінформації про дорожну специфіку тощо.

Можна зробити висновок, що використання КСК ДВЗ з високим інтелектом при сьогоднішньому рівні високих технологій комп'ютерного керування двигунами треба вважати надмірним, оскільки перевищуються вимоги до силових установок масового використання, перш за все, за вартісними критеріями. А от використання адаптивних КСК ДВЗ середнього рівня інтелекту для таких силових установок можна вважати виправданим, тому що:

- обмеження або виключення втручання оператора у керування двигуном зменшує вплив суб'єктивних факторів на процес керування, що підвищує швидкодію та якість формулювання реалізації командних сигналів на адаптацію процесів у ДВЗ до випадкових і різких змін умов експлуатації чи характеристик зовнішнього середовища;
- піднесення на якісно новий рівень автоматизації функціонування багатьох каналів адаптації є єдино можливим заходом забезпечення ефективності та стабільності керування багатовимірними системами керування;
- поєднання переваг КСК ДВЗ середнього рівня інтелекту з якостями саме КСК автомобіля при вбудуванні першої в другу посилить позитивні результати впровадження комп'ютерного керування на двигунах.

Тому впровадження КСК середнього рівня інтелекту становитиме перспективу розвитку моторобудування, перш за все, транспортного.

Поряд з цим перспективність використання КСК ДВЗ зумовлюється ще й другим рядом причин, а саме – збільшенням функцій КСК.

Справа в тому, що однією з тенденцій подальшого розвитку двигунобудування є розробка перспективних модифікацій ДВЗ, в тому числі багатопаливних або здатних працювати на альтернативних паливах (біопаливо, водень тощо), гібридних (газодизелі та ін.), двигунів зі змінною структурою (з відключенням циліндрів, з пропусканням робочих циклів, з форсажною камерою і т.д.). Керування такими нетрадиційними ДВЗ має значну специфіку, пов'язану з відмінами робочих тіл, з підключенням допоміжних силових агрегатів або з виключенням частини з них. Все це значно ускладнює КСК ДВЗ перспективних ДВЗ. Для них потребується розробка нових, спеціальних комп'ютерних систем керування, здатних враховувати допоміжні й дуже складні функціональні потреби керування та адаптації нових процесів у комбінованих двигунах (КДВЗ).

Розробка перспективних КСК ДВЗ зі значно розширеними функціями і є другим перспективним напрямком моторобудування.

По-третє, перспективи впровадження КСК середнього рівня інтелекту пов'язані до того ж з використанням їх можливостей для потреб діагностування не тільки вихідних параметрів робочих процесів (потужність, витрата палива тощо), а й реальних поточних характеристик цих процесів (сумішоутворення, запалювання, згоряння, енерговикористання, включаючи вторинну утилізацію енергії відпрацьованих газів тощо). Реалізація складних задач діагностування зазначених процесів у ДВЗ сприятиме вивченню та програмуванню оптимальних законів керування ними.

Завершуючи цей розділ підкреслимо, що досвід використання КСК ДВЗ виявляє безперечні перспективи підвищення їх функціональної ефективності.

Контрольні запитання та завдання

1. Чому комп'ютеризація керування є глобальним шляхом запровадження високих технологій у двигунобудування?
2. Які суттєві переваги електронного керування ДВЗ?
3. Чому тільки КСК ДВЗ спроможні реально оптимізувати керування двигуном?
4. Які існують напрямки розвитку мікропроцесорного керування двигунами?

5. Як можна охарактеризувати етапи розвитку КСК ДВЗ?

6. Чим відрізняються шляхи розвитку КСК дизелів та двигунів з іскровим запалюванням?

7. Які розробки вчених кафедри ДВЗ НТУ “ХПІ” сприятимуть розробці вітчизняних КСК ДВЗ?

8. Як розробляються програми керування двигунами?

9. Для чого створюються й використовуються моделі експлуатації двигунів внутрішнього згоряння різних призначень?

10. Як відпрацьовується оптимізація законів керування ДВЗ?

11. Якими є проблеми подальшого розвитку КСК ДВЗ?

12. Який внесок роблять вчені кафедри ДВЗ НТУ “ХПІ” у створення систем електронного керування ДВЗ?

13. Якою є номенклатура елементів КСК ДВЗ для автомобіля високого класу?

14. Які рівні інтелекту можуть мати КСК ДВЗ?

15. Чим виправдане використання адаптивних КСК ДВЗ середнього рівня інтелекту для перспективних двигунів?

16. Які перспективи має впровадження КСК ДВЗ на нетрадиційних двигунах?

17. Які перспективи має впровадження КСК ДВЗ середнього рівня інтелекту з вбудованим блоком діагностування?

18. Які можна сформулювати перспективи підвищення функціональної ефективності КСК ДВЗ за матеріалами глави 1?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шеховцов А.Ф. Комп’ютерні системи керування ДВЗ: Навчальний посібник. – Харків: ХДПУ, 1995. – 256 с.

2. Парсаданов І.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия: Монография. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с.

3. Итоги науки и техники, серия «Двигатели внутреннего сгорания», том 4, «Автомобильные двигатели». – М.: ВИНИТИ, 1995, с.193 – 206с.

4. Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», отдельный выпуск, – М.: ВИНИТИ, 2000, №№1-12; 2001, №№ 1–12, 2002, №№ 1–12.

5. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / Ф.И. Абрамчук, А.П. Марченко, Н.Ф. Разлейцев, Е.И. Третяк, А.Ф. Шеховцов, Н.К. Шокотов; Под. ред. А.Ф. Шеховцова – К.: Техника, 1992. – 272 с.

6. Процессы в перспективных дизелях / Под ред. А.Ф. Шеховцова. – Харьков.: Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1992. – 352 с.

Глава 2. ВИМОГИ ДО МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТА ПРИНЦИПИ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

Йтиметься про забезпечення необхідної якості керування за обраними у главі 1 критеріями.

2.1. Вимоги до КСК ДВЗ

Конкретні вимоги до КСК ДВЗ, звичайно, обумовлені специфікою керуючих дій. Однак можна сформулювати загальні вимоги, задоволення яких сприяє реалізації таких дій з найбільшим техніко-економічним ефектом при забезпеченні стабільності та безвідмовності роботи КСК під час експлуатації.

Треба при цьому виходити з задач, сформульованих вище у главі 1.

До зазначених вимог відносять [1]:

1) раціональний вибір командного параметра;

2) складання коректної програми ув'язування командного параметра з кінцевим ефектом, який повинна забезпечити КСК;

3) реалізація принципу оптимальності в КСК;

4) реалізація принципу дискретно-індивідуального керування циклом ДВЗ;

5) забезпечення принципу програмного керування у КСК з низьким рівнем інтелекту;

6) реалізація принципу адаптивності в КСК середнього та високого рівнів інтелекту;

7) реалізація принципу модульності, уніфікації та стандартизації при розробці КСК;

8) забезпечення можливості вбудування локальної КСК у комплексну КСК ДВЗ;

9) забезпечення можливості вбудування КСК ДВЗ у КСК силової

установки (автомобіля тощо);

10) забезпечення фізичної надійності роботи КСК ДВЗ за результатами структурного аналізу передачі й перетворення інформації у ній; формулювання на цій основі вимог до надійності як окремих елементів, вузлів, так і КСК у цілому;

11) забезпечення параметричної надійності КСК ДВЗ в експлуатації на основі принципу самодіагностування;

12) забезпечення аварійного захисту двигуна;

13) забезпечення ділового спілкування оператора з двигуном;

14) інші вимоги.

Повністю усі наведені вимоги стосуються КСК середнього та високого рівнів інтелекту.

КСК низького рівня інтелекту, тобто системи сьогоднішнього дня, враховують тільки частину наведених вимог, зокрема не враховують зовсім або частково позиції 8, 9, 11, 13.

Загальні вимоги до КСК ДВЗ, шляхи і принципи їх реалізації можна розбити на дві групи:

- пов’язані з забезпеченням ефективності керування процесами у двигунах;
- пов’язані з забезпеченням параметричної стабільності та надійності КСК ДВЗ під час експлуатації.

До першої з цих груп належать позиції 1–6 та 13. Друга група вимог включає позиції 7–12.

Загальні вимоги до КСК ДВЗ конкретизуємо на прикладах керування двигуном з іскровим запалюванням або дизелем.

2.2. Забезпечення ефективності керування процесами у двигунах

2.2.1. Раціональний вибір командного параметра

Йдеться про вибір параметра, адекватного керуючій дії.

Поршневі ДВЗ, на відміну, наприклад, від газових турбін, слід віднести до двигунів з дискретним процесом згоряння. У них хімічна енергія палива перетворюється у механічну окремими цикловими порціями, тобто дискретно. Тому керування дозуванням палива доцільно здійснювати також поциклово за параметром, який характеризує ефект вигоряння палива і

залежний від цього стан робочого тіла у кожному окремому робочому циклі.

В карбюраторах, наприклад, командним параметром, що визначає дозування палива, є витрата повітря через дифузор, яка дає можливість здійснювати безпосередній, без проміжних ланок, вплив на дозування палива. Однак при цьому виникає принципове протиріччя, яке пов'язане з використанням визначеного командного параметра, і полягає в тому, що дозування палива в карбюраторі реалізується як процес, обумовлений безперервно пульсуючою течією повітря, а споживання горючої суміші у поршневих ДВЗ відбувається дискретно, тобто окремими цикловими порціями.

Дискретність паливоподачі особливо треба враховувати при управлінні перехідними процесами ДВЗ, коли поциклове керування залишається єдино прийнятним, хоча велика швидкодія змін неусталених режимів, які складають перехідні процеси, значно ускладнює засоби поциклового дозування паливоподачі.

Виходячи з усього сказаного, логічно використати інший командний параметр, який визначає власне поциклове дозування палива, а саме: масове заповнення циліндра повітрям за один цикл $G_{\text{ц}}$, тобто – масу кисню.

Циклова витрата повітря, отже, й окислювача, від якої залежить необхідна доза палива та у підсумку – коефіцієнт надлишку повітря й еколого-економічні показники двигуна, складається з трьох складових:

$$G_{\text{ц}} = G_{\text{осн}} + G_{\text{дод}} - G_{\text{звор}} \tag{2.1}$$

де $G_{\text{осн}}$ – основна циклова витрата повітря з моменту відкриття впускного клапана і до моменту переміщення поршня у НМТ; $G_{\text{дод}}$ – циклова витрата повітря, яка додатково надходить до циліндру при русі поршня від НМТ до моменту закриття впускного клапана; $G_{\text{звор}}$ – циклова витрата повітря, яку повернуто назад до впускного тракту при русі поршня від НМТ до моменту закриття впускного клапана.

З цієї умови

$$G_{\text{ц}} = p_{\text{звк}} V_{\text{звк}} \Big/ RT_{\text{звк}} \tag{2.2}$$

де $p_{\text{звк}}, V_{\text{звк}}, T_{\text{звк}}$, – відповідно тиск, об'єм і температура горючої су-

міші у момент закриття впускного клапана. При точному визначенні $G_{\text{ц}}$ треба ураховувати масу залишкових газів у циліндрі на цей момент.

Оскільки $V_{\text{звк}}$ та R – стабільні, то

$$G_{\text{ц}} \approx C\frac{p_{\text{звк}}}{T_{\text{звк}}} \tag{2.3}$$

Таку циклову порцію повітря й треба дозувати при управлінні повітропостачанням циліндрів двигуна на будь-якому експлуатаційному режимі його роботи або під час перехідних процесів.

Теоретично залежність (2.3) визначає обґрунтований командний параметр при розробці засобів мікропроцесорного керування паливоподачею ДВЗ за критерієм раціонального (оптимального) рівня коефіцієнта надлишку повітря.

Зараз кращі фірми відпрацьовують умови реального застосування цього командного параметра на двигунах масового використання.

Вони виходять з необхідності прямих і безперервних вимірювань параметрів $p_{\text{звк}}, T_{\text{звк}}$, які потребують спеціальної стробоскопічної малоінерційної апаратури з датчиками, що встановлюють у порожнині циліндра подалі від стінок. Застосовуються датчики з новими фізичними ефектами (скловолоконна оптика тощо), термоанероїдні засоби та ін.

У літературі з’являються відповідні патенти, що свідчить про деякий прорив на одному з принципових напрямків підвищення ефективності електронного керування ДВЗ на основі використання нестаціонарних командних сигналів, що найбільш відповідатиме реальним умовам протікання робочих процесів у циліндрах ДВЗ.

Однак такий перспективний підхід ще не набув масового впровадження.

Сьогодні переважає досить обмежений підхід, що цілком грунтується на квазістаціонарному тлумаченні масового наповнення циліндра. Як командний параметр, що характеризує масове наповнення циліндра, доводиться використовувати $p_{\text{труб}}$ – абсолютний тиск у впускному трубопроводі, а як корегуючий параметр – температуру газу в зоні впускного клапана. Це пов’язано з тим, що в ДВЗ наповнення циліндрів, за інших рівних умов, залежить у першому наближенні від середнього тиску в циліндрі під час процесу впуску, який, у свою чергу, обумовлюється тиском у впускному

трубопроводі.

Параметр $p_{труб}$ є зручним для складання програм керування дозуванням паливоподачі. По-перше, $p_{труб}$ при стабільній температурі повітряного заряду практично на всіх експлуатаційних режимах двигуна забезпечує досить адекватну інформацію про масове наповнення циліндрів. По-друге, має здатність впливати на чутливі елементи без стробоскопіювання.

Звичайно, деяка невідповідність командного параметра $p_{труб}$ нестаціонарності робочого процесу ДВЗ, а тим більше перехідних процесів, погіршує якість роботи КСК ДВЗ.

Інші приклади раціонального вибору командних параметрів КСК ДВЗ наведено далі, у розділах, що описують різні схеми комп'ютерного керування системами двигунів, адаптивними каналами.

Однак із наведеного прикладу можна зрозуміти логіку підходу до вибору раціонального командного параметра системи керування.

2.2.2. Складання програми реалізації керувальної дії

Означена вимога формулює необхідність при розробці КСК ДВЗ складання коректної програми керування на базі зв'язку обраного (раціонального) командного параметра з кінцевим ефектом, який зобов'язана забезпечити така система керування.

Залежно від технічного завдання (ТЗ) на КСК ДВЗ можна скласти різні програми дозування, наприклад, палива: програми забезпечення найкращої паливної економічності, найменшої токсичності відпрацьованих газів або найкращої динаміки силової установки.

Можуть, нарешті, складатися й комплексні програми [1].

У розглянутому вище прикладі керування дозуванням палива у бензиновому двигуні метод розробки будь-якої з перелічених програм полягає у знятті й обробці регулювальних характеристик двигуна за складом горючої суміші, за навантажуючими показниками й рівнями паливної економічності. За результатами таких експериментів визначається спектр режимів. Чим більшою буде кількість призначених режимів, тим точніше буде складено програму керування двигуном. Практично достатньо урахувати 40–50 режимів, тобто зняти 40–50 регулювальних характеристик, де перебираються такі регулювання, як кут випередження (кут випередження вприскування), фази газорозподілу, режими навантажувальних характеристик, ха-

рактеристики паливної апаратури.

Після зняття та обробки регулювальних характеристик для кожного експлуатаційного режиму знаходяться циклові витрати палива, які відповідають мінімальним питомим витратам палива й максимальним потужностям двигуна.

Програма забезпечення найкращої паливної економічності складається як залежність потрібної циклової витрати палива $G_{\text{пал}_{\text{ек}}}$ від $p_{\text{труб}}$ (або від $G_{\text{ц}}$ – циклової витрати повітря) при мінімальній питомій витраті палива $g_{e\min}$ та частоті обертання колінчастого вала двигуна $n = \text{const}$.

Крім того, слід передбачити можливість корекції програми за умовою дотримання залежності $G_{\text{пал}_{\text{ек}}}$ від n при $p_{\text{труб}} = \text{const}$ та $g_{e\min}$.

Відповідно програми забезпечення найкращих динамічних показників силової установки (автомобіля і т.д.) має вигляд залежності $G_{\text{пал}_{Ne=\max}}$ від $p_{\text{труб}}$ при $N_e = \max$.

На практиці обидві такі програми поєднують у комплексну програму, при якій на часткових навантажених режимах реалізується програма найкращої економічності, а на повному навантаженні – програма найкращих динамічних показників. Перехід з однієї програми на іншу в реальних системах керування здійснюється автоматично за допомогою датчика економайзера або закладається до пам’яті мікропроцесора.

На рис. 2.1 показана програма дозування паливоподачі для двигуна типу ЗІЛ-431410 [1], яку розроблено за умовами:

а – найкращої паливної економічності;

б – мінімальної токсичності відпрацьованих газів;

в – максимальної потужності.

Тут: I – зона виключення датчика економайзера;

II – зона паливоподачі на режимах примусового холостого ходу.

Програма задається функцією $G_{\text{п}}(p_{\text{труб}})$ або функцією тривалості командного електричного імпульсу $\tau_e(p_{\text{труб}})$. Останній виробляється мікропроцесором разом з його периферійними пристроями за сигналами $p_{\text{труб}}$ і подається на виконавчий пристрій підсистеми дозування паливоподачі.

Підкреслимо, що програма рис. 2.1 відображає локальну програму керування паливоподачі. Вище було показано, що на практиці дозування паливоподачею є невід’ємним від дозування повітропостачання, оскільки кінцевий ефект керування двигуном має бути націлений на забезпечення

оптимальних значень α (коефіцієнта надлишку повітря) на кожному експлуатаційному режимі, які, як відомо, досягаються за рахунок і паливо-, і повітроподачі.

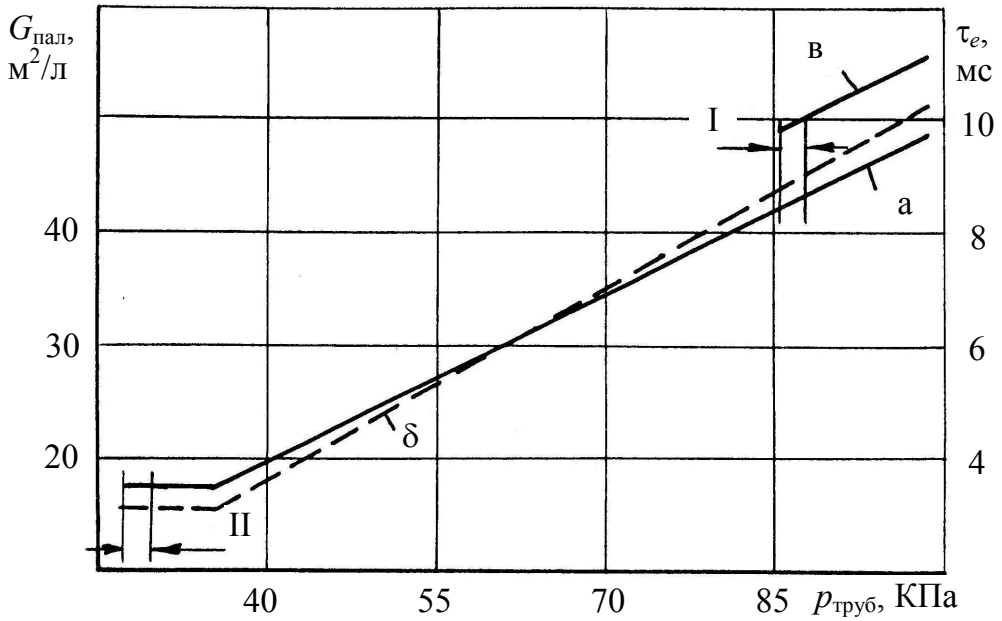


Рисунок 2.1 – Програма керування дозуванням палива

Далі будуть наведені й інші приклади складання програм реалізації керувальних діянь КСК двигунів з запалюванням.

Вище розглядалася методика складання програми керування за результатами натурних експериментів дослідних зразків двигунів.

У р. 1.2 повідомлялося, що кращі фірми успішно реалізують і чисельні експерименти за розробленими математичними моделями процесів у ДВЗ та силовій установці в цілому.

Наведемо приклад такого перспективного підходу при створені програми керування дизель-агрегату дизель-потягу ДЕЛ 01 на основі двигуна типу 6ДН. Ця розробка виконана в 2002 році у ХКБД, м. Харків [2].

Розглядається задача, яку покладено на мікропроцесорну систему керування частотою обертання колінчастого вала *n* та потужністю навантаження, що обумовлюється положенням *h* рейок ПНВТ. Задачею передбачено підвищення техніко-економічних показників дизель-агрегату для дизель-потягу.

Розв’язок подібної задачі передбачається отримати за рахунок розро-

бки і використання в мікропроцесорній системі оптимальних алгоритмів керування.

Як основні критерії оптимальності було обрано:

1. Забезпечення розгону й гальмування дизель-агрегату по позиціях контролера машиніста (ПКМ) з мінімально можливими відхиленнями положень рейок паливних насосів (ТНВТ) від їхніх оптимальних, з точки зору паливної економічності, значень при одночасному забезпеченні заданого темпу збільшення і зменшення значення *n*.

2. Зниження до мінімуму закидів значення *n* при скиданнях-накидах навантаження на дизель-агрегат.

3. Забезпечення роботи дизеля на кожній ПКМ при постійному положенні рейок ПНВТ у зоні найкращої економічності (при найменших для кожної ПМК питомих витрат палива, що й обумовить найнижчий рівень експлуатаційної витрати палива).

4. Досягнення оптимальних показників перехідних процесів навантаження генератора при змінах ПМК, скиданнях-накидах навантаження на дизель-агрегат.

При цьому критерії 1 і 2 повинні забезпечуватись алгоритмом контуру (каналу) керування рівнем *n*, а критерії 3 і 4 – алгоритмом контуру (каналу) керування потужністю навантаження дизель-агрегату.

Алгоритм керування рівнем *n* було вибрано у вигляді:

$$E - K_1\left(U_j - V_w\right) + K_2\int_0^t R_w dt - K_3\frac{dV_w}{dt}, \qquad (2.4)$$

де $$R_w = \begin{cases}(U_j - V_w), \text{при } \left|U_j - V_w\right| \le \Delta I;\\ 0, \text{при } \left|U_j - V_w\right| > \Delta I.\end{cases}$$

Тут U_j – задавання значення *n*, що визначена ПМК; V_w - відпрацьований сигнал датчика величини *n*; E – команда (сигнал) керування значенням *n*; ΔI – зона інтегрування; K_1, K_2, K_3 – параметри пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) закону керування величиною *n*;

Для забезпечення можливості варіювання темпу розгону й гальмування дизель-агрегату в алгоритмі (2.5) передбачено логічне уповільнювання задавання частоти обертання U_j при стрибкоподібній зміні відпра-

цьованого сигналу контролера машиніста $U_{км}$ при різкій зміні ПКМ у вигляді співвідношення:

$$T_j \frac{dU_j}{dt} + U_j = U_{км}, \qquad (2.5)$$

де
$$T_j = \begin{cases} T_{j_1}, \text{ при } \dfrac{dU_j}{dt} > 0; \\ T_{j_2}, \text{ при } \dfrac{dU_j}{dt} < 0, \end{cases}$$

тут T_{j_1} та T_{j_2} – константи часу уповільнення.

Оптимізація параметрів алгоритму (2.5), (2.6) керування частотою обертання колінчастого вала дизеля $\left(K_1, K_2, K_3, \Delta I, T_{j_1}, T_{j_2}\right)$ здійснювалася на комплексному моделювальному стенді з реальною мікропроцесорною системою керування дизель-агрегату та його математичною моделлю, як об'єкта керування, що реалізувалася на обчислювальній машині стенду. При цьому стенд забезпечував можливість відтворення усіх типових експлуатаційних режимів роботи дизель-агрегату: скидання і накиди навантаження, розгони й гальмування по ПКМ тощо.

Для оптимізації значень параметрів, що входять у наведені співвідношення, були побудовані перерізи меж усталеності у просторі параметрів $\left[K_1, K_2, K_3\right]$, а також проведено оцінку впливу усіх параметрів на якість перехідних процесів, як за частотою обертання, так і за положенням рейок ПНВТ при змінах ПКМ, а також при скиданнях і накидах навантаження.

У результаті були визначені:

- оптимальні значення параметрів ПІД закону керування $\left(K_1 = 3...4{,}5; K_2 = 1/64; K_3 = 16\right)$, при яких забезпечувалася стійка робота дизель-агрегату на всіх режимах, і перехідний процес при 100%-му скиданні навантаження відбувався без коливань, з забросом частоти обертання n менш 2% (34 хв$^{-1}$), тривалість перехідного процесу τ = 1 с (перехідний процес наведено на рис. 2.2);
- параметри уповільнення T_{j_1} і T_{j_2}, а також зона інтегрування ΔI $T_{j_1} = T_{j_2}$ = 5 с, та (ΔI = 150 хв$^{-1}$), при яких отримано мінімальне відхилення

рейок ПНВТ від їх заданих (оптимальних) значень при розгоні (від n= =1200 хв$^{-1}$ до n = 2200 хв$^{-1}$) й гальмуванні (від n = 2200 хв$^{-1}$ до n = =1200 хв$^{-1}$) без виходу на зовнішню характеристику – на 4,5 мм та в положенні “стоп” – на 2,5 мм при заданому темпі розгону й гальмування τ = 16 с; перехідні процеси без уповільнення та з уповільненням наведені на рис. 2.3, 2.4.

Контур (канал) керування потужністю навантаження дизель-агрегату забезпечує оптимальне, з точки зору питомої витрати палива, значення положення рейок ПНВТ ($h_{опт}$) на кожній ПКМ. При цьому, параметром керування в даному контурі є значення положення рійок ПНВТ ($h_{вимір}$), що визначає для кожного значення n ($n_{кол.вала}$) для кожної ПКМ ступінь завантаження дизель-агрегату.

Залежність $h_{опт}=f(n_{кв})$, експериментальна чи розрахункова, заноситься в пам’ять мікропроцесорної системи керування у вигляді числового масиву (таблиці), формули. Підтримання постійного оптимального значення ($h_{опт}$) на кожній ПКМ здійснюється за рахунок формування сигналу $U_{збудж}$ у вигляді напруги, яка надходить до системи керування збудженням генератора.

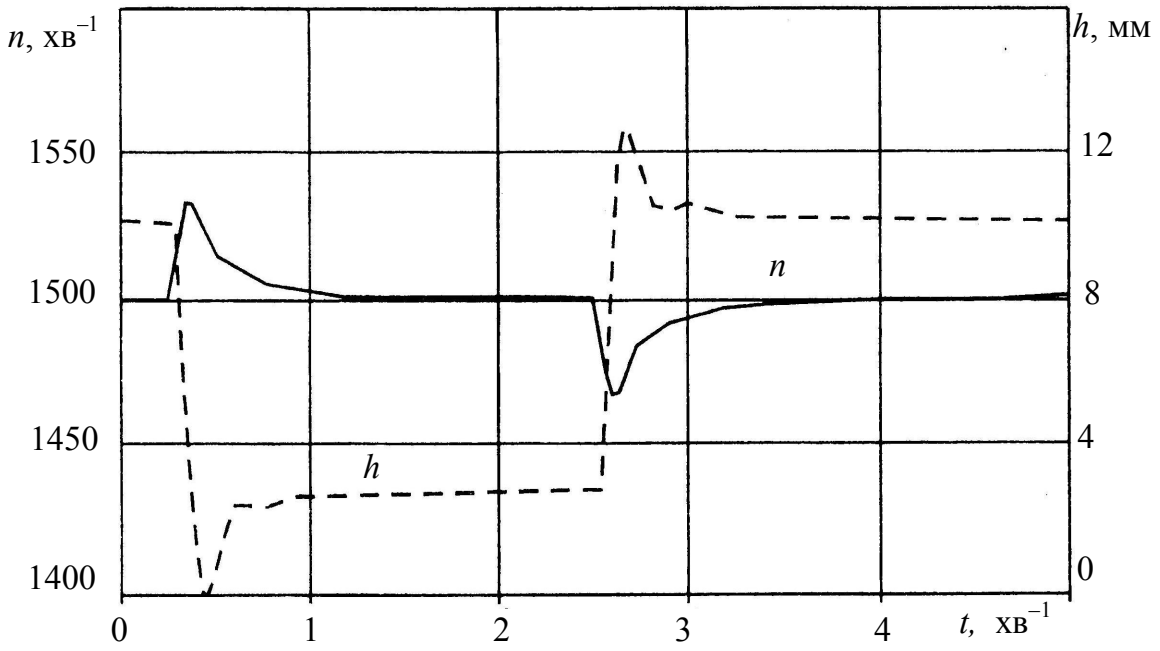


Рисунок 2.2 – Скидання / накид навантаження дизель-агрегату дизель-потягу ДЕП-01

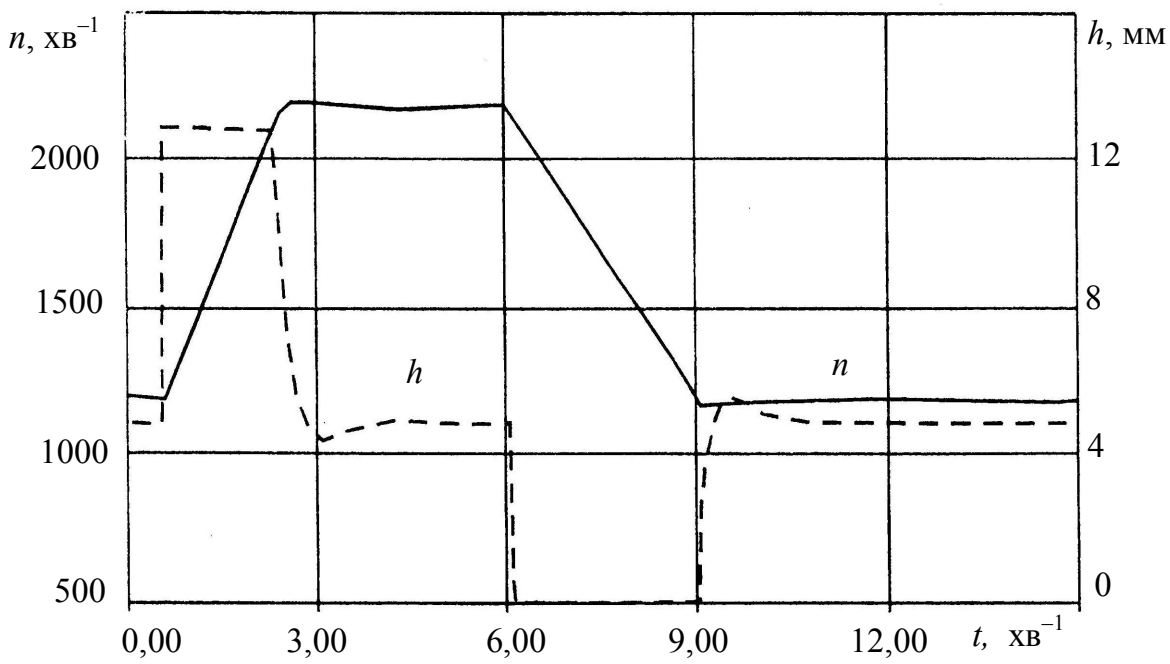


Рисунок 2.3 – Розгін / гальмування без уповільнення $T_{j_1} = T_{j_2} = 0$

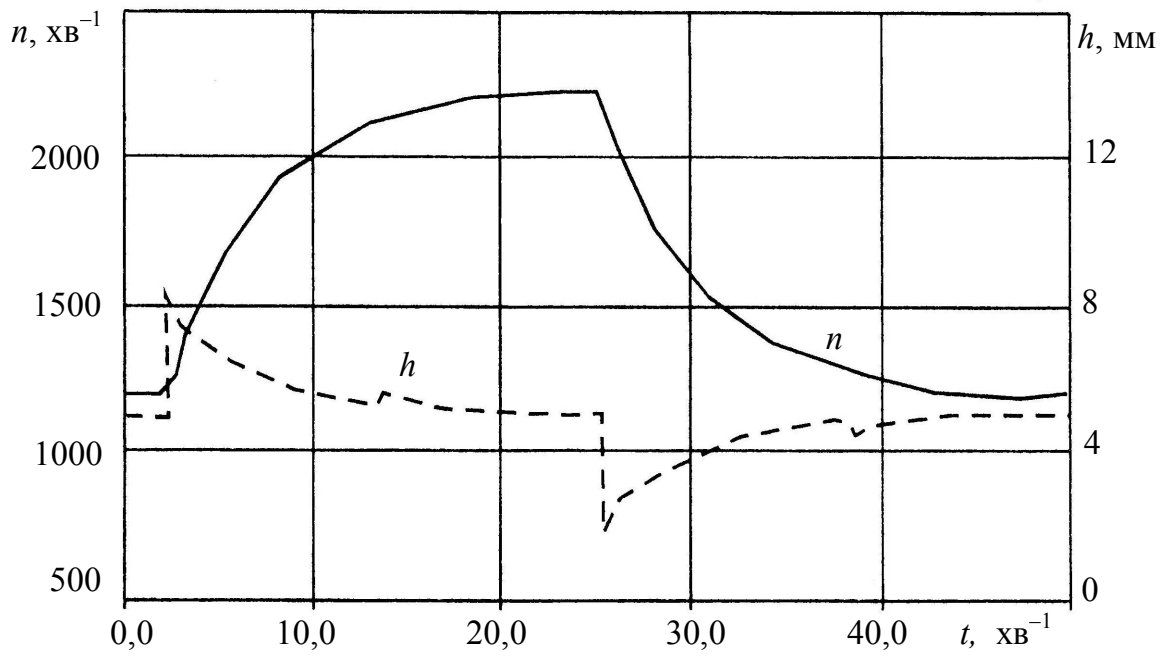


Рисунок 2.4 – Розгін / гальмування при $T_{j_1} = T_{j_2} = 5$ с

Алгоритм формування керувального сигналу $U_{\text{збудж}}$ при роботі на І-1 ПКМ $\left(\frac{dU_j}{dt}=0\right)$ прийнятий у вигляді

$$U_{\text{збудж}} = K_4(h_{\text{опт}} - h_{\text{вимір}}) + K_5\int_0^t (h_{\text{опт}} - h_{\text{вимір}})dt\,, \qquad (2.6)$$

де $h_{\text{вимір}}$ – поточне положення рейок ПНВТ (відпрацьований сигнал датчика положення рійок ПНВТ).

На кожній ПКМ значення $U_{\text{збудж}}$ обмежена границями ($0 \geq U_{\text{збудж}} \leq R_i$) з метою запобігання перевантаження дизеля. Параметри K_4, K_5 визначені за умови забезпечення мінімальних відхилень рейок ПНВТ від їх оптимальних значень $h_{\text{опт}}$ при скиданнях і накидах навантаження на дизель-агрегат.

При переключенні ПКМ значення $U_{\text{збудж}}$ обмежене згідно з таким алгоритмом:

$$U_{\text{збудж}} = \begin{cases} \leq R_i, \text{ при переході з i - ої на (i + 1) - у ПКМ } \left(\frac{dU_j}{dt} > 0\right); \\ \leq R_{i-1}, \text{ при переході з i - ої на (i + 1) - у ПКМ } \left(\frac{dU_j}{dt} > 0\right). \end{cases} \qquad (2.7)$$

Наведений алгоритм визначає специфіку протікання перехідного процесу навантаження дизель-агрегату при переключенні ПКМ:

◑ при переході з нижньої ПКМ на більш високу позицію спочатку збільшується *n* до заданого значення, а потім здійснюється з заданим темпом навантаження генератора, який визначається значенням обмеження $U_{\text{збудж}}$ на більш високу ПКМ;

◑ при переході з вищої ПКМ на нижчу зменшення $U_{\text{збудж}}$ здійснюється стрибкоподібно до обмеження, що відповідає нижчій ПКМ.

Таким чином, створення оптимізованих алгоритмів і програм керування дизель-агрегату, їх реалізація у мікропроцесорній системі керування частотою обертання колінчастого вала двигуна та потужністю навантаження дизель-агрегату забезпечує оптимальне, з точки зору паливної економічності, керування названими характеристиками.

Тому мікропроцесорна (комп'ютерна) система керування дизель-

агрегату з оптимізованими алгоритмами забезпечує, як свідчать випробування, значний техніко-економічний ефект, у тому числі:

- ✓ поліпшення паливної економічності, а також зниження димності і токсичності відпрацьованих газів за рахунок експлуатації дизель-агрегату в зоні найкращої економічності без виходу на зовнішню характеристику;
- ✓ заданий (плавний без ривків) темп розгону й гальмування дизель-агрегату по ПКМ без закидів частоти обертання;
- ✓ мінімальні (≤ 2 %) закиди частоти обертання при 100 % скиданні навантаження на дизель-агрегат.

2.2.3. Реалізація принципу оптимальності

Реалізація такого базового для керування принципу грунтується, перш за все, на конкретній постановці та розв'язанні відповідної оптимізаційної задачі.

Має бути розроблена математична модель керованого процесу (процесів). Підкреслимо, що слід примітизувати оптимізаційну задачу за рахунок надмірних спрощень. Отже, КСК ДВЗ на основі величезних можливостей електронної системи, керованої мікропроцесором, здатна в принципі забезпечити і лінійну, і нелінійну, безперервну або дискретну оптимізацію будь-якого, найбільш складного процесу у двигуні.

Розробку КСК з урахуванням сказаного слід починати з обґрунтованого вибору об'єкта і критерію оптимальності (функціонала якості) для керованого процесу (процесів), отримання на основі математичної моделі цього процесу функції цілі й визначення варійованих факторів.

Необхідно далі сформулювати вихідні дані й обмеження задачі оптимізації, вибрати найбільш ефективний метод її розв'язання, розробити алгоритм для конкретної ПЕОМ й отримати кількісні оцінки впливових факторів та меж таких впливів, що забезпечують оптимум функції цілі.

Важливо дослідити ступінь коректності отриманого розв'язку задачі оптимізації за результатами натурного моделювання процесу, що вивчається.

Усі особливості й конкретні проблеми постановки і розв'язання задач оптимізації основних процесів у ДВЗ вивчаються у спеціальному лекційному курсі "Оптимізація процесів у ДВЗ", який читається на кафедрі ДВЗ НТУ "ХПІ", і становлять предмет навчального посібника, виданого

професором Є.І. Третяком [3]. У цьому посібнику наведено всі сучасні математичні підходи й приклади отримання оптимальних розв'язків для робочих процесів у двигунах, процесів у паливній апаратурі, для термонапруженого стану деталей ЦПГ тощо.

Ознайомлення з проблемами оптимізації потребує також вивчення і використання досвіду ІПМаш НАН України, Національного транспортного університету (м. Київ), Харківської державної академії залізничного транспорту, Національної автомобільно-дорожної академії (м. Харків) та інших розробок конструкторських моторобудівних бюро України, кращих світових фірм.

Підкреслимо тільки, що кінцевим результатом розрахунково-теоретичного етапу реалізації принципу оптимальності при побудові КСК ДВЗ мають бути оптимальні закони варіювання впливових факторів, що забезпечують бажаний ефект за обраним критерієм оптимальності керованого процесу (процесів).

Саме подібні закони й повинні реалізуватися при створенні КСК ДВЗ, при нових розробках, що націлені на розширення їх функцій і, взагалі, на підвищення якості керування двигунами з допомогою електронних засобів. Треба зробити акцент на тому, що оптимізація параметрів ДВЗ на усталених режимах їх роботи не може викликати нездоланних труднощів з урахуванням накопиченого банку фундаментальних й прикладних математичних моделей практично всіх основних процесів у двигунах, які розроблено до цього часу.

Однак ситуація суттєво ускладнюється, якщо виходити з необхідності врахувати найважливішу специфічну особливість ДВЗ, у першу чергу – транспортних, що полягає у вирішальній ролі перехідних процесів та неусталених режимів (які їх складають) у формуванні експлуатаційних показників і робочих характеристик сучасних двигунів. Ця проблема висвітлена у гл. 1. Тому розглянемо питання про теоретичне забезпечення принципу оптимальності при створенні КСК ДВЗ з урахуванням перехідних процесів.

Візьмемо як приклад бензиновий двигун.

Зазначимо, що у такому двигуні перехідні процеси з позитивним прискоренням неможливо здійснити з максимальною швидкістю при збіднених економічних складах горючої суміші.

Із цього витікає, що для оптимізації паливної економічності двигуна

з урахуванням перехідних процесів не можна використовувати як параметр, що оптимізується, тільки питому витрату палива, бо не будуть забезпечені ще й необхідні динамічні якості двигуна [1]. Таке може стати неприйнятним, наприклад, у міських умовах використання автомобіля.

При різкому збільшенні частоти обертання колінчастого вала n виникає потреба змінити (доповнити) параметр, що оптимізується.

Доцільно паливну економічність оцінювати витратою палива, віднесеною не тільки до одиниці потужності, але й до одиниці кутового прискорення колінчастого вала. В такому разі критерій оптимальності не може залишатися стаціонарним і навіть квазістаціонарним; він суттєво ускладнюється у зв'язку з бажаним врахуванням нестаціонарності, оскільки кутове прискорення колінчастого вала змінюється по ходу перехідного процесу, причому – суттєво.

Запропонована зміна параметра, що оптимізується, зумовлена тим, що суттєві порушення процесів сумішоутворення, теплова інерція деталей камери згоряння й інерція масового наповнення двигуна призводять до погіршення паливної економічності при різкому збільшенні частоти обертання колінчастого вала в перехідному процесі. Тому оптимізація мінімальних питомих витрат палива g_e на неусталених режимах, які складають перехідні процеси, неминуче призведе до погіршення динамічних якостей двигуна і транспортного засобу, що в умовах експлуатації неприпустиме. Для забезпечення оптимального дозування паливоподачі при різкому збільшенні n КСК ДВЗ має автоматично переключатися на урахування параметра двигуна, що враховує його динамічні якості, а саме кутового прискорення ω колінчастого вала.

Таким чином, замість $dg_e / dG_{\text{пал}} = 0$ (однофакторна умова досягнення оптимуму на усталених режимах) слід прагнути до оптимуму, виходячи з умови $d\acute{\omega} / dG_{\text{пал}} = 0$ (двофакторна умова досягнення екстремуму при перехідних процесах різких накидів навантаження, коли також різко змінюються значення n). Тут $G_{\text{пал}}$ – циклова витрата палива. Іншими словами, коли КСК ДВЗ доручити оптимізацію дозування питомої витрати палива на усталеному режимі, то забезпечується оптимальний режим, який відповідає мінімуму функції цілі $g_e = f(G_{\text{пал}})$; при різкому ж збільшені n система керування має забезпечити вже екстремальний режим, що відповідає максимальному значенню нової функції цілі $\acute{\omega} = \psi(G_{\text{пал}})$, тобто по суті – ком-

плексного критерію якості двигуна (він гармонізує співвідношення між компонентами такої якості щодо паливної витрати і динаміки двигуна).

Наведемо інший приклад застосування комплексного еколого-економічного критерію при розробці алгоритму керування ДВЗ.

Сьогодні значно зросли вимоги до таких показників конкурентоспроможності, перш за все, автотранспортних двигунів, як паливна економічність та екологічність. Тому виникає нагальна потреба оптимізації керування ДВЗ саме щодо g_e та $g_{\text{токс}}$, де $g_{\text{токс}}$ – питомі викиди токсидів з відпрацьованими газами.

Теоретично це означає, що доречно паливну економічність оцінювати витратою палива, віднесеного не тільки до одиниці потужності, а й до одиниці токсичності викидів. Інакше кажучи, потрібно застосувати комплексний еколого-економічний критерій оптимальності $dG_{\text{токс}} / \Delta G_{\text{п}} = 0$ з урахуванням обох наведених показників технічного рівня та роботи двигуна на перехідних процесах.

Виходить, що КСК ДВЗ забезпечує оптимальний режим там, де функція цілі $g_e = f(G_{\text{пал}}) = \min$; при різкому накиді навантаження, тобто при роботі двигуна на неусталених режимах, умовою оптимуму стає співвідношення $dG_{\text{токс}}/\Delta G_{\text{пал}} = 0$, яке випливає з необхідності пошуку компромісу між витратами палива і викидами токсичних речовин з відпрацьованими газами. Як буде показано нижче, оптимуми g_e та $g_{\text{токс}}$ припадають на різні склади горючої суміші, тобто не є сумісними щодо впливових факторів. КСК ДВЗ шукає і знаходить компромісне значення α на будь-якому експлуатаційному режимі, коли мінімізовано g_e при нормативних рівнях токсичних компонентів у відпрацьованих газах двигуна.

Необхідно зауважити, що розробка математичних моделей саме перехідних процесів ДВЗ ще не завершена. Це гальмує вдосконалення КСК ДВЗ за рахунок урахування всієї специфіки перехідних процесів.

Доводиться розробку алгоритмів керування перехідними процесами у ДВЗ базувати на експериментах, про можливість та ефективність яких йшлося вище у підрозд. 2.2.2.

На завершення наведемо приклад розробки комплексного еколого-економічного критерію як основи створення алгоритмів оптимального керування ДВЗ. Така розробка виконана І.В. Парсадановим у 2003 році в НТУ “ХПІ” [4].

Показано, що коли віднести середній експлуатаційний ефективний КПД двигуна $\eta_{e_{\text{сер}}}$ до коефіцієнту екологічної ефективності β_0, то отримуємо комплексний еколого-економічний (паливно-екологічний) критерій ДВЗ $K_{\text{пе}}$. Він враховує технічний рівень двигунів щодо таких найважливіших його показників, як паливні витрати та витрати на відшкодування збитків, неминуче пов'язаних з забрудненням навколишнього середовища токсидами викидів.

Використання $K_{\text{пе}}$ дозволяє проводити аналіз компромісної ситуації, коли треба приймати рішення про допустиме підвищення витрат на паливо за умови зменшення до нормативного рівня вимог сумарних паливо-екологічних витрат. Виникає також можливість оцінки такого рішення з урахуванням потенціальних витрат на можливу суттєву реконструкцію двигуна порівняно з витратами на запровадження (або вдосконалення) систем і заходів нейтралізації викидів токсидів з відпрацьованими газами. Тому запропонований критерій може використовуватись для складання алгоритму оптимальної програми керування двигуном за еколого-економічним критерієм.

Відповідні розрахунки ведуться за формулою:

$$K_{ПЕ} = \eta_{e_{\text{сер}}} \big/ \beta_0$$

де
$$\eta_{e_{\text{сер}}} = 3600 \big/ (H \cdot g_{e_{\text{сер}}}) \qquad (2.8)$$

$$\beta_0 = B_{\text{екол}} \big/ (B_{\text{пал}} + B_{\text{екол}})$$

Тут:

H_u – нижча теплотворність палива; $g_{e_{\text{сер}}}$ – середня експлуатаційна витрата палива, вона визначається при стендових випробуваннях двигуна на представницьких режимах його роботи, які зумовлені моделлю експлуатації ДВЗ конкретного призначення. Модель експлуатації, як відзначалося у гл. 1, обирається з урахуванням типу і призначення двигуна, а також за статистичними даними щодо його річного напрацювання на кожному представницькому режимі, коли

$$g_e = \sum_{i=1}^{z} \left(G_{\text{пал}_i} P_i \right) \Big/ (N_{e_i} P_i), \text{ г/(кВт·год)}; \qquad (2.9)$$

де P_i – частка річного напрацювання двигуна у кожному i-му полігоні моделі експлуатації; z – загальна кількість експлуатаційних представницьких

полігонів (режимів), що з прийнятою загальною імовірністю наближають модель експлуатації до реальних умов використання двигуна; $G_{\text{пал}_i}$, N_{e_i} – відповідно, погодинна витрата пального та експлуатаційна потужність двигуна на і-ому представницькому режимі; $B_{\text{екол}}$ – витрати на відшкодування збитків, пов'язаних з забрудненням навколишнього середовища при експлуатації двигуна; вони пропорційні концентраціям шкідливих компонентів відпрацьованих газів CO, NO_x, C_nH_m та інш.; $G_{\text{пал}}$ – витрати на споживання палива двигуном.

Комплексний еколого-економічний критерій залежить від ряду факторів:

- обраної моделі експлуатації (кількості представницьких полігонів і часткового напрацювання двигуна на кожному з них);
- масової витрати палива на кожному з представницьких режимів, що характеризує паливну економічність двигуна під час експлуатації;
- масових витрат шкідливих речовин, що викидаються в навколишнє середовище з відпрацьованими газами двигуна на кожному з представницьких полігонів з урахуванням їхньої агресивності;
- показника відносної небезпеки забруднення територій, де використовується двигун з урахуванням характеру розсіяння відпрацьованих газів;
- від характеристик палива.

Урахування численних впливових факторів дозволяє наближати керування двигуном до рівня потрібної конкурентоспроможності моторної техніки.

2.2.4. Реалізація принципу дискретно-індивідуального керування циклом ДВЗ

Такий принцип керування означає, по-перше, що КСК ДВЗ повинна забезпечувати дозування паливоподачі для кожного циліндра індивідуально.

З урахуванням великої ролі перехідних процесів КСК ДВЗ має також керувати й окремими циклами, тобто працювати дискретно.

Взагалі, цей принцип визначає керування кожним робочим циклом (дискретно) в окремому циліндрі (індивідуально) двигуна.

Механічне керування не вирішує задачу реалізації зазначеного прин-

ципу, при цьому переускладнюється конструкція виконавчих пристроїв та інших елементів регулятора. Лише при використанні КСК ДВЗ можна розв'язати поставлену задачу дискретно-індивідуального керування паливоподачею.

Реалізація розглянутого принципу залежить від можливостей отримання коректної інформації щодо параметрів кожного робочого циклу у кожному окремому циліндрі.

Перш за все, слід визначити, яка саме інформація потрібна для побудови зазначеного варіанта керування та як її отримати. Бажано мати цю інформацію за первинними параметрами, тобто за такими, що характеризують кожний робочий цикл з необхідною повнотою і, головне, достовірністю. При цьому треба виходити також з потреби враховувати неідентичність послідовних циклів у циліндрах двигуна, яка на усталених режимах сягає 10 %, а при перехідних процесах, природно, навіть перевищує такий рівень.

Підкреслимо, що дії КСК ДВЗ мають базуватися на забезпеченні (підвищенні) ідентичності робочих циклів на усталених режимах як у кожному окремому циліндрі, так і між циліндрами. На неусталених режимах масова подача горючої суміші (повітря) у окремі циліндри повинна змінюватися під час перехідного процесу строго синхронно (з точністю порядку 1 %).

Цього можна досягнути двома шляхами.

Перший – за рахунок забезпечення однакового масового наповнення кожного циліндра на усталеному режимі роботи двигуна; природно, що і послідовні (за часом) робочі цикли також мають бути однаковими щодо циклового масового наповнення. Синхронність масового наповнення окремих циліндрів при перехідному процесі двигуна можна забезпечити, наприклад, індивідуальним керуванням фазами і час-перерізом органів газообміну або керуванням індивідуальними дросельними заслінками у кожному впускному каналі. При цьому потрібно досягати необхідної (<1,5 %) рівномірності подачі палива у кожний циліндр.

Другий шлях забезпечення ідентичності робочих циклів – за рахунок адаптації (корекції) керування повітро та паливопостачанням, тобто всі елементи керування повітрям і паливом повинні бути програмно-адаптивними (адаптивними), такими, що реагують на порушення дискрет-

но-індивідуального керування циклом ДВЗ.

Однак основною проблемою при створенні КСК ДВЗ є розробка та організація масового виробництва датчиків, характеристики яких дозволяють використовувати їх для автоматичного регулювання дуже різноманітних і складних процесів у ДВЗ, перш за все таких, що відрізняються високочастотною нестаціонарністю – тепловою, газодинамічною, хіміко-кінематичною.

Найбільш складним є отримання об'єктивної інформації щодо процесу згоряння. Поки що задовільно розв'язано лише задачу реєстрації прискорення корпусної деталі двигуна з налаштованою на неї деталі кріплення (наприклад, болту кріплення головки блока), що досить надійно свідчить про начало детонації.

Для побудови простіших систем керування, наприклад, одновимірної системи регулювання кута випередження запалювання, допустиме використання інформації від віброакустичних датчиків. Однак цього зовсім недостатньо для отримання повної інформації про нестаціонарні характеристики кожного робочого циклу (значення тиску і температури у реальному режимі часу, в першу чергу).

Для ліквідації дефіциту в таких експериментальних даних розробляються досить складні датчики з використанням різних фізичних ефектів. Так, одним з варіантів нових вимірювальних приладів є датчик у вигляді пружної мембрани, вмонтованої в корпус, який укручений (подібно свічці для запалювання) у головку циліндрів. З протилежного боку мембрани в її корпус вмонтовано два світловоди. Таким чином, мембрана одним своїм боком спрямована на камеру згоряння двигуна, а іншим боком, відполірованим до дзеркального блиску, – на згадані світловоди волоконної оптики. По одному з світловодів на мембрану подається пучок світла, а по іншому– відводиться відбитий від мембрани потік світла. Внаслідок дії на мембрану тиску газів вона прогинається, і частина відбитого потоку світла спрямовується до відвідного світловоду на світлодіод, який перетворює світлову інформацію в електричний сигнал, що залежить від поточних змін тиску в циліндрі двигуна. Використовуючи інформацію про зміни тиску в циліндрі, можна визначити характеристики і параметри робочого тіла, встановити індикаторні показники, знайти оцінки токсичності викидів, кількісно оцінити ефект детонації. Так, знаючи тиск p і робочий об'єм циліндра $V_{\text{р}}$ (тоб-

то масу робочого тіла), обчислюють поточні температури робочого тіла на основі рівняння стану й переходять до критичних температур робочого тіла, які не допускають інтенсивного утворення оксидів азоту NO_x. У результаті інтегрування експериментальної функції $p = f(\varphi)$ (φ – кут обертання колінчастого вала) за цикл знаходять середній індикаторний тиск, а маючи значення частоти обертання цього вала, встановлюють дискретні значення індикаторної потужності в кожному циліндрі. Після того як сигнал p буде продиференційовано двічі, визначають прискорення зміни тиску, що й дозволяє кількісно оцінити детонацію.

Узагальнюючи викладене, можна стверджувати, що дискретно-індивідуальне керування циклом двигуна грунтується на виконанні такого обсягу вимірювань, які робляться лише при дослідницьких стендових випробуваннях двигунів. Результати таких вимірювань реалізуються безпосередньо на автомобілі або іншій силовій установці з тим, аби після необхідної математичної обробки інформації від відповідних датчиків перетворювати її у команди керування, що забезпечуватимуть потрібну ідентичність не тільки послідовних робочих циклів кожного циліндру, а й ідентичність усіх циліндрів.

Крім того, КСК ДВЗ забезпечить автоматичне корегування параметрів кожного робочого циклу таким чином, щоб цикли здійснювались з найвигіднішими показниками для реальних нестаціонарних умов експлуатації.

Створюючи нові КСК ДВЗ, всі зазначені суттєві переваги треба враховувати при обґрунтуванні доцільності ускладнювання системи керування за рахунок використання дискретно-індивідуального принципу керування. Переваги повинні мати пріоритетне значення і сприяти втіленню їх у перспективних розробках КСК двигунів різних призначень, у тому числі українського виробництва.

2.2.5. Забезпечення принципу програмного керування

Найпростіше жорстке програмне керування сьогодні майже витіснено програмно-адаптивними системами й залишилося у тих модифікаціях двигунів, які ще знаходяться в експлуатації. Однак його розгляд дає можливість визначити базові підходи створення сучасних найскладніших КСК ДВЗ.

Для ефективності роботи будь-якої системи керування необхідні дві обов’язкові умови:

1) стабільність виконання заданої програми протягом всього терміну експлуатації КСК;

2) відсутність недопустимого непогодження заданої програми з реальністю, зумовленою конкретикою експлуатації.

Якщо перша умова, яка залежить від конструкції, якості виготовлення системи керування, може бути забезпечена, то друга умова в повному обсязі нездійсненна внаслідок жорсткості програми керування.

Простежимо особливості неадаптованого керування на прикладі паливної підсистеми такого керування – однієї з двох основних підсистем, залишаючи поза увагою КПСК повітропостачанням.

Якість роботи підсистеми паливоподачі КСК ДВЗ з програмним керуванням залежить від правильності вибору командного параметра та від коректності задання програми.

Розглядаючи звичайний карбюратор як автоматичну систему дозування паливоподачі, вже в ньому можна розпізнати усі ознаки системи з програмним керуванням. Для головної дозуючої системи карбюратора командним параметром є тиск (вакуум) у дифузорі, а для системи холостого ходу й економайзера з вакуумним привидом – вакуум (тиск) у впускному трубопроводі. Для економайзера з механічним приводом командним параметром служить положення дросельної заслінки, для прискорюючого насоса – швидкість її відкриття. На жаль, у карбюраторі командний параметр – зміна тиску в дифузорі – не забезпечує найвигідніших характеристик навіть при оптимальній програмі дозування. Перш за все, це пов’язане з тим, що дозування паливоподачі у ДВЗ з дискретним протіканням робочих циклів (це стосується всіх поршневих двигунів) повинне забезпечуватися не на основі безперервного характеру зміни тиску повітря у дифузорі, а дискретно – за кожним робочим циклом окремо.

Сучасну систему вприскування палива з механічним регулюванням (вона залишається ще в деяких модифікаціях двигунів), як і карбюратор, можна вважати системою з програмним керуванням. У даному випадку командним параметром є відносний (або абсолютний) тиск у впускному трубопроводі, а програма задається настройкою (підбором пружин)

регулятора складу суміші.

Визначення зазначених особливостей найпростіших систем регулювання (пневматичного, механічного) дозволяє сформулювати основні ознаки мікропроцесорних (комп'ютерних) систем з програмним керуванням:

- задання програми керування процесами ДВЗ, перш за все, дозуванням паливо- та повітропостачання, як визначальними;
- вибір таких командних параметрів, що адекватно відображають фізичну суть цих визначальних процесів, зокрема, їх гідро-аеродинамічні особливості;
- забезпечення найбільшого ефекту засобами мікропроцесорної техніки при реалізації комп'ютерної керуючою програми шляхом формування керувальних дій на основі обраних командних параметрів.

Розглянемо реалізацію названих ознак на прикладі КПСК паливоподачі, показаної на рис 2.5, яку побудовано на принципі програмного керування [16].

Основою КПСК є дозувальні елементи у вигляді швидкодіючих клапанів-форсунок з електромагнітним керуванням, які використовуються для розосередженого (по циліндрах) вприскування бензину з електронним керуванням. Розосереджений вприск ще називають багатоточковим.

Насос 2 створює постійний перепад тисків перед форсункою й об'ємом, куди вприскується паливо. Тому циклова витрата палива $G_{\text{пал}}$ залежить тільки від тривалості відкриття клапана форсунки.

Таким чином, кінцева мета керування зводиться до формування командного імпульсу визначеної тривалості τ_e (рис. 2.1). Формування такого командного імпульсу по суті є процесом синтезування інформації датчиків системи з метою її настройки на найкращу паливну економічність, наприклад. Сформований командний імпульс тривалістю τ_e (електричний сигнал) і подається на привід форсунки (ланка А).

Блок синтезу інформації (БСІ) може мати різні схемні рішення, що визначається принципом перетворення інформації датчиків, у тому числі з використанням мікропроцесора.

Підсистема паливоподачі працює від електромережі автомобіля.

Схема на рис. 2.5 допомагає з'ясувати структуру сучасної КСК ДВЗ, до якої і входить КПСК паливоподачі.

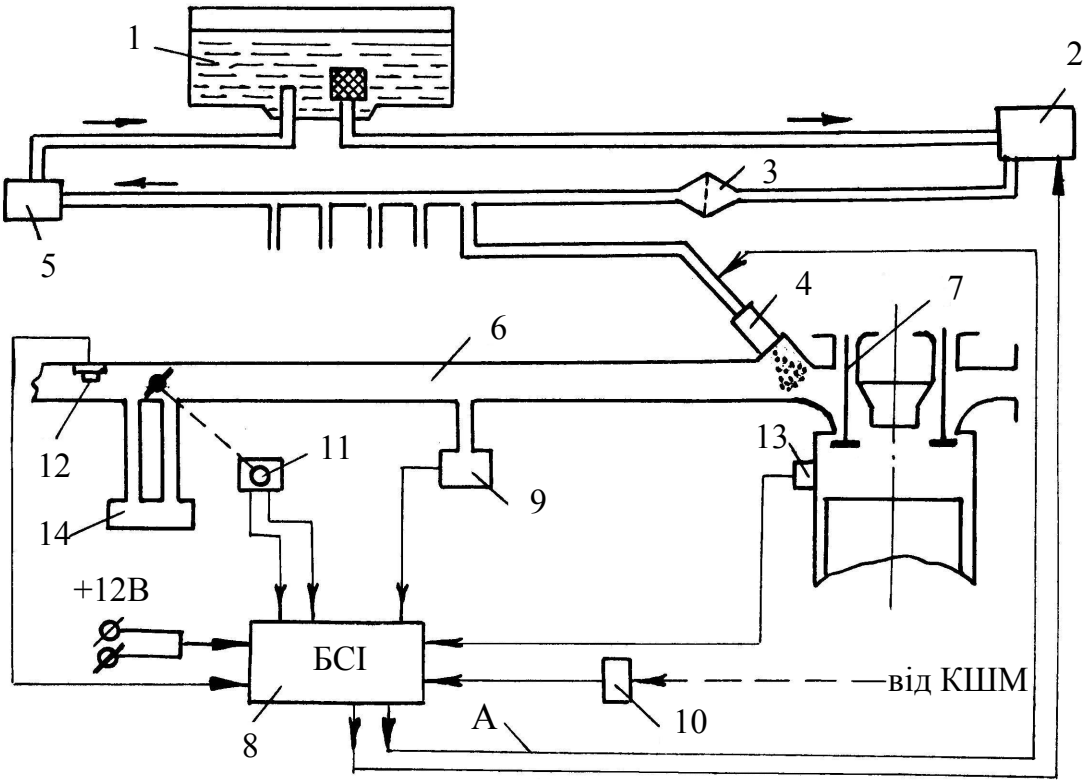


Рисунок 2.5 – Підсистема розосередженого вприскування бензину з електронним керуванням

1, 3 – відповідно, паливний бак, фільтр; 2 – паливний насос з електроприводом; 4 – форсунка з електромагнітним керуванням; 5 – стабілізатор тиску палива; 6 , 7 – відповідно, впускні трубопровод і клапан; 8 – блок керування (синтезу інформації); 9 – датчик абсолютного тиску; 10 – датчик частоти обертання колінчастого вала; 11 – датчики положення і швидкості відкриття дросельної заслонки; 12, 13 – відповідно, датчики температур повітря й охолоджувальної рідини; 14 – перепуск з клапаном регулювання подачі повітря під час пуску та прогріву двигуна

Призначенням функціональних КПСК паливо- та повітропостачанням є формування головних командних імпульсів і їхня реалізація за заданими функціями цілі з бажаним техніко-економічним ефектом. Під головними командними імпульсами КСК ДВЗ розуміються такі, що формуються в блоках керування (КБК) при змінах основних показників роботи двигуна – експлуатаційної паливної економічності та прийнятності, а також роботою двигуна під час пуску, на примусовому холостому ході тощо.

До КСК ДВЗ можуть входити, окрім КПСК, й допоміжні КБК токсичністю, надійністю, кліматичним пристосуванням двигуна тощо [6, 16].

2.2.6. Реалізація принципу адаптивності

Цей принцип реалізується в КСК з середнім і високим рівнем інтелекту. Крім того, як відзначено вище, адаптивні (програмно-адаптивні) системи вже витісняють системи з суто програмним керуванням ДВЗ. Це пояснюється наступними причинами.

Автомобіль (як і інші силові установки з ДВЗ) функціонує в середовищі, що безперервно змінюється, причому режими роботи агрегатів та механізмів повинні якомога повніше узгоджуватися з нестаціонарними характеристиками цього середовища. Тому режими роботи автомобіля (і двигуна) безперервно змінюються як під впливом середовища, так і в наслідок дій оператора, що ним керує.

Якщо розглядати окремі механізми власне двигуна і в цілому автомобіля, використовуючи принцип автоматизації спрацьовування командної дії, слід підкреслити, що більшість з них є системами з програмним керуванням без зворотних зв’язків, тобто вони позбавлені можливості адаптації.

На жаль, програма дій таких систем (пристроїв), що закладається ще при проектуванні силової установки й уточнюється у процесі їхньої доводки, зберігається в незмінному вигляді протягом усього терміну експлуатації.

У реальних умовах експлуатації неминуче виникає суттєве непогодження між програмами керування, які жорстко закладені в КСК, і тими, що є оптимальними для даного моменту часу. Це обумовлено випадковим (непередбаченим) сполученням конкретних факторів, що миттєво змінюються в конкретних умовах експлуатації.

Системи з автоматичною адаптацією принципово відрізняються від систем з жорстким програмним керуванням. Головна перевага перших – здатність самонастроюватись за результатом на виході КСК ДВЗ; для адаптивних систем характерна наявність зворотного зв’язку.

Проблеми адаптивного керування робочим циклом двигуна можна розглянути, виходячи з напрацювань у галузі кібернетики й теорії керування.

Сучасний стан цих наук дозволяє з повною підставою вважати постановку задачі комплексного адаптивного керування робочим циклом ДВЗ сучасною і реальною.

Можна створювати системи з адаптивним керуванням, які мають декілька входів (декілька командних параметрів), оскільки необхідно враховувати кілька впливаючих факторів: концентрацію токсичних речовин у відпрацьованих газах, кут випередження запалювання, фази газорозподілу, температурний режим деталей, тиск наддуву тощо.

Конструктивно-схемні рішення КСК ДВЗ, у яких задіяно принцип адаптації робочих процесів в двигуні до умов його експлуатації, перш за все, до спрацювання пар тертя під час терміну служби, розглянуто нижче.

Зупинимося на специфіці ДВЗ як об'єкта керування з точки зору його пристосування до адаптивності.

Специфічною характеристикою, яку потрібно дослідити, є тривалість виходу об'єкта регулювання на оптимальний режим. Для автомобільного двигуна, наприклад, який працює переважно в умовах перехідних процесів (неусталених режимів), швидкий вихід системи в зону оптимального параметра має першорядне значення, оскільки це скорочує тривалість перехідних процесів.

Відомо, що час пошуку оптимуму залежить від ряду факторів, у тому числі від швидкодії приводу задавального пристрою, пов'язаної зі зміною режиму роботи електромагнітних форсунок паливоподачі. Така швидкодія приводу зумовлює і здатність форсунок практично без затримки виконувати команди БСІ. Інакше кажучи, якщо зв'язати пристрій оптимізації мікропроцесора з БСІ, можна отримати канал керування, швидкість виходу якого на режими оптимальних складів суміші буде цілком прийнятною. Нижче буде показано, що для каналів адаптації паливоподачі автомобільних швидкохідних бензинових двигунів тривалість виходу на оптимальний режим не повинна перевищувати 0,2 мс.

Важливо ще раз підкреслити, що особливістю систем автоматичної адаптації є самозмінний закон регулювання. Це й дає можливість застосувати такі системи для автоматичного забезпечення екстремальних оптимальних значень показників двигуна, що нас цікавлять.

Зупинимося на класифікації каналів КПСК паливоподачі автомобільного двигуна і на задачі, що пов'язана із знаходженням оптимального

складу горючої суміші.

Нижче мова піде про програмно-адаптивні КПСК паливоподачею, що отримали практичне поширення:

- з безпосереднім дослідженням похідної;
- ті, що реагують на знак похідної;
- з запам'ятовуванням екстремуму;
- крокового типу;
- з доповнювальним пошуковим сигналом.

*КПСК з безпосереднім дослідженням похідної***.** Припустимо, що на виході автомобільного двигуна встановлено датчик інформації про ефективний крутний момент $M_{\text{кр}}$. Як інший датчик використано переривник запалювання, частота імпульсів якого пропорційна швидкісному режиму роботи двигуна. Перетворюючи інформацію зазначених датчиків, можна судити про ефективну потужність двигуна:

$$N_e = \kappa \cdot M_{\text{кр}} \cdot n,$$

де κ – константа, n – частота обертання колінчастого вала двигуна, що відповідає N_e.

Тому, коли до БСІ надійде інформація про крутний момент (напруга $U_{\text{м}}$), про швидкісний режим (U_n), а константа буде визначена постійною напругою $U_{\text{к}}$, то потужність двигуна, що залежить від значення пропорційної їй напруги U_N, буде адекватною добутку трьох зазначених напруг, тобто

$$U_N = U_{\text{к}} U_{\text{м}} U_n.$$

Припустимо далі, що у паливопроводі встановлено датчик, який перетворює інформацію про вагову витрату палива в напругу U_n. Тоді питома витрата палива g_e адекватно визначається співвідношенням

$$U_g = U_{\text{пал}} / U_N .$$

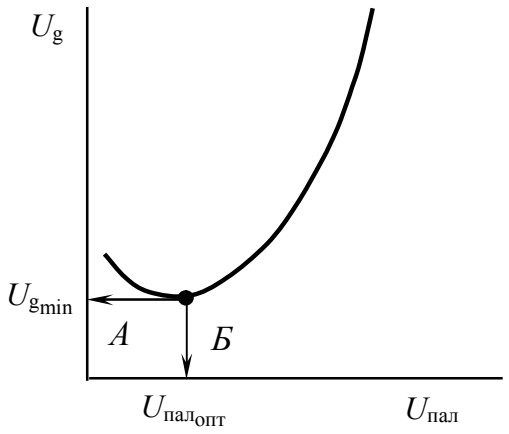


Рисунок 2.6 – Характеристика функції, що оптимізується

Виходячи з поняття регулювальної характеристики, відмітимо, що питомі витрати палива, отже, і U_g, за регулювальною характеристикою змінюються згідно з графіком рис. 2.6.

Залежно від режиму роботи двигуна крива зміщується й перекручується, причому закон її відбування заздалегідь невідомий, тому що на неї впливає значна кількість (у випадковій комбінації) змінних по ходу експлуатації факторів. Однак в усякому разі екстремальне значення $g_{e\min}$ обумовлюється умовою $dU_g / dU_{\text{пал}} = 0$. (для будь-якого вигляду функції $g_e = f(G_{\text{пал}})$).

Схема адаптації електронного типу, яка забезпечує відповідне керування, що задовольняє відмічену умову, показана на рис. 2.7.

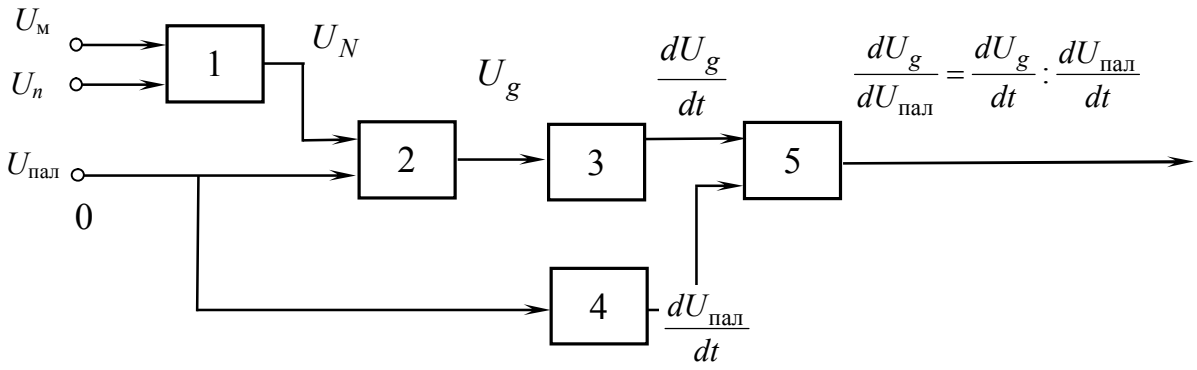


Рисунок 2.7 – Схема електронного пристрою для адаптації з безпосереднім дослідженням похідної та її елементи (блоки):

1 – множення; 2 – ділення; 3, 4, 5 – диференціювання; 0 – датчики

Регулювання за відхиленням від нуля напруги U здійснює БСІ:

$$U \equiv dU_g / dU_n .$$

Наведена система відносно проста. Головний її недолік – наявність диференціюючих блоків, які за принципом своєї дії різко посилюють високочастотні перешкоди.

КПСК, що реагує на знак похідної. Для усунення впливу високочастотних перешкод можуть застосовуватися схеми адаптації, що досліджують знак похідної, у яких немає диференціюючих блоків.

Стосовно дозування палива автомобільного двигуна схема працює наступним чином.

Для схеми рис. 2.8 диференціювання не обов'язкове, а достатньо оцінити відношення кінцевих прирощень $\Delta U_g / \Delta U_n$. Спеціальний

пристрій визначає знак. У момент його зміни для U_g виконавчий блок відповідно змінює витрату палива.

Наприклад, канал адаптації знаходиться у визначеній режимній точці. Пошук екстремуму йде у напрямі збільшення годинних (за годину) витрат палива. На виході обчислювального пристрою відбувається безперервне зменшення U_g (див. рис. 2.6, зона А,). Таке буде доти, доки U_g не змінить знак, після чого пошук екстремуму почнеться у зворотному напрямку (див. рис. 2.6, зона Б).

КПСК з запам'ятовуванням екстремуму. У такій схемі (рис. 2.9) також використовують принцип аналізу знака похідної. Її відмінністю від попередніх схем є наявність блоків пам'яті й порівняння.

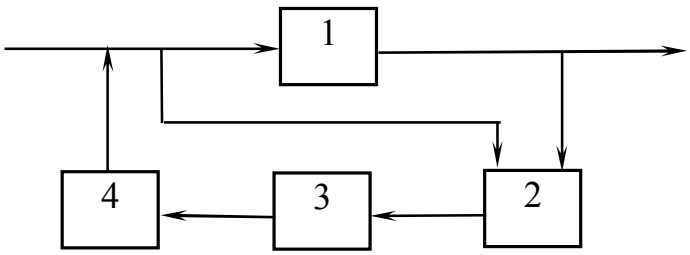


Рисунок 2.8 – Схема адаптації, що реагує на знак похідної:
1 – об'єкт керування; 2 – обчислювальний пристрій; 3, 4 – блоки визначення знаку й виконання

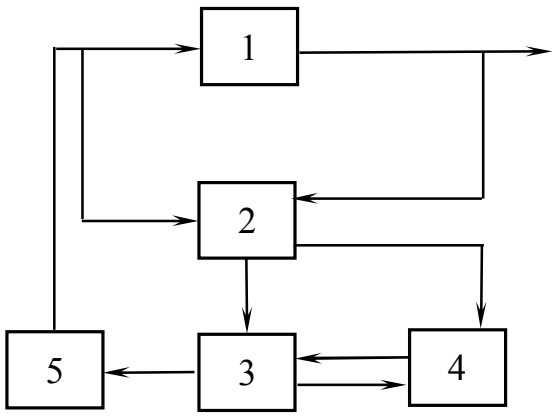


Рисунок 2.9 – Схема з запам'ятовуванням екстремуму:
1 – об'єкт керування; 2 – обчислювальний пристрій; 3,4,5 – блоки порівняння і виконання

Блок пам'яті фіксує напругу $U_g^{'}$, що відповідає екстремальним значенням питомих витрат палива. Потім здійснюється процес порівняння. При цьому коли різниця значень поточного U_g та $U_g^{'}$ досягне критичного значення, спрацює реверс блока виконання. Така схема також є чутливою до перешкод.

КПСК крокового типу. Враховуючи складність захисту адаптуючих

каналів від перешкод, становлять інтерес схеми крокового типу.

Особливістю таких схем є дискретна зміна параметра, що оптимізується. Показання знімаються через певні терміни часу (кроки), які задаються тактовим генератором, причому у поршневому двигуні частоту роботи цього генератора задає власне двигун. Тому час досягнення екстремуму залежить як від швидкісного режиму двигуна n, так і від кількості циліндрів: чим більшою буде кількість циліндрів, а також n, тим вищою стає частота тактового генератора і тим швидше здійснюється пошук екстремуму.

Отримана інформація подається на блок порівняння, у якому відбувається порівняння параметрів попередніх кроків. Якщо в результаті подібного порівняння з'ясується, що параметр, який оптимізується, g_e збільшився, то виконавчий пристрій видає команду на реверс.

На рис. 2.10 показана структурна схема адаптуючого каналу КПСК паливоподачою крокового типу.

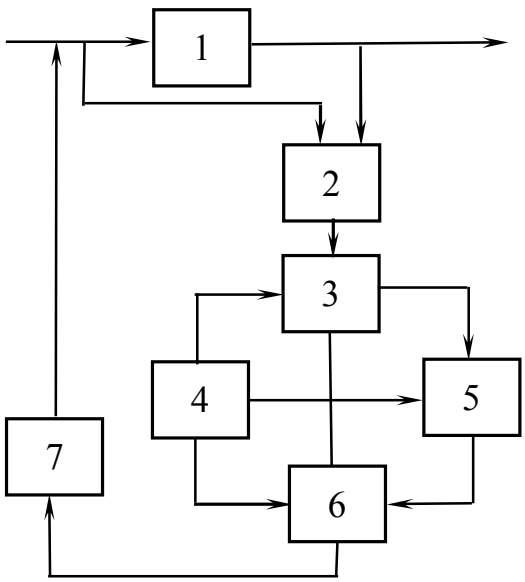


Рисунок 2.10 - Схема КПСК крокового типу:

1 – об'єкт керування;
2 – обчислювальний пристрій;
3 – блок порівняння;
4 – тактовий генератор;
5 – блок пам'яті;
6 – блок порівняння;
7 – блок виконання

КПСК з доповнювальним пошуковим сигналом. Розглянемо схему з доповнювальним пошуковим сигналом, який накладається на основний сигнал (рис. 2.11).

Дія такої схеми ґрунтується на тому, що обчислювальний пристрій подає на фільтр сигнал, пропорційний питомій витраті палива, але фільтр пропускає тільки синусоїдальну компоненту цього сигналу. Далі сигнал

передається до логічного елемента, куди одночасно подається сигнал від генератора синусоїдальних коливань.

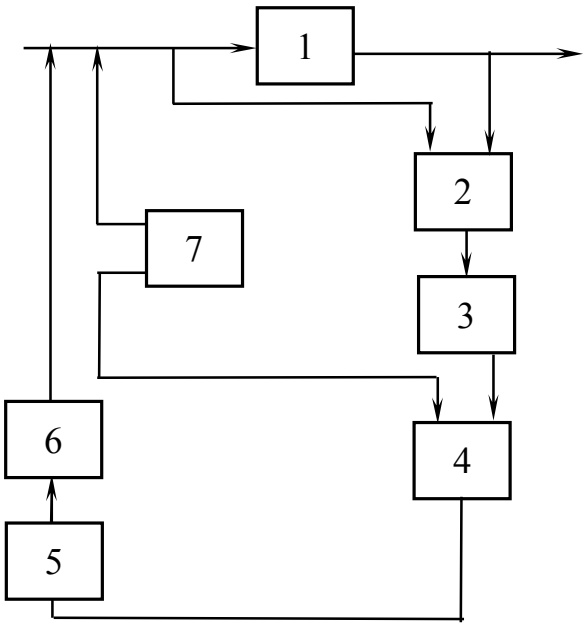


Рисунок 2.11 - Схема з доповнювальним пошуковим сигналом:

1 – об’єкт керування;
2 – обчислювальний пристрій;
3 – фільтр;
4 – логічний елемент;
5 – перемикач полярності;
6 – блок виконання;
7 – генератор синусоїдальних коливань

При переході адаптуючого каналу через екстремальну точку фаза коливань зміщується на 180 кутових градусів. Зміщення фази викликає на виході з логічного елемента сигнал, що може використовуватися для реверсу подачі палива.

Аналізуючи наведені структурні схеми адаптивних каналів КПСК паливоподачі, можна дійти висновку, що всі вони можуть застосуватись для ефективного реагування на випадкові зміни умов експлуатації силових установок з ДВЗ. Це підтверджується і практикою.

Однак треба наголосити, що особливі переваги мають схеми з відсутністю диференціюючих блоків, що різко знижує рівні високочастотних перешкод, тобто підвищує якість вихідних адаптуючих сигналів та переваги програмно-адаптуючого керування в цілому.

Приклади і схемні рішення КСК ДВЗ з функціонально різними каналами адаптації наведені у подальших главах цього підручника.

Завершуючи розгляд принципу адаптивності при побудові КСК ДВЗ, відзначимо, що застосування адаптивних засобів адаптації – це єдиний і глобальний напрямок подальшого розвитку комп’ютерних систем керування.

Ще раз підкреслимо, що у системах з жорсткими програмами

керування (хоча б і в електронному виконанні) неможливо реалізувати задачі керування з оптимізацією за кількома критеріями.

Крім того, адаптивні КСК, не зважаючи на їх складність, практично не збільшують вартість силової установки, оскільки комп'ютерно-електронна частина системи керування будується на включенні в неї адаптуючих елементів замість існуючих. Крім того, незмінність вартості зумовлено й тим, що з двигуна знімається ряд найбільш складних механічних систем керування. Нарешті, а це – головне, забезпечується суттєва додаткова економія палива, зниження токсичності викидів, поліпшення динаміки силової установки.

2.3. Забезпечення надійності КСК ДВЗ

Принциповим є питання надійності і стабільності роботи комп'ютерних систем керування під час тривалої експлуатації.

Саме ці якості тривалий час гальмували або стримували розвиток і використання КСК у двигунобудуванні.

Останнім часом проблемі фізичної та параметричної надійності ДВЗ приділяється помітна увага, досягнуто значних результатів, що й дозволило поставити КСК ДВЗ на масове виробництво та експлуатацію. Забезпечено великий техніко-економічний ефект і високу конкурентоспроможність сучасної автоматизованої моторної техніки різних призначень.

Крім того, підвищення надійності та стабільності роботи КСК ДВЗ сприяло зростанню технічного рівня як власне двигунів так і моторних силових установок.

Зупинимося на проблемах надійності і стабільності сучасних КСК ДВЗ.

2.3.1. Забезпечення фізичної та параметричної надійності роботи КСК ДВЗ за результатами їх структурного аналізу й самодіагностування

Розглянемо питання структурного аналізу на прикладі автомобільного двигуна.

Попередній структурний аналіз пристроїв дозування на стадії їх проектування дозволяє правильно прогнозувати надійність роботи системи керування як найважливішого показника якості, наприклад, підсистеми

палива. Мова йде про фізичну (безвідмовність та довговічність) і параметричну (стабільність роботи у процесі тривалої експлуатації) надійність КСК.

Розглядаючи карбюратор як автомат (це стосується будь-якої схеми дозування палива), доцільно простежити проходження командної інформації через окремі ланки (елементи) цієї підсистеми керування паливоподачею. При цьому з достатньою повнотою виявляються потенційні причини відмов, а отже – надійність КПСК.

Згадаємо основи перетворення інформації в системах автоматичного керування.

Аналіз будь-якої схеми передачі інформації полягає у встановленні ступеня змін сигналу, що проходить через так звані межі розділу (в них змінюється характер та форма інформації). Процеси, що виникають у системі при подаванні на її вхід сигналу, умовно називають рухом системи.

Межі розділу виникають при переході інформації через так звані проміжні ланки: датчик, блок синтезу інформації, форсунки та ін. Кожна така ланка має власну (особисту) надійність, що зумовлює надійність проходження інформації через неї.

Метою структурного аналізу підсистеми керування і є з'ясування питання про наявність у ній проміжних ланок, вирішення якого дозволяє судити про надійність КПСК.

У карбюраторах структура передачі інформації (і структурна модель) досить проста. Зміни тиску в дифузорі безпосередньо, без проміжних ланок, діють на паливо, обумовлюючи більшу чи меншу інтенсивність його витікання через жиклери. Відсутність додаткових (зі своєю ненадійністю) проміжних ланок саме і робить таку схему найнадійнішою.

Таким чином, маємо досить просту і надійну схему перетворення інформації у карбюраторі: об'ємна витрата повітря перетворюється в параметр вакууму в дифузорі, який через жиклер обумовлює витрати палива $G_{\text{пал}}$.

На відміну від карбюраторів у системах вприскування палива обов'язково виникають проміжні ланки, що збільшує імовірність погіршення надійності каналу паливоподачі.

У схемах дозування з електронним керуванням, порівняно з

механічними системами вприскування перетворення інформації є більш складним. Це бачимо при зіставленні рис. 2.12 та 2.13.

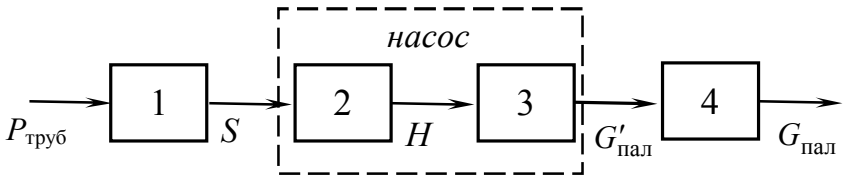


Рисунок 2.12 – Схема перетворення інформації при механічному керуванні вприскуванням:

1 – регулятор; 2 – механізм повороту (плунжера); 3 – секція ПНВТ; 4 – форсунка

При механічному управлінні (рис. 2.12) під впливом $P_{труб}$ на чутливий елемент регулятора командний параметр перетворюється у переміщення рейки *S*. Далі переміщення рейки перетворюється за допомогою плунжера нагнітальної секції в активний хід його *H*, від якого вже безпосередньо й залежить доза палива $G'_{пал}$, яка подається ПНВТ – паливним насосом високого тиску. Нарешті, форсунка здійснює вприскування палива $G_{пал}$ у циліндр двигуна.

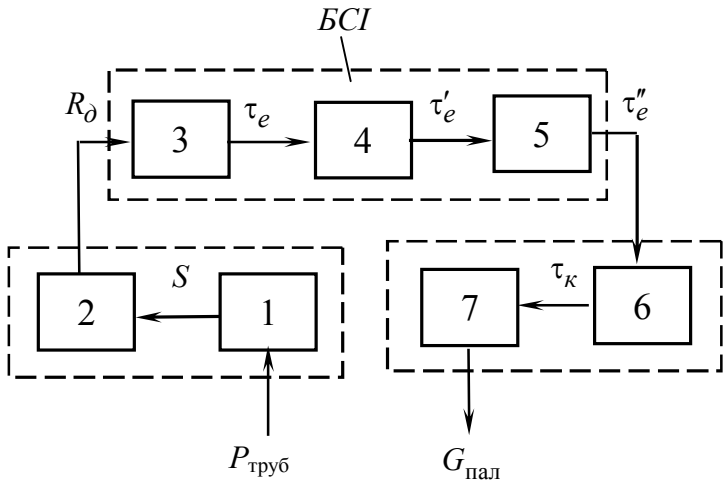


Рисунок 2.13 – Схема перетворення інформації при електронному управлінні дозуванням палива:

1 – анероїдна коробка датчика; 2 – потенціометр; 3 – мультивібратор; 4 – посилювач потужності; 5 – комутатор; 6 – електромагнітна форсунка; 7 – жиклер електромагнітної форсунки

У КПСК дозуванням палива дизеля діє схема рис. 2.12. Тут тиск $P_{труб}$ чутливим елементом датчика (анероїдною коробкою, та ін.) перетворюється у лінійне переміщення *S*. У результаті цього зміщується струмозйомний елемент потенціометра, змінюючи активний опір

резистора, включеного у ланку мультивібратора. Останній формує командний імпульс конкретної тривалості τ_e , який є пропорційним опору датчика R_{g} (резисторного типу). Імпульс τ_e посилюється у спеціальному посилювачі до τ'_e і, проходячи комутатор, виходить з БСІ у вигляді імпульсу τ''_e. Останній і подається в електромагнітний пристрій форсунки, який перетворює його у тривалість відкриття клапана форсунки $\tau_к$. При постійних тиску палива й напруги живлення БСІ циклова втрата палива $G_{\text{пал}}$ є пропорційною тривалості $\tau_к$.

Постає питання, чому пристрої дозування паливоподачі з мікропроцесорним керуванням, у яких є найскладнішою схема перетворення інформації, як бачили вище, все ж вибираються як найбільш перспективні.

Це пов’язано, по-перше, з тим, що, на відміну від механічних засобів керування, з їх допомогою можна зробити практично нерухомими всі основні ланки на шляху інформації і тим самим наблизити підсистему керування дозуванням паливоподачі за надійністю (зокрема, стабільністю показників при тривалій експлуатації) до пристроїв без проміжних ланок. Іншою причиною, як з’ясовано вище, є те, що КПСК паливоподачі єдина надає можливість реалізовувати дозування паливоподачі засобами автоматичної адаптації.

В умовах масової експлуатації за стабільністю роботи, простотою обслуговування, фізичною надійністю й вартістю виготовлення саме КПСК паливоподачею (бензин, дизельне паливо тощо) стали зіставними з системами дозування сучасних багатокамерних карбюраторів та механічних пристроїв вприскування палива.

Прагнення до комплексного керування ДВЗ пов’язане з необхідністю урахування всієї сукупності факторів, які впливають на оптимальні склади суміші (заряду циліндру): тиск навколишнього середовища, тепловий режим двигуна, індивідуальні особливості водія при водінні автомобіля. З’являються адаптивні канали керування та ін. Все це приводить до неминучого введення додаткових пристроїв з проміжними ланками керування. Подібне переускладнення знижує надійність звичайних карбюраторів і механічних схем регулювання. Однак воно не впливає на надійність КПСК паливоподачі, про що йшлося вище.

За останні роки у галузі поліпшення надійності КСК ДВЗ в цілому також досягнено значних результатів. Дуже важливо, що цими питаннями почали займатися на самих ранніх етапах – при проектуванні за результатами структурного аналізу системи керування в цілому. Треба тільки, аби були ретельно обґрунтовані й реалізовані численні вимоги щодо фізичної надійності та стабільності вузлів КСК ДВЗ.

Збільшенню фізичної надійності та стабільності КСК ДВЗ сприяє і тенденція безперервно підвищувати якість саме мікропроцесорних засобів, перш за все таких, на які впливають жорсткі умови експлуатації силових установок з ДВЗ. Приділяється велика увага якості датчиків, виконавчих пристроїв та їх пристосуванню до різких тепломеханічних навантажень, у тому числі за рахунок використання в їх схемах і конструкціях нових фізичних ефектів, спрощення зазначених схем і конструкцій тощо.

Мікропроцесорні системи керування оснащуються засобами автоматичного діагностування для забезпечення й поліпшення профілактичного обслуговування під час експлуатації.

Необхідно розрізняти види діагностування з залученням до нього КСК ДВЗ [5]:

- реалізація випробувальних програм з комп’ютерним керуванням на станціях технічного обслуговування автомобілів;
- самодіагностування КСК.

Випробувальні програми обслуговують діагностування двигунів. Їх розгляд виходить за межі цього підручника.

Зупинимося на самодіагностуванні як ефективному заході підвищення фізичної і параметричної надійності КСК ДВЗ.

Мета самодіагностування – забезпечення компенсації та локалізації відмов КСК, їх попередження самою КСК ДВЗ. Воно, по суті, є суттєвим компонентом системи адаптації КСК середнього та вищого рівня інтелекту.

Йдеться про те, що в результаті самодіагностування можуть бути задіяні зворотні зв’язки між КСК та двигуном за сигналами датчиків адаптації, відповідно до яких формуються команди корекції, що задаються комплексом команд керування. Така корекція повинна виходити з оцінок самою КСК умов роботи двигуна, а також власне КСК, та на цій основі забезпечувати поліпшення зазначених умов до необхідного ступеня для

запобігання відмов керованого об’єкта, а також для уникнення нестабільності робочих характеристик КСК ДВЗ при тривалій експлуатації.

Система самодіагностування має, як мінімум, забезпечувати функції:

- контролю локальних пошкоджень й виходів зі строю КСК ДВЗ;
- контролю старіння (погіршення показників) КСК ДВЗ у визначені терміни часу при тривалій експлуатації;
- оцінки допустимості пошкоджень з точки зору можливості функціонування двигуна до визначеної межі розвитку пошкоджень;
- індикації часткових пошкоджень.

Контроль пошкоджень (власне, діагностування) здійснюється за такими напрямками: постійне самодіагностування елементів мікропроцесорної (електронної) схеми; діагностування працездатності датчиків, діагностування характеристик двигуна.

Власне, корекція керування паливоподачею залежно від спрацювань і неточностей регулювання здійснюється застосуванням датчиків зворотних зв’язків, наприклад, за кутом випередження запалювання / початку вприскування.

Але домінуюча роль, яку відіграють електронні системи керування ДВЗ, потребують підвищеної уваги до їх обслуговування. Крім того, основні функції силової установки стають все більш залежними від електронних систем керування. Тому ці системи повинні задовольняти жорсткі вимоги щодо їх безвідмовності, ресурсу, стабільності.

Вирішення даних проблем полягає у включенні функцій і засобів самодіагностування до КСК. Реалізація цих функцій здійснюється електронним блоком керування (БСІ) шляхом самоперевірки таким чином: програмовані чипи пам’яті наділені тестовими комбінаціями, які можна відновлювати й використовувати у цілях порівняння. Для запам’ятовуючих пристроїв застосовується порівняння з підсумковими даними випробувань з метою гарантії того, що всі дані й програми зберігаються у цих пристроях правильно.

Датчики випробуються на точність даних, що знімаються (у встановлених межах); також перевіряються розімкнуті й замкнуті ланки. Кінцеві елементи керування можуть випробуватися під час їх роботи з використанням граничних значень електричного струму.

Сказане вище пояснюється рис. 7.2, де показані зміст, логіка використання вбудованого у КСК ДВЗ електронного діагностичного блока для самодіагностування.

У подальших розділах підручника буде розглянуто конструктивні рішення реалізації принципу самодіагностування.

2.3.2. Забезпечення принципу модульності, уніфікації та стандартизації при розробці КСК ДВЗ

Природньо, що реалізація принципу модульності, уніфікації й стандартизації сприяє підвищенню внутрішньої надійності та стабільності роботи КСК ДВЗ.

Це дозволяє при побудові комп'ютерних систем керування двигунів використовувати елементи, доведені промисловістю до масового виробництва, тобто такі, що зарекомендували себе як електронна апаратура більш високої якості, ніж нові створювані дослідні зразки.

Мова йде, перш за все, про стандартні датчики, елементи виконуючих пристроїв, мікроплати БСІ тощо (паливні насоси, стабілізатори тиску, електрокеровані форсунки для вприскування палива та ін.).

Доцільність подібної технічної політики підтверджується тим, що кращі світові фірми (Bosch, наприклад) розробляють вузли КСК ДВЗ і повністю зосереджуються саме на комплектуючій продукції для різних ДВЗ; інші провідні фірми цілком свідомо звужують номенклатуру своєї продукції. Тому вироби фірми Bosch ставляться практично на всі КСК ДВЗ моторних фірм США, Японії, Англії, Італії, Франції, Росії та інших країн.

Досвід свідчить, що саме після переходу на такий шлях значно прискорились темпи створення й, головне, запровадження КСК ДВЗ.

2.3.3. Забезпечення аварійного захисту КСК ДВЗ

Конструктивні варіанти реалізації такого принципу при побудові сучасних КСК ДВЗ досить різноманітні й вивчаються нижче на прикладах конкретних систем керування.

У найпростішому вигляді захист двигуна забезпечує усунення або зниження до мінімуму пошкоджень, що виникають у результаті зменшення тиску мастила, перевищення температури та недостатньої кількості охолоджувальної рідини. За результатами контролю пошкоджень (відмов) на основі аналізу характеристик систем змащування та охолодження КСК

виконує функцію захисту двигуна при погіршенні цих характеристик за рахунок обмеження паливоподачі, а коли двигун працює у критичній ситуації (розгін), КСК забезпечує зупинку двигуна за рахунок переривання подачі палива у циліндри ДВЗ.

У КСК більш високого класу використовується аналогічний підхід, однак суттєво розширюється діапазон факторів, що відповідають за можливі відмови двигуна. При цьому особливо виділяються первинні фактори, відстежування яких підвищує ефективність аварійного захисту двигуна, перш за все щодо швидкодії та локалізації, або запобіганню відмов. Мова йде про реагування (миттєве) КСК ДВЗ на температури деталей у характерних тепломеханічно перевантажених зонах (верхнє поршневе кільце, перемичка між впускним і випускним клапанами у головці циліндрів тощо), на зазори у парах тертя, перепади температур у деталях камер згоряння та ін.

Природньо, урахування багатьох первинних факторів при розробці систем аварійного захисту, вбудованих у КСК ДВЗ, ускладнює такі системи керування, однак ефект описаного захисту перевищує витрати ускладнення КСК, тим більше, як відмічалося вище, переускладнення системи електронного керування майже не позначається на стабільності і фізичній надійності системи.

Основні труднощі використання систем керування з автоматичним аварійним захистом двигуна пов’язані з проблемою датчиків і вимірювальних схем, здатних передавати достовірну інформацію з важкодоступних зон (рухомі деталі, вогневі поверхні, зони рухомих контактів). Подібні труднощі суттєво загострюються у зв’язку з необхідністю отримувати первинні сигнали, перш за все, про нестаціонарні характеристики процесів у деталях ДВЗ, що дуже важливо, якщо враховувати переважну роль перехідних процесів у ряді причин відмов швидкохідних двигунів.

Такі труднощі здатні подолати далеко не всі фірми, а це гальмує широке впровадження найбільш ефективних, але дуже складних розробок конструкцій аварійного автоматичного захисту ДВЗ.

2.4. Інші принципи побудови КСК ДВЗ

Вище викладено загальні принципи побудови КСК ДВЗ, які пов’язані зі специфікою двигунів. Їх реалізація дозволяє створити

ефективні системи керування, здатні задовольнити зростаючі потреби замовників моторної техніки.

Уточнимо тепер принципи побудови КСК ДВЗ з урахуванням того, що вони являють собою мікропроцесорні системи.

Для ефективного функціонування комп'ютера у складі КСК ДВЗ необхідний ряд додаткових (допоміжних) пристроїв переробки інформації та передачі командних сигналів з попереднім її підсилюванням.

Розглянемо це питання на прикладі підсистеми паливо-вприскування бензину у циліндри двигуна типу "Motronic" фірми Bosch (рис. 2.14).

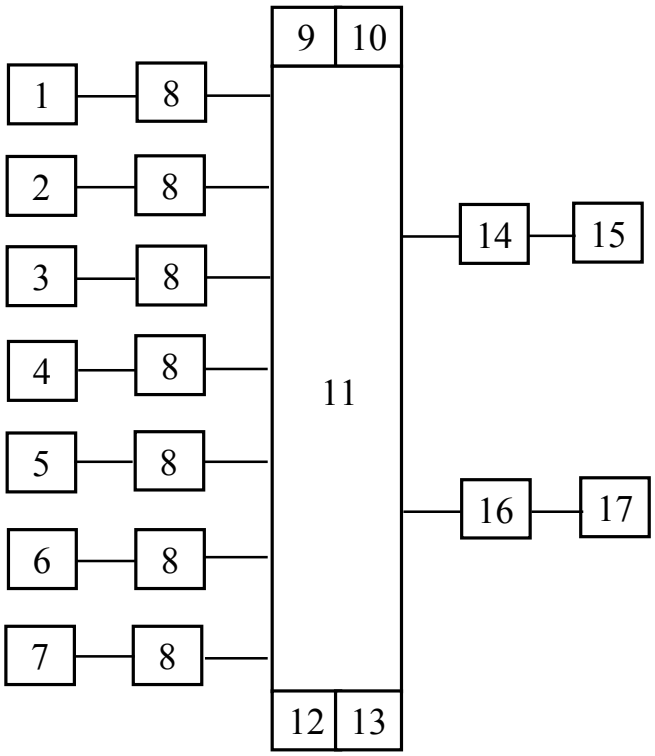


Рисунок 2.14 – Структура мікропроцесорної підсистеми паливоподачі типу "Motronic" фірми Bosch:

1 – датчик початку відрахування; 2 – датчик частоти обертання колінчастого вала; 3 – датчик витрати повітря; 4 – датчик температури повітря; 5 – датчик температури охолоджувальної рідини; 6 – акумулятор; 7 – датчик положення дросельної заслінки; 8 – пристрої сполучення; 9 – стабілізатор; 10 – генератор тактових імпульсів; 11 – мікропроцесор; 12 – постійний запам'ятовуючий пристрій; 13 – оперативний запам'ятовуючий пристрій; 14 –посилювач потужності; 15 – електромагнітні форсунки (форсунки з електромагнітним керуванням); 16 – комутатор; 17 – котушка запалювання

Використовують датчики: частоти обертання, витрати повітря, температури повітря й охолоджувальної рідини, положення дросельної заслінки, навантаження тощо. Сигнали з них подаються на пристрої,

сполучені з комп'ютером. Такі пристрої служать для перетворення сигналів датчиків у форму, зручну для зчитування комп'ютером.

Потім сигнали надходять до мікропроцесора, який здійснює обчислення відповідно до заданого алгоритму та програми керування. Для роботи процесора потрібен генератор тактових імпульсів, що виробляє функціональні сигнали постійної частоти.

Напруга електропостачання подається на розглянуті елементи від стабілізатора, оскільки в електричному колі автомобіля завжди мають місце значні коливання току.

Сигнали на виході комп'ютера мають невелику потужність, що пов'язано з малою потужністю вхідних сигналів, які виробляються датчиками. Тому їх не можна використовувати для керування котушкою запалення й електромагнітними клапанами. Для підсилення сигналів використовуються вихідні каскади: підсилювач потужності при керуванні клапанами форсунок 15 та комутатор 16 при управлінні котушкою запалювання.

Така система здійснює керування коефіцієнтом надлишку повітря α та кутом випередження запалювання $\varphi_{зап}$ за оптимальними програмами. Для цього у ячейках постійного запам'ятовуючого пристрою записані так звані опорні значення кута випередження запалювання. Процесор за результатами аналізу сигналів, що надходять з датчиків частоти обертання колінчастого вала і навантаження (положення дросельної заслінки), обирає опорні значення, що доставляють оптимуми паливної економічності для кожного експлуатаційного режиму. При пуску і прогріві двигуна, а також на холостому ході значення кута випередження запалювання встановлюються залежно від температури охолоджувальної рідини та частоти обертання колінчастого вала. Вводиться, нарешті, додаткова корекція кута випередження запалювання при роботі двигуна на режимі повної потужності та на примусовому холостому ході.

Розглянута КПСК паливоподачі не має адаптивних каналів керування.

Однак багато інших фірм випускають КПСК з програмно-адаптивним керуванням.

Можливість адаптації КПСК, наприклад у КСК ДВЗ фірми Toyota реалізована шляхом корекції опорних значень кута випередження

запалювання залежно від сигналів датчика детонації й запам’ятовування нових значень зазначеного кута, що не призводять до детонації. У результаті система має якості “самонавчання”, виявляючи і потім виключаючи такі значення кута, що призводять до детонації в циліндрах двигуна.

Далі буде ще наведено приклади допоміжних пристроїв переробки і передачі інформації при вивченні КСК ДВЗ різних типів.

Однак вже з аналізу схеми рис. 2.14 бачимо, що загальна структурна особливість будь-яких КСК ДВЗ пов’язана з тим, що вони включають не тільки мікропроцесори, а й являють собою складні набори електронних пристроїв, характеристики яких залежать від задач керування та бажаної якості самого керування.

Другим дуже важливим принципом побудови КСК ДВЗ, що витікає з мікропроцесорного виконання, є принцип вбудування.

Вище наголошувалося, що необхідно забезпечити як вбудування локальної КСК у комплексну систему керування, так і вбудування останньої у КСК силової установки, наприклад, автомобіля.

При переході до адаптивних систем, що також підкреслено, блок автоматичного діагностування слід вбудувати у КСК ДВЗ.

Виникає питання, які саме можливості надає принцип вбудування.

Справа не в тому, що додаткові функції КСК неможливо реалізувати, наприклад, без вбудування додаткових блоків керування у базову систему керування. Треба розуміти, що при вбудуванні поєднуються функціонально мікропроцесорні схеми, функції датчиків та виконавчих пристроїв, що значно підсилює керувальні можливості КСК без особливого ускладнення її схеми.

Приміром, при вбудуванні схеми діагностування у схему КСК ДВЗ один і той самий датчик одночасно використовується для вирішення задач керування та діагностування. Сигнали, наприклад датчиків систем охолодження двигуна й змащення, одночасно використовуються як для потреб КСК ДВЗ так і для потреб КСК автомобіля (приміром, для індикації сигналів про недопустимі порушення стану систем двигуна на пульті керування автомобілем).

Очевидно, що принцип вбудування передбачає суттєве підвищення

ефективності автоматичного керування як двигуна, так і силової установки з ним.

2.5. Класифікація та загальна структура сучасних КСК ДВЗ

Вище у цій главі розглянуто принцип побудови КСК ДВЗ. Також розкрито особливості КСК ДВЗ у цілому, їх функціональних підсистем, блоків, каналів керування.

На рис. 2.15, 2.16 наведено узагальнену класифікацію сучасних КСК двигунів та схему їх структурних особливостей.

У подальших розділах підручника буде розглянуто схемно-конструктивні особливості сучасних КСК двигунів різних типів і призначень згідно з класифікаційними ознаками, наведеними на цих рисунках.

В основному розглядатимуться схеми і конструкції КСК ДВЗ останніх поколінь, у яких реалізовані кращі досягнення світового двигунобудування.

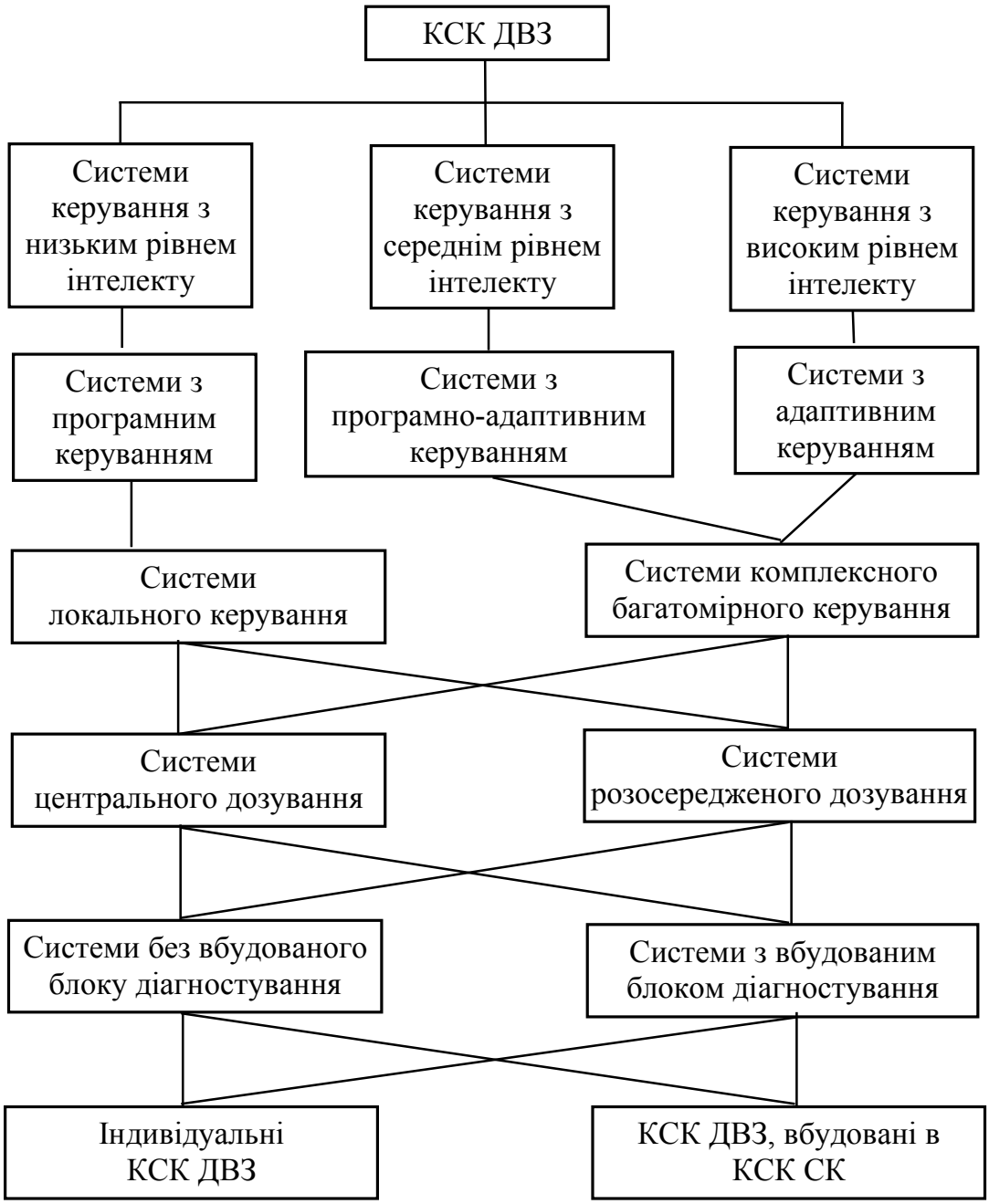


Рисунок 2.15 – Класифікація сучасних КСК

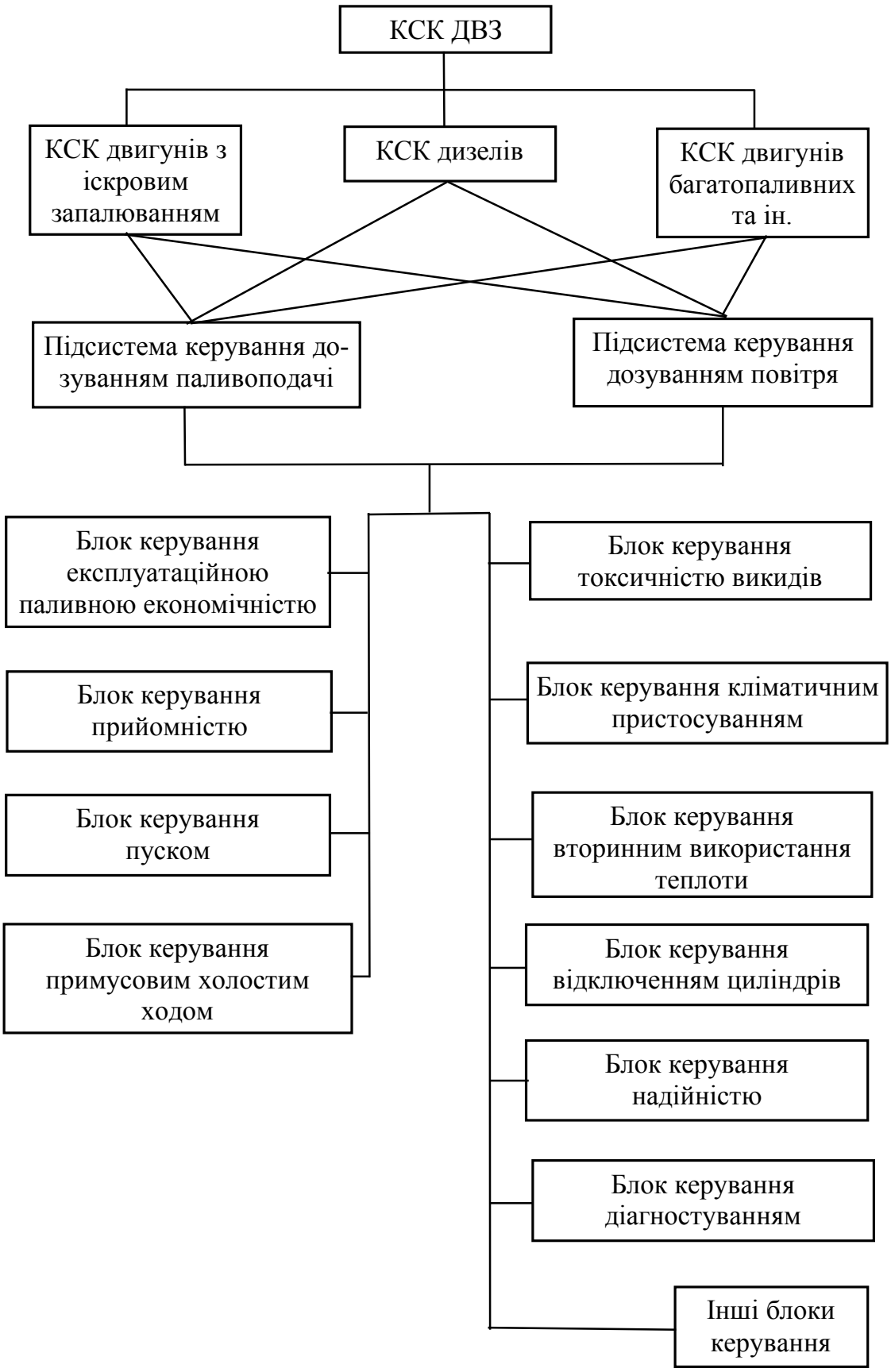


Рисунок 2.16 – Структура сучасних КСК ДВЗ

Контрольні запитання та завдання

1. Які принципові позитивні якості мають КСК ДВЗ?
2. Якими є проблеми подальшого розвитку сучасних КСК ДВЗ?
3. Які загальні вимоги ставляться до КСК ДВЗ?
4. Які принципи покладено в основу сучасних КСК ДВЗ?
5. Що розуміти під командним параметром електронного каналу керування?
6. Які особливості складання оптимальної програми керування двигуна?
7. Що таке дискретно-індивідуальне керування циклом ДВЗ?
8. Що розуміється під адаптивністю керування?
9. Як структура КСК ДВЗ впливає на її надійність?
10. Які переваги мають модульність, уніфікація та стандартизація при розробці комп'ютерних систем керування?
11. Що таке керування аварійним захистом двигуна?
12. Які особливості має КСК ДВЗ як мікропроцесорна система?
13. Які елементи входять до структури сучасних КСК ДВЗ?
14. Які є класифікаційні ознаки сучасних КСК ДВЗ?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шеховцов А.Ф. Компьютерные системы управления ДВС: Учеб. Пособие. – Харьков: ХГПУ, 1995. – 256 с.
2. Рязанцев Н.К. и др. Улучшение технико-экономических показателей силового агрегата дизель-поезда на основе применения микропроцессорной системы управления // «Двигатели внутреннего сгорания»: Сб. – №1. – Харьков.: НТУ «ХПИ», 2002. – С. 55–57.
3. Методы оптимизации процессов двигателей внутреннего сгорания: Уч. пособие / Е.И. Третяк. – К.: ИСИО, 1993. – 144 с.
4. Парсаданов И.В. Повышение качества дизелей на основе комплексного критерия расхода топлива и токсичности отработавших газов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 238 с.
5. Автомобильный справочник (Bosch): Пер. с англ. 1-е рус. изд. – М.: «За рулем», 2000. – 896 с.

Глава 3. ЕЛЕКТРОННЕ КЕРУВАННЯ ПАЛИВОПОДАЧЕЮ У ДВИГУНАХ

Комп'ютерні підсистеми керування паливоподачею у бензинових, дизельних, багатопаливних та інших альтернативних двигунах принципово відмінні. Тому кожну з таких КПСК розглянемо окремо.

Однак при вивченні будь-якої з зазначених підсистем важливо враховувати і досвід, накопичений при розробках і використанні КПСК паливоподачею бензинових двигунів, з огляду на те, що підсистеми паливоподачі двигунів з іскровим запаленням суттєво випереджають подібні автоматичні засоби дизелів і, тим більше, багатопаливних та інших двигунів.

3.1. КПСК паливоподачею у бензинових двигунах

Розглянемо необхідність і можливості удосконалення паливоподачі у сучасних бензинових двигунах. Найбільше споживання транспортними силовими установками енергетичних ресурсів визначає нагальну потребу у підвищенні їх паливної економічності.

Сьогодні паливна економічність головних споживачів бензину – автомобільних ДВЗ – суттєво поліпшилася. Характерно, що основним фактором її зростання стало збільшення ступеню тиску, яке вимагало серйозних заходів щодо запобігання небезпеки детонації, що виникла при цьому. Подальше підвищення паливної економічності автомобільних двигунів вимагає подолання ще значніших труднощів, зумовлених недосконалістю самого робочого циклу з поступовим характером вигоряння горючої суміші у циліндрі двигуна.

За рахунок чого ж ще можливо збільшити паливну економічність сучасного автомобільного двигуна?

Невичерпним резервом треба вважати оптимізацію програми дозування палива та її автоматичну адаптацію до випадкових і різких змін експлуатаційних режимів. Отже, аналіз дозувальних пристроїв сучасних кар-

бюраторів показав, що залежно від режиму роботи двигуна відхилення від оптимального дозування може сягати 10 %. Оптимальне дозування палива, як підтверджує практика, може звести подібне відхилення до 2 % і менше.

Що ж конкретно розуміється під оптимальним дозуванням палива у бензиновому двигуні?

Встановлено, що найкраща паливна економічність при роботі бензинового двигуна залежить від складу горючої суміші.

Максимальна потужність також досягається при конкретному потужнісному складі горючої суміші, що відрізняється від економічного складу.

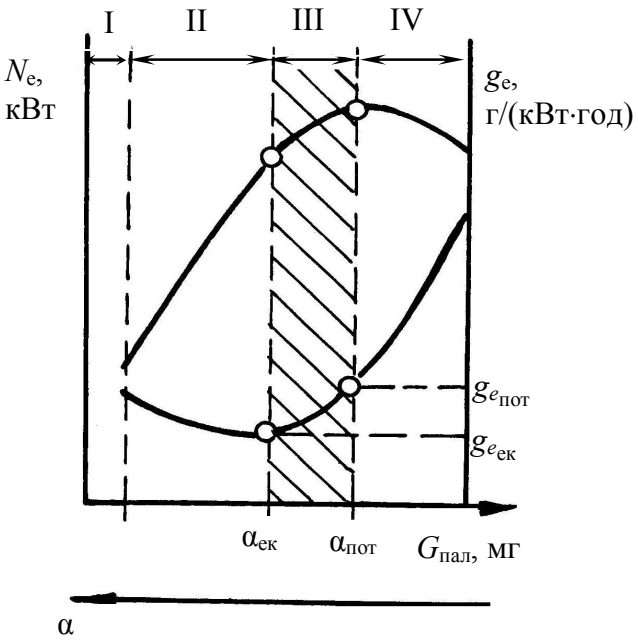


Рисунок 3.1 – Регулювальна характеристика двигуна з іскровим запалюванням

На рис.3.1 показано регулювальну характеристику двигуна з іскровим запалюванням за складом суміші при n = const (n – частота обертання колінчастого вала). Для кожного α підбирався оптимум $\varphi_{\text{зап}}$ (кут випередження запалення). По цій характеристиці визначають економічний (якому відповідає питома витрата палива $g_{e\text{ек}}$) та потужнісний (з відповідною питомою витратою палива $g_{e\text{пот}}$) склади суміші. Такі склади суміші характеризуються відповідними коефіцієнтами надлишку повітря $\alpha_{\text{ек}}$, $\alpha_{\text{пот}}$.

Бачимо, що регулювальна характеристика має декілька зон. Зона I розташована за нижньою межею спалаху, і в ній робота двигуна, природньо, неможлива. Зона II характеризується недоречним збідненням горючої суміші: в ній двигун працює неусталено, при збідненні суміші потужність швидко падає, а паливна економічність погіршується (зростає g_e). У зоні III горюча суміш раціонально збіднюється, а паливна економічність двигуна поліпшується (зі збільшенням α падає g_e), але дещо падає потужність;

при цьому $\alpha_{пот} \approx 0{,}8...0{,}85$; $\alpha_{ек} \approx 1{,}1...1{,}15$. Для зони IV характерним є нераціональне збагачення суміші, тому паливна економічність різко погіршується, а потужність знижується. Нарешті, відрізок за зоною IV (на рисунку не визначена) міститься за верхнею межою спалахування, коли робота двигуна неможлива.

Таким чином, якщо виходити із паливної економічності й враховувати потужнісні показники двигуна, то всі раціональні склади горючої суміші, що подаються керованою підсистемою дозування палива, повинні обов'язково розташовуватися у зоні III регуляторної характеристики.

Завершуючи викладене, можна зробити висновок, що метою оптимізації дозування палива є забезпечення α у межах зони III (рис.3.1) при будь-яких експлуатаційних режимах роботи двигуна на силовій установці. Використання КСК робить вирішення цієї складної задачі цілком реальним і найбільш ефективним.

3.1.1. Вимоги до КПСК паливоподачею бензинових двигунів

Наведене вище та досвід експлуатації двигунів з іскровим запалюванням дозволяють сформулювати наступні основні вимоги до комп'ютерних підсистем керування дозуванням палива:

1. Забезпечувати пускове збагачення суміші і підтримання підвищеної частоти обертання колінчастого вала при прогріві двигуна.

2. На режимах холостого ходу прогрітого двигуна відповідний канал КПСК паливоподачею має дозувати її таким чином, аби склад горючої суміші відповідав мінімально можливій усталеній частоті обертання колінчастого вала при найменшій погодинній витраті палива та найнижчій токсичності відпрацьованих газів. Для прискорення пуску холостого ходу двигуна цей канал КПСК повинен збагачувати горючу суміш, а на режимах примусового холостого ходу припиняти подачу палива. По мірі прогріву двигуна склад горючої суміші необхідно поступово збіднювати. Такі функції мають виконуватися незалежно від кількості включених споживачів (фари, кондиціонер, рації і т. п.).

3. Забезпечувати максимально ефективні показники роботи двигуна у всьому діапазоні швидкісних та навантажувальних режимів шляхом вибору оптимальних кутів випередження запалювання й паливоподачі при мінімальному викиді токсидів з відпрацьованими газами. Для цього:

- в умовах усталених режимів експлуатації при неповному відкритті дросельної заслінки КПСК повинна здійснювати подачу горючої суміші, що обумовлює задану потужність двигуна при найменшій витраті палива, тобто автоматично реалізувати програму дозування для отримання оптимальної паливної економічності;
- на усталеному режимі при повному (або близькому до повного), відкритті дросельної заслінки КПСК повинна забезпечувати подачу збагаченої горючої суміші (зона III, рис. 3.1), тобто реалізувати програму дозування для досягнення $N_{e\max}$;
- на неусталених режимах (під час перехідних процесів) КПСК повинна визначати склади горючої суміші, які дозволяють за найменший час перейти двигуну з одного усталеного режиму на інший з мінімально можливою витратою палива й токсичністю та забезпечує такий темп перехідного процесу, коли закиди режимних параметрів n і N_e стають неможливими або навіть зовсім нереальними.

4. В цілому на основі реалізації сформульованих вимог КПСК повинна забезпечити оптимальне керування паливоподачею за заданою цільовою функцією, наприклад, мінімуму середньо-експлуатаційних витрат палива при накладених обмеженнях щодо токсичності викидів, надійності, прийомистості, тощо.

5. Відключати подачу палива в аварійному режимі (перевищення допустимої частоти обертання колінчастого вала) і здійснювати перехід на запасну (усереднену) програму у випадку виходу з ладу будь-якого з датчиків.

Крім функціональних вимог, пов'язаних з керуванням роботою двигуна, КПСК повинна відповідати і спеціальним вимогам, зумовленим з особливостями експлуатації силової установки:

- висока надійність роботи в умовах значного перегріву й підвищених вібрацій;
- мінімальне власне енергоспоживання;
- мінімальні габарити і маса.

Також до спеціальних вимог щодо КПСК слід віднести й такі:

- можливість зовнішньої діагностики та самодіагностування;

◑ гнучкість у керуванні – здатність перепрограмування та адаптації до умов експлуатації, що випадково змінюються.

Підкреслимо, що вимоги до оптимізації паливоподачі на всіх експлуатаційних режимах повинні виконуватися узгоджені з дозуванням повітропостачання, бо керування робочим процесом двигуна змінюється не за g_e, а за α (склад суміші), який цілком зумовлює економічні, потужнісні, токсичні та інші експлуатаційні показники двигуна, небезпеку детонації, теплонапруженість деталей тощо.

У наступних розділах підручника цьому принциповому питанню приділятиметься належна увага.

При вивченні конструкцій і схем КПСК паливоподачею бензинових двигунів, як і газових, детальніше зупинимося на методах і засобах забезпечення важливих вимог до керування паливоподачею з урахуванням специфіки експлуатації.

3.1.2. Схемні та конструктивні особливості підсистем керування паливоподачею у двигунах з іскровим запалюванням

Підсистеми комп'ютерного керування паливоподачею у сучасних бензинових двигунах реалізовані у трьох формах:

- ┌ вприскування з індивідуальним електронним керуванням;
- ┌ вприскування з центральним електронним керуванням;
- ┌ у тому числі – електронне керування карбюратором.

Перші дві форми відрізняються тільки кількістю дозувальних пристроїв та місцем їх установки.

При індивідуальному (розосередженому, багатоточковому) вприскуванні з електронним керуванням кількість форсунок, як правило, відповідає кількості циліндрів двигуна, а місцем їх установки може бути або зона впускного клапана, або власне камера згоряння у циліндрі. Остання форма вприскування називається безпосереднім (прямим) вприскуванням палива і є перспективною, як це буде показано далі. При центральному вприскуванні з електронним керуванням незалежно від кількості циліндрів встановлюється одна (спільна) форсунка на всі циліндри, причому вона розміщується в зоні змішувальної камери, також однієї на всі циліндри.

Бачимо, що на сьогоднішній день вприскування легкого палива починає домінувати.

Тому детально зупинимося на проблемах вприскування легкого палива до циліндра [1, 2, 3].

Вприскування бензину у ДВЗ – це сучасна підсистема паливоподачі, хоча років їй не менше, ніж традиційному карбюратору.

Для розпилювання палива й виготовлення паливо-повітряної суміші в будь-якій системі живлення використовується перепад тиску: в карбюраторі за рахунок руху поршня створюється розріджування повітря у дифузорі перед жиклером, а в системах вприскування – за рахунок тиску палива, створюваного високопродуктивним насосом. Різниця нібито непринципова. Але перепад тиску в системах вприскування є майже на порядок вищим. Це забезпечує кращу гомогенізацію горючої рідини, яка характеризується дрібністю та однорідністю розпилювання, якістю змішування краплин палива з повітрям, рівномірністю розподілу цих краплин в об'ємі циліндру.

Ідея подачі палива у двигун під тиском така ж стара, як і сам ДВЗ. Перші досліди у цій галузі проведено ще на кінці XIX сторіччя. Цікаво, що почалося впровадження вприскування на бензинових двигунах для авіації з механічним вприскуванням, наприклад, на аероплані братів Райт (1903 рік). Перший експериментальний пристрій вприскування палива під тиском з'явився на чотиритактному двигуні ще 1894 року, тобто роком раніше карбюратора Даймлера і Майбаха. Фірма Bosch почала експериментувати з механічними системами вприскування у 1912 році. Однак такі системи монтувалися тоді лише на унікальних гоночних машинах на легкому паливі; до серійного виробництва справа не доходила. На серійних автомобілях того часу панував карбюратор, бо він був незрівнянно простіший у виробництві, більш надійним в експлуатації і, що головне, на порядок чи на два дешевшим. Систему вприскування палива для дизелів створила фірма Bosch у 1927 році. 1937 року цю ідею реалізували в авіаційних серійних моторах, як дизельних, так і бензинових.

Нарешті, 1954 року в Німеччині був представлений публіці легковий автомобіль з бензиновим двигуном, оснащеним механічною системою вприскування – це був знаменитий Mercedes-Benz 300SL. Пізніш подібні системи з'явились і на автомобілях BMW, Jaguar та інших фірм. У найбільш "автомобільній" країні – США – перша підсистема вприскування з'явилася 1957 року на автомобілях Chevrolet з механічною системою, ви-

готовлених корпорацією General Motors. Цього ж року фірма Bendix розробила першу систему вприскування з електронним керуванням.

Однак було потрібно ще 10 років, аби така система стала впроваджуватися. Це трапилося у 1967 році, коли автомобілі Volkswagen, оснащені електронною підсистемою вприскування ECGL (пізніше названа D-Jetronic), почали виходити на ринок США. Підсистема проіснувала майже 10 років; останніми автомобілями, на яких вона ще була, стали Volvo 164E та Mercedes 450 1975 року.

Модифікацій вприскування на сьогодні створено (й запатентовано) чимало.

Як сказано вище, вприскування здійснюється у впускний колектор (центральне вприскування – Central-point Injection), у передклапанний простір (багатоточкове вприскування – Multi-point Injection) або безпосередньо у камеру згоряння кожного циліндра двигуна (безпосереднє, або пряме вприскування – Direct Injection). Вприскувати паливо можна як безперервно (Continuous Injection), так й імпульсно, окремими послідовними порціями (Pulsed Injection).

Центральне вприскування

Пояснимо принципову схему центрального керованого вприскування рис. 2.5 та 3.2.

Перш за все, необхідно відзначити, що така КПСК паливоподачею, на відміну від звичайних карбюраторів дозволяє повністю відділити процес дозування палива від процесу сумішоутворення. Розділення функцій дозування й сумішоутворення дає можливість використовувати різні пристрої для інтенсифікації розпилювання палива, наприклад, за допомогою дифузорів змінного перерізу, ультразвуку. Паливо подається не в зону впуску, а до змішувальної камери. Перевагою КПСК центрального вприскування є їх повна взаємозамінюваність (за габаритами) з карбюраторами; крім того, тиск палива можна знизити до 0,05–0,06 МПа, що дозволяє у ряді випадків використовувати звичайний мембранний паливний насос.

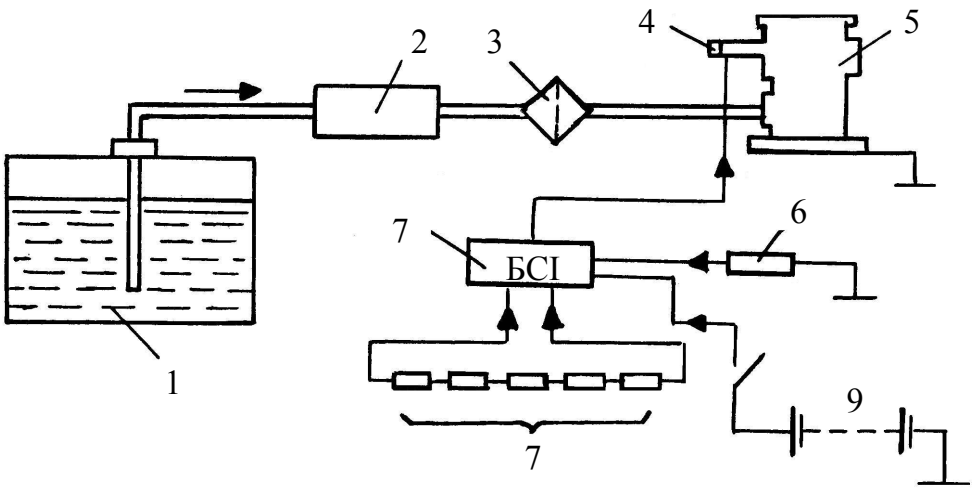


Рисунок 3.2 – Підсистема центрального вприскування з електронним керуванням:

1 – паливний бак; 2 – паливний насос; 3 – фільтр; 4 – форсунка з електромагнітним приводом; 5 – змішувальна камера; 6 – датчик стартових (запускаючих імпульсів); 7 – функціональні датчики; 8 – блок синтезу інформації; 9 – акумулятор живлення КПСК

Пояснимо особливості цієї схеми додатково. По-перше, у впускному колекторі на місці звичайного карбюратора (замість нього) прямо над дросельною заслінкою розташована електромагнітна форсунка, або інжектор 4; форсунка являє собою швидкодіючий електромагнітний клапан з соплом, який забезпечує високоефективне розпилювання палива, коли клапан відкритий. Для відкривання клапана на нього подається управляюча напруга електричного струму; паливо до форсунки підводиться під тиском 0,1 МПа через фільтр 3, електричним насосом 2, що розташовується у самому паливному баку. Кількість палива, що подається, залежить від часу відкриття клапану форсунки при стабільному тиску палива на вході у форсунку. Тривалість такого відкриття (приблизно від 1 до 20 мс) визначається електронним БСІ, який передає інформацію на керуючий комп’ютер, до складу якого входить мікропроцесор. Комп’ютер порівнює занесені в його пам’ять експериментальні дані про оптимальний режим роботи двигуна з інформацією про його навантажувальний режим у даний момент часу, яка надходить від датчиків 7 (абсолютного тиску у впускному трубопроводі, режимів економайзера, прискорення холостого ходу, теплового режиму, а також режиму відключення подачі палива на примусовому холостому ході,

тощо). Частота спрацьовування клапана форсунки є кратною частоті обертання колінчастого вала двигуна; у більш удосконалених варіантах такої системи момент вприскування пов'язаний також із фазами газорозподілу, зокрема з моментами відкриття впускних клапанів.

Дозоване й розпилене паливо з потоком повітря, прискореним у дифузорі змішувальної камери, надходить до циліндрів двигуна. Змішувальна камера КПСК з центральним вприскуванням є вертикальною, тобто з падаючим потоком горючої суміші.

Підкреслимо, що для таких систем керування спеціально розроблено змішувальні камери. Конструкція таких камер обумовлює ефективність гомогенізації горючої суміші. При їх проектуванні забезпечуються:

- якомога менший аеродинамічний опір тракту наповнення при повністю відкритій дросельній заслінці;
- оптимальна площа перерізу змішувальної камери у зоні введення палива, яка забезпечує найкращу гомогенізацію суміші; під найкращою гомогенізацією розуміється така, яка наближається до повної ($K_г \to 1$) за дрібністю розпилювання суміші, якістю перемішування з повітрям, рівномірністю розподілу палива в камері згоряння. Практично повна гомогенізація можлива лише при роботі двигуна на газі, тоді як для роботи на бензинах $K_г < 1$; тут $K_г = G_{п2} / G_{п1}$, де $G_{п1}$ – витрата палива при бензиноповітряній суміші, $G_{п2}$ – те ж при повній гомогенізації та економічному складі горючої суміші;
- як найбільше згладжування дискретності паливоподачі.

Розглянемо варіанти змішувальних камер, які реалізують перелічені вимоги.

Характерна особливість змішувальної камери (рис. 3.3, а) виявляється у розміщенні електромагнітної форсунки усередині цієї камери впродовж потоку повітря. Форсунка 5 розміщена у цьому потоці повітря, її корпус має сприятливу аеродинамічну форму. Підведення палива та повітря для розпилювання палива, а також підключення до кола електропостачання здійснюється через радіальні ребра 1. Корпус камери являє собою трубу 1 з дросельною заслінкою 6; всередині труби розміщено електромагнітну (електрокеровану) форсунку 5. Для інтенсифікації розпилювання палива у зону розпилювача по обвідній трубці 7 подається повітря із наддросельного об'єму, в якому створений тиск, близький до тиску навколишнього се-

редовища. Дозування палива здійснюється клапаном 8 форсунки, який при подачі до обмотки 4 імпульсу електричного струму (тривалістю τ_e) відкриває отвір сідла-розпилювача 9. Паливо при постійному тиску через штуцер 2 і канал 3 подається у внутрішню порожнину форсунки та із неї (при відкритті клапану) – до змішувальної камери. На режимі холостого ходу дросельна заслінка закрита й регулювання подачі повітря здійснюється гвинтом 10. Командні імпульси електричного струму від БСІ надходять до зажима 11 і далі – в електромагнітну обмотку форсунки. Перевагою цієї форсунки є сприятливий напрямок струменів палива вздовж потоку повітря, добре розпилювання палива на режимах холостого ходу та на режимах малих навантажень. До її недоліків слід віднести значну висоту, складність доступу до форсунки, зменшення подачі повітря й палива при збільшенні навантаження.

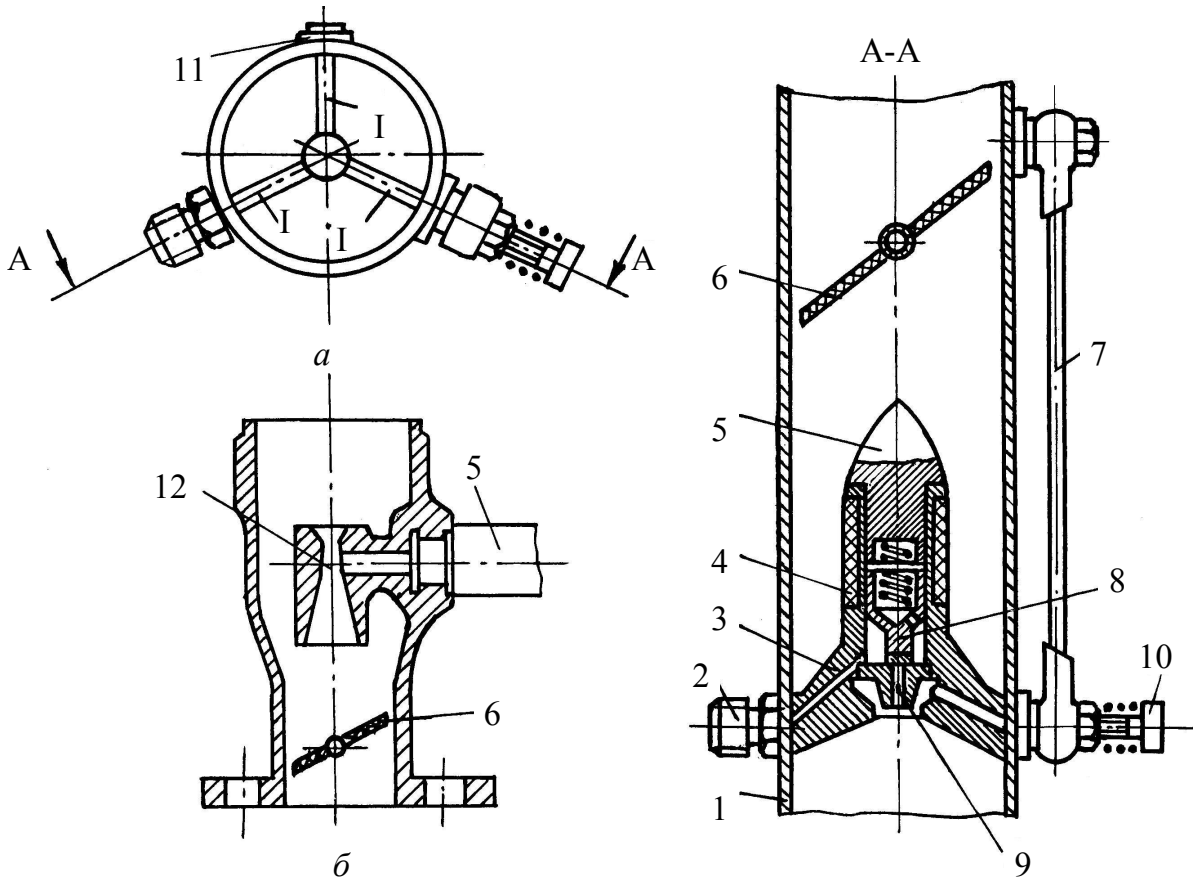


Рисунок 3.3 – Змішувальна камера системи центрального вприскування бензину з електронним програмним керуванням при розташуванні форсунки:

а – усередині камери; *б* – зовні

У варіанті змішувальної камери (рис. 3.3, б) паливо подається до малого дифузора 12. Форсунка 5 розміщена зовні камери, і при пошкодженнях її легко замінити. Розпилювання палива на режимах холостого ходу й малих навантаженнях здійснюється дросельною заслінкою 6.

В іншій змішувальної камері (рис. 3.4) паливо подається усередину осі дросельної заслінки. Поздовжні наскрізні пази в осі та у втулці дросельної заслінки забезпечують інтенсивне розпилювання палива за рахунок перепаду тисків повітря над дросельною заслінкою та за нею. У широкому діапазоні навантажень воно забезпечується за рахунок змінного перекриття зазначених пазів, коли по мірі відкриття дросельної заслінки збільшується переріз отворів для проходження повітря, яке розпилює (гомогенізує) паливо. Перевагою конструкції є ефективне сумішоутворення на режимах холостого ходу і при малих навантаженнях. Подібна камера найбільш повно задовольняє вимогу щодо габаритних розмірів та сумішоутворення. Крім того, зовнішнє розташування форсунки суттєво полегшує її заміну при пошкодженні, як і в конструкції камери, що наведено на рис. 3.3, б. Регулювання режиму холостого ходу дуже плавно забезпечується поворотом осі дросельної заслінки; при цьому змінюється перекриття отворів у втулці та осі дросельної заслінки, отже, й переріз каналу для надходження горючої суміші. Переріз змішувальної камери обирають з умови створення необхідних (для інтенсивного розпилювання палива при повністю відкритій дросельній заслінці) швидкостей потоку повітря на режимах зовнішньої характеристики двигуна; бажано, аби швидкість суміші в зоні дросельної заслінки була б не нижчою за 50 м/с.

Завершуючи розгляд КПСК центральним вприскуванням бензину у впускний тракт, наголосимо, що, безумовно, вони стали позитивним кроком порівняно з карбюраторами. Однак через дещо необґрунтоване спрощення вони мають суттєві недоліки і вже не задовольняють сучасні, більш жорсткі вимоги. Основний недолік, як і у карбюраторах, – неоднаковий розподіл горючої суміші по циліндрах та її конденсація, що суттєво посилює тертя і спрацювання деталей ЦПГ.

Тому в Європі, Японії КПСК центральним вприскування обладнуються, в основному, на невеликих автомобілях, що пов’язано з відносно невеликою вартістю таких підсистем паливоподачі. Мала кількість циліндрів при загальному літражі двигуна до 2 л зводить до мінімуму різницю

між довжиною окремих впускних каналів до циліндрів, тобто практично ліквідує негативний ефект конденсації горючої суміші та її потрапляння на дзеркала циліндрів.

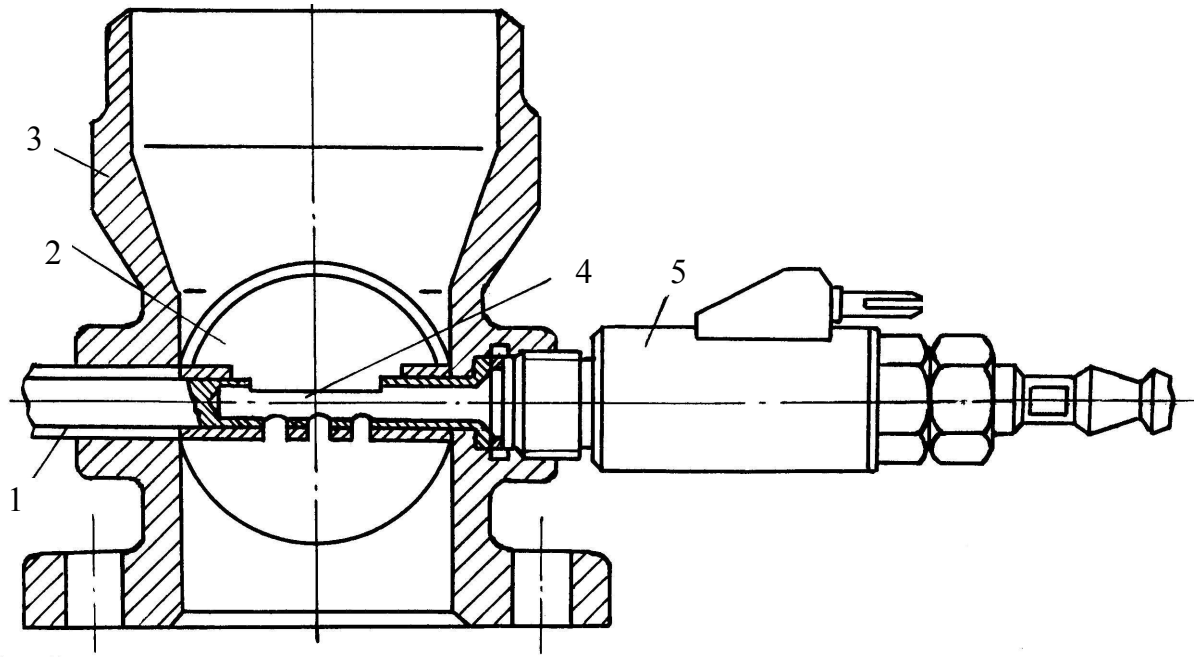


Рисунок 3.4 – Змішувальна камера карбюратора з центральним вприскуванням і програмним керуванням при подачі палива у пустотілу ось дросельної заслінки

В останні роки висловлюється точка зору [4] про те, що підсистеми центрального вприскування палива все ж не можуть бути категорично зняті з експлуатації малолітражних двигунів (до 1,7–2 л). Причини відомі: такі підсистеми простіші й дешевші (на 30 %), ніж підсистеми багатоточкового вприскування; вони більш надійні (внаслідок своєї структурної спрощеності); для їх установки замість карбюратора не треба вносити будь-які конструктивні зміни у двигуни. Тому, мабуть, російські розробники, як і українські, можуть скористатися такою нагодою. Підкреслимо, що розглянуті принципові схеми центрального вприскування належать до КПСК з програмним керуванням паливоподачею, бо вони не мають адаптивних керуючих каналів (див. рис. 2.5 та 3.2).

Однак це не свідчить, що центральне вприскування не застосовується у КПСК з програмно-адаптивним керуванням. Приклади наведено далі.

Багатоточкове вприскування

Більш досконалими є КПСК з багатоточковим вприскуванням. У них паливоподача здійснюється індивідуально до кожного циліндра. Принципову схему такої КПСК наведено вище (див. рис. 2.5). Особливості цієї схеми конкретизуємо на прикладі КПСК паливоподачею LE-Jetronic фірми Bosch [5, 16].

Паливо з бензобака 1 насосом 3 через паливний фільтр 4 подається до загальної магістралі 5, яка живить електромагнітні форсунки 19. Тиск палива підтримується постійним на рівні 2,5 бар регулятором-стабілізатором тиску 8, який спрямовує надлишки палива знову до бака. У кожний циліндр двигуна паливо вприскується окремою форсункою. Принцип дозування кількості палива, як і у всіх КПСК, – часовий. Клапани форсунок управляються електромагнітно й відкриваються синхронно з обертанням колінчастого вала двигуна поодинці або групами по два-три (так зване послідовне вприскування). Мікропроцесор комп'ютера, який входить до БСІ 10, обробляє дані від відповідних датчиків, про навантажувальний режим двигуна, частоту обертання й положення колінчастого вала, положення дросельної заслінки, температуру охолоджувальної рідини, кількість (масу) й температуру повітря, яке надходить у двигун тощо. Така інформація зіставляється з закладеними у пам'ять блока синтезу інформації експериментальними регулювальними характеристиками для оптимізації тривалості імпульсів τ_e напруги, що подаються на електромагніти клапанів форсунок. У більш досконалих моделях КПСК цього типу визначається й оптимальний момент вприскування.

Головний (командний) датчик у всіх системах вприскування – це пристрій, який вимірює кількість повітря, що надходить у двигун, і дозволяє судити про його навантажувальний режим. Вимірювати кількість повітря можна по-різному.

У першій найпростішій КПСК багатоточкового вприскування фірми Bosch D-Jetronic вимірювався тиск у впускному колекторі, звідки з'явилось позначення D (Druck з німецької – тиск). Це був такий самий непрямий метод, як і у карбюраторі. У 1974 році з'явилася КПСК L-Jetronic, у якій кількість повітря, що живить двигун, визначалася більш точно: за кутом відхилення шторки або лопаті датчика повітряного потоку (Luft-повітря). Найбільш точний метод вимірювання використовувався у КПСК LH-Jetronic

(1984 рік), LH-Motronic (1984 рік) та LH-Motronic (1987 рік). Motronic за класифікацією Bosch визначає КПСК вприскуванням, об'єднану з блоком

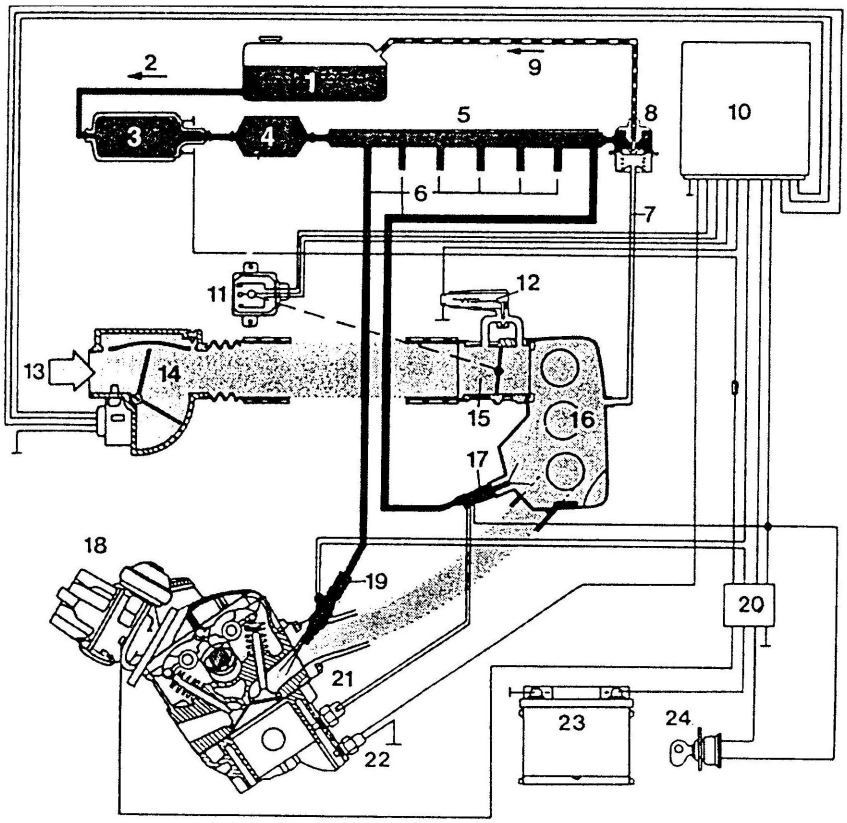


Рисунок 3.5 – Схема підсистеми багатоточкового вприску LE-Jetronic (на прикладі шестициліндрового автомобіля BMW):

1 – бензобак; 2 – бензопровід; 3 – шиберний роликовий паливний насос; 4 – паливний фільтр; 5 – розподільчий паливопровід; 6 – паливопроводи; 7 – керувальний паливопровід низького тиску;8 – регулятор тиску; 9 – зворотний паливопровід; 10 – блок синтезу інформації (блок керування); 11 – мікровимикач – датчик положення дросельної заслінки; 12 – заслінка додаткового повітря; 13 – вхід усмоктуваного повітря; 15 – патрубок дросельної заслінки; 17 – пусковий клапан холодного двигуна; 18 – розподільник запалювання; 19 – електромагнітна форсунка; 20 – реле; 21 – термореле з витримкою часу; 22 – датчик температури охолоджувальної рідини; 23 – акумуляторна батарея; 24 – вмикач запалювання і стартера

керування запалюванням. Літера H у позначенні – з німецького Heiss – гарячий. Дійсно, у термоанемометрах витратомірів цього типу використовується тонкий (70 мкм) платиновий провідник, нагрітий до 100 ºС. Потік по-

вітря (вимірюваний) охолоджує цей провідник; за зміною його електричного опору й визначається кількість (масова) повітря, що живить циліндр. Перевага: пряме вимірювання маси, що дозволяє відмовитися від поправок на температуру й питому вагу або висоту над рівнем моря.

Підсистема за показаннями головного датчика 14 виробляє електричний командний сигнал на керування паливоподачею з урахуванням сигналів інших функціональних датчиків.

Підсистема має спеціальний пристрій, який виключає паливоподачу на режимах примусового холостого ходу. Він починає працювати при закритій дросельній заслінці, задіяній на центральний вимикач або при $n < 1000 \text{хв}^{-1}$, причому n змінюється залежно від температури у системі охолодження, але не перевищує 1800 хв^{-1}, тобто близько половини номінального значення n.

Передбачено також пристрій, що пропускає повітря в обхід дросельної заслінки під час прогрівання двигуна.

Електронний блок керування живиться від електричної мережі автомобіля.

З рис. 3.5 бачимо, що у КПСК LE-Jetronic використовується принцип програмно-адаптивного керування. Це зумовлено наявністю датчика концентрації кисню у відпрацьованих газах двигуна (λ-зондом). Цей датчик забезпечує адаптивний канал керування пристроєм хімічної нейтралізації викидів, про що мова йтиметься далі.

Безперервне вприскування

Наведені вище КПСК є імпульсними, бо вприскування палива форсунками вони здійснюють дискретно. Запропоновано [2] подавати паливо форсунками безперервно, змінюючи лише його кількість залежно від навантаження на двигун. Мова йде про підсистеми K-Jetronic, KE-Jetronic, KE3-Jetronic, KE-Motronic та ін. Вони використовуються на двигунах європейського виробництва (фірми Audi, BMW, Ferrari, Mercedes, Peugeot, Porsche, Renault, Rolls-Royce, Volvo, Volkswagen і т.д.).

Головні принципи будови зазначених КПСК:

- безперервне вприскування палива;
- безпосереднє (пряме) вимірювання витрати повітря.

На рис. 3.6 [6] наведена схема однієї з сучасних чи не найдосконаліших КПСК безперервним вприскуванням палива типу KE-Jetronic фірми

Bosch. Літера К в позначенні – від німецького Kontinuerlich – безперервний.

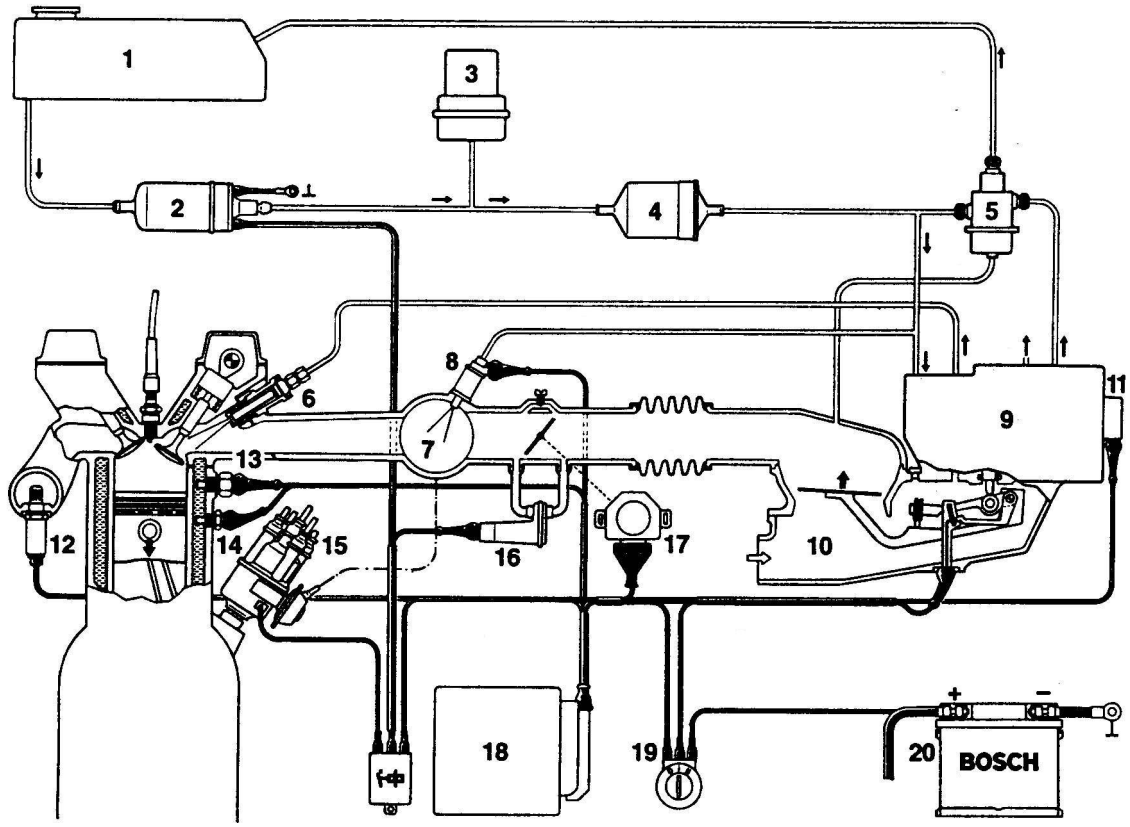


Рисунок. 3.6 – Схема КПСК безперервним вприскуванням типу KE-Jetronic фірми Bosch [16]:

1 – паливний бак; 2 – електричний паливний насос; 3 – гідроакумулятор палива; 4 – паливний фільтр; 5 – стабілізатор перепаду тиску палива; 6 – електромагнітна форсунка; 7 – впускний колектор; 8 – пускова форсунка; 9 – дозатор; 10 – вимірювач витрати повітря; 11 – електрогідравлічний коректор тиску; 12 – λ-зонд (датчик концентрації кисню (O_2) у відпрацьованих газах); 13,14 – датчики температури охолоджувальної рідини; 15 – розподільник запалювання; 16 – регулятор холостого ходу; 17 – датчик положення дросельної заслінки; 18 – БСІ (блок електронного керування); 19 – вимикач запалювання; 20 – акумуляторна батарея

Ця підсистема, на відміну від K-Jetronic з механічним керуванням, має БСІ (блок синтезу інформації), тобто мікропроцесорний блок керування, який забезпечує додаткові функції.

Розглянемо роботу такої КПСК. Паливо проходить через розподільник (дозатор) палива 9 (його показано на рис. 3.7). Діафрагментний регулятор підтримує тиск у КПСК на постійному рівні. Кількість палива, яке подається розподільником, регулюється зміною перерізів дозувальних отворів у ньому. Кількість отворів прямокутної форми відповідає кількості циліндрів двигуна. Розміри дозувального отвору залежать від положення керувального плунжера. Для отримання постійного значення падіння тиску в цих отворах при різних витратах повітря використовується регулятор перепаду тиску, що встановлюється за кожним дозувальним отвором.

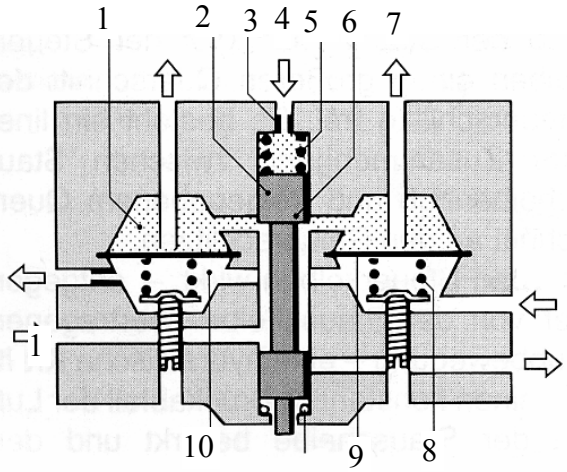


Рисунок 3.7 - Розподільник дозування палива [17]:

1 – верхня камера диференційного клапана; 2 – керувальний поршень; 3 – дозувальний отвір; 4 – підведення палива (тиск у системі); 5 – пружина; 6 – керувальна кромка й регулювальний прохідний переріз; 7 – трубопровід до форсунки вприскування (тиск вприскування); 8 – пружина клапана; 9 – мембрана клапана; 10 – нижня камера диференційного клапана;

У цій підсистемі початковий тиск і тиск, що діє на керувальний плунжер, рівні за значенням. Відношення кількостей повітря та палива корегується за рахунок різниці тисків одночасно у всіх камерах розподільника палива.

Тиск у системі перед дозувальними отворами (рис.3.7) приводить до протитиску на керувальний плунжер, який переміщується заслінкою вимірювача витрати повітря (див. рис.3.6). Із порожнини керувального плунжера паливо проходить через виконавчий механізм, нижні камери клапана різниці тисків, обмежувач потоку й регулятор тиску, а вже потім надлишкове паливо повертається до паливного бака. Разом з обмежувачем потоку виконавчий механізм утворює дільник тиску.

Падіння тиску, що відповідає силі струму у виконавчому механізмі, призводить до змін у перепаді тисків в дозувальних отворах, отже, забезпечує зміну кількості вприскуваного палива.

Коли у верхню камеру надходить більша кількість палива, мембрана вигинається вниз і відкриває прохідний переріз клапана дотi, доки не буде досягнуто встановлений пружиною диференційний тиск. Коли потік палива зменшується, мембрана вигинається менше і зменшує прохідний переріз. Таким чином, мембрана знаходиться у рівновазі, яка підтримується для кожної кількості палива шляхом зміни прохідного перерізу клапана.

При зміні полярності струму, який підводиться, припиняється надходження палива, що може використовуватися для припинення подачі палива при перевищенні встановлених значень частоти обертання колінчастого вала.

Електрогідравлічний коректор тиску 11, що показаний на рис. 3.8, закріплюється на розподілювачі й забезпечує дозування палива зміною перепаду біля кромки плунжерного дозатора. Збагачення робочої суміші здійснюється пропорційно збільшенню підведеного струму. Оскільки потік постійного магніту не змінюється, а потік електромагніту є пропорційним електричному струмові у котушці електромагніту, результуючий момент, що повертає заслінку, буде пропорційним силі струму.

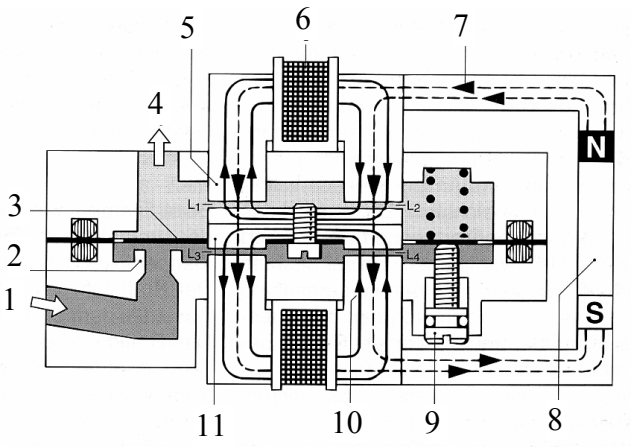


Рисунок 3.8 – Електрогідравлічний коректор тиску [17]:

1 – подача палива (системний тиск); 2 – сопло; 3 – заслінка; 4 – вихід палива до форсунок вприскування; 5 – магнітний полюс; 6 – котушка електромагніту; 7 – магнітний потік, створюваний постійним магнітом; 8 – постійний магніт; 9 – регулювальний гвинт для установки початкового обертального моменту; 10 – магнітний потік, викликаний електромагнітом; 11 – якір; L_1, L_2 – повітряні щілини (зазори)

У БСІ здійснюється обробка сигналів, що надходять з пристрою керування запалюванням (частота обертання колінчастого вала) від датчика температури охолодної рідини, потенціометра на осі дросельної заслінки (витрата повітря), датчика її положення (режим холостого ходу, примусовий холостий хід, режим повного дроселя), вимикача стартера, λ-зонда, да-

тчика тиску та інших датчиків. Найбільш важливими в БСІ є керувально-контрольні функції:

- збагачення суміші під час запуску і після запуску двигуна;
- збагачення суміші під час прогрівання;
- збагачення суміші під час розгону автомобіля;
- збагачення суміші при повному навантаженні двигуна;
- припинення подачі палива при перевищенні частоти обертання колінчастого вала;
- керування частотою обертання колінчастого вала на холостому ході;
- регулювання складу горючої суміші залежно від висоти над рівнем моря;
- адаптація керування паливоподачею за сигналами λ-зонда, що робить цю підсистему КПСК програмно-адаптивною; потрібні регулювання за сигналами цього зонда виконуються з допомогою регулятора тиску.

Бачимо, що ці функції КПСК відповідають вимогам, сформульованим вище щодо керування паливоподачею у бензинових двигунах.

Деталізуємо реалізацію цих функцій КПСК безперервним вприскуванням на прикладах підсистем, як наведеної на рис.2.22, так і карбюратора з електронним керуванням фірми Pirburg, який випускається під назвою Ecotronik [1] та ін.

Це багатофункціональна підсистема комп'ютерного керування двокамерним карбюратором, яка забезпечує програмно-адаптивне підтримання стехіометрічного складу горючої суміші ($\alpha \rightarrow 1$) на експлуатаційних режимах двигуна, що принципово є необхідною умовою роботи окислювальної камери хімічного нейтралізатора CO, яку неможливо реалізувати при програмному управлінні, оскільки, як уже зазначалось, випадкові зміни умов експлуатації не сполучаються з жорсткою програмою дозування паливоподачі. Крім того, забезпечується оптимальний склад горючої суміші на режимах пуску і прогрівання, а також регулюється частота обертання колінчастого вала двигуна на режимах холостого ходу за критерієм мінімізації витрат палива при уповільненні закриття дросельної заслінки й включенні економайзера. Підтримання заданої частоти обертання колінчастого вала n на режимі холостого ходу, незалежно від температури й в'язкості мастила, втрат на тертя, включення й виключення кондиціонера та інших агрегатів, що підтримують комфортність у салоні водія, є дуже важливою

експлуатаційною якістю автомобільного двигуна, що досягається відносно просто. При відхиленні значення n на 10 хв$^{-1}$ виконавчий пристрій автоматично за командою мікропроцесора, що входить до складу комп'ютера, змінюючи положення дросельної заслінки, встановлює попередню частоту обертання n.

Збагачення горючої рідини при пуску і прогріванні здійснюється так. Пуск холодного двигуна можливий лише у тому випадку, якщо кількість і склад горючої суміші зумовлює отримання індикаторної потужності, що дорівнює або є більшою за сумарні втрати у механізмах ДВЗ, які різко зростають внаслідок високої в'язкості мастила. Через наявність холодних стінок камери згоряння випаровування палива не є достатнім. Тому необхідна кількість парів має бути отримана за рахунок надлишкової подачі палива. Виконавчий пристрій трохи відкриває дросельну заслінку до положення, що відповідає максимуму значення n холостого ходу. У випускному трубопроводі по мірі прогрівання двигуна виконавчий пристрій поступово прикриває дросель до положення холостого ходу при заданій температурі.

На режимах різкого збільшення n, коли потрібне короткочасне збагачення горючої суміші (у звичайних карбюраторах такі функції виконує насос-прискорювач), керування дроселем є аналогічним попередньому. Відповідні датчики і виконавчі механізми описано нижче.

Для підключення подачі палива під час переходу двигуна на режим примусового холостого ходу дросельна заслінка закривається на декілька більший термін часу, ніж необхідно для її нормального положення за даною температури. В результаті цього надходження горючої рідини у циліндри припиняється, колінчастий вал продовжує обертатися тільки від трансмісії автомобіля. При переході на навантажувальні режими водій відкриває дросель, він проходить порогове значення, у двигун за командами БСІ починає подаватися горюча суміш, і його робота відновлюється. При виключенні запалювання інколи має місце продовження роботи двигуна, зумовлене калільним запалюванням, тобто у непередбачених (некерованих) умовах, без втручання підсистеми керування запалюванням. Гарантію зупинки двигуна спричиняє виключення запалювання палива, що проходить за тією ж самою схемою, як і при переході на режим примусового холостого ходу. За сигналами відповідного датчика й командами БСІ

дросель повністю закривається, подача горючої суміші припиняється і двигун зупиняється.

Підкреслимо, що подібним чином та з аналогічними допоміжними й основними функціями діє більшість сучасних КПСК безперервним вприскуванням. Виняток становить КПСК типу Ecotronik (про яку вже йшлося, де, крім дросельної заслінки, є ще й повітряна заслінка. Тут регулювання ґрунтується на узгодженому управлінні дроселем і повітряною заслінкою; це дає можливість реалізувати комп'ютерне керування, не застосовуючи дискретне дозування паливоподачі. Кожна заслінка має свої керувальні датчики та виконавчі пристрої. Канали керування обома заслінками задіяні на мікропроцесор. Все це надає специфіки керуванню, наприклад, пуском холодного двигуна, його прогріванням, адаптивним каналом λ-зонда. Спочатку виконавчий пристрій трохи відкриває дросель до положення $n_{\text{xx}_{\max}}$. Повітряна заслінка при цьому зачиняється до положення, яке забезпечує холодний пуск двигуна. Потім у впускному трубопроводі виникає перепад тисків, дросель автоматично встановлюється в положення холостого ходу при даному ступені прогріву двигуна. Далі, по мірі подальшого прогрівання, виконавчі пристрої поступово трохи закривають дросель і так само трохи відкривають повітряну заслінку. Замість насоса-прискорювача (як у карбюраторах) його функції замінює повітряна заслінка; на режимах різкого збільшення n здійснюється прикриття повітряної заслінки й подальше її відкриття за експоненціальним законом до положення, що відповідатиме вже новому режиму роботи. Адаптивний канал для підтримання $\alpha \approx 1$ на експлуатаційних режимах має виконавчий пристрій – ту ж повітряну заслінку. При переході в зону збагаченої суміші у відпрацьованих газах відсутній O_2; тоді датчик кисню (λ-зонд) видає в БСІ адаптивний імпульс, що перетворений та посилений приймається виконавчим пристроєм повітряної заслінки, яка за цим командним сигналом трохи відкривається до моменту появи у відпрацьованих газах вільного кисню. Знову спрацьовує λ-зонд, який формує команду незначного закривання повітряної заслінки до положення збагаченої суміші. Далі все повторюється. Таким чином і забезпечується адаптивне підтримання стехіометричного складу горючої суміші, що необхідно для нормальної роботи нейтралізатора.

Безпосереднє вприскування

Перспективною модифікацією багатоточкового керованого вприскування є система безпосереднього або прямого вприскування, при якому вприскування бензину здійснюється не у впускний колектор, а безпосередньо у камеру згоряння (як у дизелях).

Цікаво, що перша у світі підсистема вприскування для серійного бензинового двигуна належала якраз до цієї категорії (йдеться, як відомо, про двигун автомобіля Mercedes-Benz 300 SL, 1954). Але там використовувалися паливні насоси високого тиску з механічним приводом від двигуна, що вимагало максимальної точності виготовлення й ретельного регулювання. Такі підсистеми мали велику вартість і вимагали високого рівня їх обслуговування та й Mercedes-Benz 300 SL можна назвати серійною машиною тільки із значною натяжкою: широкого застосування вона не знайшла.

Реалізація на сучасному технічному рівні КПСК паливоподачі з прямим вприскуванням для бензинових двигунів потребує вирішення ряду конструктивних і технологічних проблем, і здійснити її у масовому виробництві поки що не вдається.

Не зважаючи на це, ідея вважається перспективною, а розробки в такому напрямку ведуться багатьма фірмами.

Провідними тут є кращі японські фірми Toyota та Mitsubishi.

На Tokyo Show наприкінці 1993 року фірма Toyota першою продемонструвала новий двигун Д-4 [2]. Це 4-циліндровий бензиновий двигун з безпосереднім вприскуванням палива, який працює на перезбідненій горючій суміші із ступенем тиску 12,5 (за відсутності детонації). Паливо подається під великим (для легкого бензинового палива) тиском 10 МПа. Момент початку вприскування регулюється автоматично залежно від навантаження на двигун: при малих та середніх навантаженнях вприскування починається пізніше щодо ВМТ, при великих – раніше. Для керування турбулізацією потоку у циліндрі застосований спеціальний клапан у повітряному впускному клапані, що відкривається при великих навантаженнях. Робота над двигуном продовжується; по закінченні її японські конструктори мають надію домогтися 20 % експлуатаційної (реальної) економії палива. Масового упровадження двигунів з безпосереднім вприскуванням фірма очікує не раніше 2005–2010 років.

Така впевненість підтверджується позитивною практикою у цьому

напрямку фірми Mitsubishi Motors [3].

Розглянемо накопичений досвід цієї фірми.

Реалізацію безпосереднього вприскування конструктори замислили на добре відомому чотирициліндровому 16-клапанному (по 4 на циліндр) двоваловому моторі 4G93 (встановлюється на автомобілях Mitsubishi Galant, Space Runner і Carisma, літражем 1834 см^3). При модернізації передбачено наступне. По-перше, повітря подається вертикально зверху, а не збоку, як традиційно; фірма стверджує, що вертикальне повітроподавання поліпшує наповнення циліндра. Крім того, змінили поршень (рис. 3.9); його незвичайне усічене дно із сферичним заглибленням дозволяє різко спрямувати потік повітря у зворотний бік. Тим самим упорядковується рух повітря і він стає стабільнішим. Поліпшується наповнення циліндра, а також сумішоутворення.

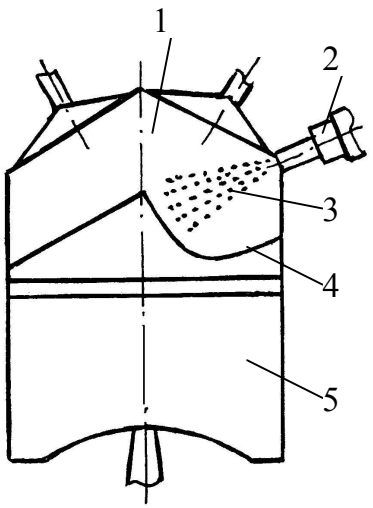


Рисунок 3.9 - Конструктивна схема поршня перспективного бензинового двигуна з безпосереднім вприскуванням типу 4G93 фірми Mitsubishi Motors:

1 – камера згоряння; 2 – форсунка; 3 – струмінь палива; 4 – контур камери згоряння з боку поршня; 5 – поршень

Нарешті, використали новий паливний (для бензину) насос із значно підвищеним тиском (5,0 проти 0,33 МПа на традиційному двигуні 4G93). Ступінь тиску підвищили з 10,5 до 12. Спочатку заряд палива розміщується над поршнем, а потім повітряним вихором доставляється до свічки запалювання. У ході численних експериментів (щодо підбору форми поршня, інтенсивності повітряного вихора тощо) конструктори домоглись, аби найзбагачена суміш утворювалася безпосередньо навколо свічки. Так, вдалося примусити працювати двигун на максимально збідненій горючій суміші – співвідношення повітря / бензин у цьому моторі сягає до 40:1.

У підсумку, двигун може працювати на збідненій суміші, не втрачаючи при цьому в потужності та суттєво виграючи в паливній економічнос-

ті, бо в зоні згоряння (біля свічки) витримуються склади горючої суміші, що відповідають $g_{e\min}$ та $N_{e\max}$.

Випробування показали, що на холостих обертах колінчатого вала витрата палива у нового мотора на 40 % нижча, ніж у 4G93. Випробування мотора безпосередньо на автомобілі виявили 25 % економію палива при швидкості 40 км/год. Аналогічна економія отримана і при русі в міському циклі. Економія палива на різних режимах руху наведена у табл.3.1.

Таблиця 3.1 – Економія палива при русі автомобіля за міським їздовим циклом

Умови їзди		Економія палива, % 5 10 15 20 25 30 35
Японський стандарт 10•15		
Рух у місті	Токіо, середня швидкість 25 км/год	
	Токіо, середня швидкість 45 км/год	
Рух за містом	60 км/год	
	100 км/год	

Нарешті, щодо потужнісних показників. Для їх забезпечення фірма запровадила охолодження горючої суміші (завдяки випаровуванню бензину в новій камері згоряння) безпосередньо у циліндрі, що дозволило без виникнення детонації підвищити ступінь тиску до 12 при використанні бензину з тим же октановим числом. Крім того, велику роль зіграла й форма факела розпилювання вприскуваного бензину (форма конуса), який підібрано ідеальним для гомогенізації суміші. Результат – літрова потужність, як і максимальний крутний момент, підвищилися на декілька відсотків практично в усьому діапазоні роботи двигуна (рис.3.10). Як наслідок, приблизно на 5 % поліпшилася динаміка автомобіля – як з механічною, так і з автоматичною КПП.

Але новий двигун поки що має деякі вади.

На дуже навантажених режимах експлуатації мотор “не справляється” з перезбідненою робочою сумішшю. Двигун з безпосереднім вприску-

ванням бензину функціонує лише на двох режимах – в економічному та “тяговому”.

Принципово КПСК безпосереднім вприскуванням бензину не відрізняється від керування таким вприскуванням дизельного палива (у дизелях). Тобто керуванню підлягають: циклова витрата бензину; кут випередження вприскування та характеристики паливоподачі (максимальний тиск палива і тривалість вприскування), тощо.

Існує і відмінність: необхідно ще керувати кутом випередження запалювання бензину за допомогою керування свічкою.

Загальні особливості керування безпосереднім вприскуванням будуть викладені далі у розділі 3.2.

І останнє. Безумовно, керування паливоподачею у бензинових двигунах найчастіше пов’язане з керуванням запалювання в них.

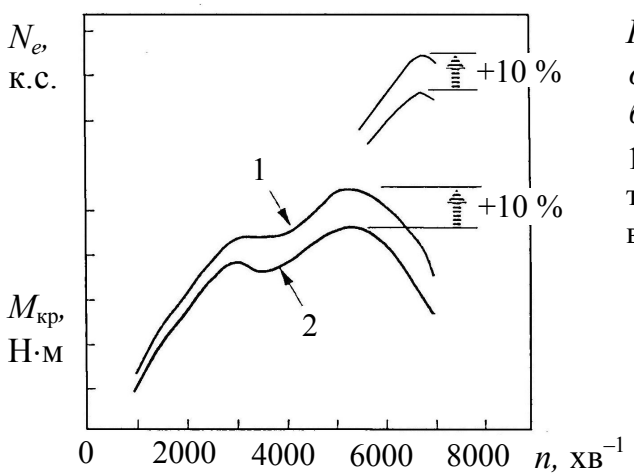


Рисунок 3.10 – Показники перспективного двигуна з безпосереднім вприскуванням бензину [16]:

1 – безпосереднє вприскування (ступінь тиску 12); 2 – звичайне багатоточкове вприскування (ступінь тиску 10,5)

Як свідчить практика, найкращих результатів досягають шляхом комбінованого керування одночасно цими обома процесами. З огляду на специфіку такого керування, воно розглядається окремо, у підрозд 3.1.3.

3.1.3. Комбіновані підсистеми керування запалюванням та вприскуванням бензину

В останні роки вважаються найбільш ефективними (і тому – перспективними) комбіновані підсистеми керування процесами запалювання горючої суміші та вприскування бензину.

Такий підхід враховує тісні взаємозв'язки цих процесів і те, що необхідно виходити з їх впливу на вирішення проблем керування двигуном. Сказане ілюструють рис. 3.11, 3.12. Саме це й треба покласти до основи розробки оптимальних алгоритмів програм керування для закладання до пам'яті мікропроцесора.

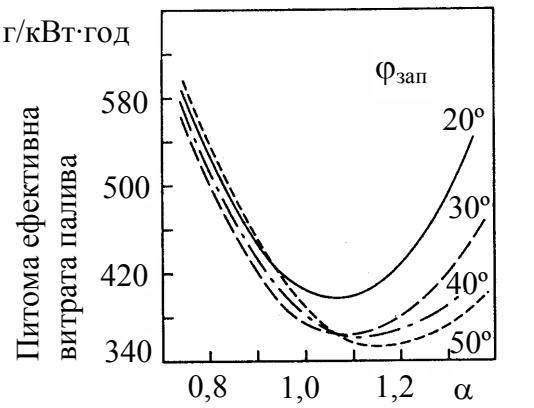


Рисунок 3.11 – Вплив складу горючої суміші (α) *та моменту запалювання* ($\varphi_{зап}$) *на витрату палива та крутний момент бензинового двигуна [6]*

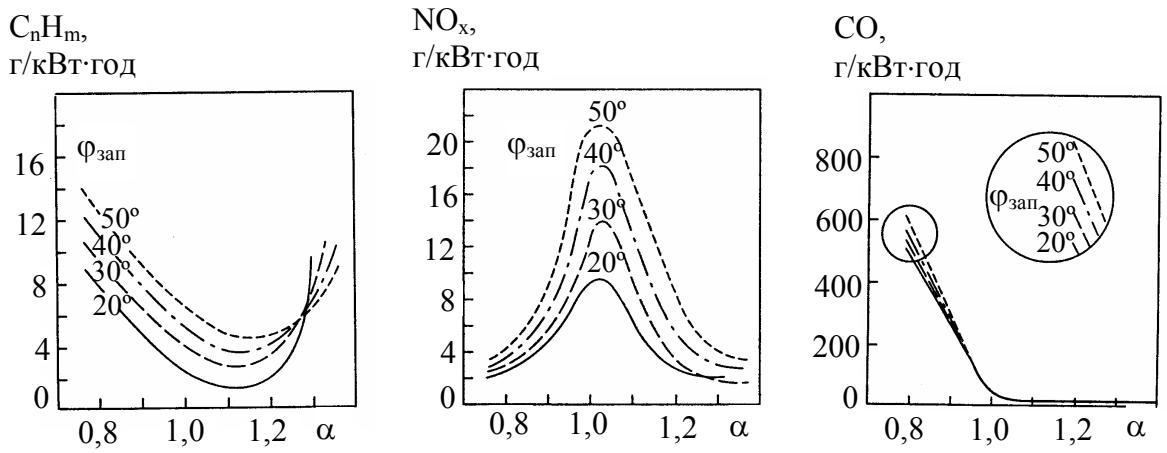


Рисунок 3.12 – Вплив складу горючої суміші (α) *та моменту запалювання* ($\varphi_{зап}$) *на токсичність відпрацьованих газів бензинового двигуна [6]*

Перш ніж розглядати такі КПСК, зупинимося на основних поняттях електронного керування запалюванням горючої суміші в бензинових двигунах.

Момент запалювання. Зміни моменту запалювання відбиваються на витраті палива й токсичності відпрацьованих газів. Збільшення випередження запалювання підвищує потужність двигуна, знижує витрату палива і призводить до зростання викидів C_nH_m (вуглеводи, що не згоріли) й особливо оксидів азоту (NO_x). Однак дуже випереджене запалювання може викликати детонацію. Запізнювання запалювання веде до підвищення температури відпрацьованих газів, що також негативно впливає на роботу двигуна. Підсистеми електронного керування двигуном програмуються так, аби момент запалювання відповідав частоті обертання колінчастого вала, навантаженню, температурі тощо, тобто використовуються для досягнення компромісу між взаємно протилежними цілями.

Запалювання. Надійне запалювання, по-перше, стимулює якісне й повне вигоряння горючої суміші. По-друге, воно у широкому діапазоні режимів роботи двигуна є суттєвим фактором для ефективної роботи каталітичного нейтралізатора. Пропуски запалювання призводять до догоряння суміші в самому каталітичному нейтралізаторі, його перегрівання і виходу з ладу. Здатність палива до запалювання підвищується за рахунок його ефективного розпилювання й доброго доступу суміші до електродів свічки, а також шляхом збільшення тривалості іскрового заряду й довжини самої іскри (збільшений зазор між електродами свічки). Свічка запалювання визначає довжину іскри; тривалість іскрового заряду залежить від типу і конструкції пристроїв запалювання, а також від умов, при яких здійснюється запалювання. Хоча енергійне (інтенсивне) завихрення горючої суміші є бажаним з точки зору якості сумішоутворення та згоряння, воно може погасити іскру, призводячи до неповноти згоряння суміші. Тому енергія, яку запасено у котушці запалювання, повинна бути достатньою (0,2–0,3 МДж) для отримання одного або кількох послідовних іскрових зарядів.

Транзисторний принцип запалювання. Сьогодні ще досить поширеними є безконтактно-транзисторні прилади запалювання, які замінили на нових моделях двигунів батарейні пристрої. Тут переривник замінюється магнітно-імпульсним електрогенератором, або імпульсним генератором Холла (рис. 3.13). Генератор створює імпульси струму і його напруги безконтактним способом, які, у свою чергу, за допомогою електронних схем виробляють імпульси високої напруги. Імпульсні генератори індукційного

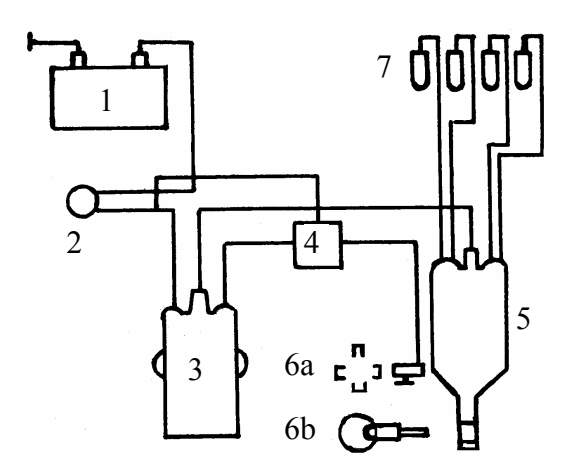


Рисунок3.13 – Схема безконтактно-транзисторної підсистеми запалювання [6]:
1 – акумуляторна батарея; 2 – вимикач запалювання; 3 – котушка запалювання; 4- електронний блок; 5 – розподільник запалювання з відцентровим і вакуумним механізмами регулювання випередження запалювання; 6а – імпульсний генератор індукційного типу; 6b – імпульсний генератор, заснований на ефекті Холла (альтернативний варіант); 7 – свічі запалювання

струму є генераторами змінного струму з постійним збудженням, мають статор і ротор. Кількість пар полюсів ротора відповідає кількості циліндрів двигуна. Частота й амплітуда змінного струму, що створюється у генераторі, змінюється відповідно до зміни частоти обертання колінчастого вала двигуна. БСІ КПСК запалюванням та вприскуванням палива обробляє інформацію про напруги змінного струму й використовує її для керування запалюванням. Імпульсний генератор Холла базується на відповідному ефекті. Чутливе до зміни швидкості обертання *n* магнітне поле створює в електрозарядженому полупровідниковому шарі імпульси напруги, які й подаються до БСІ. Імпульсні генератори мають суттєві переваги перед механічними переривниками, тому що вони не схильні до спрацювання, тобто не потребують обслуговування. Вони також забезпечують більш точне керування моментом запалювання.

Особливості електронних блоків керування запалюванням. Фактично всі сучасні блоки такого керування мають у початковому колі регулятори струму, а також контур зміни моменту запалювання за кутом обертання колінчастого вала. Коло зміни моменту запалювання за цим кутом зменшує до мінімуму час роботи кола регулювання струму. Це дозволяє знизити втрати струму в БСІ, а також компенсувати зміни напруги акумуляторної батареї та температури котушки запалювання.

В останні роки електронні підсистеми керування вприскуванням бензину комбінуються з електронним блоком керування запалюванням.

Найбільш поширеною є комбінована підсистема запалювання і вприскування Motronic M5, до розгляду якої й перейдемо [6]. Хоча ця підсистема була значно модернізована після її введення в експлуатацію, основні

її елементи (вприскування палива й електронне запалювання) залишилися без змін.

Випускаються і переважно використовуються КПСК:

- Motronic M5 на основі безперервного розосередженого (багатоточкового) вприску;
- Mono-Motronic на основі підсистеми Mono-Jetronic дискретного центрального вприскування бензину;
- Motronic MED7 на основі безпосереднього вприскування (наведена у підрозд. 3.1.4).

За допомогою датчиків усі параметри, необхідні для отримання оптимального згоряння, передаються до БСІ, де виконується їх обробка. Про те, як характер сумішоутворення і склад суміші разом з даними щодо встановлення моменту запалювання впливають на процес згоряння, дивись рис. 3.11, 3.12.

Основними керувальними змінними є частота обертання колінчастого вала й режим навантаження. Відповідні датчики описуються в підрозд. 3.1.5. Саме ці параметри є основними для визначення оптимальних характеристик дозування палива при вприскуванні й кута випередження запалювання.

Підсистема Motronic забезпечує точне визначення моментів запалювання і вприскування бензину навіть на режимах розгону і гальмування.

Електронний блок керування (БСІ) на основі інформації від датчиків забезпечує контроль умов роботи двигуна через дуже короткі інтервали часу (мілісекунди).

Аналогово-цифровий перетворювач переводить відфільтровані сигнали у цифровий формат; це дозволяє обробити всю інформацію в мікропроцесорі перед передачею її на ланцюги виходу. Задавальні контури (кола вихідних посилювачів) перетворюють сигнали низької потужності у сигнали тієї потужності, яка необхідна у різних приводах виконавчих пристроїв КПСК. У пам’яті зберігаються програми й установчі дані, забезпечуючи їх узгодженість за рахунок нечутливості до коливань у рівнях сигналів та похибках.

Програма має задовольняти граничні характеристики двигуна (у реальному масштабі часу); для 6-циліндрового двигуна, наприклад, що працює при максимальній частоті n, відрізки часу між окремими робочими

циклами сягають всього 3 мс. Основні розрахунки мікропроцесора повинні виконуватися не довше цього часу.

Щодо виконавчих пристроїв, сучасні КПСК Motronic застосовуються для запалювання з однією котушкою запалювання на один або два циліндри двигуна.

Власне, КПСК Motronic складається з ряду елементів. Особливо підкреслимо, що коли запалювання і вприскування палива об'єднані в одну підсистему (по суті таку КПСК можна б назвати "КПСК згоряння"), окремі елементи підсистеми починають набувати такою гнучкості й діапазону дій, які виходять за межі, властиві кожному з цих елементів поодинці.

КПСК Motronic може виконувати функції по вибору керувальних параметрів, наведених на діаграмах рис. 3.14, а також додаткові функції зі зниження токсичності й підвищення паливної економічності.

Функціональна схема КПСК запалюванням та паливоподачею у бензинових двигунах показана на рис. 3.15.

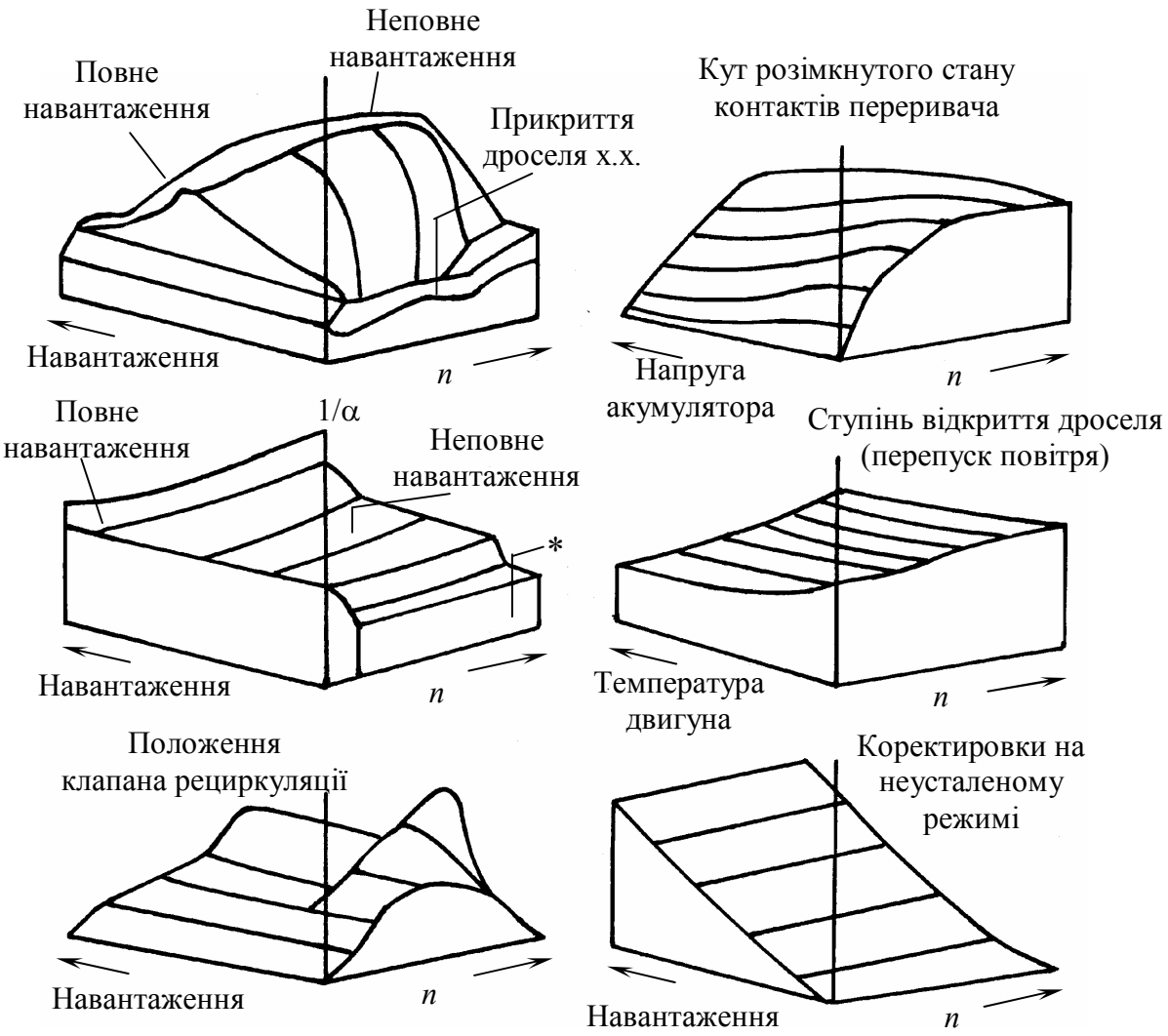
Адаптивне керування на вході є важливою стандартною особливістю цієї КПСК з λ-зондом; це особливо важливо для підтримання вимог щодо токсичності відпрацьованих газів упродовж всього терміну служби автомобіля.

Поліпшення показників економічності й підвищена потужність двигуна є головними причинами того, що контроль за детонацією став також стандартною характеристикою двигуна. Керування частотою обертання колінчастого вала на холостому ході було природною передумовою для об'єднання цієї КПСК з каналами зниження викидів пари палива (продувочний канал) та керування фазами газорозподілу.

Усе сказане знайшло своє відображення у схемі рис. 2.31 і становить стратегію адаптації бензинових двигунів за цілою низкою найважливіших напрямків поліпшення їх технічного рівня та конкурентоспроможності.

Розглянемо таку стратегію детальніше.

Замкнуті контури керування все більшою мірою доповнюються адаптивними, оскільки запізнювання спрацьовування контурів робить необхідним підвищувати точність керувальних дій. Як вимірювані змінних при адаптуванні використовуються й змінювані параметри замкнутого контуру (контурів), наприклад, *n* та ін.



* - припинення подачі палива при перевищенні *n* встановленого значення

Рисунок 3.14 - Діаграма для вибору керувальних параметрів у КПСК Motronic (приклади) [16]

Адаптивні змінні (програма дозування палива, подача повітря у режимі холостого ходу та кут повороту дросельної заслінки) зменшують необхідність у регулюваннях як на стадії виробництва двигуна, так і під час експлуатації.



Рисунок3.15 – Функціональна схема КПСК Motronic запалюванням та паливоподачею у бензинових двигунах [6]

Процес адаптації, у якому використовуються дані щодо моментів запалювання й надходження паливної пари з сосудини з активованим вугіллям, дозволяють оптимізувати роботу двигуна незалежно від типу палива, яке використовується.

Для додаткового зниження токсичності та поліпшення динамічної характеристики автомобіля на неусталених режимах (при перехідних процесах), в деяких КПСК Motronic застосовується так зване послідовне вприскування, яке рекомендувалось у підрозд. 3.1.2. У такому випадку дозування палива, що надходить у кожний циліндр двигуна, здійснюється один раз за цикл точно у визначений момент. Залежно від умов роботи двигуна, бензин для поліпшення розпилювання може вприскуватися до моменту початку відкриття впускного клапана. Особливості послідовного вприскування ілюструються рис. 3.16.

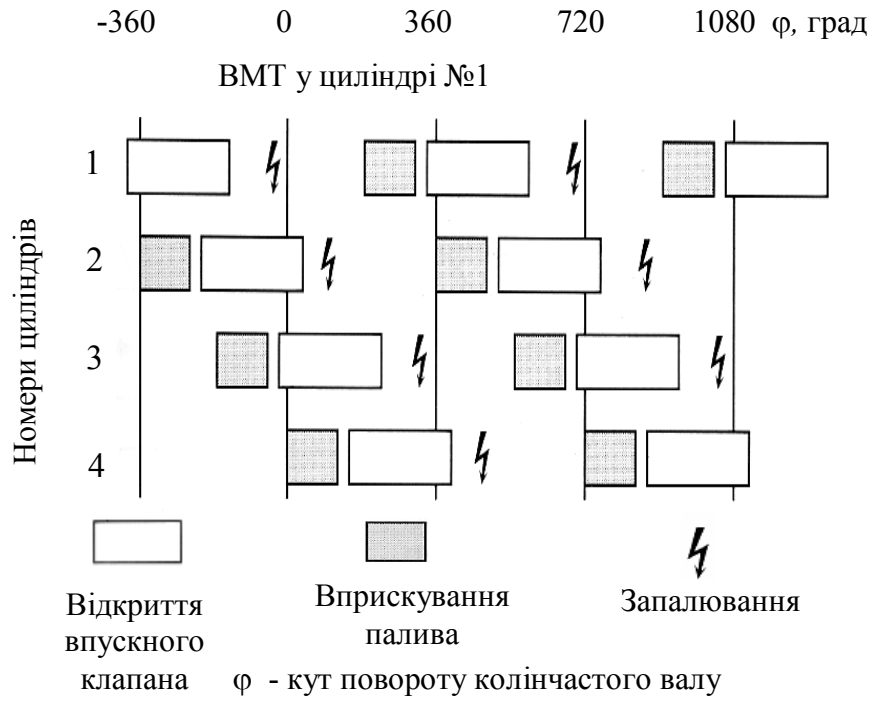


Рисунок 3.16 - Послідовний вприск палива

До комбінованої КПСК з безперервним вприскуванням і запалюванням розосередженого типу також можна віднести підсистеми, наведені на рис. 3.17 і 3.18.

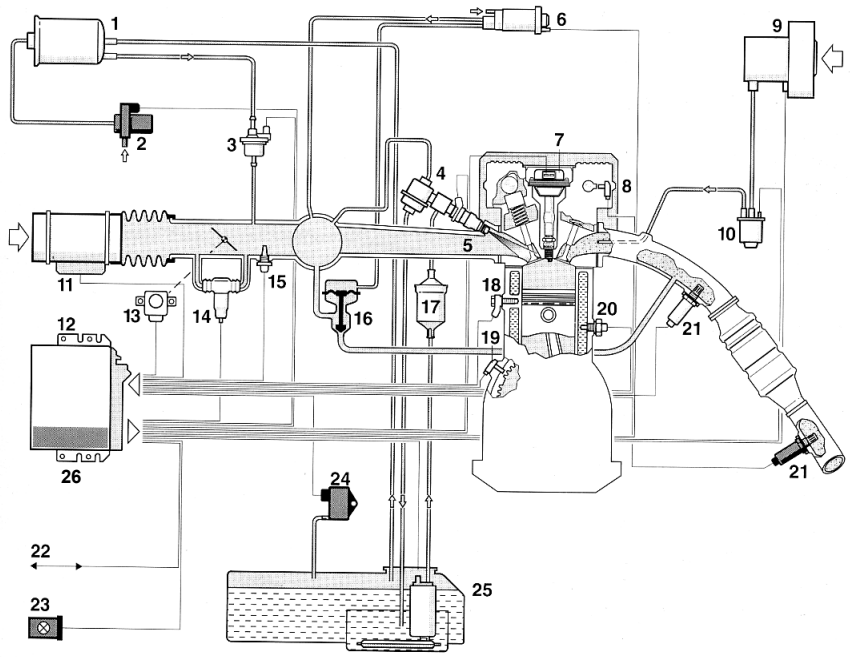
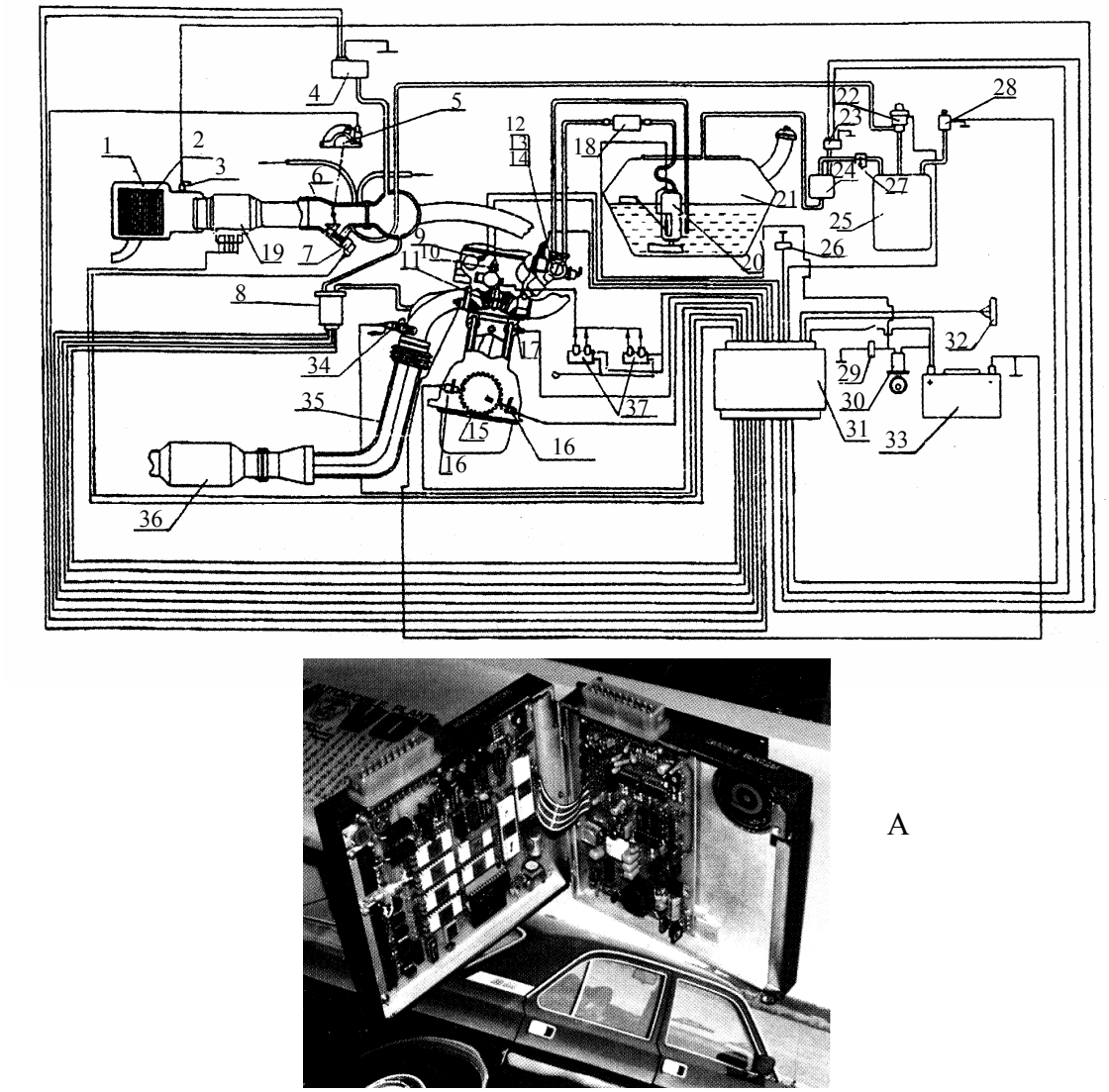


Рисунок 3.17 – Підсистема керування запаленням й вприском бензину Motronic M5:

1 – посудина з активним вугіллям; 2 – клапан впуску повітря; 3 – продувочний клапан для посудини з активованим вугіллям; 4 – регулятор тиску палива; 5 – форсунка; 6 – регулятор тиску; 7 – котушка запалення; 8 – фазовий датчик; 9 – насос для подавання додаткових порцій повітря; 10 – допоміжний повітряний затвор; 11 – вимірювач масової витрати повітря; 12 – БСІ; 13 – датчик кутового положення дроселя; 14 – виконавчий пристрій у системі холостого ходу; 15 – датчик температури повітря; 16 – клапан рециркуляції; 17 – паливний фільтр; 18 – датчик детонації; 19 – датчик частоти обертання колінчастого валу; 20 – датчик температури охолоджувальної рідини; 21- кисневий датчик (λ-зонд); 22 – діагностичний інтерфейс; 23 – діагностична лампочка-індикатор; 24 – датчик перепаду тиску; 25 – паливний насос з електроприводом; 26 – від акумулятора

Ці КПСК реалізують оптимальні характеристики керування двигуном. З високою точністю і стабільністю відтворюються характеристики кута випередження запалювання, задані у тривимірній системі координат (за *n*, температурним і навантажувальним режимами). Підсистеми мають зворотний зв’язок по параметрам детонації й забезпечують (з метою отримання максимального крутного моменту) роботу двигуна на режимах, близьких до детонації, причому роблять це з урахуванням технологічних розкидів параметрів двигуна й відхилення октанового числа палива від стандарту.



А

Рисунок 3.18 - Багатофункціональна комплексна КПСК розосередженим вприскуванням палива й запалюванням, розробка НДІАЕ, Росія [18]:

1 – фільтр з фільтруючим елементом 2; 3 – датчик температури повітря, що всмоктується; 4 – датчик абсолютного тиску повітря; 5 – датчик положення дроселя; 6 – дросельний патрубок; 7 – регулятор холостого ходу; 8 – клапан рециркуляції; 9 – фазовий датчик; 10 – датчик температури охолоджувальної рідини; 11 – свічка запалювання; 12 – паливна рампа; 13 – регулятор тиску палива; 14 – електромагнітна форсунка; 15 – зубчастий вінець маховика; 16 – індуктивний датчик початку відрахування й частоти обертання колінчастого вала; 17 – датчик детонації; 18 – паливний фільтр; 19 – датчик масової витрати палива; 20 – модуль електро-бензонасоса; 21 – паливний бак; 22 – клапан продувки адсорбера; 23 – датчик тиску пари палива; 24 – сепаратор; 25 – адсорбер; 26 – реле електричного паливного насоса; 27 – клапан гравітації; 28 – клапан діагностики адсорбера; 29 – головне реле запалювання; 30 – замок запалювання; 31 – мікропроцесорний блок керування; 32 – виносна колодка для підключення зовнішньої системи діагностики двигуна; 33 – акумулятор; 34 – датчик кількості O_2 у відпрацьованих газах; 35 – випускний колектор; 36 – нейтралізатор відпрацьованих газів; 37 – двовивідні котушки запалювання. А – загальний вигляд КПСК

Підтримується оптимальний склад паливо-повітряної суміші у циліндрах; коректується кут випередження запалювання і склад суміші відповідно до зміни режиму експлуатації автомобіля. Згідно з заданим алгоритмом і програмами КПСК керує своїми виконавчими механізмами (регулятором холостого ходу, паливними форсунками, помпою системи охолодження двигуна, вентиляторами тощо); вона може працювати у режимі самодіагностування й видавати водієві інформацію про свою підготовленість до роботи або про необхідність регулювання окремих вузлів.

Підсистема відзначається високою надійністю на всіх режимах експлуатації, при будь-якій складності кліматичних умов, практично не потребує технічного обслуговування.

КПСК на 15–17 % підвищує паливну економічність двигуна, знижує до норм США токсичність його викидів, зберігає протягом усього періоду експлуатації стабільність своїх вихідних характеристик (параметричну надійність).

Ця розробка дозволяє стверджувати, що російські конструктори за останні роки зробили дуже великий крок на шляху створення сучасних КПСК паливоподачі. Вони реалізовані й добре зарекомендували себе на основних моделях легкового автотранспорту. Важливі імпортні комплектуючі елементи (датчики, виконавчі механізми тощо) успішно використовуються й на російських моделях.

Такі ж розробки з урахуванням досвіду провідних фірм світу, ведуть і українські моторобудівники.

Розглянуті комбіновані КПСК належать до комплексних електронних підсистем, тобто таких, які можуть оптимізувати керування за комплексним критерієм, про що йшлося у гл. 1.

Для такої оптимізації є всі передумови:

- багатофакторність керованих процесів;
- наявність практично всіх основних та адаптуючих параметрів;
- об’єднання в одній КПСК по суті двох підсистем (запалювання та вприскування), що створює можливість функціонального підсилення каналів електронного керування тощо.

Фірми-розробники користуються цими перевагами; вони створили та створюють і далі КПСК паливоподачі нових поколінь з розширенням ке-

рувальних адаптованих впливів, не обмежуючись керуванням запалюванням та вприскуванням, а й з оптимізацією повітропостачання тощо.

Це буде подальшим кроком до створення повністю адаптованих комп'ютерних систем керування ДВЗ, у яких враховано всі внутрішні зв'язки між процесами двигуна.

3.1.4. Огляд сучасних і перспективних розробок та патентів з КПСК паливоподачі бензинових двигунів провідних фірм світу

Вище було викладено основи створення КПСК паливоподачею двигунів з іскровим запалюванням.

Метою даного огляду є ознайомлення студентів з науково-технічними розробками моторобудівних фірм світу з безперервного вдосконалення таких підсистем, їх елементів на прикладах найбільш масових бензинових двигунів.

На основі подібних розробок, які задовольняють сьогодні масовий попит, створюються перспективні модифікації КПСК ДВЗ.

На рис. 3.19 показана сучасна електронно-керована одноточкова підсистема електронного керування центральним вприскуванням низького тиску для 4-циліндрових двигунів, особливістю якої є наявність паливної форсунки центрального розташування, роботою якої керує електромагнітний клапан. Підсистема використовує дросель для дозування повітря на впуску, у той час як вприскування палива проводиться розпилюванням над дроселем. Розподіл по циліндрах здійснюється у впускному колекторі. Різноманітні датчики контролюють усі основні робочі характеристики двигуна для розрахунків керувальних сигналів для форсунок інших виконавчих пристроїв КПСК. Форсунка розташовується над дроселем. Струмінь палива спрямований безпосередньо у серпоподібний отвір між корпусом і дроселем, де за рахунок великої різниці тиску забезпечується оптимальне сумішоутворення, яке виключає можливість осідання палива на охолоджених стінках впускного тракту. Форсунка працює при надлишковому тиску в 1 бар. Розпилювання палива дозволяє отримати однорідний розподіл суміші навіть в умовах повних навантажень. Вприскування палива через форсунку синхронізовано з імпульсами запалювання.

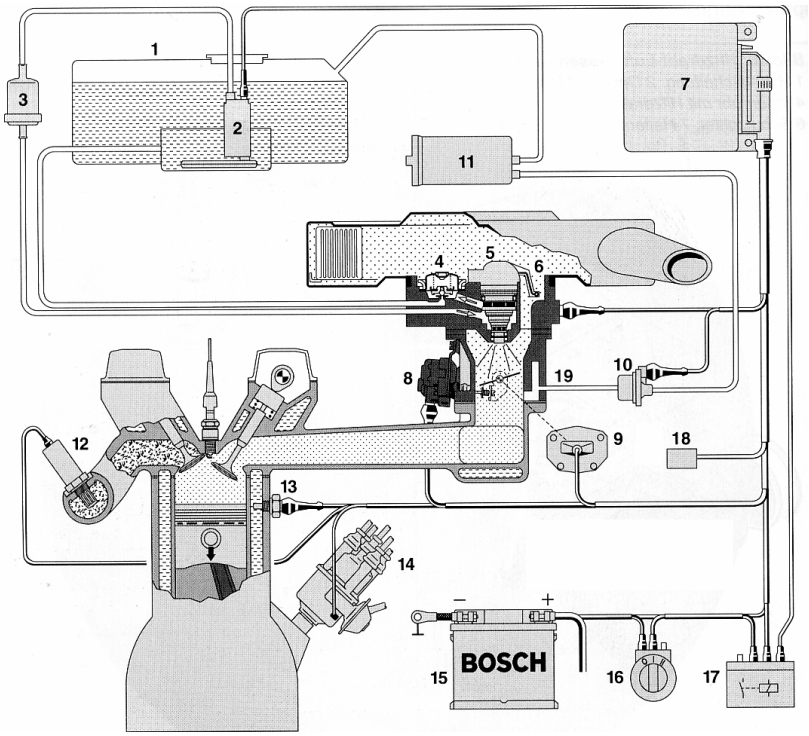


Рисунок 3.19 – Схема КПСК паливоподачею Mono-Jetronic фірми Bosch [6], [16]:

1 – паливний бак; 2 – паливний насос з електроприводом; 3 – паливний фільтр; 4 – стабілізатор перепаду тиску палива; 5 – електромагнітна форсунка; 6– датчик температури повітря; 7 – БСІ; 8 – привід дросельної заслінки; 9 – датчик положення дросельної заслінки; 10 – клапан; 11 – резервуар з вугіллям (адсорбер); 12 – кисневий датчик (λ-зонд); 13 – датчик температури охолоджувальної рідини; 14 – розподільник запалювання; 15 – акумулятор; 16 – вимикач запалювання; 17 – реле; 18 – рознімання для приєднання діагностичної апаратури; 19 – блок центрального вприскування

Окрім частоти обертання колінчастого вала двигуна n, до основних змінних, від яких залежить робота КПСК, можна віднести такі: відношення об'єму повітря до його маси у потоці; абсолютний тиск у колекторі (впускному) й положення кута відкриття дроселя. Підтримання відношення α/n у системі Mono-Jetronic може забезпечити відповідність навіть найжорсткішим вимогам щодо концентрації токсидів у відпрацьованих газах, коли ця КПСК використовується з адаптивним (зворотним) зв'язком – з кисневим датчиком (λ-зондом) і трикомпонентним каталітичним нейтралізатором. Сигнал від λ-зонда, який надходить в самоадаптивну систему, використовується для компенсації змін в умовах роботи двигуна, а також для підтримання стабільності роботи протягом усього терміну служби.

Зупинимося на функціях адаптації КПСК. Під час холодного пуску

двигуна, а також безпосередньо після пуску та у режимі прогрівання час вприскування палива збільшується з метою збагачення паливо-повітряної суміші. При холодному двигуні привід дроселя встановлює її в таке положення, при якому подається більша кількість суміші у двигун, таким чином підтримуючи частоту обертання *n* на холостому ході й концентрацію токсидів у відпрацьованих газах на постійному рівні. Потенціометр, закріплений на осі дроселя, фіксує положення заслінки і на основі цих даних БСІ збільшує кількість палива, що подається. Таким же способом КПСК забезпечує збагачення робочої суміші під час прискорення та на режимі нового дроселя. У режимі примусового холостого ходу забезпечується виключення паливоподачі. Адаптивне регулювання частоти обертання *n* на холостому ході дозволяє зменшити і стабілізувати цю частоту. БСІ за допомогою пристроїв приводу забезпечує відповідність положення дросельної заслінки змінам частоти обертання *n* та температури.

На рис. 3.20 показано детально центральний блок вприскування КПСК Mono-Jetronic, а на рис. 3.21 – блок центрального вприскування (Opel) для цієї ж КПСК [6, 16].

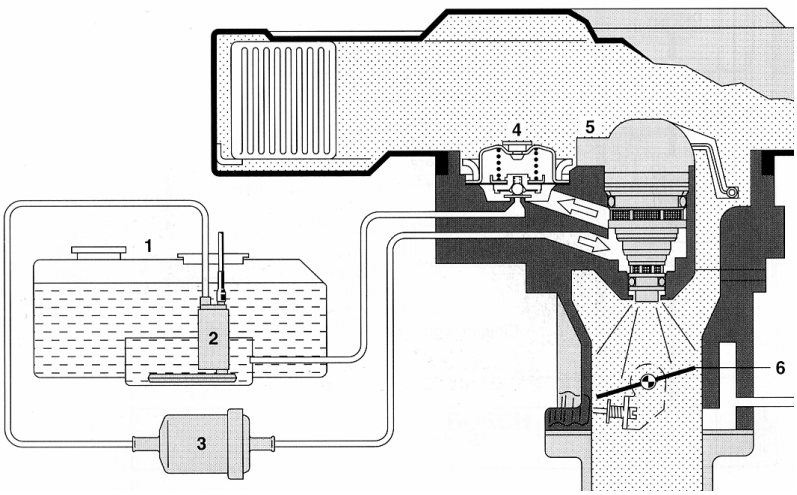


Рисунок 3.20 – Центральний блок вприскування КПСК Mono-Jetronic:
1 – паливний бак;
2 – паливний насос з електроприводом;
3 – паливний фільтр;
4 – регулятор тиску;
5 – верхня частина (гідравлічна);
6 – дросель

Розглянемо іншу КПСК з центральним вприскуванням фірми Hitachi, Японія (рис. 3.22) [1].

Звернемо увагу на те, що цей варіант, як і попередній (рис. 3.19) мають циркуляційну подачу палива із стабілізатором тиску (перепаду тиску), виконаними в єдиному блоці з форсункою. Японська фірма Hitachi, наприклад, для кращого розпилювання палива встановлює за форсункою ультразвуковий розпилювач, інші фірми не бажають ускладнювати підсистему.

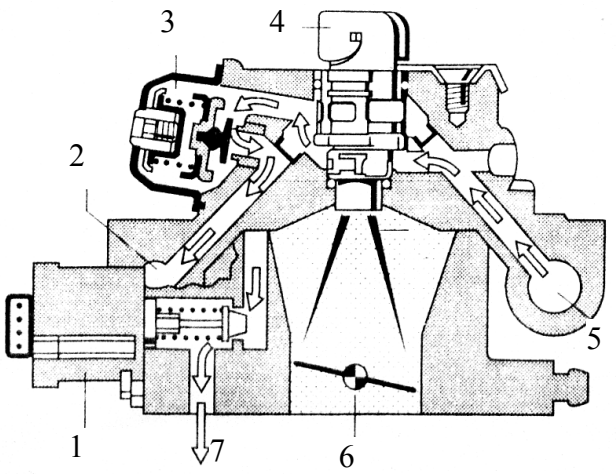


Рисунок 3.21 – Блок центрального вприскування (Opel):
1 – крокoвий електродвигун для керування роботою двигуна на холостому ході; 2 – повернення палива; 3 – регулятор тиску; 4 – форсунка; 5 – вхід палива; 6 – дросельна заслінка; 7 – до випускного колектора двигуна

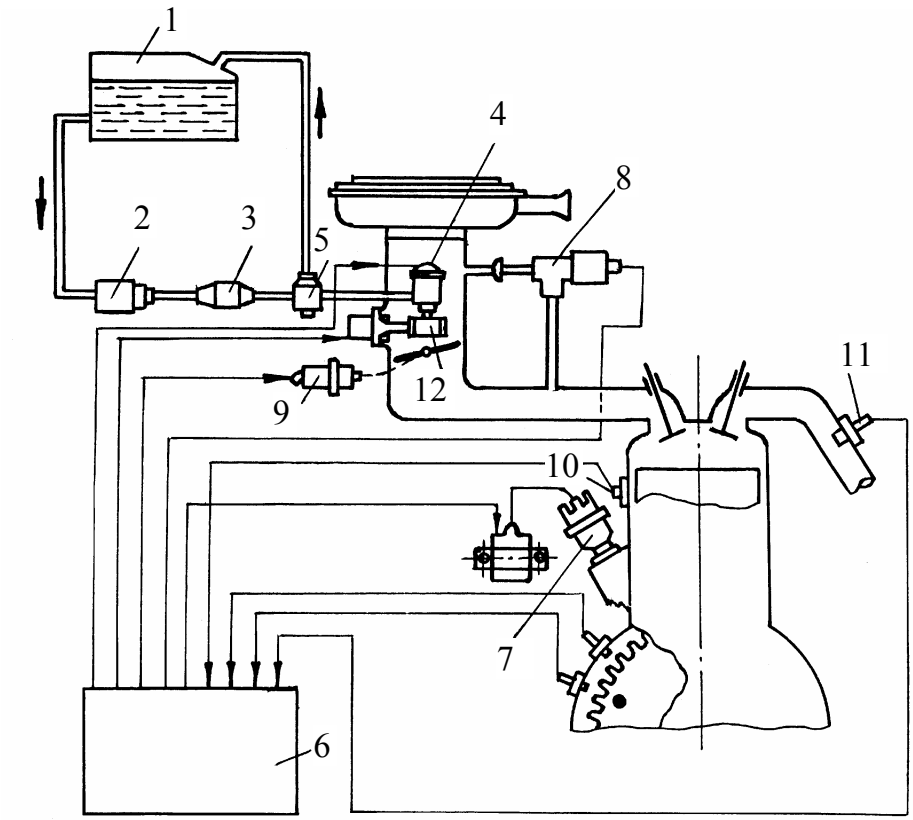


Рисунок 3.22 - КПСК центрального вприскування фірми Hitachi, Японія (принципова схема)
1 – паливний бак; 2 – паливний насос; 3 – фільтр; 4 – форсунка; 5 – стабілізатор тиску; 6 – електронний блок синтезу інформації (керування); 7, 9,10 – відповідно, датчики стартових імпульсів, положення дросельної заслінки, температури охолоджувальної рідини; 8 – регулятор перепуску повітря; 11 – λ-зонд; 12 – ультразвуковий розпилювач

КПСК, що розглядаються, мають регулятор частоти обертання *n*, принцип дії якого базується на регулюванні положення дроселя або пристрою перепуску повітря в обхід дросельної заслінки. В обох випадках це здійснюється на основі інформації щодо реального значення *n* (яке знімають з датчика *n*), що подається на виконавчий пристрій (дискретний електродвигун). Останній діє на дросель (або електромагнітний клапан) та регулює витрату повітря через обвідний (байпасний) канал в обхід дросельної заслінки.

Основні підсистеми з центральним вприскуванням, як і більшість інших таких же підсистем, мають датчик наявності O_2, що дозволяє адаптивно підтримувати стехіометричний склад горючої суміші й одночасно забезпечувати програмно-адаптивний принцип дозування палива.

Комплектації обох підсистем майже аналогічні.

Характерно, що стабілізатор тиску (перепаду тиску) встановлено у форсунки, а паливні канали мають більші перерізи, що зводить до мінімуму гідравлічні втрати в тракті й робить необов'язковим встановлення стабілізатора на гілках трубопроводу (тих, що підводять чи відводять паливо). Для запобігання парових пробок стабілізатор тиску доречно розміщувати до форсунки й завжди вище неї.

Струмінь палива після форсунки повинен мати форму порожнього конуса, а кут розпилювання бути таким, аби забезпечувати потрапляння палива у щілину між дроселем і стінкою змішувальної камери. Особливо інтенсифікується розпилювання палива при використанні ультразвуку (фірма Hitachi) або плівкового випарювання.

Зазначені підсистеми реалізують повну програму дозування палива (пуск та прогрівання двигуна, регулювання *n* на холостому ході, регулювання роботи економайзера та пристроїв примусового холостого ходу, збагачення горючої суміші при різкому відкритті дроселя, збіднення її при закритті дроселя, сповільнювання закриття дроселя, адаптивне підтримання стехіометричного складу горючої суміші тощо.

Можливість гнучкого керування частотою (кратністю) і фазою (моментом) паливоподачі дозволяє створювати на основі систем центрального вприскування досконалі багатовимірні (комплексні) КПСК, які мають підсистему дозування палива, його гомогенізації й запалювання, канали керування рециркуляцією, захистом нейтралізаторів від перегріву, тепловим

захистом деталей, вбудований блок самодіагностування, що робить такі КПСК цілком сучасними.

Підкреслимо, що КПСК центрального вприскування палива добре узгоджується з КПСК наддувом, що отримує дедалі більшого поширення на двигунах з іскровим запалюванням.

Оглянемо сучасні КПСК розосередженого (багатоточкового) вприскування [6, 16]. На рис. 3.23 подано таку КПСК типу L-Jetronic [6, 16]. Це КПСК з дискретним вприскуванням палива. Вона поєднує в собі переваги КПСК з безпосереднім вимірюванням витрати повітря й можливості, що надаються електронікою. Така підсистема розпізнає зміни в умовах роботи двигуна (спрацювання, нагаростворення в КЗ, зміни в зазорах клапанів), що забезпечує постійно оптимальний склад відпрацьованих газів.

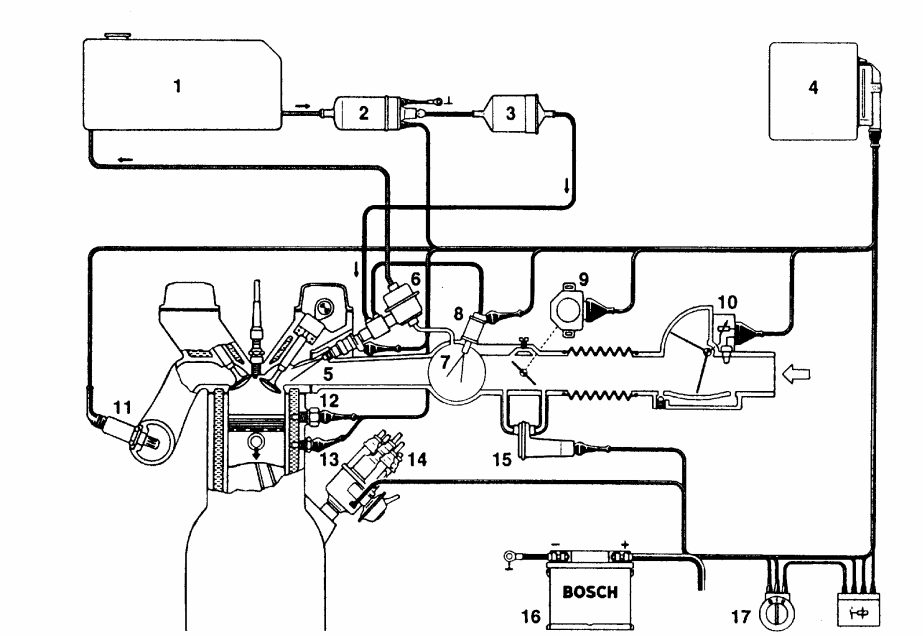


Рисунок 3.23 - Схема КПСК багатоточковим вприскуванням L-Jetronic:

1 – паливний бак; 2 – паливний насос з електроприводом; 3 – паливний фільтр; 4 – БСІ; 5- форсунка; 6 – регулятор тиску палива; 7 – впускний колектор; 8 –пускова форсунка; 9 – датчик положення дроселя; 10 – вимірювач витрати повітря; 11 – λ-зонд; 12 – термовимикач і реле часу; 13 – датчик температури охолоджуючої рідини; 14 – розподільник запалювання; 15 – регулятор *n* на холостому ході; 16 – акумулятор; 17 – вимикач запалювання

Паливо вприскується через форсунки з електромагнітним керуванням. Форсунка, яку встановлено перед кожним циліндром, включається у роботу один раз за один оберт колінчастого вала. Для спрощення керування форсунками всі вони підключаються до електрокола паралельно. Різниця між тиском палива і тиском у впускному колекторі двигуна підтримається на постійному рівні 2,5–3,0 бар; тому кількість палива, що подається, визначається виключно тривалістю імпульсу τ_e, який встановлюється БСІ. Тривалість τ_e варіюється відповідно до витрати повітря, що всмоктується; частотою обертання n, іншими параметрами, що контролюються датчиками.

Магістраль високого тиску з'єднує всі форсунки двигуна. В її кінці розташовано регулятор (стабілізатор перепаду тиску), що підтримує постійний тиск у напорній магістралі палива [17]. При перевищенні встановленого тиску клапан мембрани відкриває злив до паливного бака. Регулятор зв'язаний трубопроводом з впускним колектором за дроселем, аби тиск у напорній магістралі не залежав від тиску у впускному колекторі; в цьому випадку при будь-якому положенні дроселя падіння тиску на форсунках буде однаковим. З регулятора невикористане паливо спрямовується знову до бака через зворотну магістраль. Оскільки це паливо нагрівається на цьому шляху, температура його у паливному баці зростає.

У паливному баці створюється пара палива з інтенсивністю, що залежить від температури палива. Для виконання вимог охорони навколишнього середовища пара палива спрямовується через систему вентиляції паливного баку в абсорбер з активованим вугіллям. Після пуску двигуна пара повертається до впускного колектора і потім допалюється у двигуні. КПСК має й модифікацію паливної магістралі без повертання палива до бака (рис. 3.24).

Така модифікація зменшує перегрівання палива у баці, що полегшує виконання прийнятих норм щодо максимально допустимих викидів наливної пари. Регулятор тиску палива розташовується у паливному баці або безпосередньо прилягає до нього, а зворотна магістраль, зв'язана з баком, відсутня. Надлишок палива, що подається насосом, повертається безпосередньо до бака без проходження по колу "двигун та назад". Такий пристрій може знизити температуру у паливному баці до 10 °С при зменшенні випарювання палива приблизно на третину.

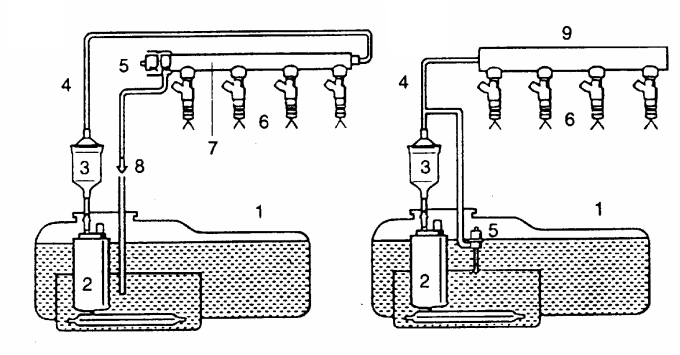


Рисунок 3.24 - Схема паливоподачі:

а – стандартна система; *б* – система без повертання палива до баку.
1 – паливний бак; 2 – паливний насос з електроприводом; 3 – паливний фільтр; 4 – напірна магістраль високого тиску; 5 – регулятор тиску палива; 6 – форсунки; 7 – паливопровід з форсунками (безперервний потік палива); 8– зворотна паливна магістраль; 9 – паливопровід з форсунками (без повертання палива до баку)

БСІ перетворює змінні параметри роботи двигуна в τ_e (електричні імпульси). Інтервали цих імпульсів корелюються з установкою моменту запалювання, тоді як їх тривалість є, в основному, функцією частоти n і витрати повітря, що всмоктується. У БСІ застосовується цифрова обробка даних для регулювання якості суміші на підставі аналізу залежності N_e/n.

Підсистема LH-Jetronic (рис. 3.25 [6, 17]) схожа з L-Jetronic. Відмінність – в методах вимірювання витрати повітря, що всмоктується. У КПСК LH-Jetronic використовується термоанемометричний вимірювач масової витрати повітря, тому результати не залежать від густини повітря на всмоктуванні, яка змінюється залежно від температури і тиску навколишнього середовища.

КПСК оснащено цифровим БСІ. Пристрої для регулювання якості робочої суміші відмінні від тих, що застосовуються в системі L-Jetronic. Тут використовуються програмовані залежності навантаження від n для мінімізації витрати палива й токсичності відпрацьованих газів. У БСІ розраховується тривалість вприскування й τ_e, яка визначає кількість вприскнутого палива. БСІ має мікропроцесор з усталеною синхронізуючою частотою, що задається кварцовим генератором, запам'ятовуючий пристрій, аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Як тепловий вимірювач у LH-Jetronic використовуються термоанемометричний датчик або плівковий

вимірювач масової витрати палива, а також вимірювач Karman об'ємної витрати повітря вихрового типу (такі датчики розглядаються у підрозд. 3.1.5).

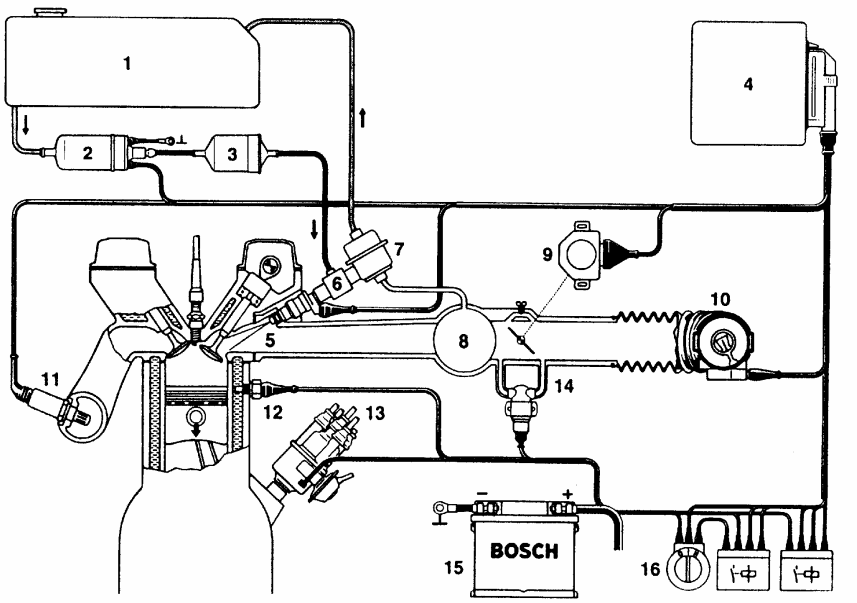


Рисунок 3.25 - Схема КПСК паливоподачею LH-Jetronic, фірми Bosch:
1 – паливний бак; 2 – паливний насос з електроприводом; 3 – паливний фільтр; 4 – БСІ; 5 – форсунка; 6 – розподілювач палива; 7 – стабілізатор перепаду тиску; 8 – впускний колектор; 9 – датчик положення дроселя; 10 – вимірювач масової витрати повітря; 11 – λ-зонд; 12 – датчик температури охолоджувальної рідини; 13 – розподілювач запалювання; 14 – регулятор частоти n на холостому ході; 15 – акумулятор; 16 – вимикач запалювання

Детальніше розглянемо такі важливі функції КПСК паливоподачею, як керування роботою двигуна на холостому ході, електронне керування дроселем (EGas) та регулювання довжини впускних трубопроводів. Це принципові питання на шляху створення інтегральних КПСК перспективних двигунів.

Керування роботою двигуна на холостому ході. Частота обертання *n* на холостому ході визначається витратою повітря, коефіцієнтом надлишку повітря α і моментом запалювання $\varphi_{зап}$. Ці параметри можуть регулюватися зміною кількості повітря і / або моментом запалювання. Регулювання двигуна з метою отримання найнижчої частоти обертання *n* є важливим кроком до зниження витрати палива і токсичності. Крім пристроїв регулювання заряду з виконуючим пристроєм, що безпосередньо діє на дросель, є й інші, які діють в обхід дросельної заслінки (рис. 3.26). Ви-

конавчий пристрій 1 встановлено у магістралі, що йде мимо заслінки; кульовий затвор у цьому пристрої забезпечує регулювання відкриття перепускного клапана доти, доки не досягнуто необхідного значення n_{xx} .

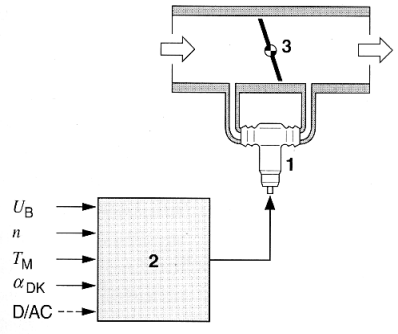


Рисунок 3.26 - Керування частотою обертання колінчастого вала двигуна на холостому ході:
1 – виконуючий пристрій; 2 – електронний блок керування; 3 – дросель; U_B – подача напруги; n – частота обертання колінчастого вала двигуна; T_M – температура двигуна; α_{DK} – кут відкриття (положення дроселя); D/AC – сигнали від автоматичної трансмісії та кондиціонера

Електронне керування дроселем (EGas). Приводом дроселя є керований БСІ електродвигун, який повертає заслінку. Оскільки EGas регулює положення дроселя електронним способом, воно може виконувати й інші функції, пов'язані з поліпшенням характеристик двигуна, підвищенням безпеки руху, зручністю керування автомобілем.

Впускний трубопровід з керованою геометрією. Зміна форми цього трубопроводу є одним із способів впливу на крутний момент двигуна. Для отримання майже ідеальної кривої крутного моменту можна регулювати довжину впускних трактів. На рис. 3.27 показано впускний трубопровід з безперервним регулюванням довжини [6]. При складанні програми регулювання виходять з того, що впускні напрямні трубопроводи скороченої довжини забезпечують отримання високої потужності за рахунок зменшення крутного моменту; у той час як трубопроводи зі збільшеною довжиною впливають протилежним чином на ці параметри (рис. 3.28).

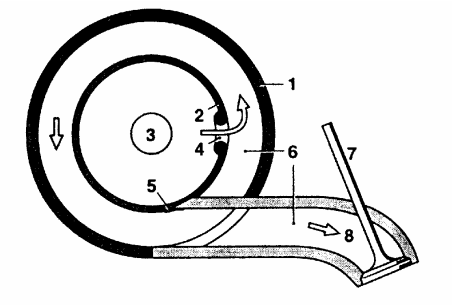


Рисунок 3.27 - Впускний трубопровід з безперервним регулюванням довжини:
1 – нерухомий корпус; 2 – поворотний барабан (повітророзподільник); 3 – впуск повітря у барабан; 4 – впуск повітря у напрямний трубопровід; 5 – ущільнення (наприклад, пластинчата пружина); 6 – впускний напрямний трубопровід; 7 – впускний клапан; 8 – впуск повітря до циліндра

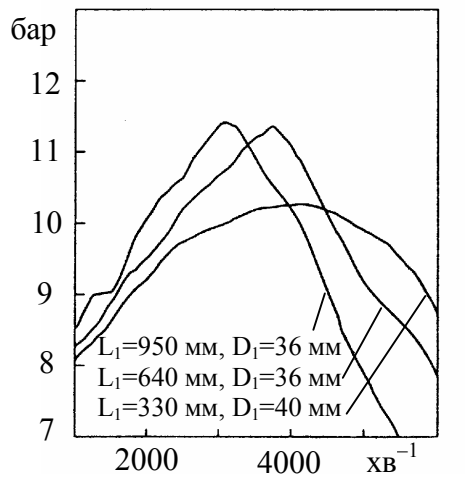


Рисунок 3.28 – Середній ефективний тиск залежно від n для безперервно регульованого по довжині впускного трубопровода (для трьох значень L):

L_1 – ефективна довжина впускного напрямного трубопровода;
D_1 – діаметр впускного напрямного трубопровода

Проведений огляд сучасних КПСК паливоподачею у бензинових двигунах дозволяє стверджувати, що в галузі автомобільних (найпоширеніших) двигунів на початку XXI сторіччя домінуюче положення займають розосереджені (багатоточкові) підсистеми. Це випливає з табл. 3.2, де подано статистичні дані за 1999 рік [19] щодо поширення різних схем паливоподачі бензинових двигунів (у %).

Таблиця 3.2 – Підсистеми паливоподачі

Підсистеми паливо-подачі	Діапазони робочих об'ємів, л								
	< 1	1,0–1,25	1,25–1,5	1,5–1,75	1,75–2,0	2,0–2,25	2,25–2,5	2,5–2,75	2,75–3,0
РВП, %	82	77	84	91,3	97,1	100	92,8	95	92,8
ЦВП, %	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0	0,9
БВП, %	0	0	0	0	1,7	0	2,1	0	1,8
КПП, %	18	23	15,5	8,2	1,2	0	5,1	5	4,5

Примітка: РВП – розосереджене вприскування палива; ЦВП – центральне вприскування палива; БВП – безпосереднє (пряме) вприскування палива; КПП – карбюраторна подача палива.

Розосереджені КПСК випускають майже всі провідні фірми світу.

Центральне вприскування (як і електронні карбюратори) не витримало конкуренції з РВП. Головними перевагами РВП є більш високі можливості щодо форсування двигунів, підвищена паливна економічність, високі динамічні показники й добрі антидетонаційні якості двигунів. При їх удосконаленні в останні роки йшли по шляху підвищення надійності, на-

рощування кількості функцій, введення самодіагностування, елементів і каналів адаптації і т.п.

Як відзначалося у підрозд. 3.1.2, провідними автомобілебудівними фірмами світу розпочато освоєння промислового виробництва перспективних модифікацій двигунів з БВП (безпосереднім вприскуванням). Про підготовку серійного випуску, крім фірм Toyota та Mitsubishi, заявили фірми Volkswagen, Renault та ін. Промислове (масове) виробництво підсистем БВП ознаменує початок нового етапу у розвитку КПСК паливоподачею бензинових двигунів.

На рис. 3.29 показана схема КПСК БВП типу Motronic MED фірми Bosch [19], яка, за заявою фірми, буде випускатись з початку XXI сторіччя.

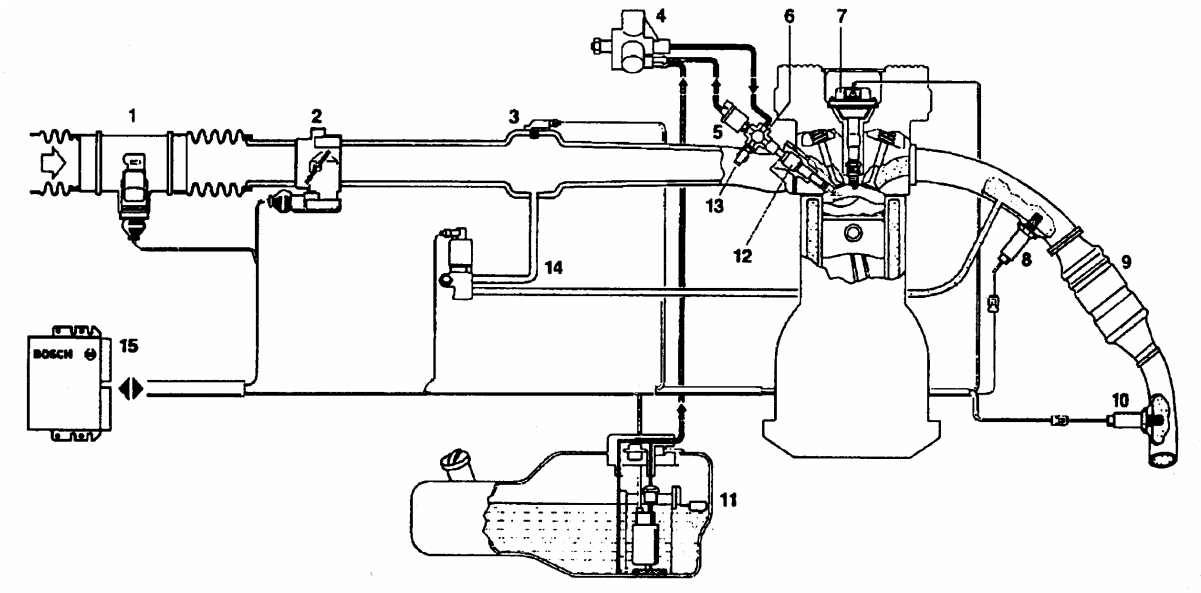


Рисунок 3.29 – Схема підсистеми Motronic MED7, фірми "R.Bosch":
1 – термоанемометричний витратомір повітря; 2– електрокерована дросельна заслінка; 3 – датчик абсолютного тиску у впускному трубопроводі; 4 – паливний насос високого тиску; 5 – стабілізатор перепаду тиску палива; 6 – паливна рампа; 7 – котушка запалювання на свічці; 8, 10 – λ-зонд (до і після хімічного нейтралізатора) 9; 11 – підкачувальний електробензонасос; 12 – електромагнітна форсунка; 13 – датчик тиску палива; 14 – клапан рециркуляції ОГ; 15 – мікропроцесорний блок керування

Стратегії керування дозуванням палива у таких підсистемах можуть бути різними, й вибираються окремими фірмами-розробниками залежно від параметрів швидкісних і навантажувальних режимів роботи двигуна. При цьому склад паливоповітряної суміші, як правило, змінюється від го-

могенного ($\alpha \approx 1$) до гранично розшарованого ($\alpha = 1{,}3...2{,}2$). Найбільшою мірою переваги двигунів з БВП виявляються при роботі на збіднених сумішах і часткових навантаженнях. Усталена робота двигуна досягається розшаруванням суміші зі створенням зони багатої суміші поблизу свічки запалювання, після спалахування якої починається процес горіння всього заряду у циліндрі. Для більш надійного спалахування суміші використовується запалювання з підвищеною енергією іскрового заряду. Момент вприскування і тиск палива також змінюються залежно від режиму роботи двигуна для забезпечення потрібних умов сумішоутворення при даному складі суміші. Наприклад, якщо на холостому ході тиск палива підтримується на рівні 3 МПа, то при повному навантаженні й номінальних значеннях n (до 6000 хв$^{-1}$) воно зростає до 10–12 МПа.

Декілька уточнень щодо розшарування заряду в двигуні з Motronic MED7. Часткові режими забезпечуються таким розшаруванням заряду, при якому в камері згоряння (КЗ) створюються дві зони [15], одна з яких, розташована біля свічки запалювання, містить паливоповітряну суміш, що спалахує. Друга зона містить теплоизолюючий шар з повітря та залишкових газів. При такому розшаруванні заряду середнє значення α у КЗ сягає 1,5–3,0.

Всі ці заходи дозволяють забезпечити ефективне згоряння екстремально збідненої суміші ($\alpha > 2{,}0$), що і приводить до підвищення паливної економічності двигуна з БВП приблизно на 20 % порівняно з РВП. На рис. 3.30 наведено порівняльні навантажувальні характеристики бензинового двигуна з різними схемами вприскування [19], що ілюструють переваги БВП. Як бачимо, двигун з БВП має значно більшу паливну економічність. Крім того, реалізація БВП дозволяє підвищувати потужнісні показники двигуна приблизно на 10 % (за рахунок можливості використання високих ступенів тиску $\varepsilon = 11...12$ та збільшення наповнення), а також знизити сумарну токсичні сть відпрацьованих газів на 20 % порівняно з іншими схемами вприскування.

Слід враховувати, що на сьогодні в цілому підсистеми БВП мають ще значну вартість і є досить складними.

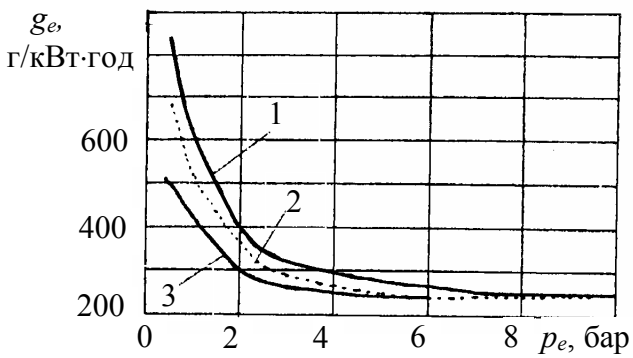


Рисунок 3.30 – Навантажувальні характеристики бензинових двигунів з різними схемами паливоподачі:
1 – РВП; 2 – збіднена гомогенна суміш; 3 – БВП, збіднений розшарований заряд

Прогнози свідчать [19], що незважаючи на це, з початку XXI століття застосування систем БВП у Західній Європі різко зросте (рис. 3.31). З використанням БВП у циліндрах отримає практичне втілення принцип внутрішнього сумішоутворення в бензинових двигунах. Він має ряд відомих переваг перед зовнішнім сумішоутворенням: можливість підвищення ступеню тиску (й паливної економічності), забезпечення економічної роботи двигуна на екстремально збіднених сумішах та ін. У зв'язку з цим може постати і глобальне питання: чи не припинити використання зовнішнього сумішоутворення у бензинових двигунах із розвитком БВП.

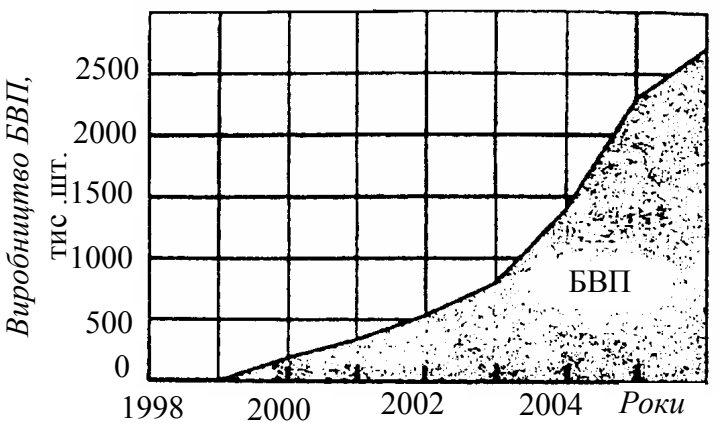


Рисунок 3.31 – Прогноз розвитку БВП в Західній Європі

На думку практиків, незважаючи на значні переваги БВП, він не витіснить інші схеми вприскування і в майбутньому.

Цей висновок базується на аналізі всього комплексу переваг і недоліків концептуально різних підсистем паливоподачі (табл. 3.3). Саме співвідношення "переваги / недоліки" визначає техніко-економічну доцільність застосування кожного типу підсистеми вприскування палива.

Важливо підкреслити, що кожна з підсистем паливоподачі є само-

стійним технічним рішенням, яке має свою “технічну нішу” у різних сегментах виробництва бензинових двигунів.

Таблиця 3.3 – Порівняльна оцінка різних схем вприскування [19]

Параметри оцінки	Системи		
	ЦВП	РВП	БВП
Складність конструкції та технології	невисока	підвищена	висока
Забезпечена паливна економічність двигуна порівняно з КПП)	поліпшення на 3–5 %	поліпшення на 5–15 %	поліпшення на 25–30 %
Можливість підвищення потужнісних показників двигуна (порівняно з КПП)	0–8 %	5–15 %	20–25 %
Спосіб сумішоутворення, що реалізується	зовнішнє (гомогенні суміші)	зовнішнє (розшарований заряд)	внутрішнє (гомогенний і розшарований заряд)
Вартість підсистеми	невисока $ (400–500)	середня $ (700–800)	висока $ (3000–6000)
Склад паливоповітряної суміші (α)	0,85–1,1	0,85–1,2	0,95–2,5
Інші особливості	Конструкція двигуна без змін. Взаємозаміни з КПП. Більш надійна робота форсунок. Розширення можливості форсування ДВЗ при роботі з наддувом	Змінюється конструкція впуску. Ступінь тиску є можна підвищити на 0,5–1,5 порівняно з КПП. Добре узгоджується з газодинамічним та газотурбінним наддувом	Потребує особливих форм КЗ, днища поршня, впускних клапанів, головки циліндрів. Допускається підвищення є до 12

Розвиток РВП, як і ЦВП, у світовому автомобілебудуванні, в тому числі в країнах СНД й України, ще тривалий час продовжуватиметься, в першу чергу, в таких напрямках:

- організація керованого вихороутворення на впуску;

- поліпшення розпилювання палива за допомогою ультразвукових пристроїв, використання стиснутого повітря та ін.;
- застосування локального підігріву паливоповітряної суміші для поліпшення пускових якостей двигунів;
- використання різних видів наддуву у сполученні з охолодженням наддувочного повітря;
- застосування адаптивних алгоритмів керування паливоподачею, взаємопов'язаних з регулюванням запалювання, рециркуляції відпрацьованих газів на впуск, наддувом тощо.

При вивченні вище ЦВП підкреслювалося, що ця підсистема знайде попит на двигунах автомобілів з літражем, меншим 1,7–2,0 л. Вона цікавить розробітників Росії [4], України та інших країн (що розвиватимуться) на першому етапі запровадження КПСК паливоподачею на вітчизняних двигунах, виходячи, перш за все, з вимог простоти конструкції та обслуговування, невисокої вартості, взаємозамінюваності БВП і КПП й т. ін.

Крім того, дослідження показують [20], що сама схема утворювання паливо-повітряної схеми при ЦВП може бути радикальним чином змінена, що й дозволить значно поліпшити якість сумішоутворення, повніше використати потенціальні можливості та розширити сферу ("нішу") застосування ЦВП.

Перейдемо до огляду патентів останнього часу, в яких пропонуються нові підходи до вдосконалення КПСК бензиновими двигунами.

Значна частина патентів присвячена найважливішій проблемі керування паливоподачею у бензинових двигунах – забезпеченню різної структури горючої суміші залежно від навантажувального режиму. Йдеться про так зване гомогенне згоряння, яке вкрай потрібне на повному навантаженні двигуна, коли значні циклові подачі палива не сприяють гомогенізації. Теоретичне питання розглянуті, зокрема, фірмою Daimler Chrysler. У 2000 році представник цієї фірми повідомив про дослідження, де застосовувалась форсунка з тридцятьма сопловими каналами. Показано, що при найдрібнішому розпилюванні палива кількість створених NO_x різко зменшувалось. Застосування таких форсунок у бензинових двигунах дозволяє їм функціонувати зі спалахуванням від тиску без застосування пристроїв запалювання. Іншим способом отримання високогомогенних сумішей є організація вихрового руху заряду в циліндрі відомими методами. Знаходять

також поширення пористі вставки в КЗ, виконані з керамічної піни або дротяної канителі. Паливо, що вприскується, розподіляється за безліччю пор, де створюється мікротурбулентність і виникають осередки спалахів суміші. При цьому зони з високою температурою, де утворюється NO_x, не виникають. Вприскування палива може здійснюватись при зниженому тиску. Серійне виробництво таких двигунів передбачено у 2008–2010 роках, у тому числі на автомобілях Volkswagen та Daimler Chrysler з електронним вприскуванням.

Ряд патентів цього напрямку продовжують пошук засобів як гомогенізації суміші на великих навантаженнях бензинового двигуна, так і організації роботи двигуна на неповних навантаженнях з збідненим розшарованим зарядом:

- патент США, 2000: Система регулювання моменту запалювання для ДВЗ. В електронному блоці системи передбачено два запам'ятовуючих пристрої: у першому зберігаються дані для регулювання випередження запалювання залежно від швидкісного й навантажувальних режимів зі збідненим зарядом, а у другому – аналогічні дані при роботі зі збагаченим зарядом. У період автоматичного за сигналом КПСК переключення ДВЗ від збідненого заряду на збагачений і назад для регулювання випередження запалювання використовуються дані обох запам'ятовуючих пристроїв (наприклад, шляхом їх інтерполяції) [8];
- патент Японії, 2001: Двигун з іскровим запалюванням й вприскуванням бензину в циліндри. Двигун призначений для роботи на двох режимах: на бідних паливоповітряних сумішах з розшаруванням заряду та на стехіометрічній суміші з гомогенним зарядом. На першому режимі бензин вприскується у циліндр на другій половині такту стискування, причому струмінь з форсунки, яка розташована похило, потрапляє у заглиблення днища поршня. На другому режимі бензин вприскується в циліндр у такті впуску, причому струмінь форсунки може досягати протилежного боку циліндра. Для кращого випаровування бензину, що потрапляє на стінку, та забезпечення для цього підвищеної температури стінки оболонка охолодження цієї зони відділена від інших оболонок і виконана меншою за розмірами [9];
- патент Японії, 2000: Спосіб регулювання складу паливоповітряної суміші. Спосіб призначений для ДВЗ з вприскуванням (керова-

ним за сигналами КПСК) бензину через індивідуальні форсунки у канали впускних клапанів. Для кожного переключення з багатої суміші на збіднілу (й назад) відводиться певний термін, протягом якого одночасно змінюються в різних напрямках подач бензину й повітря. Так, при переході на бідну суміш ступінчасто зменшується подача бензину при одночасному збільшенні подачі повітря зміною положення дросельної заслінки. Вважається, що збільшується швидкодія КПСК [10];

- патент США, 2001: Спосіб переводу двигуна на режим роботи з розшаруванням заряду або з гомогенним сумішоутворенням. Спосіб призначений для багатоциліндрового ДВЗ з вприскуванням бензину у циліндри з електронним регулюванням. Плавний перехід ДВЗ з режиму розшарування заряду на режим гомогенного сумішоутворення забезпечується тимчасовим відключенням частини циліндрів й корекцією в інших циліндрах складу паливоповітряної суміші та моменту випередження запалювання [11];
- патент США, 2001: Електронна система керування надходженням заряду в циліндри. У двигуні з іскровим запалюванням керування забезпечують дросельна заслінка, пристрій для зміни фаз газорозподілу та пристрій для зміни прохідного перерізу на виході впускного колектора. Спільна дія всіх трьох виконавчих пристроїв, що включаються за командами КПСК, забезпечує підвищення швидкодії і точності керування порівняно зі керуванням тільки дросельною заслінкою, дозволяє працювати зі створенням гомогенної або розшарованої суміші [11].

Друкується інформація про інші патенти, які стосуються різних питань розвитку КПСК з електронним керуванням паливоподачі в бензинових двигунах:

- патент США, 2001: Система керування двигуном і трансмісією автомобіля. Електронний пристрій реагує на сигнали звичайної сукупності датчиків ДВЗ й додатково – на сигнал датчика режиму роботи трансмісії (включення різних передач або ще одного ведучого моста). Забезпечується для кожного режиму трансмісії оптимальна форма регуляторної та коректорної гілок залежності крутного моменту ДВЗ від його швидкісного режиму [12];
- патент Японії, 2000: Система керування вприскуванням палива. Електронна система типу Common Rail призначена для автомобільного

ДВЗ з вприскуванням бензину в циліндри. Вона має заглибний підкачувальний насос з фільтрами та регуляторами тиску; плунжерний насос високого тиску з автоматичними зворотними клапанами на вході й виході та електромагнітним клапаном перепускання палива із насосної камери на вхід насоса; напірну магістраль з підключеними до неї форсунками й датчиком тиску; електронний блок, що реагує на сигнали датчика тиску в напірній магістралі; датчики частоти n ДВЗ та положення кулачка приводу плунжера насоса й керуючого роботою електромагнітного перепускного клапана. Це й дозволяє регулювати тиск у напірній магістралі у залежності від режиму роботи двигуна [13];

- патент США, 2002: Форсунка із завихрувальним пристроєм і пневматичним розпилюванням. Форсунка призначена для бензинового ДВЗ. У зоні сідла клапана розпилювача форсунки встановлено диск з рядом осьових і тангенціальних прорізів, які забезпечують вихровий турбулентний рух струменя палива. Він потрапляє у вихідну камеру форсунки з периферійним подачею розпилювального повітря і далі до відкритих сопел, які ведуть до впускної системи [14];
- патент Німеччини, 2001: Компенсація створення паливної плівки у впускній системі. Плівка палива, що створюється на стінці впускного трубопроводу і впускному клапані, змінює α, що негативно впливає на роботу каталітичного нейтралізатора. Треба подавати додаткове паливо для компенсації різниці між кількостями палива, що осідає та випаровується. Електронне керування реалізує цю задачу зміною тривалості вприскування палива у впускну систему [15].

Завершуючи огляд нових розробок та патентів, відзначимо, що ті, які стосуються КПСК паливоподачею у бензинових двигунах, присвячені трьом напрямам: вприскування, електронні схеми й засоби керування, комплексність КПСК.

Бачимо, що увагу провідних моторобудівних фірм світу привертають саме глобальні тенденції і відповідні проблеми розвитку паливних та запалювальних підсистем перспективних двигунів. Тому бум комп’ютерного керування ДВЗ ще далеко не уповільнився.

3.1.5. Датчики та виконавчі пристрої КПСК паливоподачею та запалюванням у двигунах з іскровим запалюванням

Датчики та виконуючі пристрої відіграють вирішальну роль у забезпеченні ефективної та стабільної роботи КПСК паливоподачею і запалюванням горючої суміші. Якою б досконалою не була б мікроЕОМ, застосована в КПСК, отримати повноцінну віддачу від її величезних можливостей можна лише у випадку найдостовірної ідентифікації достатньої кількості параметрів, що однозначно визначають експлуатаційні режими й нестаціонарні перехідні процеси двигуна.

Саме тому у КПСК потрібно використовувати найкращі первинні датчики, які б ототожнювали весь комплекс процесів, що впливають на ефективність і стабільність керування.

Основними функціональними вимогами до датчиків КСК ДВЗ є:

- точність;
- швидкодія;
- надійність (безвідмовність, ресурс, стабільність);
- технологічність;
- мінімальні габарити, маса, тощо.

Спеціальні вимоги до датчиків диктуються жорсткими умовами експлуатації комп'ютерних засобів на працюючих двигунах. Тому датчики повинні ще мати:

- тепло- й холодостійкість;
- вібро- та ударостійкість;
- перешкодостійкість;
- волого- й пилестійкість;
- корозійну стійкість (особливо до сольових розчинів).

Зазначені вимоги не охоплюють усього комплексу якостей датчиків, потрібних для досягнення оптимальних законів керування.

Це стосується особливостей і місця обладнання цих первинних перетворювачів. Наприклад, датчик кисню звичайно встановлюють у кінці приймальної труби глушника, де сходяться випускні патрубки груп циліндрів, а не відразу на виході відпрацьованих газів з кожного циліндру. Це сприяє усередненню концентрації кисню, однак датчик не відразу (з запізненням) реагує на зміни складу суміші та, з урахуванням часу спрацьовування, склад паливо-повітряної суміші відхиляється від потрібного (стехі-

ометричного) і деякий час двигун дає підвищений викид шкідливих речовин на випуску. Чим довшою є ця затримка, тим більшою буде неточність вимірювання.

Існує також і похибка роботи багатьох датчиків, пов'язана з видачею ними аналогових електричних сигналів, неприйнятних для мікро ЕОМ, яка сприймає інформацію тільки у цифровому вигляді. Крім того, датчики не завжди узгоджуються з мікрокомп'ютером за діапазоном змін вхідних сигналів, швидкості отримання інформації та ін. Є необхідність застосування інтерфейсу, який забезпечуватиме попередню обробку аналогових сигналів датчиків та перетворення їх у цифрові.

Розробка датчиків, що задовольняють всім вимогам, становить значні труднощі. Однак при роботі датчиків спільно з мікро-ЕОМ частину їх недоліків можна компенсувати за рахунок:

- лінеаризації нелінійної характеристики датчика;
- заглушування його шумів;
- корекції чутливості й точки нуля, які звичайно змінюються при тривалій експлуатації;
- компенсації впливу навколишнього середовища (температури і т.п.);
- автоматичного діагностування датчиків.

Для виконання програм оптимального керування системами двигуна, закладеними до пам'яті мікро-ЕОМ, КПСК вкрай необхідна найбільш повна ідентифікація кожного експлуатаційного режиму.

Це роблять такі *основні датчики* у КПСК паливоподачі та запалювання:

- частоти обертання колінчастого вала;
- витрати повітря;
- положення (відкриття) дросельної заслінки;
- температури охолоджуючої рідини.

Допоміжні датчики обслуговують канали адаптації, блок діагностування та ін. До них належать датчики:

- кисню у відпрацьованих газах (λ-зонд);
- детонації;
- кутового положення колінчастого вала;
- температур деталей;
- температур робочих рідин у системах двигуна;

- тиску в системах двигуна;
- витрати палива;
- кліматичних параметрів;
- зазорів у з’єднаннях поміж деталями;
- концентрації різних токсидів у викидах двигуна;
- переміщень чутливих елементів виконавчих механізмів адаптивних каналів, тощо.

Слід підкреслити, що коло датчиків сучасних КПСК безперервно розширюється; патентуються ефективні вимірювачі, основані на нових фізико-хімічних ефектах. Цей процес оновлення бази датчиків суттєво збільшує функціональні можливості КПСК паливоподачі і запалювання, що поліпшує оптимізацію керування двигунами.

Виконавчі пристрої КПСК реалізують задачі перетворення електронних командних сигналів датчиків у реальні переміщення силових елементів приладів дозування паливоподачі й організації запалювання двигунів. До них відносять:

- ✓ паливні насоси (бензонасоси);
- ✓ форсунки;
- ✓ інжектори вприскування;
- ✓ свічки;
- ✓ нейтралізатори;
- ✓ стабілізатори тиску палива (перепадів тиску палива);
- ✓ клапани перепускання палива;
- ✓ клапани рециркуляції;
- ✓ привід дроселя;
- ✓ демпфери тиску (коливань) палива;
- ✓ прискорювачі при максимальному навантаженні;
- ✓ регулятори складу горючої суміші;
- ✓ пускові форсунки;
- ✓ змішувальні камери;
- ✓ адсорбери;
- ✓ кінцеві вимикачі;
- ✓ розподільники запалювання (електронні, механічні);
- ✓ котушки запалювання;
- ✓ акумулятори;

- ✓ розподілювачі палива;
- ✓ регулятор підігрівання при пуску;
- ✓ термореле;
- ✓ допоміжний повітряний клапан системи х.х.;
- ✓ коректори тиску палива при вприскуванні;
- ✓ пристрої керування частотою обертання колінчастого вала на х.х.;
- ✓ пристрої зниження викидів пари палива з бензобака;
- ✓ діагностичний інтерфейс та ін.

Спочатку розглянемо основні датчики КПСК паливоподачею та запалюванням.

Частота обертання колінчастого вала двигуна. Сьогодні контактні датчики *n* витиснені індуктивними датчиками, закріпленими на картері маховика таким чином, що їх чутливий елемент розташовано над зубчастим вінцем маховика (рис. 3.32). При проходженні кожного зуба в обмотці датчика генерується ЕРС (електрорушійна сила). Частота імпульсів залежить від кількості зубців на маховику й частоти його обертання *n*. Для двигуна кількість зубців маховика є незмінною. Тому частота вимірюваних електричних імпульсів, наведених індукцією, зумовлена лише частотою обертання колінчастого вала.

Вимогою є точне виставлення датчика (індуктора) та мале биття зубців маховика, оскільки зазор між торцем датчика і верхньою поверхнею зубця є малим (0,5–1,5 мм), а зі збільшенням цього зазора амплітуда сигналу датчика суттєво зменшується.

Недоліком такого індуктивного датчика є те, що його сигнал на пускових частотах обертання $n_{пуск}$ зменшується і стає не таким чітким. Сучасні індуктори надійно функціонують при частотах, більших ніж 30–40 хв$^{-1}$.

Такі датчики отримали значне поширення, бо мають високу швидкодію, не чутливі до забруднення, прості й дешеві.

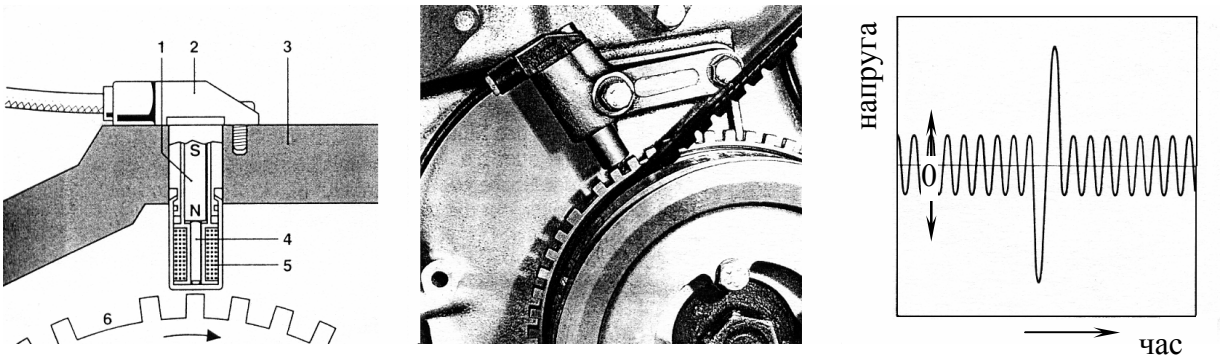


Рисунок 3.32 – Індуктивний датчик частоти обертання колінчастого вала:

1 – магнітний сердечник; 2 – фланець кріплення датчика; 3 – картер маховика; 4 – магнітопровід з магнітом м'якого заліза; 5 – обмотка; 6 – зубчастий диск маховика

Отримали поширення і фотодатчики. У них використовується принцип сприймання фотоприймачем випромінювання від інфрачервоного джерела. Якщо на шляху променя розмістити зубчастий диск або кільце з заданою кількістю отворів, то при перериванні світового потоку на виводах фотодіода або фототранзистора, встановлених у приймачі, генерується ЕРС, яка стає вхідним сигналом для мікро-ЕОМ щодо частоти обертання *n*. Такі датчики мають високу швидкодію, малі габарити, достатньо прості й дешеві. Але вони дуже чутливі до забруднення, що треба враховувати при виборі місця розташування фотодатчика.

Ряд фірм розробили датчик з використанням ефекту Холла. Діапазон робочих частот обертання у таких датчиків є більш широким, ніж у індуктивних. Але вони потребують дуже ретельного виготовлення, періодичної перевірки чутливого елемента, що збільшує вартість як самого датчика, так і його експлуатації.

Інформація розглянутого типу датчика використовується КПСК крім прямого призначення, для підтримання заданої *n* на холостому ході, для підключення або відключення паливоподачі на режимі примусового холостого ходу, для обмеження максимального *n*, тощо.

Витрати повітря. Як зазначалось вище, маються переваги застосування які головного командного параметра циклового масового постачання повітря замість абсолютного тиску у впускному трубопроводі.

Масову кількість повітря треба вимірювати найточніше, бо її використовують як базу для оптимального керування на експлуатаційних ре-

жимах співвідношенням повітря–паливо α, керування перехідними процесами, режимами х.х., різкого прискорення до $N_{e\max}$.

У зв'язку з цим, розробники КСК ДВЗ приділяють найбільшу увагу витратомірам поточної маси повітря, що споживається двигуном.

Розглянемо сучасні й перспективні витратоміри повітря.

На рис. 3.33 наведено потенціометричний датчик-витратомір [6]. Повітряний потік діє на прямокутну заслінку, закріплену на осі, й повертає її на відповідний кут, який потенціометром перетворюється у напругу, пропорційну витраті повітря. Дія потоку на заслінку зрівноважується пружиною.

Для погашення коливань, що зумовлені пульсацією повітряного потоку й динамічними явищами, характерними, наприклад, для автомобіля, витратомір має демпфер-компенсатор у вигляді пластини, яку виконано як єдине ціле з вимірювальною заслінкою. Пластина розташована у спеціальній демпфуючій камері.

На режимах х.х. повітря йде у двигун по байпасному каналу в обхід вимірювальної заслінки.

Вдала конструкція забезпечує високі метрологічні якості повітявимірювача. Головний недолік – наявність рухомих елементів, що як відомо, негативно впливає на надійність. Наявність спрацьованого контактного вузла також знижує стабільність роботи при тривалій експлуатації цього датчика. Але тільки останній спроможний давати інформацію про масову витрату повітря, що робить їх придатними і для перспективних КПСК паливоподачею.

Принцип дії термоанемометрів базується на залежності значення теплового потоку, що відводиться з нагрівального елемента 3 (протягненої нитки) обдуваючим повітрям 5 (за умови підтримання постійного перепаду температур між цим елементом і повітрям, від масової витрати через заданий переріз потоку через камеру 2.

Вимогам статичності всіх елементів вимірювачів витрат повітря задовольняють вихреві, ультразвукові, термоанемометричні датчики.

Термоанемометричний витратомір повітря для КПСК паливоподачею ДВЗ (рис. 3.34) має вигляд короткого патрубка, який встановлюють між корпусом дроселя й повітряним фільтром. Вхід та вихід проточного каналу вимірювача захищений сітками 1, які також сприяють випрямлен-

ню потоку. На корпусі є електронний блок первинної обробки інформації. Вимірювальний теплообмінний елемент у вигляді платинової нитки діаметром приблизно 70 мкм розміщений перпендикулярно потоку повітря у проточному каналі вимірювальної камери 2.

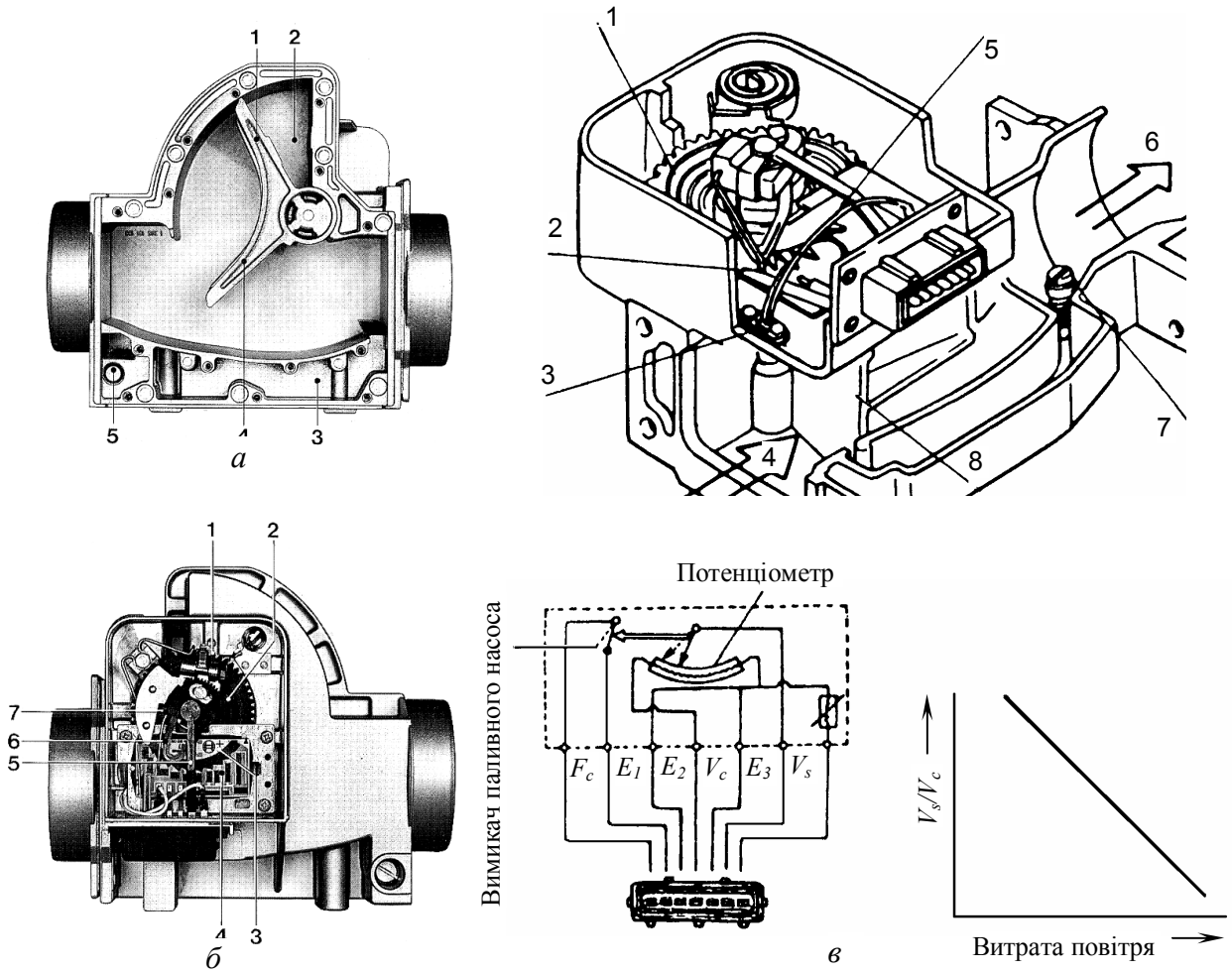


Рисунок 3.33 - Потенційний витратомір повітря:

а – вигляд проточної частини: 1 – компенсаційна заслінка; 2 – демпфуюча камера; 3 – байпасний канал; 4 – вимірювальна заслінка; 5 – гвинт регулювання суміші на х.х.;

б – вигляд з боку мікропроцесорного блока: 1 – зубчастий вінець; 2 – зворотна пружина; 3 – тля пружини; 4 – мікроплата; 5 – рукоятка; 6 – шлейф; 7 – контакти паливного насоса;

в – конструкція, схема, характеристика: 1 – зворотна тарована пружина; 2 – контакти вимикача паливного насосу; 3 – датчик температури повітря, що надходить; 4 – потік повітря; 5 – потенціометр; 6 – до впускного трубопроводу 7 – гвинт регулювальний; 8 – рухлива заслінка (вимірювальна)

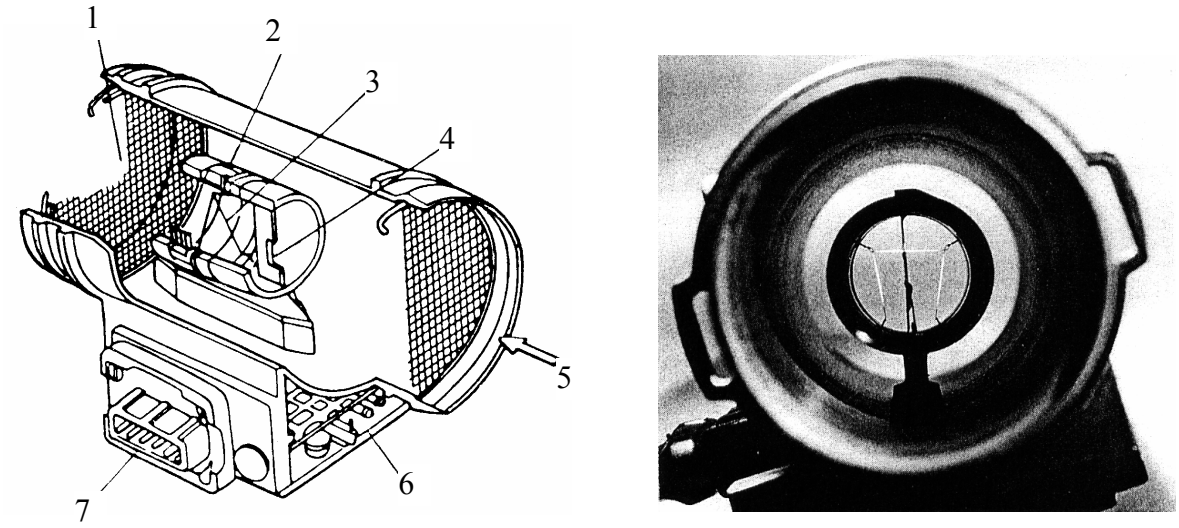


Рисунок 3.34 - Термоанемометричний датчик витрати повітря [6]:
1 – захисна сітка; 2 – вимірювальна камера; 3 – дріт; 4 – датчик температури повітря; 5 – потік повітря; 6 – електронна схема; 7 – штекер роз'єднання

Електронний блок також підтримує постійний перепад температур (порядку 150 °С) між підігріваною електричним струмом платиновою ниткою та потоком повітря. При цьому знімання теплоти з нитки змінюється адекватно масовій кількості повітря, тобто швидкості обтікання чутливого елемента набігаючим повітряним потоком. Електричний сигнал датчика, таким чином, є пропорційним витраті повітря.

Особливістю термоанемометрів є можливість самоочищення нитки від відкладень, для чого через неї пропускають струм, що розжарює нитку до 1000–1100 °С. При такій температурі наліт згоряє, а метрологічні характеристики вимірювача поновлюються.

На відміну від розглянутого, у витратомірі Hitachi (Японія) (рис. 3.35) теплообмінний елемент розміщено не в основному потоці повітря, а в байпасному каналі невеликого перерізу. Це дозволяє зменшити вплив пульсації потоку й небезпеку відмов при зворотних спалахах. Форма, розміри й розташування обвідного каналу повинні забезпечити необхідну відповідність витрат повітря через основний та байпасний канали.

Розташований у каналі **а** теплообмінний (чутливий) елемент виконаний у вигляді тонкої спіралі з платинового дроту. Для захисту від забруднень спіраль має тонке скляне покриття. Швидкодія вимірювача становить приблизно 20 мс, а діапазон вимірювання витрати палива – від 9 до

300 кг/год, що забезпечує КПСК сучасних двигунів з робочим об'ємом до 2 л. Похибки вимірювання – 5–7 %; тобто їх можна вважати досить високими для перспективних КПСК паливоподачею.

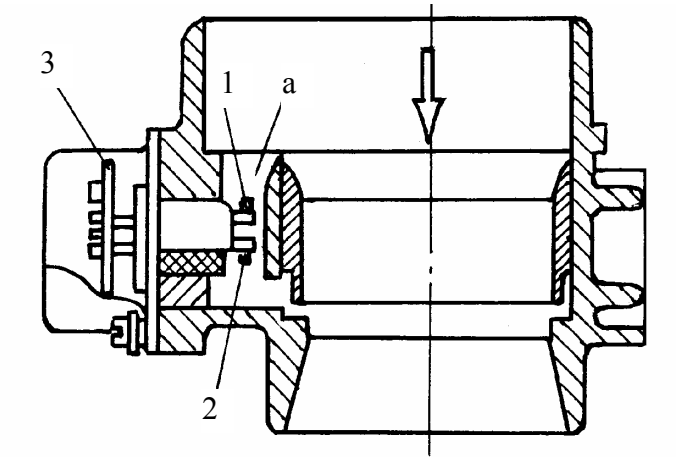


Рисунок 3.35 – Термоанемометричний вимірювач масової витрати повітря фірми Hitachi[1]:

1, 2 – термоанемометри;
3 – плата електронної схеми;
а – байпасний канал

В останні роки проведені глибокі дослідження, на основі яких розроблено ряд термоанемометричних вимірювачів витрат повітря для перспективних КПСК (рис. 3.36).

Характерною особливістю створюваних вимірювачів є застосування як теплообмінника спеціальної плівки. Остання має металево-полімерну структуру, у якій створюється металева решітка із фольги товщиною порядку десятків мікрометрів. Зверху плівка для захисту фольги вкривається лаком.

Перевагою використання плівкових елементів є відпадання необхідності застосовування платини. Справа не тільки в тому, що платина – коштовний метал. Процес тепловіддачі від платинової нитки дуже малого діаметра до повітряного потоку залежить саме від цього діаметру, а також від швидкості потоку. Для отримання стабільних та ідентичних для вимірювачів характеристик доводиться встановлювати дуже жорсткі допуски на діаметр платинової нитки або використовувати індивідуальне калібрування чутливого елемента, що подорожчує датчик.

Плівкові термоанемометричні вимірювачі мають мале розсіювання характеристик. Їх випробування в КПСК вприскуванням показали, що погрішності вимірювання знижуються до 2 %; на нестаціонарних (неусталених) режимах їх стала часу становить 10 мс. Вимірювані рівні максимальної витрати повітря сягають 600 кг/рік.

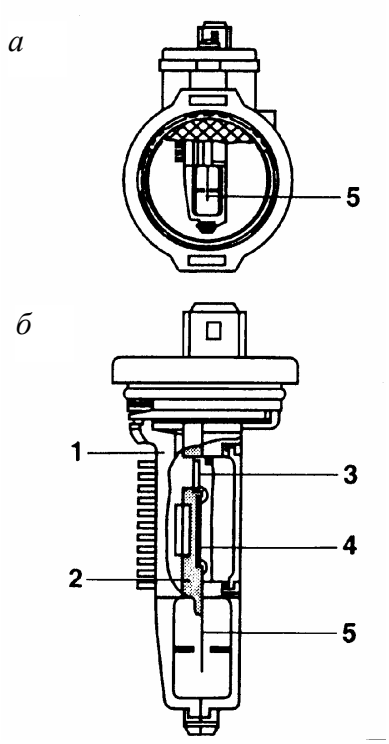


Рисунок 3.36 – Плівковий вимірювач масової втрати повітря:
а – корпус; *б* – плівковий вимірювач (встановлено по центру корпуса); 1 – тепловідвідний елемент; 2 – розпірка; 3 – задавальний ступінь; 4 – гібридна схема; 5 – вимірювач (металева плівка)

Плівкові термометри можуть виготовлятися у вигляді вставок, розташованих по осі потоку повітря, що протікає через циліндричний корпус вимірювача.

Для перспективних КПСК фірмами США для своїх автомобілів запропоновано ультразвуковий витратомір повітря [17]. Вимірювач має завихрювач, який утворює завихрення повітряного потоку. Перпендикулярно до напряму цього потоку ультразвуковий генератор, що встановлений на патрубку, запускає ультразвукові хвилі, які й реєструє приймач. Завихрення повітряного потоку змінюють частоту пускових хвиль, за рівнями яких судять про зміни об'ємної витрати повітря. З урахуванням неможливості отримувати масові витрати повітря дещо сумнівними стають перспективи ультразвукових витратомірів.

На ультразвуковому ефекті побудовані й витратоміри витрати повітря – датчики Corman [6], розроблені фірмою Mitsubishi (Японія). Вони використовуються тільки на японських автомобілях.

Кутове положення (кут відкриття) дросельної заслінки. Такі датчики можуть: 1) виконувати функції головного датчика, коли дозування палива здійснюється за положенням дроселя та частотою обертання колінчастого вала двигуна, або 2) допоміжного датчика, якщо як головний датчик використовується датчик абсолютного тиску у впускному трубопроводі, або вимірювач циклової витрати палива.

Особливо високі метрологічні вимоги ставлять до датчика у першому випадку. Це пояснюється тим, що індуктивні датчики *n* практично повністю задовольняють таким вимогам; вся складність реалізації методу до-

зування при цьому зосереджується на отриманні найточнішої інформації саме щодо положення дросельної заслінки.

Залежність витрат повітря крізь дросельну щілину від кута повороту дросельної заслінки є нелінійною. На початку відкриття вже поворот на частки градуса різко змінює витрату повітря або горючої суміші, тому чутливість датчика при малих відкриттях заслінки має бути особливо великою. Наприклад, датчик вприскування фірми Alfa-Romeo обладнаний перетворювачем у вигляді складного потенціометра з восьми струмознімальних доріжок; спеціальна обробка отриманого електронного сигналу забезпечує чутливість схеми не менш ніж 0,05° повороту заслінки.

Задачу вимірювання малих кутових переміщень можна вирішити й іншими способами, наприклад, спеціальними прецизійними індуктивними датчиками.

Вона спрощується, якщо зазначений датчик не є головним у КПСК, а виконує допоміжні функції керування холостим ходом, або режимом максимального навантаження чи примусового холостого ходу. Для цього потрібна інформація лише про крайні положення дроселя.

Крім інформації про положення дроселя, для керування паливоподачею потрібно мати й інформацію про швидкість його відкриття, оскільки при різкому зростанні n для поліпшення динамічних якостей двигуна горючу суміш необхідно збагачувати за рахунок збільшення циклової подачі палива. У такому разі інформація подається до електронного БСІ від спеціального пристрою, що генерує серію імпульсів, частота яких залежить від швидкості відкриття дросельної заслінки.

Датчики положення та швидкості відкриття дросельної заслінки звичайно розташовуються в єдиному корпусі, який монтується збоку корпусу дроселя на його осі.

Типове конструктивне рішення цього вузла грунтується на тому, що положення закриття чи відкриття дросельної заслінки фіксується однозначно двома кінцевими вимикачами, які керуються кулачком, закріпленим на осі заслінки. Такі вимикачі дають командні імпульси на зміну паливоподачі (на примусовому холостому ходу) або потужності. У датчику швидкості відкриття заслінки можливе використання принципу зміни електронного опору при пробіганні повзункового контакту по дуговому сектору з набором нерухомих контактів. Найпоширенішим та таким, що задовольняє ви-

могам щодо точності знаходження положення (кута відкриття) дроселя, є датчик-потенціометр, корпус якого закріплений на блоці дросельної заслінки, а рухома частина зв'язана з заслінкою. На рис. 3.37 наведено конструкцію та схему датчика-потенціометра.

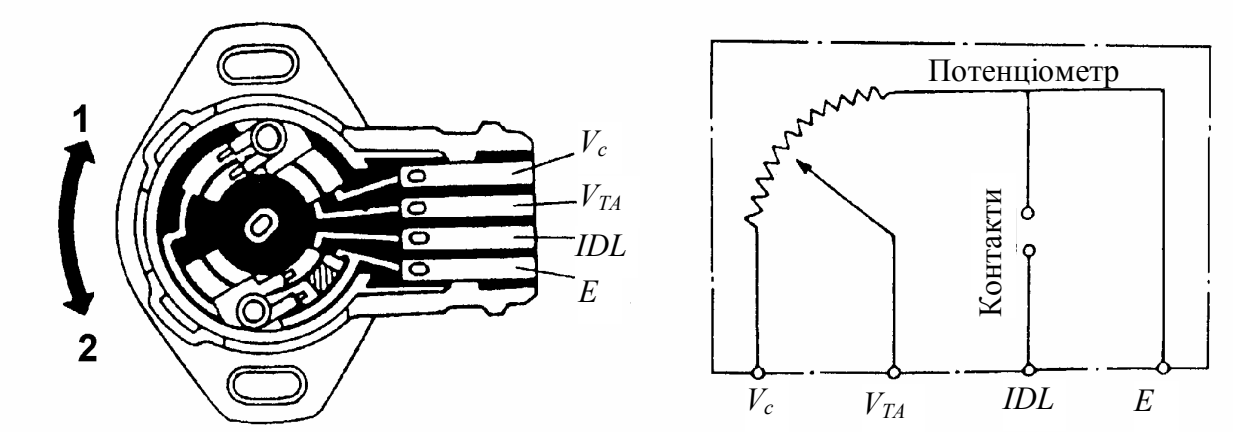


Рисунок 3.37 – Конструкція (поперечний переріз) та схема датчика кута відкриття дросельної заслінки:

1 – заслінку відкрито; 2 – заслінку закрито

Сигнал, що надходить на потенціометр, перетворюється на напругу, що змінюється пропорційно положенню дроселя.

На рис.3.38 також показано двопозиційний датчик положення дросельної заслінки.

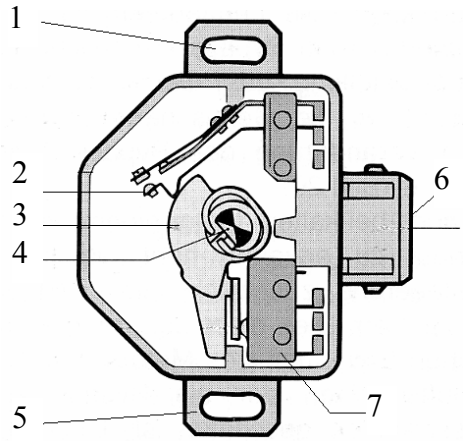


Рисунок 3.38 – Датчик положень максимального відкриття та закриття дросельної заслінки:

1 – опора; 2 – контакт повного відкриття дросельної заслінки; 3 – кулачок; 4 – вісь дроселя; 5 – опора; 6 – електричний розмикач каналу керування; 7 – контакт закриття дросельної заслінки

Температура охолоджувальної рідини. Така температура є важливим режимним параметром двигуна, особливо у період запуску, оскільки визначає при цьому рівень корекції паливоподачі для надійного запуску. Та-

кож командний сигнал цього датчика при підвищенні теплового стану двигуна забезпечує зменшення кута випередження запалювання, аби запобігти перегріванню ДВЗ.

Звичайно датчик температури розташовують неподалік від термостату. Як чутливий елемент у ньому використовується матеріал, опір якого (електричний) суттєво залежить від температури. Датчик працює на основі використання негативного температурного коефіцієнта (NTC), тобто при збільшенні температури значення його опору зменшується (рис.3.39).

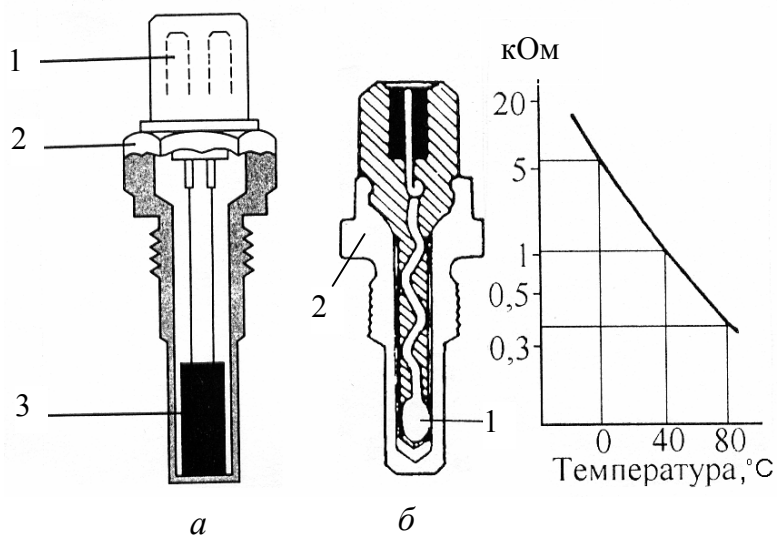


Рисунок 3.39 - Конструкції та характеристики датчиків температури охолоджувальної рідини:

а – полупровідниковий термометр опору (thermistor): 1 – електричний зв'язок; 2 – корпус; 3 – NTC напівпровідник;
б – електротермометр: 1 – чутливий елемент; 2 – корпус

У зв'язку з важливістю інформації про температурний стан на двигунах з КПСК використовуються два датчики: один обслуговує електронну схему, інший виконує діагностичний та візуальний контроль з виведенням сигналу на панель водія.

Уваги заслуговують плівкові термометри опору. Плівка виготовляється з нікелевої пасти з високим коефіцієнтом електричного опору. Датчик для КПСК використовується у вигляді друкованої схеми на пластині з оксиду алюмінію: спочатку наносять випалюванням тонкий шар пасти, далі – паладієво-срібну підложку й захисний шар склошлаку. Плівка має лі-

нійну залежність електроопору від температури при –40...+80 °С. Датчики випускаються масово.

Тепер розглянемо великий масив різноманітних допоміжних датчиків для обслуговування каналів адаптації, діагностування, блокування та інших функціональних потреб сучасних КПСК.

Датчик кисню у відпрацьованих газах (λ-зонд). Такий датчик є основою ефективної нейтралізації токсидів у викидах двигунів та адаптивним датчиком (зворотного зв'язку), що обслуговує КБК екологічними характеристиками практично всіх ДВЗ різних призначень.

Обґрунтування конструкції, особливості робочих характеристик λ-зонда пояснюються у розділі 6.2, присвяченому саме проблемі боротьби з токсичністю двигунів.

Датчик детонації. Для зменшення детонації застосовують два способи: зменшення кута випередження запалювання (КВЗ) або зміну складу горючої суміші. Другий з них є кращим, бо не погіршує паливної економічності двигуна.

У разі використання цих способів треба обрати найкращий закон зміни як КВЗ, так і α. Найбільш слушним з точки зору досягнення оптимальних показників двигуна, слід розглянути закон зміни КВЗ (α), який забезпечує робочий процес на межі виникнення детонації, незалежно від фактичного октанового числа використовуваного палива. При реалізації подібного закону у двигуні забезпечується найбільша повнота згоряння за рахунок зростання швидкості протікання процесів, що передують спалахуванню після подачі іскри та підвищення швидкості поширення фронту полум'я.

Реалізувати такий складний закон зміни КВЗ (α) можна лише за допомогою КПСК за сигналами датчика детонації.

З рис. 3.40 бачимо, що у циліндрі детонаційні коливання робочого тіла є одним із небезпечних складових спектра коливань, можливих при роботі двигуна.

Датчик детонації повинен розпізнавати й виділяти високочастотні детонаційні коливання з цього спектру.

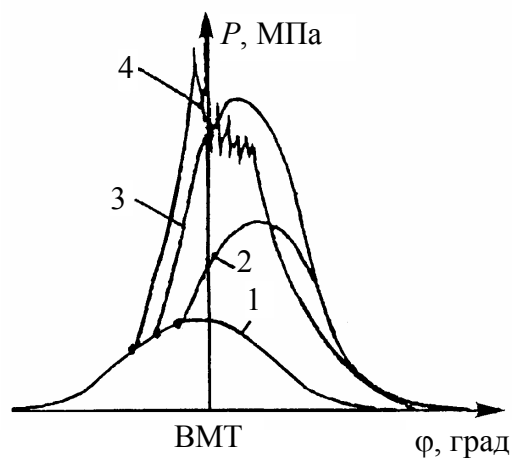


Рисунок 3.40 - Індикаторні діаграми ДВЗ:

1 – за відсутності запалювання;
2 – при пізньому запалюванні;
3 – нормальне згоряння при оптимальному КВЗ;
4 – раннє детонаційне згоряння

Проблема в тому, аби мати найчутливіший датчик, що реєструватиме з високою швидкодією саме початкові стадії детонації. Це необхідно, бо КПСК потребує часу на командні впливи ще до детонаційного спалахування горючої суміші.

На сьогодні цю проблему успішно вирішують.

Найкращими за якостями є прості п’єзокварцеві акселерометри, що реагують на спектр вібрацій. Конструкції датчиків, наприклад, фірми Bosch, розраховані на закріплення їх на одній зі шпильок головки циліндрів. Для збільшення чутливості передбачена система фазування, яка пропускає сигнал акселерометра тільки в період згоряння, тобто при звуженні терміну вимірювання до 15–60° повороту колінчастого вала. Смуга пропускання, яка забезпечує оптимальну чутливість вимірювача, розташована на частотах порядку 6–16 кГц. Розроблено й індуктивні датчики.

Конструктивні варіанти датчиків детонації показані на рис. 3.41.

Датчик детонації індуктивного типу (рис. 3.41, а) базується на принципі зміни магнітного опору і призначений для КПСК, що забезпечує автоматичне регулювання кута випередження. Він виробляє сигнали за початком детонації для адаптивного канала зворотного зв’язку. Він має магніт 1, сердечник 2, магнітний язичок 3. Корпус датчика різьбовою частиною закріплено до блока циліндрів ДВЗ й коливається разом з ним. При коливаннях язичка, власна частота якого співпадає з частотою детонації, зміна зазору веде до зміни магнітного потоку, що фіксується зміною напруги на кінцях обмотки 5 магніту. Датчик нечутливий до умов зовнішнього середовища, простий у виробництві, надійний у роботі, має малу масу, виготовляється з недорогих матеріалів.

Датчик детонації п’єзоелектричного типу (рис. 3.41, б) сприймає вібрації корпусних деталей ДВЗ, що виникають при детонаційному згорянні, та перетворює їх в електричний сигнал. Індикатор складається з металевого корпусу 1, який закріплено на блоці циліндрів ДВЗ, інерційної маси 2, пружин конусних 3, 4 та п’єзоелектричного чутливого елемента 5. Корпус закритий кришкою 6, яку виконано з ізоляційного матеріалу. Власна частота коливань інерційної маси настроєна на частоту коливань корпусу ДВЗ саме при детонаційному згорянні. З початковою стадією цього процесу коливання корпусу викликають резонансні коливання інерційної маси, що періодично б’ють по п’єзоелектричному елементу, викликаючи виникнення у ньому електричного струму, який далі знімається через контакт 7. Наявність індикатора виключає необхідність у широкосмуговому фільтрі, про який йшла мова вище при розгляді датчика детонації фірми Bosch.

Вимірювач (рис. 3.41, в) відрізняється від попереднього лише формою інерційної маси.

Те ж саме стосується й датчика на рис. 3.41, г.

Нарешті, розроблений та успішно використовується, оптичний датчик детонації, в основу якого покладено вимірювання світлового випромінювання при згорянні у циліндрі двигуна. Відомо, що таке випромінювання змінює прозорість робочого тіла. Датчик має світовод, який монтується всередині центрального металевого електрода свічки. Зовнішній вивід з нього зв’язаний з фотоприймачем.

Датчик кутового положення колінчастого вала. Для визначення положення цього вала успішно використовується один з основних датчиків – вимірювач частоти обертання колінчастого вала *n*. Він обслуговує адаптивний канал КПСК для пристосування робочого процесу двигуна до змін умов його експлуатації, не врахованих заданою програмою керування.

Сигнали цього датчика дозволяють змінювати КВВ (КВЗ) відповідно до їх оптимальних значень згідно з програмою процесу.

Природно, двигун повинен мати виконавчі механізми, що дозволяють автоматично з потрібною швидкістю змінювати КВВ (КВЗ) без зупинки двигуна.

Датчик температур деталей. Такі датчики призначені для каналів адаптації керування та діагностування за критерієм теплового стану основних деталей, наприклад, ЦПГ.

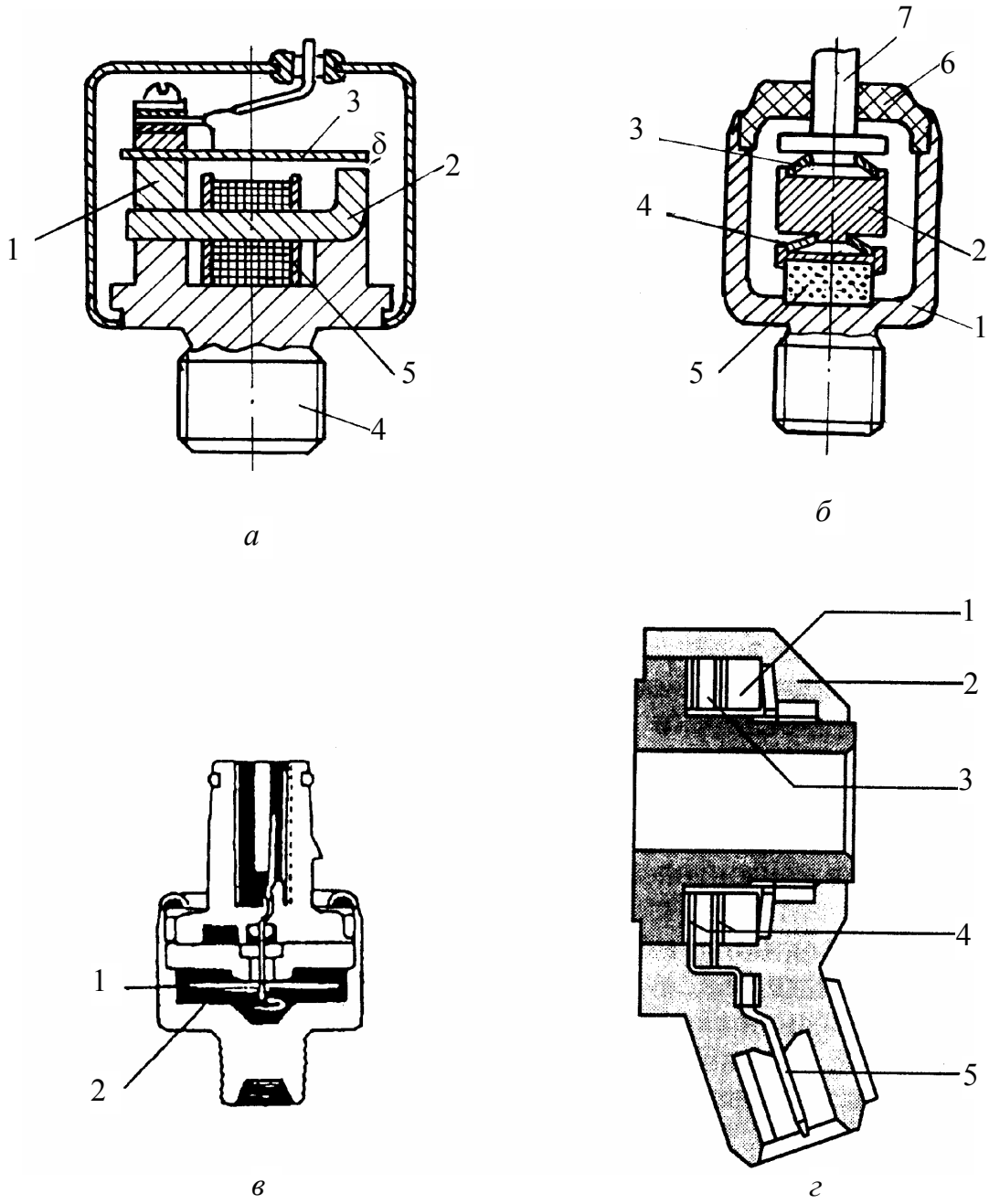


Рисунок 3.41 – Датчики детонації:

а – індуктивний датчик;

б – п’єзоелектричний датчик з кубічною масою;

в – п’єзоелектричний датчик з пластинчатою масою:

1 – пластина інерційна; 2 – чутливий п’єзоелемент;

г – *п’єзоелектричний датчик з дисковою масою:*

1 – інерційна маса у вигляді порожнистого диска;

2 – заливка компаундом;

3 – п’єзокерамічний елемент;

4 – контакти; 5 – вивід сигналу до БСІ

Якщо вимірювання температур газових та рідинних потоків у системах ДВЗ базується на метрології стандартних теплотехнічних термометрів (термопари, термометри опору), то стандартних вимірювачів температур стінок деталей з бажаними характеристиками поки що не розроблено.

Тому необхідно розробляти такі датчики індивідуально, відповідно до специфіки об'єктів термометрії – деталей ДВЗ різних типів і призначень.

Сьогодні вже запропоновано ряд нестандартних датчиків для вимірювань стаціонарних температур деталей двигунів. Їх почали використовувати у схемах КПСК (точніше, їх адаптивних каналів) автомобілів, наприклад, елітного класу. Такі вимірювання, природно, коштують немало.

В основному розробляються поверхневі плівкові термопари та термометри опору.

Їхні конструктивні характеристики залежать від потрібної чутливості та швидкодії вимірювачів, рівня первинного сигналу, відведених габаритів, особливостей місць розташування на поверхнях деталей ДВЗ. При цьому головну увагу слід приділяти надійності датчиків і стабільності при тривалій експлуатації у досить жорстких умовах ЦПГ, камер згоряння і т.п.

Такі термопари та термометри опору мало чим відрізнятимуться від вимірювачів, що створювались і створюються для випробувань при проведенні наукових досліджень.

Вони вивчаються студентами у лекційному курсі "Методи експериментальних досліджень".

Потрібно підкреслити, що при перспективних розробках КПСК ДВЗ конструктори зустрінуться зі значно більшими труднощами. Йдеться про вимірювання температур рухомих деталей (поршень, клапан, тощо), для чого необхідно мати надійні струмознімачі, які б забезпечували безперервну видачу сигналів вимірювача.

Не менші труднощі чекають на конструкторів при розробці вимірювачів нестаціонарних температур під час перехідних процесів (для контролю небезпечних закидів температур по закінченні "скидань–накидів" навантаження).

Як свідчать заяви фірм, їхні зусилля націлені на створення необхідних термометричних датчиків для перспективних КПСК з багатопараметричною адаптацією, нарешті, й за критерієм надійності деталей ДВЗ.

Датчики температур робочих рідин у системах двигуна. Як такі датчики можуть використовуватися описані вище вимірювачі температур за умови їхньої стійкості до агресивних робочих тіл (паливо, мастило, відпрацьовані гази та ін.) в умовах тривалої експлуатації.

Однак для перспективних КПСК потрібно розробляти і значно складніші датчики температур робочого тіла (газу) в циліндрі двигуна. Це вкрай необхідно при поцикловій адаптації робочого процесу з метою корегування характеристик перехідних процесів, про що йшлося вище.

Цю проблему вирішують принципово нові вимірювачі температур газів, наприклад, основані на використанні оптико-волоконної техніки.

Зупинимося на оптико-волоконних засобах вимірювань детальніше.

Завдяки своїй простоті, малій вартості та мініатюрності оптико-волоконні перетворювачі можуть знайти та знаходять все ширше застосування у КСК ДВЗ [26, 27].

Вони мають високу чутливість, добрі динамічні якості та високу технологічність при вимірюваннях нестаціонарних параметрів – швидкості газового потоку, тиску в ньому, тиску у мастильному шарі швидкохідних підшипників тертя, витрат палива тощо. Саме ці та подібні параметри процесів у ДВЗ можуть відігравати роль командних параметрів КПСК паливоподачі або повітропостачання, приміром.

Волоконно-оптичні датчики не створюють поля розсіювання, не спричиняють виникнення іскри, не чутливі до перешкод. Вони можуть використовуватися у діапазоні робочих температур від –40 до +135 °С; спеціальні волокна працездатні при температурі до 800 °С.

На рис. 3.42,а показано принципи конструювання чутливих елементів оптиковолоконних датчиків тиску детонації та витрати палива.

Датчик тиску (рис. 3.42,б) має розмір від 1 до 3 мм у діаметрі; мембрана виготовлена з полірованого алюмінієвого сплаву; центральний світловод є освітлювальним, а периферійні – приймальними.

Оптоелектронний перетворювач (див. рис. 3.42, а) для вимірювання поточної витрати палива включає генератор тиску для живлення випромінювального діода та підсилювач фотоприймача. Аналоговий сигнал перетворювача передається до БСІ КСК ДВЗ. Електронним чутливим елементом такого волоконно-оптичного датчика виступає оптична пара (світлодіод – фотодіод), яка працює в інфрачервоному діапазоні. У таких датчиках

використовуються оптичні траси, які виготовляються із кварцових, скляних, полімерних матеріалів.

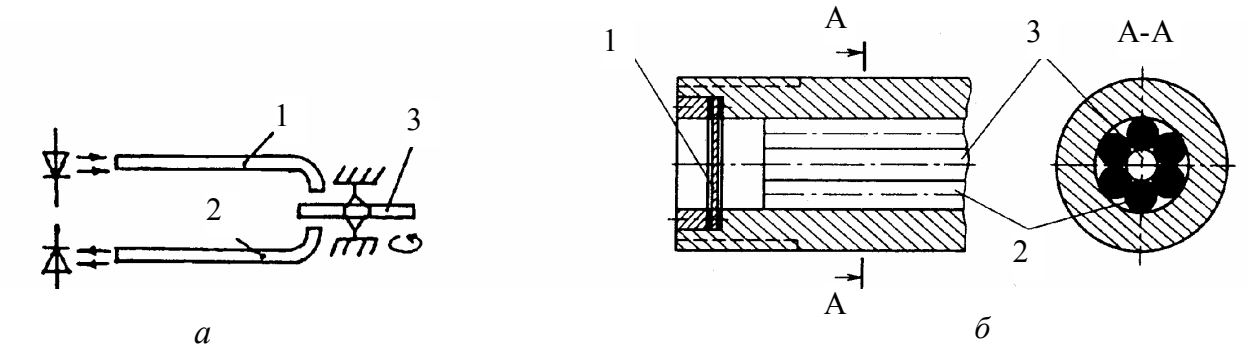


Рисунок 3.42 – Оптичні схеми оптоволоконних датчиків:
а – *датчик оптоелектронний: 1 – передавальний світловод; 2 – приймальний світловод; 3- турбінка;*
б – волоконно-оптичний перетворювач тиску: 1 – мембрана; 2 – приймальні світловоди; 3 – передавальний світловод

Датчики тиску у системах двигуна. Мова йде про датчики абсолютного тиску, оскільки схеми вимірювачів перепадів тиску поєднуються з виконавчими пристроями регулювання цих перепадів. Відповідно, стабілізатори перепадів тиску розглянуто нижче у розділі, присвяченому виконавчим механізмам КПСК.

Найбільш простими і зручними для вимірювання можуть вважати датчики з мембранним чутливим елементом. Принциповим недоліком таких конструкцій є наявність рухомих деталей і контактів, тобто меж розділів вимірювальної схеми (наприклад, розділи між повітрям і мембраною, мембраною і потенціометром). Це зменшує чутливість (через витрати на тертя в рухомих парах) і швидкодію та інерційність механічних елементів. Суттєво обмежена надійність датчика, що пов’язано з величезною кількістю переміщень його елементів при тривалій експлуатації, яка досягає 20 млн на 100 тис. км пробігу. Зазначені датчики практично не використовуються для КПСК.

Підвищений ресурс відрізняє індуктивні безконтактні датчики. На рис. 3.43 показано датчик КПСУ фірми Bosch.

Його основний елемент – дві анероїдні коробки, що реагують на абсолютний тиск. Деформація анероїдів змінює положення якоря. При цьому змінюється індуктивність котушок, які включені у схему БСІ КПСК. Вимірювальний комплекс датчика розташований у герметичному корпусі, який за допомогою шланга, наприклад, з'єднаний з задросельним об'ємом впускного трубопроводу. На жаль, і в цьому датчику є рухомі елементи, що погіршує його характеристики, перш за все, щодо швидкодії.

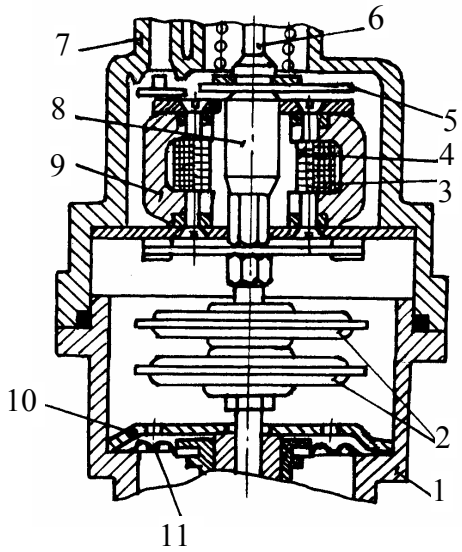


Рисунок 3.43 – Датчик тиску з анероїдним чутливим елементом та індуктивним перетворювачем:
1 – корпус; 2 – анероїдні коробки; 3, 4 – обмотки котушки; 5 – підвіска якоря; 6 – демпфер; 7 – штуцер для підключення до впускного трубопроводу; 8 – якір; 9 – магнітопровід; 10 – упор; 11 – мембрана

Сьогодні широке застосування отримали датчики на основі мікроелектронних технологій. Виявлені їхні добрі метрологічні характеристики, висока надійність але відносно низька якість.

На рис. 3.44 наведено приклад такого датчика, який випускається фірмою Honovell (США). Його чутливий елемент – перегородка мембранного типу з кремнію. На поверхню кремнію вакуумним напиленням нанесені тензорезистори. На робочій частині мембрани виконана мікросхема обробки імпульсу й термокомпенсаційні резистори. Діаметр такого датчика складає 15 мм, що дозволяє розташувати його безпосередньо в корпусі блока керування.

На рис. 3.45 показано загальний вигляд та характеристику напівпровідникового датчика тиску. У перетворювачі тиску на кремнієвому кристалі використовується п'єзорезистивний ефект. На поверхні кристалу сформовано міст опорів, струм через який змінюється під впливом деформації. Цей струм посилюється; вводиться температурна компенсація. Таким чи-

ном формується вихідний сигнал. Такі датчики вимірюють, наприклад, розрідження у впускному трубопроводі за дросельною заслінкою.

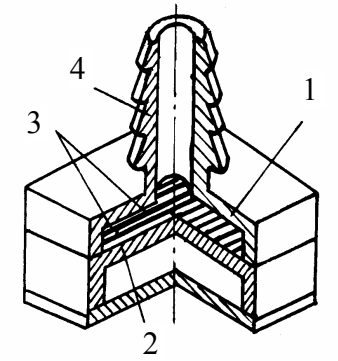


Рисунок 3.44 – Датчик абсолютного тиску:

1 – корпус; 2 – мембрана з кремнію; 3 – тензорезистори; 4 – штуцер для шланга сполучення з випускним трубопроводом

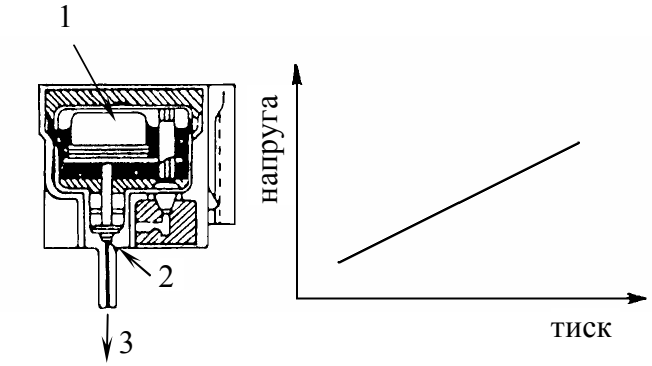


Рисунок 3.45 – Конструкція (поперечний переріз) та вихідна характеристика датчика тиску:

1 – напівпровідниковий п'єзоелектричний перетворювач; 2 – фільтр; 3 – трубопровід

Датчик витрати палива. Адаптивні КПСК за критерієм паливної економічності передбачають наявність датчиків витрати палива. Розробка та організація масового виробництва таких датчиків становлять складну технічну проблему, оскільки вони повинні поєднувати високі метрологічні властивості з великою надійністю, стабільністю та прийнятною вартістю. Як правило, такі вимоги важко суміщати.

Основною передумовою надійності і стабільності роботи датчиків витрати палива є відсутність у них рухомих деталей. З цієї точки зору поршневі або турбінні витратоміри малоперспективні, оскільки мають деталі зі значним переміщенням (поршневі) або надвисокою частотою обертання (турбінні з ротором, що обертається).

Крім того, паливним датчикам належить функціонувати в бензині, тому зазнавати агресивного впливу сіркових сполучень і, що безпечніше, нафтових смол. Осмолення рухомих деталей неминуче призводить до втрати метрологічних якостей, іноді – до відмов внаслідок затвердіння таких смол.

Найбільш перспективними є вимірювачі витрати палива, що використовують принцип термоанемометрії, який вже описано вище. Вони повні-

стю статичні, мають простий пристрій перетворення первинного сигналу. Важливо також, що їх виробництво може бути налагоджене на тих же підприємствах, які виготовляють витратоміри повітря термоанемометричного типу, про широке застосування яких раніше зазначалося. Необхідно передбачити компенсаційні засоби для вилучення смолистих речовин з чутливих елементів датчика.

Ультразвукові вимірювачі витрати палива значно складніші, ніж термоанемометричних. Вони потребують малогабаритних вимірювачів і відповідних приймачів. Разом з тим, такі вимірювачі не чутливі до смолистих відкладень на випромінювачах і приймачах. До того ж, їхні поверхні самоочищаються внаслідок високочастотних коливань.

Датчики кліматичних параметрів. Мова піде про датчики тиску, вологості, температури навколишнього середовища (газового середовища) з помірними рівнями вимірюваних параметрів.

Це значно спрощує вибір відповідних датчиків. Для сьогоднішніх КПСК придатні стандартні вимірювачі масового виробництва з підвищеною чутливістю, які вже давно обслуговують автомобілі, наприклад.

Датчики зазорів, концентрацій, переміщень. Такі датчики становитимуть об'єкти перспективних розробок КПСК ДВЗ.

Основні труднощі, пов'язані з розробкою відповідних датчиків, стосуються відсутності їх стандартних конструкцій.

Крім того, потрібно не обмежуватися дослідницькими розробками, а турбуватись про створення датчиків масового використання, що задовольнятимуть всі вимоги до датчиків КПСК, сформульовані на початку даного розділу підручника.

Завершуючи розгляд датчиків КПСК, слід зупинитися на спільній роботі датчиків та мікро-ЕОМ, оскільки від цього залежить така важлива характеристика каналів адаптації та діагностування, як їхня швидкодія. Справа в тому, що тривалість обробки та перетворення первинних сигналів датчиків в мікро-ЕОМ залежить від форми, інших властивостей цих сигналів.

Розглянемо дану проблему детальніше.

Узгодження сигналів датчиків та мікро-ЕОМ вимагає застосування різноманітних периферійних схем. Це пов'язано з тим, що спочатку фізич-

ні величини (температура, тиск, частота обертання та ін.) перетворюються за допомогою датчиків в електричні сигнали.

Вихідні сигнали датчиків, як правило, являють собою аналогові величини, які неможливо обробити безпосередньо в ЕОМ. Спочатку сигнали датчиків необхідно піддати аналого-цифровому перетворенню з метою надання їм – з високою точністю – цифрового вигляду.

Крім того, вихідний сигнал датчика частіше є невеликим (для переміщень рухомих елементів виконавчих пристроїв); повний електричний опір самого датчика – значний. У таких випадках ще до аналого-цифрового перетворення потрібна попередня обробка: посилення потужності сигналу та перетворення вихідного електроопору.

Коли в КПСК багато датчиків, використовують мультиплексор – пристрій, який дозволяє одночасно з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) ефективно обробляти сигнали кількох датчиків (рис. 3.46).

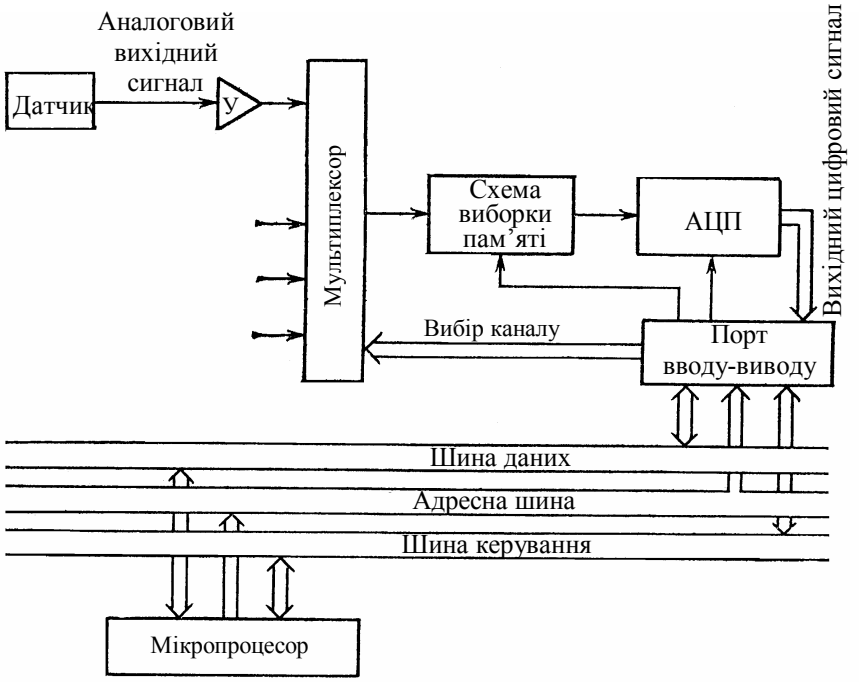


Рисунок 3.46 – Структурна схема КПСК, що містить датчики та мікро-ЕОМ

Необхідно відзначити, що аналоговими сигналами наведених вище датчиків КПСК є сигнали датчиків:

- витрати повітря;

- температури охолоджувальної рідини;
- положення дросельної заслінки;
- детонації;
- напруги акумулятора тощо.

Мають цифровий код сигнали датчиків:

- кута повороту колінчастого вала;
- частоти обертання колінчастого вала;
- схеми запалювання;
- кисню (λ-зонд) та ін.

Форми вихідних сигналів датчиків КПСК показано на рис.3.47.

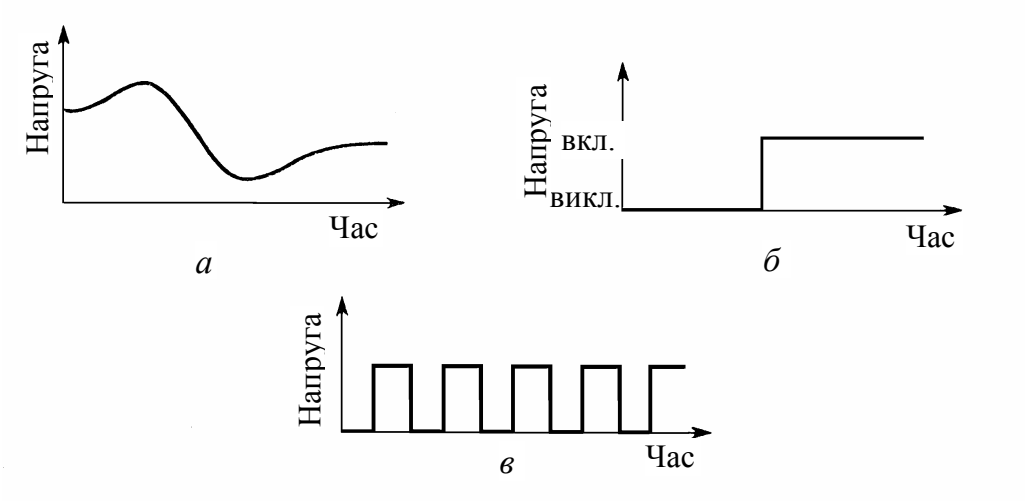


Рисунок 3.47 – Форми вихідних сигналів датчиків:
а – аналоговий сигнал; *б* – цифровий сигнал (включено-виключено); *в* – цифровий сигнал (безперервні імпульси)

Аналоговий сигнал типу рис. 3.47,а характерний для датчиків витрати повітря або температури охолоджувальної рідини та ін. Сигнал типу рис. 3.17, в – цифровий, являє собою безперервні незмінні імпульси та характерний для датчиків *n* тощо. Цікавим є цифровий сигнал типу рис. 3.47,б, який є дворівневим і визначає стан датчика за схемою: “включено-виключено”. Подібні датчики називаються бінарними й широко використовуються в КПСК як кінцеві датчики положення або при контролі такого

параметра, для якого достатньо знати, перевищує його значення визначений рівень чи ні.

Підкреслимо, що вхідна обробка сигналів датчиків залежить від їхньої форми.

Розглянемо обробку цифрових сигналів (рис. 3.48). Хоча багато датчиків і видають саме цифрові сигнали, точніше – сигнали в імпульсному вигляді, зручному для подальшого перетворення в цифрові коди, але й вони без попередньої обробки не будуть сприйматися мікро-ЕОМ. Це пов'язано з тим, що мікроЕОМ функціонує від стабілізованого джерела живлення напругою +5 В яке входить до складу КПСК, і сигнали, що передаються на його вхід, необхідно узгоджувати з цією напругою, бо вони мають різноманітні значення. На рис. 3.48 наведено форми сигналів, що надходять на вхід: *а* – перевищуючі допустиме значення; *б* – перемінної полярності; *в* – мають перешкоди й шуми; *г* – мають піки напруги.

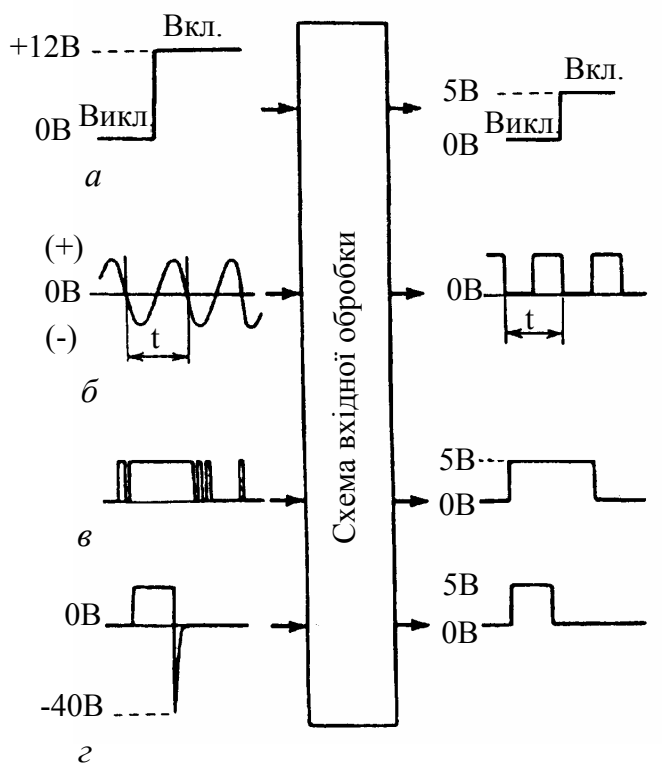


Рисунок 3.48 – Вхідна обробка цифрових сигналів:

а – стрибок напруги; *б* – знакозмінна напруга; *в* – наявність перешкод; *г* – викиди напруги

Тільки після перетворень подібний сигнал може бути закодований і введений до мікро-ЕОМ.

Аналогові датчики застосовуються при діагностуванні (випадках безперервного контролю фізичної величини). За типом змінюваного вихідного електричного параметра аналогові датчики поділяються на три групи:

- зі змінюваною вихідною напругою;
- таким же струмом;
- таким же електричним опором.

Більш поширений спосіб сполучення аналогових датчиків та мікро-ЕОМ – з використанням АЦП. Вихідний сигнал датчика після первинної обробки перетворюється в аналогову напругу оптимального рівня, а потім за допомогою АЦП перетворюється у цифровий сигнал.

Завершуючи розділ датчиків КПСК, підкреслимо, що на сьогодні проведено величезну роботу з їх створення. Вже розроблено і масово використовується більше 100 датчиків різних призначень і типорозмірів. Вони забезпечують якісну первинну інформацію для комп'ютерного керування паливоподачею, запалюванням сучасних ДВЗ, діагностування та ін.

Перейдемо до розгляду виконавчих пристроїв сучасних КПСК паливоподачею та запалюванням.

Саме виконавчі пристрої замикають канали керування, тому від їх характеристик залежить кінцева ефективність КПСК. Ці характеристики мають бути не гіршими, ніж метрологічні, конструкторсько-технологічні параметри датчиків, які розпочинають схему керування будь-яким процесом двигуна.

Отже, функціональні вимоги до виконавчих пристроїв повинні відповідати високому рівню вимог до датчиків, у тому числі щодо точності, швидкодії, надійності, технологічності, габаритів, маси тощо. На перший план виходить конструктивна та параметрична надійність цих пристроїв, оскільки вони завжди мають рухомі елементи й пари тертя, високі динамічні навантаження, працюють у жорстких умовах.

Спеціальні вимоги до виконавчих пристроїв носять індивідуальний характер, оскільки зумовлені різноманітністю схем дії і конструкцій таких пристроїв.

Однак можна відзначити загальні принципи побудови виконавчих пристроїв КПСК, у тому числі найважливіші:

- максимальне спрощення схеми дії;
- найменша перестановочна сила;
- найменша маса виконавчого елемента;
- вибухобезпека (актуально для роботи з бензином);
- висока зносостійкість деталей запираючих вузлів;
- висока корозієстійкість;
- мінімальне нагароутворення на поверхнях запираючих вузлів;
- відсутність підтікання (герметизація) запираючих вузлів;

◈ стабільний захист від агресивності робочих тіл (бензин, відпрацьовані гази і т.п.);

◈ компенсація впливу тиску навколишнього середовища у схемах стабілізації.

При аналізі перспективних модифікацій КПСК виявляється загальна тенденція заміни механічних приводів на електромагнітні або електродинамічні приводи запірних вузлів, що найбільш відповідають сформульованим вимогам.

Розглянемо сучасні конструкції виконавчих пристроїв КПСК паливоподачею та запалюванням. До них відносять:

- форсунки та інжектори;
- пристрої подачі палива до форсунок;
- інші виконавчі пристрої паливоподачі;
- пристрої запалювання;
- пристрої, що обслуговують мікропроцесор.

Форсунки та інжектори. Вони є головним пристроєм КПСК вприскуванням.

Найбільш поширені форсунки з електромагнітним приводом. Форсунки перетворюють електричні командні імпульси в дії, що зумовлюють дозування палива. При дискретній подачі палива вони по суті являють собою швидкодіючі клапани з електромагнітним керуванням.

Головне – такі клапани повинні забезпечити мінімальну тривалість τ_e командного електричного імпульсу на рівні, меншому 0,75 мс. Це пояснюється таким прикладом. Внаслідок швидкісного режиму роботи двигуна (на режимі максимальної потужності рівень n може перевищити 5000 хв$^{-1}$) з кількістю циліндрів z – до 8 й тактністю, звичайно для цього режиму, тривалість вприскування по куту обертання займає 120–130 град. П.К.В., що становить усього τ_e = 3 мс, $\tau_{e\min}$ = 0,75 мс, тобто не більше ¼ від $\tau_{e\max}$, оскільки (з умови режимного регулювання) $\Delta G_{\text{пал}_{\max}}/\Delta G_{\text{пал}_{\min}}$= 4 ($\Delta G_{\text{пал}}$ – циклова подача палива).

Створення електромагнітної частини форсунки, яка б спрацювала за такий малий проміжок часу, є складною задачею. При τ_e < 1мс на роботу клапанної форсунки починає впливати механіко-електромагнітна інерційність системи.

Поліпшити швидкодію форсунок можна, використовуючи магнітоелектричні пристрої, які реагують на полярність командного імпульсу.

Принцип дії форсунок з електромагнітним керуванням можна вивчити на прикладі сучасної конструкції (рис.3.49). Форсунка складається з корпусу, який є також магнітопроводом сильного постійного магніту, та плоского клапана, на якому розташована мініатюрна котушка, що має можливість переміщуватися у магнітному зазорі в межах зони пружності мембрани, що жорстко з'єднана з клапаном. Паливо подається через отвори 3 та 4 (останній у клапані), заповнює порожнину А форсунки. Тиск на мембрану зрівноважується, клапан притискається до сідла невеликим зусиллям, що створюється її пружністю й тиском палива за рахунок різниці площин над і під мембраною (над мембраною площа більша на значення площі поперечного перерізу сідла 6 клапана. Зазначене зусилля не перевищує 0,3–0,4 Н.

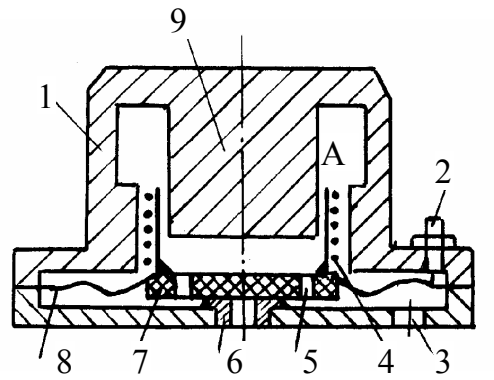


Рисунок 3.49 – Магнітоелектрична форсунка:

1 – корпус; 2 – вивід; 3 – отвір для відведення палива; 4 – рухома котушка; 5 – отвір у клапані; 6 – сідло клапана; 7 – клапан; 8 – мембрана; 9 – постійний магніт

При подачі у котушку імпульсу сили струму прямої полярності котушка втягується у магнітне поле зазору і клапан відкривається; деталь 6 виконує роль жиклера.

При припиненні імпульсів прямої полярності біполярний прилад автоматично змінює полярність імпульсу, і струм починає текти у котушці у зворотному напрямку, внаслідок чого котушка, а разом з нею і клапан, виштовхуються з магнітного зазору. Подача палива припиняється.

Розглянута схема форсунки дозволяє значно скоротити електромеханічну інерційність її рухомих елементів та повністю узгодити τ_e і фактичний час відкритого стану форсунки. Це пов'язано з тим, що внаслідок малої індуктивності обмотки електричної котушки зростання (зниження) електричного поля відбувається протягом 0,03–0,04 мс, тому значно скорочу-

ється й інерційність системи клапан–котушка.

Широко використовуються різноманітні варіанти форсунок фірми Bosch, НВО "ЦНІПА", НАМІ та ін. На рис. 3.50 показано форсунки фірми Bosch з електромагнітним керуванням та неплоским клапаном, виконаним у вигляді порожнистої втулки, що, природно, збільшує масу цієї рухомої деталі. Такі форсунки відрізняються конфігурацією штифту, габаритами (на рис. 3.50, справа бачимо малогабаритну форсунку).

У кращих форсунках, які упроваджені, підвищено швидкодію, стабільність їхньої роботи, перш за все, за рахунок зменшення залипання клапана при його зрушенні з місця (початок процесу вприскування), зниження спрацювання основних пар тертя, а також зменшення електромагнітної інерційності. Останнє необхідно, аби забезпечити роботу форсунки при частоті електричних імпульсів до 200 Гц.

У ряді форсунок для підвищення їхньої надійності і швидкодії зменшено параметри обмотки котушки магніту (розробки НВО "ЦНІПА", Росія), що допускає короткочасне (порядку 0,7 мс) формування імпульсу току. Це дозволяє суттєво знизити некерований час руху якоря-клапана і тим самим підвищити точність дозування малих циклових подач палива на часткових навантаженнях двигуна. При цьому зусилля пружини збільшується більш ніж вдвічі, що, у свою чергу, скорочує час залипання і зворотного перельоту якоря-клапана, а також зменшує можливість власне залипання. Йдеться про те, що некерований час руху якоря-клапана знижує точність дозування палива; цей час визначається тривалістю зрушення з місця якоря з урахуванням його залипання. Взагалі проблемі статичності форсунок як головного виконавчого пристрою КПСК паливоподачею двигунів з іскровим запалюванням має бути приділено серйозну увагу.

Фірма Bosch та інші успішно використовують форсунки-інжектори (рис. 3.51). Треба підкреслити, що до умов їхнього застосування ставляться підвищені вимоги.

Це пов'язано з тим, що забруднення форсунок-інжекторів залежить від якості бензину. Низька якість бензину виявляється у підвищеному шумі холостого ходу, провалі або неповному наборі швидкості при різкому тиску на педаль газу, збільшенні витрати палива, димних викидах. Подібні прояви з'являються в автомобілях з невеликим підкапотним простором при коротких поїздках по місту з тривалими зупинками між ними: у непрацю-

ючому “гарячому” двигуні захолонені у соплах форсунок (кільцеві щілини) краплі палива випаровуються, залишаючи нагар, лаки та інші осади, поступово забиваючи вузький (приблизно 0,05 мм) кільцевий канал (рис.3.51).

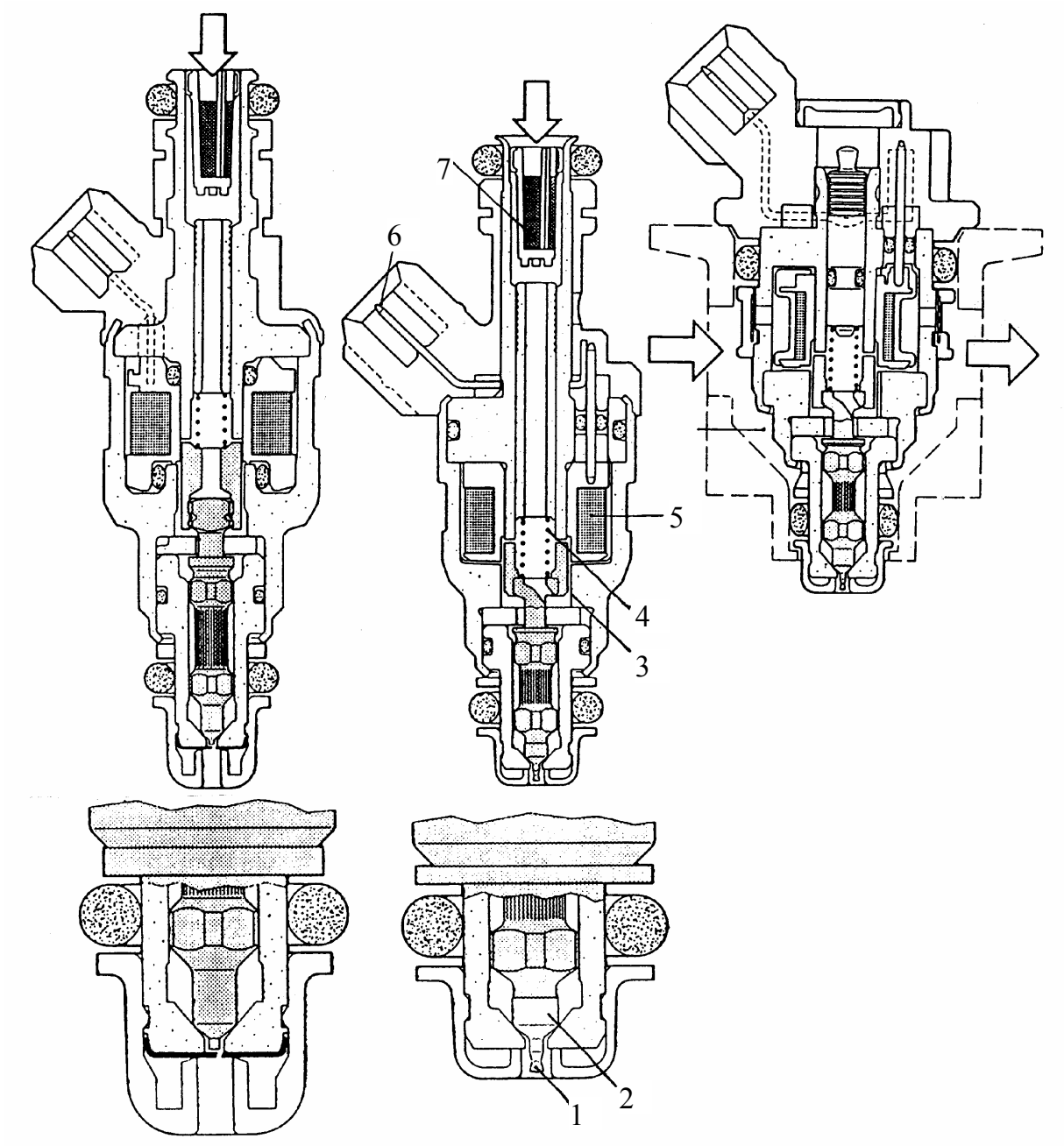


Рисунок 3.50 – Електромагнітні форсунки:

1 – штифт; 2 – голка; 3 – якір; 4 – пружина; 5 – обмотка електромагніта; 6 – електричний контакт; 7 – паливний фільтр

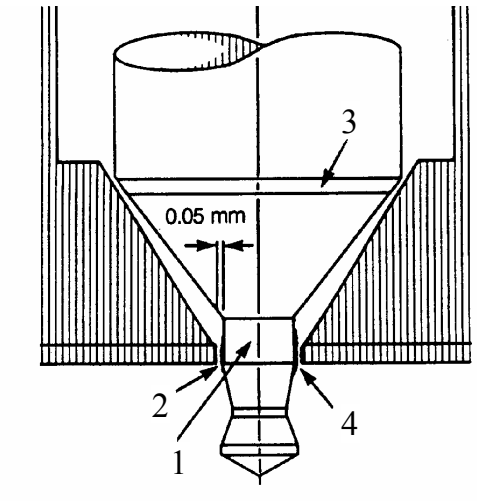


Рисунок 3.51 – Схема інжектора:
1 – штифт; 2 – кільцева щілина (вихід палива); 3 – контактна поверхня; 4 – нагар

Як профілактику можна використовувати високосортний бензин з добрими миючими характеристиками. Слід додавати миючі присадки до бензину, причому тільки ті, котрі спеціально призначені для очищення інжекторів; добавки для карбюраторних двигунів не годяться.

Як бачимо з аналізу форсунок з електромагнітним приводом, використання в ньому феромагнітного магнітопроводу забезпечує необхідне значення переставних зусиль, що діють на запірний вузол. Однак подальше форсування електромагнітного привода за призначенням створюваного зусилля обмежується насиченістю матеріалу магнітопроводу. Тому набуває поширення електродинамічний привод, оснований на використанні сил взаємодії між вихровими струмами, наведеними у замкнутому контурі змінним магнітним потоком. Вперше такий привод почав розроблятися стосовно дизельних форсунок, оскільки там більш жорсткі вимоги по швидкодії (далі це буде обґрунтовано). Розробка бензинових форсунок з електродинамічним приводом тільки розпочинається. Очікується, що повний час відкриття запірного клапана зменшиться вдвічі, тобто до 0,3–0,5 мс.

Пристрої подачі палива до форсунок. Як відзначалося, в КПСК подача палива за цикл залежить від тривалості відкритого стану клапана форсунки. При такій умові важливого значення набуває забезпечення постійного тиску (перепаду тиску палива).

Досвід використання звичайних мембранних насосів з механічним приводом показав, що вони не гарантують постійного тиску палива в широких діапазонах його витрати.

Тому в сучасних КПСК застосовують тільки шестеренчасті, роликові та інші насоси з автономним електроприводом. На рис.3.52, 3.53, 3.54 показано принцип дії та конструкцію роликового паливного (бензинового) насоса.

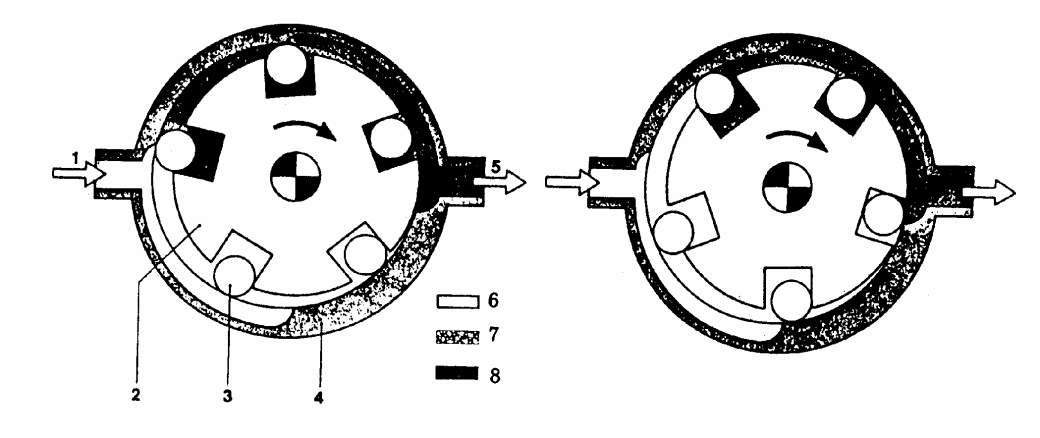


Рисунок 3.52 – Принцип дії роликового паливного насоса (РПН):
1 – всмоктуюча частина; 2 – ротор; 3 – ролик; 4 – корпус насоса; 5 – нагнітальна частина; 6 – паливо без тиску; 7 – паливо, що подається; 8 – паливо під тиском

Електричний паливний насос являє собою шиберний насос з робочими елементами у вигляді роликів, що приводяться в дію постійно працюючим електродвигуном. Вони на поверхні ротора, ексцентрично розташованого у корпусі насоса, під дією відцентрової сили протискуються до корпусу насосу, тобто діють як ущільнення. У створені між роликами порожнини надходить паливо. Електродвигун працює безпосередньо у паливі (занурений насос). Це дозволило повністю ліквідувати вибухонебезпеку, оскільки в корпусі немає здатної до спалахування паливоповітряної суміші. В електродвигуні якір з колектором вбудовуються у єдиний з насосом корпус, тобто вони обертаються безпосередньо в паливі; в результаті зменшується і спрацювання щіток.

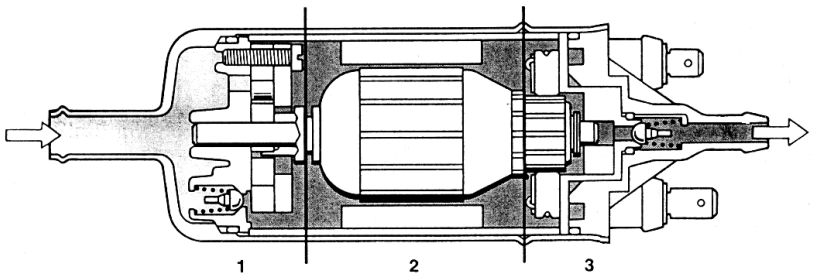


Рисунок 3.53 – Загальний вигляд РПН:
1 – шиберний пристрій; 2 – електродвигун; 3 – кришка

Насос подає палива більше, ніж потрібно ДВЗ для того, аби міг надійно працювати регулятор тиску й забезпечувалось постійний злив зайвого палива. Злив необхідний для охолодження елементів системи вприску-

вання й вилучення забруднень.

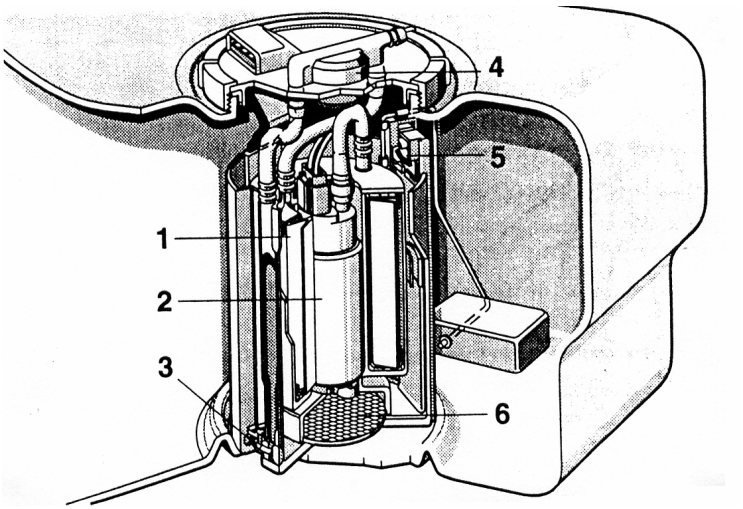


Рисунок 3.54 – Особливості конструкції РПН фірми Bosch:

1 – паливний фільтр; 2 – паливний насос з електродвигуном; 3 – усмоктувальний насос; 4 – регулятор тиску палива; 5 – датчик рівня палива; 6 – фільтр на всмоктуванні

На більшості сучасних автомобілів насос розміщується у паливному баці та включається на визначений термін. У такому випадку при включенні запалювання насос починає діяти. Якщо заданий час (звичайно 2 с) скінчився, а ДВЗ не працює, то насос виключається.

Вал якоря електродвигуна з'єднується з ротором через пластмасову муфту, щоб у випадку заклинювання ротора не нагрівався електродвигун (недопустимо при подачі бензину), а справа обмежувалась би лише поломкою муфти.

На рис. 3.55 подано конструктивні варіанти паливних насосів для обслуговування сучасних КПСК паливоподачею.

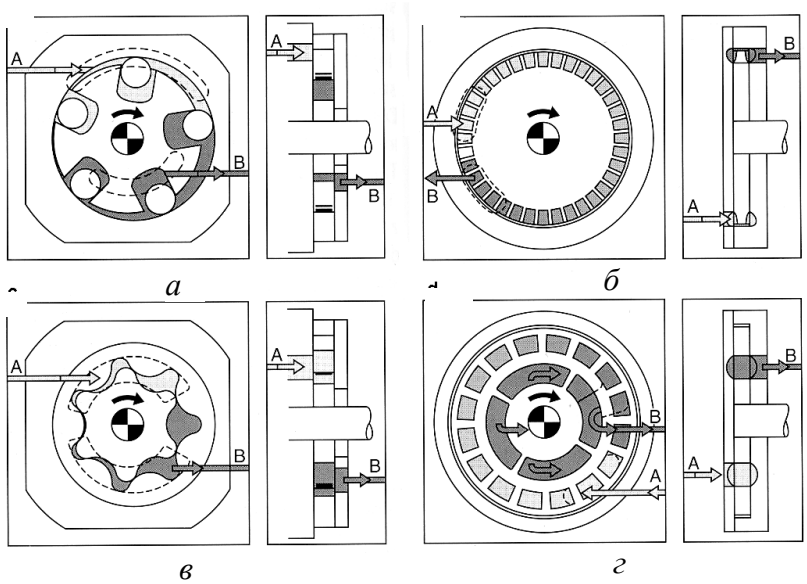


Рисунок 3.55 – Конструкції шиберних пристроїв паливних насосів з електроприводом для КПСУ паливоподачею:

а – роликовий;
б – периферійний;
в – зубчастий;
г – канальний

Як сказано вище, паливні насоси підсистем керування паливоподачею розраховуються на підвищену продуктивність, що дозволяє використовувати спеціальні стабілізатори тиску (перепаду тиску), які діють за принципом перепуску.

Стабілізатори тиску палива являють собою мембранні перепускні клапани (рис. 3.56, а), відрегульовані на певний тиск. При збільшенні тиску зайва частка бензину перепускається через клапан й повертається до паливного бака.

В останні роки на їх основі розроблено стабілізатори перепаду тиску (між входом до форсунки та впускним повітряним трубопроводом) (рис.3.56, б). У КПСК з розосередженим (багатоточковим) вприскуванням об'єм стабілізатора над мембраною поєднаний з задросельним об'ємом впускного трубопроводу. Це суттєво спрощує розв'язання задачі дозування палива: циклова доза вже не залежить від перепаду тиску (залежить від атмосферного тиску), який завжди накладається у перших стабілізаторів тиску. Особливо перепад суттєво впливав на режимах холостого ходу й часткових навантаженнях, при яких перепад тиску у впускному трубопроводі порядку 40 кПа становить більше 30 % тиску в паливній магістралі. Для компенсації зазначеного перепаду раніше доводилося вводити відповідну поправку у тривалість командного імпульсу τ_e, що подається на форсунки.

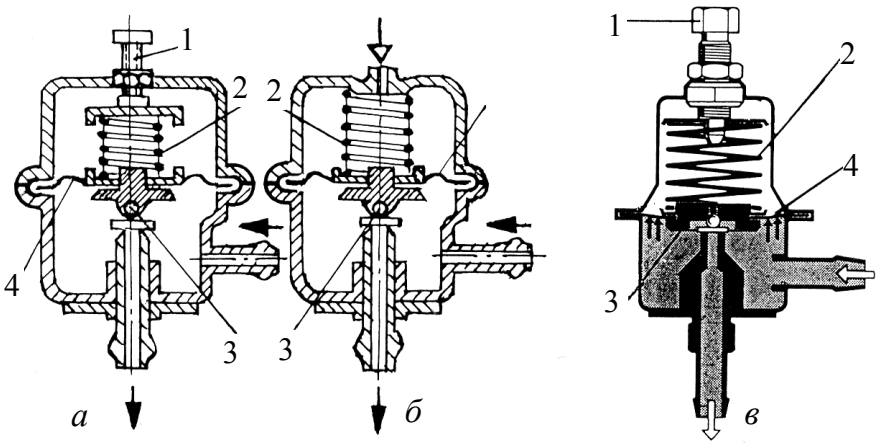


Рисунок 3.56 – Стабілізатори тиску (а); перепаду тиску (б); і демпфер коливань палива (в):

1 – регулювальний болт; 2 – пружина установки тиску (перепаду тиску; 3 – перепускний клапан; 4 – мембрана;⇩ – повітря із дросельного каналу; ← – паливо від насосу; ↓ – паливо на злив у бак

У системах центрального вприскування, де паливо подається перед дроселем, необхідність компенсації перепаду тиску виявляється меншою мірою.

Доти, доки дозування палива буде здійснюватися форсунками дискретно, динамічні процеси, зумовлені різкою відсічкою паливоподачі, повинні особливо враховуватися при розробках КПСК. Справа в тому, що забезпечення нормального дозування палива вимагає ліквідації хвильових явищ у паливопроводах.

В останні роки використовують спеціальні демпфери (рис.3.56, в), що згладжують гідравлічні удари і ліквідують хвильові явища при правильному виборі пружного елемента демпфера.

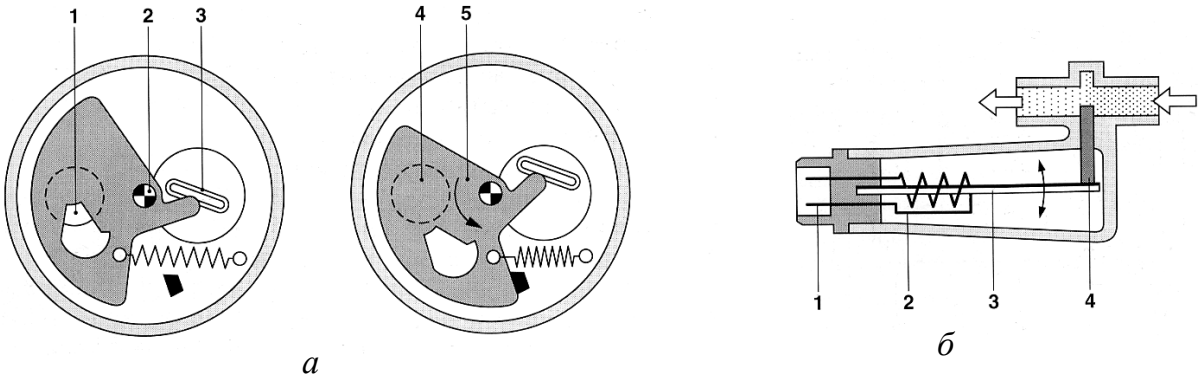
Деякі фірми (Bosch та ін.) для демпфування коливань застосовують спеціально підібрані шланги із бензоморозостійкої гуми.

Інші виконавчі пристрої. До них належать пристрої, що обслуговують додаткові функції КПСК паливоподачею та запалюванням. Розглянемо основні з них.

Заслінка додаткового повітря. Холодний двигун має підвищений опір тертя, яке треба додатково долати на холостому ході. Тому заслінка додаткового повітря дозволяє двигуну отримувати більше повітря, обходячи дросель. Оскільки це повітря вимірюється витратоміром й ураховується при дозуванні палива, двигун у результаті отримує й більше суміші. Таким чином досягається підвищена частота обертання колінчастого вала на холодному ДВЗ.

Заслінка додаткового повітря (рис.3.57) являє собою перфоровану заслінку, що перекриває прохідний переріз обхідного каналу, керований біметалевою пружиною.

Відкриття прохідного перерізу залежить від температури таким чином, що на холостому двигуні відкривається більший прохідний переріз, а при підвищенні температури двигуна цей переріз зменшується доти, доки канал повністю не закриється. Біметалева пружина електрично підігрівається. Завдяки цьому можна обмежити час відкриття заслінки залежно від типу двигуна. Місце розташування заслінки додаткового повітря вибирається таким, аби вона сприймала температуру двигуна. Тому на прогрітому ДВЗ заслінка додаткового повітря не працює.



а *б*

Рисунок 3.57 – Заслінка додаткового повітря:

а – схема керування: 1 – отвір у діафрагмі; 2 – осьовий підшипник; 3 – електричне підігрівання; 4 – повітряний канал; 5 – перфорована мембрана;

б – конструкція приладу: 1, 2 – електропідігрівання біметалевої пружини; 3 – біметалева пружина; 4 – перфорована заслінка

Форсунка холодного пуску. Для того щоб компенсувати втрати палива на конденсацію при пуску та полегшити пуск холодного (непрогрітого) двигуна, треба у момент пуску вприскувати додаткове паливо. Останнє подається через форсунку холодного пуску (рис. 3.58) у впускний трубопровід.

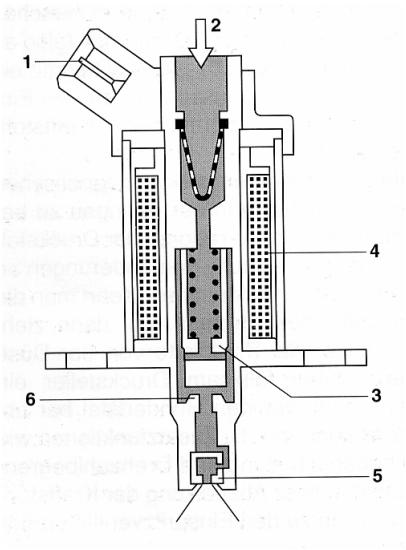


Рисунок 3.58 – Форсунка холодного пуску:

1 – електричне рознімання; 2 – підвід палива із сітчатим фільтром; 3 – клапан (якір магніту); 4 – обмотка електромагніту; 5 – відцентровий розпилювач; 6 – корпус

Тривалість включення такої форсунки обмежується термореле залежно від температури двигуна (охолоджувальної рідини).

Форсунка холодного пуску – електромагнітна. В її корпусі розташована обмотка електромагніту. У знеструмленому стані рухомий якір притиснутий пружиною до ущільнення й закриває розпилювач. Коли електромагніт включається, якір підіймається і відкриває доступ паливу в розпилювач. Потік палива при вході в розпилювач закручується.

Завдяки формі відцентрового розпилювача паливо розпилюється особли-

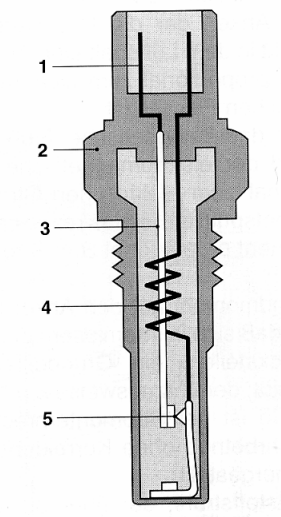


Рисунок 3.59 – Термореле:
1 – електронне рознімання; 2 – корпус з різьбою; 3 – біметалева стрічка; 4 – обмотка підігріву; 5 – контакт

во дрібно і змішується з повітрям у впускному трубопроводі за дросельною заслінкою.

Термореле. Цей пристрій (рис. 3.59) обмежує час роботи форсунки холодного пуску залежно від температури двигуна. Термореле складається із біметалевої стрічки, яка, залежно від своєї температури, розмикає або замикає контакт. Вона розташована у порожньому корпусі з різьбою. Корпус встановлюють у місці, де можливо найбільш точно вимірювати температуру двигуна.

Час включення форсунки холодного пуску залежить від нагрівання термореле двигуном, зовнішнім повітрям та власного електропідігріву. Треба обмежувати власне підігрівання форсунки (при 20 °С біля 8 с), інакше суміш перезбагатиться.

При прогріві контакт розмикається. Тому при пуску прогрітого двигуна паливо через пускову форсунку не вприскується.

Контакт керує обмоткою електромагніта пускової форсунки.

Пневматичний датчик прискорення. Цей датчик виконує функції економайзера. Він змонтований на осі дросельної заслінки. Крім функції вимикача на режимах примусового холостого хода, датчик прискорення виконує також функції датчика режиму прискорення подачі палива у впускний тракт, посилаючи при різкому відкритті дроселя серію імпульсів, які збільшують паливоподачу на режимах прискорення. Датчик (рис. 3.60) працює наступним чином. Порожнини А та Б розділені мембраною і сполучаються тільки через калібрований отвір. Тому час вирівнювання тиску у А і Б залежить від їх об’ємів та пропускної здатності каліброваного отвору. При різкому натисканні на педаль дроселя тиск порожнині А різко зростає і мембрана, долаючи зусилля пружини, прогинається, роз’єднуючи контакти. При подальшому поступовому вирівнюванні тисків мембрана

повертається у початкове положення; контакти замикаються і збагачення горючої суміші зупиняється.

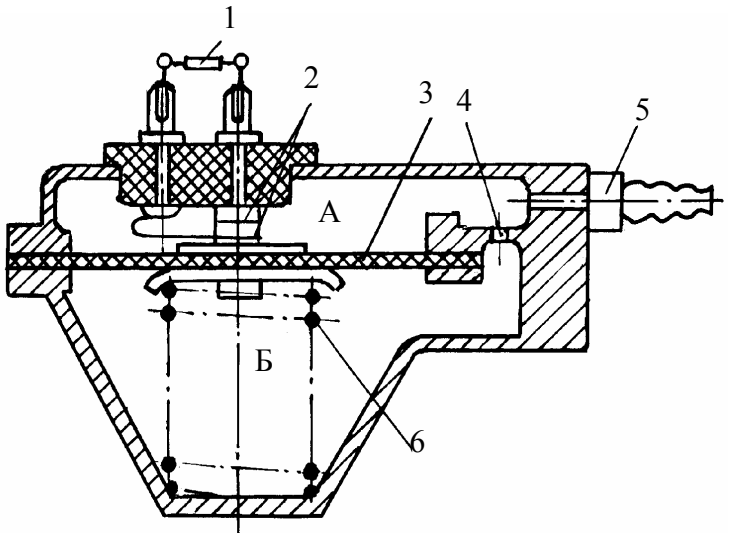


Рисунок 3.60 – Пневматичний датчик прискорення:

1 – резистор; 2 – контакти; 3 – мембрана; 4 – штуцер; 5 – калібрований отвір; 6 – пружина

Регулятор прогріву (регулятор керувального тиску). Зміни протитиску здійснюються регулятором прогріву, який (рис. 3.61) встановлено на двигуні таким чином, щоб він краще сприймав температуру (охолоджувальної рідини). Додатково регулятор має електричний підогрів.

Регулятор складається з підпружиненого клапана з плоским сідлом і біметалевою пружиною з електричним підігрівом.

У холодному стані біметалева пружина стискує клапанну пружину 7, зменшує силу її дії на мембрану 4 клапана. У такому разі прохідний переріз клапана є великим, у результаті більше палива йде на злив із магістралі керувального тиску, що знижується.

З початком тиску біметалева пружина підігрівається електричним струмом і теплотою двигуна; вона згинається й зменшує свою дію на пружину 7 клапана. Тиск пружини на мембрану посилюється; клапан з плоским сідлом зменшує свій прохідний переріз, у результаті протитиск збільшується.

Збагачення при прогріванні припиняється, коли біметалева пружина повністю сходить з клапанової пружини. У такому випадку керувальний тиск набуває свого нормального значення, визначеного тільки пружиною клапана. При холодному пуску керувальний тиск становить 0,05 МПа, на прогрітому двигуні – 0,37 МПа.

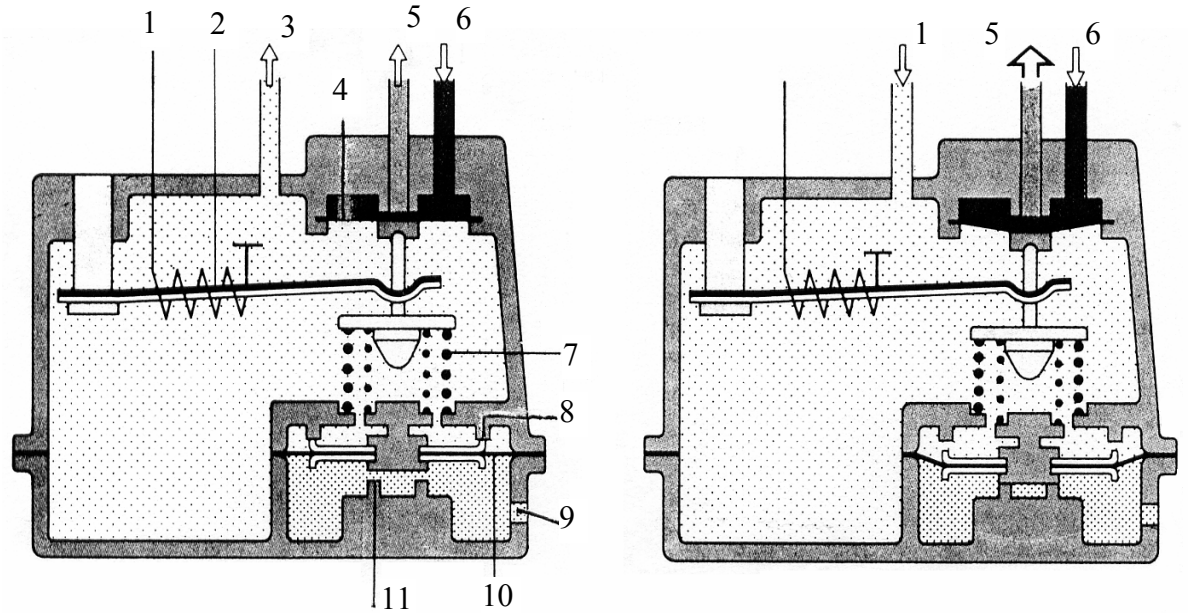


Рисунок 3.61 – Регулятор прогріву з мембраною повних навантажень на режимах холостого ходу й часткових навантажень:

1 – електричний підігрів; 2 – біметалева пружина; 3 – підведення розрідження (від впускного колектора); 4 – мембрана клапана; 5 – злив у паливний бак; 6 – керувальний тиск (від розподільника тиску); 7 – клапанна пружина; 8 – верхній упор; 9 – зв'язок з навколишнім середовищем; 10 – мембрана; 11 – нижній упор;
а – часткове навантаження; *б* – повне навантаження

Крім того, регулятор протитиску забезпечує збагачення суміші при переході на режим повного навантаження. Для цього регулятор прогріву має пружину меншого діаметра, яка спирається верхнім кінцем на тарілку штока клапана, а нижнім – на опору мембрани 10 і яка встановлена всередині пружини 7. Мембрана поділяє регулятор на верхню й нижню камери. Верхня камера сполучена трубопроводом із впускним колектором за дросельною заслінкою і в ній діє розрідження. Нижня камера залежно від виконання з'єднана або з навколишнім середовищем, або іншим трубопроводом з повітряним фільтром.

Завдяки високому розрідженню на холостому ході та на часткових навантаженнях мембрана 10 підіймається до впирання у верхній упор 8. У такому випадку внутрішня пружина тисне на верхню мембрану 4 з максимальною силою. Таким чином зусилля двох пружин забезпечують задане значення керувального тиску для даного навантажувального режиму. При

подальшому відкритті дроселя розрідження у верхній камері зменшується, нижня мембрана погинається униз до упирання в нижній упор 11. Верхня пружина ослаблюється, керувальний тиск зменшується на задане значення, в результаті суміш збагачується.

Накопичувач палива. Накопичувач палива (рис. 3.62) підтримує тиск у паливній магістралі після зупинки двигуна, щоб полегшити його повторний пуск, особливо гарячого двигуна (якщо паливо в магістралі знаходиться під тиском, вірогідність створення парових пробок мала). Завдяки відповідній конфігурації корпусу накопичувач згладжує пульсації паливоподачі при роботі паливного насоса.

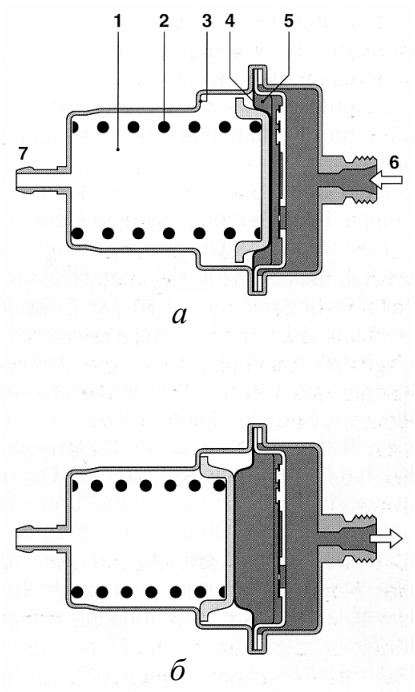


Рисунок 3.62 – Накопичувач палива:
а – *пустий;* б – *повний;*
1 – порожнина пружини; 2 – пружина; 3– упор; 4 – мембрана; 5 – об'єм для накопичування; 6 – вхід палива

Внутрішня порожнина накопичувача розділена мембраною на дві частини: одна камера служить для накопичування палива, у другій знаходиться пружина.

Під час роботи насоса накопичувальна камера заповнюється паливом. Мембрана прогинається, долаючи опір пружини, до впирання в корпус.

У цьому положенні, що відповідає максимальному об'єму накопиченого палива, мембрана залишається доти, доки працює двигун.

Паливний фільтр. Паливний фільтр (рис. 3.63) затримує частинки, які забруднюють паливо і які можуть негативно вплинути на роботу агрегатів паливоподачі.

Паливний фільтр включає паперовий фільтрувальний елемент, за яким знаходиться допоміжна сітка. Завдяки такій комбінації досягається високий ступінь очищення. Паливо фільтрується у бумажному фільтрувальному елементі, а сітка затримує частинки, що можуть відірватися у процесі експлуатації. Тому показаного на корпусі фільтра стрілкою напряму подавання палива слід суворо дотримуватися.

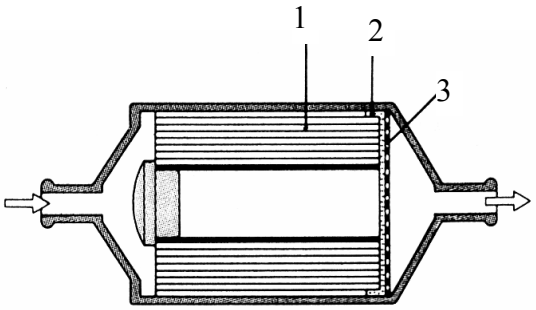


Рисунок 3.63 – Паливний фільтр:
1 – паперовий фільтр;
2 – опорна пластина; 3 – сітка

Залежно від робочого об'єму (літражу) двигуна та розмірів фільтра термін його експлуатації на автомобілі може становити від 30000 до 80000 км пробігу.

Пристрої запалювання. Зупинимося на основних з них – свічках та котушках запалювання. Саме вони разом з безконтактним розділенням запалювання визначають перспективи розвитку КПСК паливоподачею та запалюванням.

Котушки запалення. Вони виконують функції пристрою для накопичування енергії та трансформатора. На котушку подається напруга постійного струму від електричної мережі автомобіля, і вона забезпечує вироблення імпульсів запалювання у вигляді необхідної напруги розрядного струму для свічок запалювання. Питомий опір первинної обмотки котушки та індуктивності визначають кількість енергії, що запасається у магнітному полі котушки запалювання. Вторинна обмотка котушки повинна мати такі характеристики, що дозволяють отримати потрібну пікову напругу, силу струму та тривалість самого розряду.

Контакти переривника, які використовують у системі батарейного запалювання з котушкою, можуть забезпечувати переривання струму силою приблизно до 5 А. Найновіша підсистема запалювання (DLI – за міжнародною класифікацією), що діє без розподільника й має електронні способи дії, установки моменту запалювання за частотою обертання колінчастого вала та навантаженням двигуна, розподілу запалювання по відповідних циліндрах двигуна, може функціонувати практично на струмі будь-якої сили.

У підсистемі батарейного запалювання використовувались допоміжні опори (служать як шунт, що відключається для збільшення струму під час холодного пуску двигуна).

У підсистемі електронного запалювання (DLI) немає потреби у допоміжних опорах, оскільки за допомогою електронної схеми момент спрацьовування котушки запалювання можна визначити на підставі значень

напруги акумулятора й частоти обертання колінвала, що й забезпечує отримання максимальної енергії запалювання.

Кожна котушка запалювання повинна швидко заряджатися для подальшої видачі напруги та енергії, що особливо важливо при високих *n*. Важливими пріоритетами в цьому випадку є мала індуктивність первинної обмотки та, у ряді випадків, підвищений переривистий струм.

Конструкції та схеми котушок запалювання підсистеми DLI подано на рис. 3.64 та 3.65.

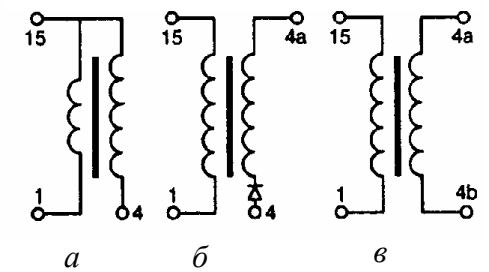


Рисунок 3.64 – Котушки запалення (*схема*)*:*
а – котушка запалення для однієї свічі (підсистема без розподільника запалення);
б – котушка запалення одноіскрового типу;
в – котушка запалення для двох свічок

Котушки запалювання з бітумною або мастильною ізоляцією у металевому корпусі все більше замінюються котушками з заповнювачами на основі епоксидної смоли. Такі котушки забезпечують більшу свободу у виборі геометричних розмірів (можуть мати менші розміри), типів та кількості електричних клем, а також краще чинять опір вібраціям і мають малу масу. Первинна обмотка котушки, що є основним джерелом теплоти, розташована якомога ближче до сердечника з метою отримання кращого теплообміну й економії міді.

Синтетичні матеріали, що застосовуються у котушці запалювання, забезпечують отримання доброго зачеплення між усіма високовольтними компонентами (залиті епоксидною смолою).

Котушки запалювання на одну й дві свічки застосовуються як альтернатива загальноприйнятим підсистемам запалювання з розподільником запалювання (батарейним, транзисторним, ESA-електронним запалюванням – всіма з механічним розподільником). Такі котушки використовуються в підсистемах без розподільника запалювання.

Коли котушка працює на одну свічку запалювання, струм, що змінюється у первинній обмотці, дозволяє отримати імпульс запалювання на окремій свічці у точно визначений момент часу. Додаткові розрядники або високовольтні діоди застосовуються для запобігання позитивним високо-

вольтним імпульсам струму (1–2 кВ), які можуть привести до передчасного іскрового розряду.

На котушці, що обслуговує дві свічки запалювання, вторинна обмотка електрично ізольована від первинної обмотки. Кожний з двох виводів високої напруги з'єднаний зі свічкою запалювання для створення електродугових розрядів на обох свічках при відсіканні струму в первинній обмотці. Спеціальних заходів для запобігання появ розряду під час виключення запалювання не потребується.

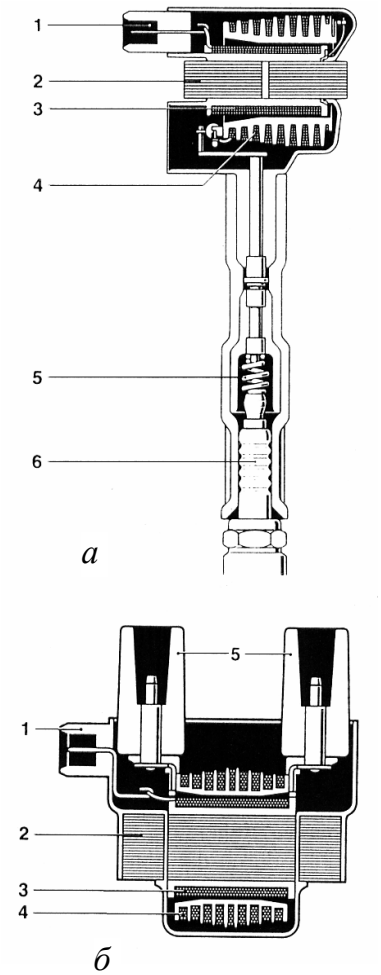


Рисунок 3.65 – Котушки запалювання

а – для однієї свічки;
б – двохіскрова котушка (в системах запалювання без розподільника) [6]: 1 – клема низької напруги; 2 – пластинчастий залізний сердечник; 3 – первинна обмотка; 4 – вторинна обмотка; 5 – виводи високої напруги; 6 – свічка

Підмикання й розташування таких котушок запалювання полегшується за рахунок комбінації кількох котушок та розміщення їх у єдиному спільному корпусі (рис. 3.65, б).

Свічки запалювання. Свічка запалювання відіграє важливу роль у забезпеченні надійної й оптимальної роботи КСК паливоподачею та запалюванням, тобто КПСК двигуном.

Свічка запалювання служить для передачі струму високої напруги, який виникає у катушці запалювання, до електродів камери згоряння, де цей струм здійснює іскровий разряд для запалювання горючої суміші.

Свічка повинна бути працездатною при напрузі запалювання більшій 35 кВ, і використанні ізоляції, яка не руйнується при температурах до 1000 °С. Крім того, вона має витримувати безперервно діючі вібрації, високотемпературні хімічні процеси (аг-

ресивний вплив продуктів згоряння і, як результат, високотемпературну корозію). Свічка зазнає швидких змін температурних режимів (перепадів температур між нагрітими продуктами згоряння й холодною робочою сумішшю), тому керамічний ізолятор повинен мати високий опір тепловим ударам.

Конструкцію свічки запалювання подано на рис. 3.66 а, б.

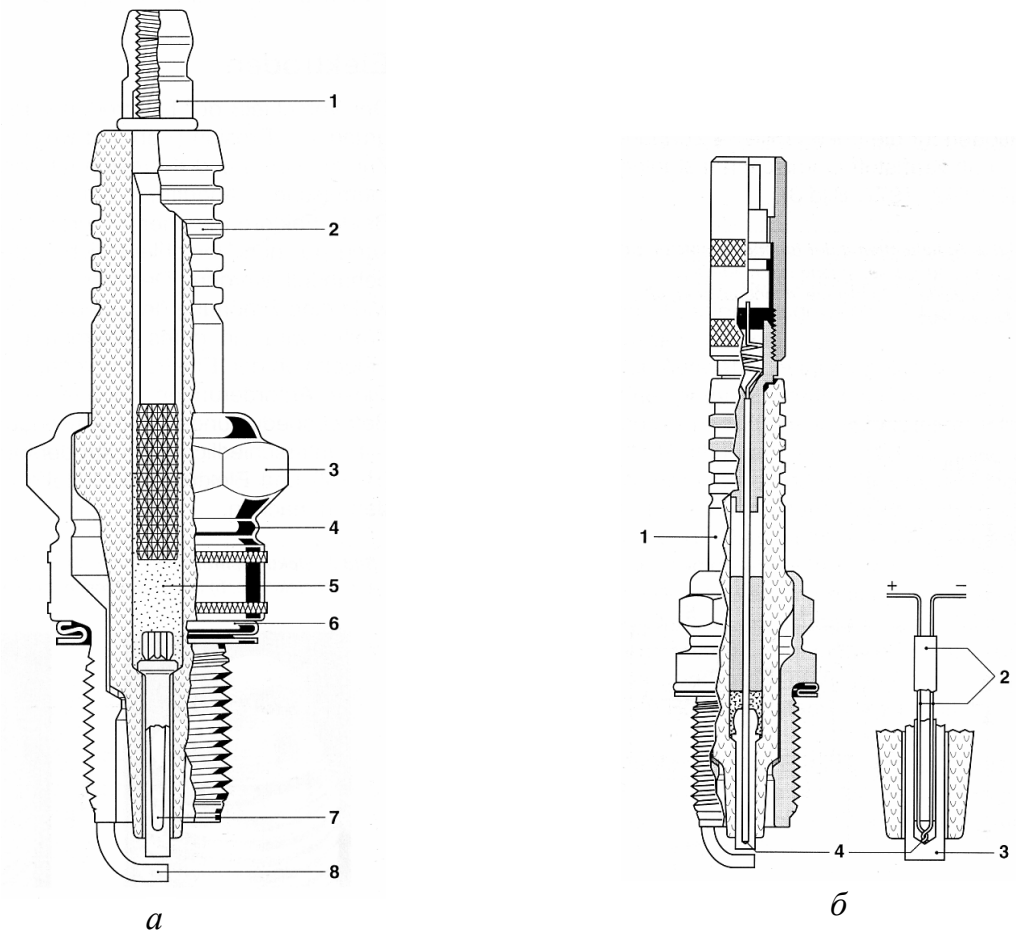


Рисунок 3.66 – Свічки запалювання:

а – свічка запалювання: 1 – примикання дроту високої напруги; 2 – керамічний ізолятор; 3 – корпус; 4 – зона, яка витримує теплову деформацію; 5 – струмопровідне лите скло; 6 – прокладка; 7 – центральний електрод з композитного матеріалу (Ni/Cu); 8 – боковий електрод (з'єднаний з масою);
б – свічка з термоелементом: 1 – ізолятор; 2 – захист виводу термоелемента; 3 – центральний електрод; 4 – термоелемент

Електропровідний елемент зі скляного литва створює з'єднання між центральним електродом і контактною голівкою в ізоляторі. Скляний елемент одночасно виконує функцію ущільнення від прориву газів, що знахо-

дяться під великим тиском. Свічка також має резистор для усунення перешкод.

Боковий електрод, як і центральний, виготовляють, в основному, з нікелевих сплавів, що дозволяє йому чинити опір високим тепловим напругам. Цей електрод приварюється до корпусу свічки.

Бажано мати максимальні зазори між електродами свічки, бо вони сприяють іскрі запалювати відносно великі об'єми паливо-повітряної суміші, що й забезпечує надійне згоряння цієї суміші й добрі потужнісні характеристики двигуна. З іншого боку, цей зазор не повинен бути занадто великим для забезпечення гарантії того, що пробивна напруга буде достатньою для отримання сталого електродугового разряду навіть у кінці терміну служби свічки запалювання й за несприятливих обставин. Буває неможливим досягти сталої роботи двигуна на холостому ході і при занадто звуженому зазорі між електродами свічки.

На нормовану пробивну напругу запалювання впливає багато факторів, таких як:

- зазор між електродами свічки;
- конфігурація свічки;
- робочі температури;
- матеріал, що використовується; а також фактори, що відносяться до конкретної КЗ:
  - α (відношення повітря до палива в робочій суміші);
  - швидкість газового потоку;
  - турбулентність і тиск продуктів згоряння.

Високі значення пробивної напруги запалювання необхідні у таких випадках:

- високі ступені тиску;
- двигуни з наддувом;
- неоднорідна робоча суміш, особливо при переході від розгону до режиму холостого ходу та при збіднених сумішах;
- холодні електроди та робочі суміші;
- великий зазор поміж електродами свічки (обгоряння свічки).

Безконтактне розподілення запалювання. Це перспективний та ефективний пристрій організації ефективного запалювання.

Пристрої з котушками запалювання на кожний циліндр практично витіснили механічні розподільники запалювання. У них кожний циліндр

двигуна оснащений власною (індивідуальною) котушкою запалювання з задавальним (підсилювальним) каскадом, який встановлено безпосередньо над свічкою запалювання або окремо від неї. При цьому необхідна синхронізація роботи котушок застосуванням датчика обертання розподільного вала або шляхом визначення тиску в циліндрі. Цей пристрій придатний для двигунів з будь-яким числом циліндрів.

Пристрій з однією котушкою запалювання на два циліндри – подальший крок поліпшення запалювання двигунів. На кожні два циліндри мається одна котушка запалювання. Колінчастий вал може використовуватися для синхронізації їхньої роботи. Клема високої напруги котушки запалювання з'єднана із свічками запалювання двох циліндрів, робочі цикли здійснюються зі зміщенням на 360 град. П.К.В. один від одного. Додатковий іскровий розряд отримується під час такту випуску. Подібний пристрій запалювання може застосовуватися тільки на двигунах з парною кількістю циліндрів. Сьогодні описаний безконтактний спосіб запалювання використовується найчастіше, оскільки його вартість найменша порівняно з пристроєм з котушками запалювання на кожний циліндр.

Пристрої, що обслуговують мікропроцесор. Сьогодні до складу КПСК паливоподачею та запалюванням включають блок синтезу інформації (БСІ). Для синтезу інформації, отриманої від датчиків, використовують мікропроцесори, в яких, як відомо, знайшов застосування цифровий принцип цього синтезу.

Тому зупинимося на особливостях виконавчих пристроїв, які обслуговують мікропроцесор.

До них відносяться:

- засоби розподілення командних імпульсів (КІ);
- пристрої сполучення;
- оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП);
- постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП);
- генератор тактових імпульсів;
- стабілізатор електроживлення;
- вихідні каскади (підсилювач потужності для керування клапанами форсунок; комутатор для керування котушками запалювання).

Мікропроцесор разом з цими пристроями складають мікро-ЕОМ КПСК.

До основних пристроїв розподілення належать безконтактні засоби розподілення командних імпульсів та біполярні пристрої формування цих імпульсів.

Як відзначено вище, безконтактні пристрої розподілення КІ характеризуються відсутністю механічних комутаторів й спеціальних переривників, які подають стартові імпульси. Їх використання сприяє усуненню механічних елементів у складі КПСК та підвищенню їх експлуатаційної надійності.

Для генерування стартових імпульсів використовується переривник підсистеми запалювання. Стартовий імпульс подається одночасно в БСІ та в так зване перелічувальне кільце.

Сформований КІ почергово проходить через кожний з осередків блоку збігів за умови надходження до нього імпульсу від перерахункового кільця.

На виході з таких осередків маються підсилювачі потужності, до кожного з яких і підключена форсунка.

У вихідних каналах електронного комутатора, наприклад, 4-циліндрового двигуна, імпульси з'являються у послідовності 1-2-3-4 і т.д. Отже, для того щоб паливо у циліндри подавалося відповідно до порядку роботи такого двигуна, необхідно вихідні канали з'єднати з форсунками узгоджено. Наприклад:

порядок роботи циліндрів	поєднання каналів
1-2-4-3	1-1; 2-2; 3-4; 4-3;
1-3-4-2	1-1; 2-3; 3-4; 4-2

Безконтактний комутатор КІ виконують по-різному.

Відомі тригерні комутатори, в яких кількість транзисторів у 2 рази перевищує кількість вихідних каналів, наприклад, 16 для 8-циліндрових двигунів.

Більш поширені тригерні комутатори у сполученні з діодними схемами збігів; у них на кожний канал потрібен один транзистор.

Безконтактні комутатори можуть бути зібрані на ферритранзисторних елементах, що підвищує їх надійність. У них на кожному каналі є один транзистор, який одночасно з виконанням функції комутації формує потужний імпульс сили струму, що робить непотрібним застосування допоміжних блоків підсилення потужності.

Таким чином, якщо форсунки з'єднані з вихідними каналами комутатора згідно з порядком роботи циліндрів двигуна, то пристрій забезпечить автоматичну синхронізацію моменту подачі палива з процесом впуску горючої суміші.

Електронні схеми різних безконтактних комутаторів для ДВЗ наведені у спеціальній літературі з наладки й ремонту КСК ДВЗ [1, 6, 16, 17, 21].

Суттєвим та важкоздоланним недоліком КПСК дозуванням палива є електромеханічна інерційність виконавчих пристроїв-форсунок, які б в ідеальному випадку мали б точно відстежувати тривалісний інтервал часу командного імпульсу. Практично трудно створити електромагнітний клапан форсунки, який міг би забезпечувати τ_e тривалістю 0,5 мс та менше. Але без таких швидкодіючих форсунок неможливо реалізувати з достатньою точністю узгоджене вприскування.

Одним з можливих ефективних рішень такої проблеми є використання біполярних пристроїв у комплексі з магнітоелектричними пристроями, які реагують на полярність імпульсу.

Принцип дії біполярних пристроїв полягає в тому, що між імпульсами прямої полярності в магнітоелектричну схему виконавчого пристрою подається імпульс зворотної полярності. У результаті й відкриття, й закриття клапана виконується електромагнітними силами (в монополярних пристроях клапан відкривається електромагнітом, а закривається пружиною). Звичайні монополярні імпульси від БСІ спеціальним електронним блоком передаються на два генератори, почергово змінюючи полярність КІ, який потім надходить на магнітоелектричну форсунку.

Інші виконавчі пристрої мікропроцесорної схеми КПСК (наприклад, ОЗП, ПЗП, стабілізатори живлення електроенергією, підсилювачі потужності тощо) вибирають з ряду уніфікованих електронних пристроїв, що описані у відповідній літературі.

Пристрої сполучення потрібні для перетворення сигналів датчиків у форму, необхідну для зчитування процесором. Як пояснювалося вище при розгляді датчиків КПСК, у таких пристроях аналогові й цифрові сигнали з датчиків перетворюються у цифрові (необхідної форми) з потрібною амплітудою та шпаруватістю.

На завершення аналізу датчиків та виконавчих пристроїв комп'ютерних підсистем керування паливоподачею й запалюванням у ДВЗ на рис. 3.67, 3.68, 3.69, 3.70 надано фотознімки натурних датчиків, виконавчих пристроїв сучасних КПСК паливоподачею і запалюванням бензинових двигунів.

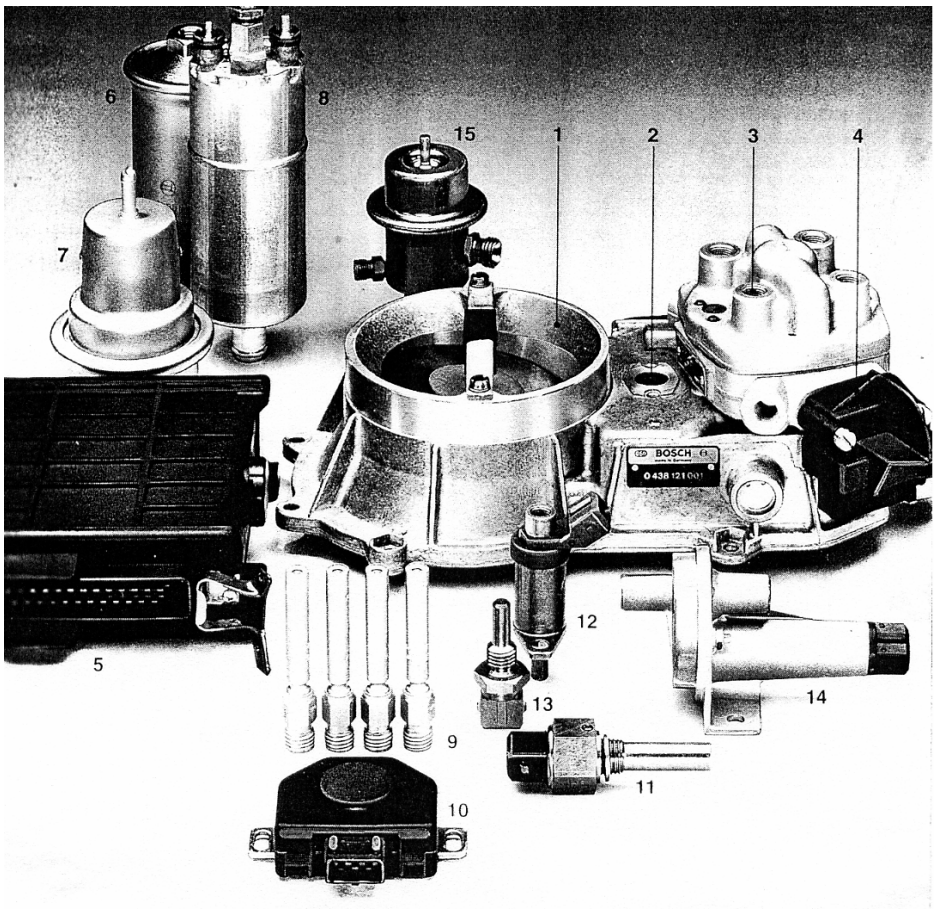


Рисунок 3.67- Комплектація КПСК паливоподачею KE-Jetronic:
1 – витратомір; 2 – регулятор складу горючої суміші; 3 – гідроакумулятор палива; 4 – електрогідравлічний коректор тиску; 5 – БСІ; 6 – паливний фільтр; 7 – дозатор; 8 – паливний насос; 9 – форсунки; 10 – датчик положення дроселя; 11 – датчики температури охолоджувальної рідини; 12 – форсунка пускова (холодного запуску); 13 – вимірювач температури; 14 – клапан додаткового повітря; 15 – стабілізатор тиску палива

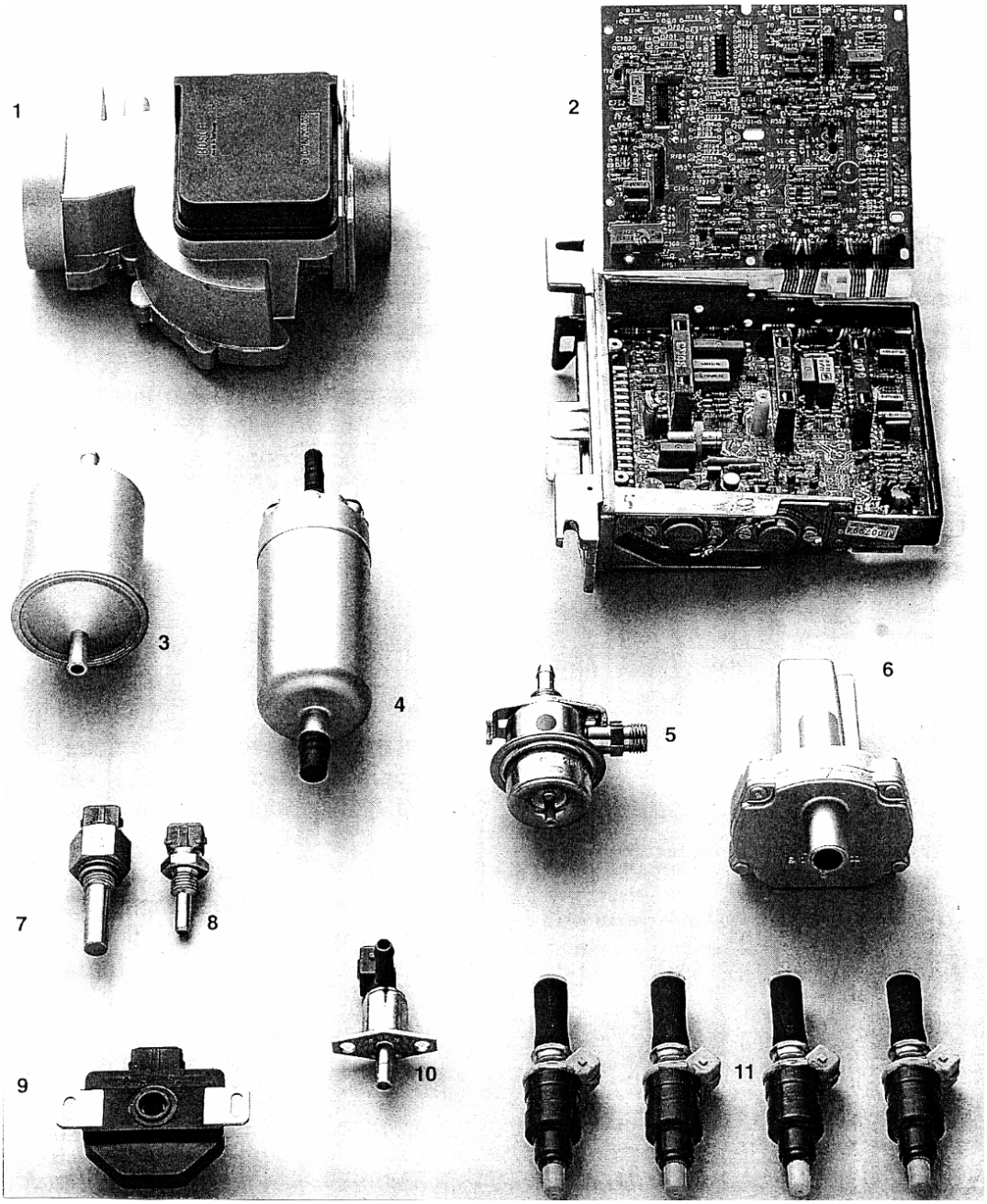


Рисунок 3.68 – Комплектація КПСК паливоподачею L-Jetronic:

1 – витратомір повітря; 2 – БСІ; 3 – паливний фільтр; 4 – паливний насос з електроприводом; 5 – регулятор тиску палива; 6 – клапан додаткового повітря; 7 – датчик температури охолоджуючої рідини; 8 – датчик температури; 9 – датчик положень дроселя; 10 – пускова форсунка; 11 – електромагнітні форсунки



Рисунок 3.69 – Датчики та виконавчі пристрої сучасної КПСК паливоподачею (Motronic) (початок):

1 – датчик прискорення; 2 – датчик положення колінвала; 3 – датчик положення дроселя; 4 – кінцевий вимикач дроселя; 5 – вузол дроселя з пневмоприводом; 6 – демпфер тиску палива; 7 – регулятор тиску палива; 8 – датчик абсолютного тиску; 9 – датчик абсолютного тиску (D-Jetronic); 10 – датчик абсолютного тиску; 11 – механічна форсунка; 12 – електромагнітна форсунка



Рисунок 3.69 (продовження):

13 – форсунка; 14 – бензонасос; 15 – регулятор складу суміші; 16 – пускова форсунка; 17 – датчик детонації; 18 – паливний фільтр; 19 – накопичувач палива; 20 – паливна рампа; 21 – λ-зонд; 22 – комутатор електронний; 23 – клапан х.х. з кроковим електродвигуном; 24 – термоанемометричний витратомір повітря

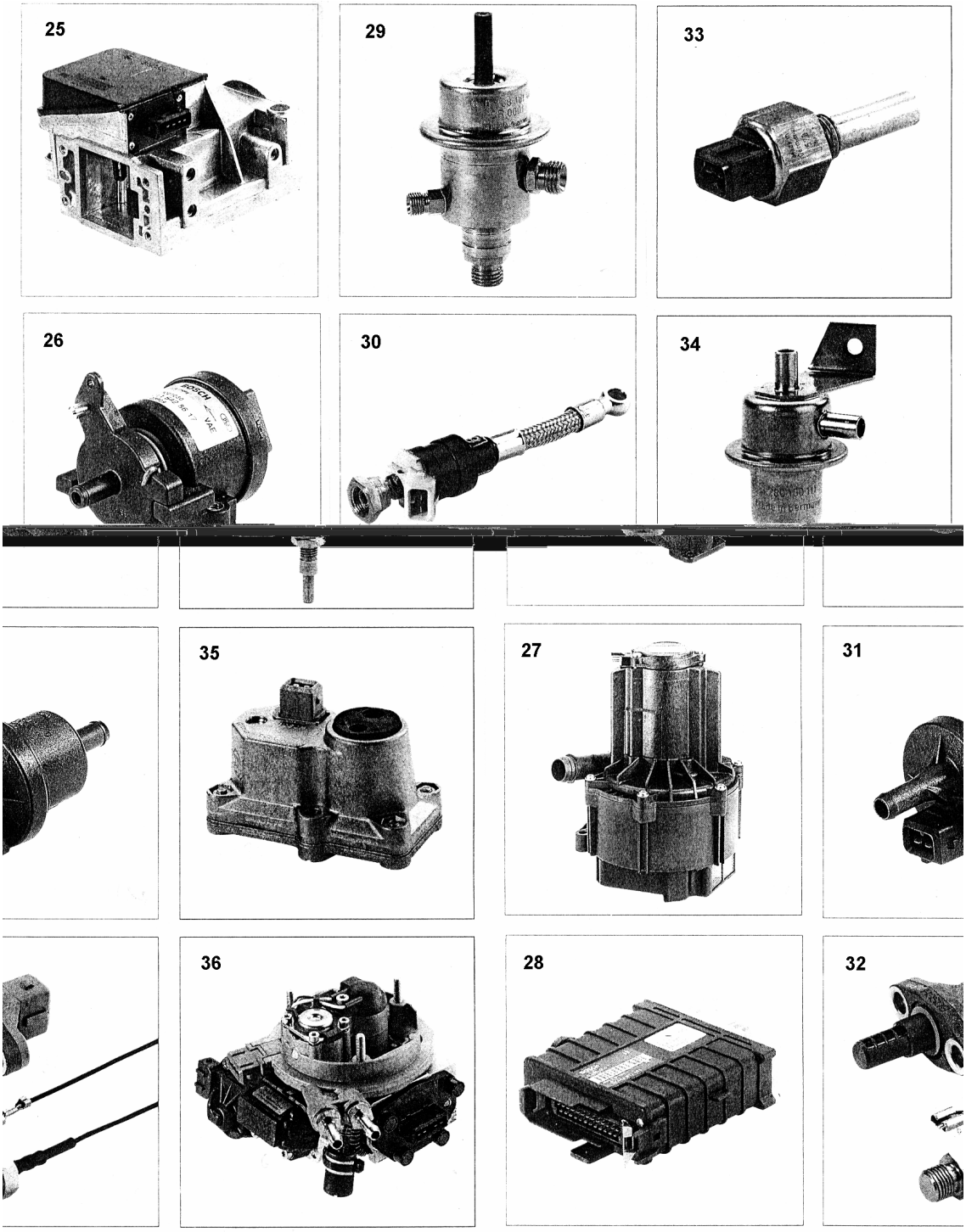


Рисунок 3.69 (закінчення):

25 – витратомір повітря газодинамічний; 26 – модуль педалі акселератора; 27 – адсорбер; 28 – контролер електронний; 29 – регулятор тиску; 30 – клапан перепуску палива при λ-регулюванні; 31 – клапан вентиляції паливного баку; 32 – температурний датчик; 33 – датчик температури; 34 – вакуумний регулятор; 35 – регулятор керувального тиску; 36 – вузол центрального вприскування

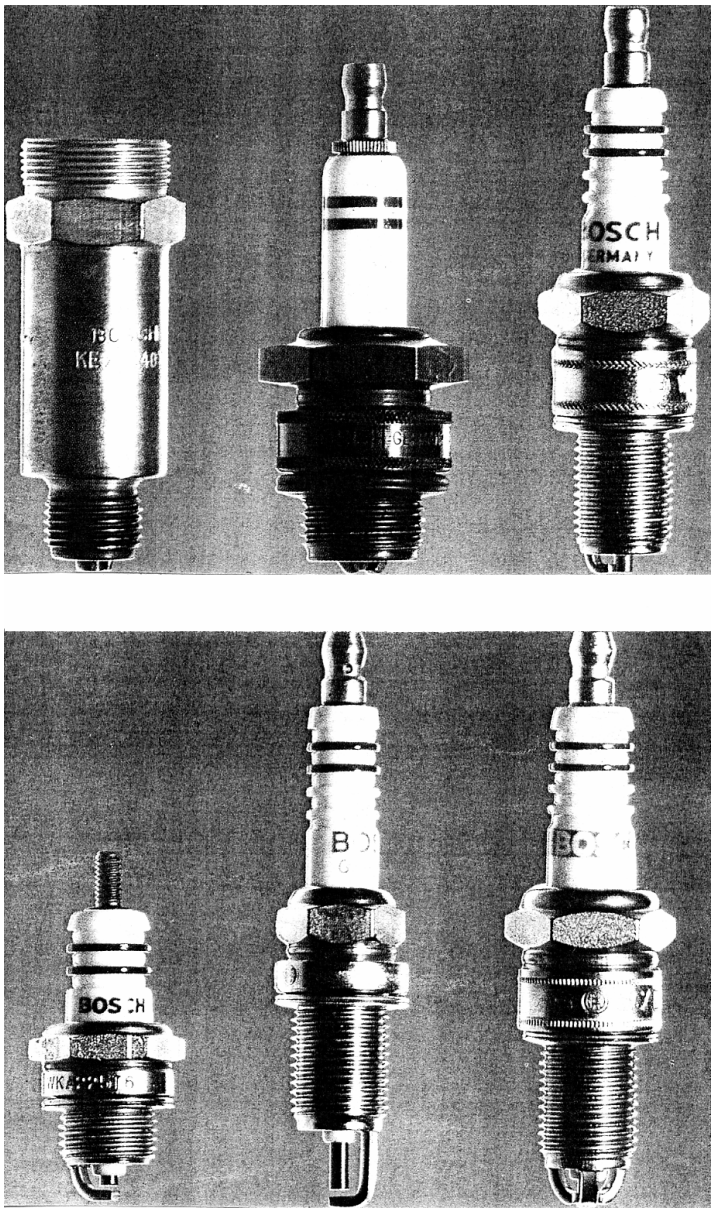


Рисунок 3.70 – Сучасні свічки запалювання

3.2. КПСК паливоподачею у дизелях

3.2.1. Можливості поліпшення паливоподачі у сучасних дизелях

Сьогодні провідні моторобудівні фірми суттєво розширюють виробництво швидкохідних дизелів для транспортних засобів, перш за все легкових та малотоннажних вантажних автомобілів. До 2000 року вже 53 % нових французьких, 20 % німецьких легкових автомобілів оснащено дизелями з показниками (паливна економічність, токсичність), які дещо перевищують рівні бензинових двигунів.

У першу чергу це пояснюється запровадженням КПСК паливоподачею на всіх моделях сучасних автотранспортних двигунів, що дозволяє оптимізувати робочі процеси в широкому спектрі експлуатаційних режимів, і перш за все – при перехідних процесах.

Тільки електронне керування у поєднанні з рекордними рівнями тисків палива при вприскуванні (до 135–200 МПа) дозволило досягнути не компромісних, а справді найбільш високих показників дизелів за експлуатаційною витратою палива, димністю, токсичністю, шумністю, механічними, тепловими навантаженнями тощо.

Однак ще не всі резерви поліпшення паливоподачі у дизелях вичерпано; це ж стосується й обмежень, наведених вище.

Тому фірми Росії (ЗАЗ, ЯМЗ та ін.), України (ХКБД, м. Харків) та зарубіжні (Mercedes-Benz; Volkswagen та Audi; AVL; Stays-Daimler-Puch AG; Fiat; Robert Bosch і Daimler-Benz тощо) приділяють велику увагу розробкам нових КПСК паливоподачею дизелів, причому не тільки таких, що керують цикловими подачами, але і якістю вприскування за рахунок керування моментом початку та тривалістю вприскування, його максимальним тиском, формою характеристики паливоподачі.

Можна вважати комп’ютеризацію керування дизелів одним з генеральних напрямів технічного прогресу в моторобудуванні.

Заміна традиційних відцентрових чутливих елементів мікропроцесорним керуванням дозволяє на значно вищому рівні знаходити нові можливості розв’язувати задачі дво- та всережимного регулювання, особливо при скиданнях-накидах навантажень, значно скоротивши перехідні процеси, та зменшити середню експлуатаційну витрату палива та кількість токсичних викидів при зниженні нерівномірності обертання колінчастого вала.

3.2.2. Вимоги до КПСК паливоподачею у дизелях

Накопичений досвід створення й використання КПСК паливоподачею дозволяє сформулювати такі основні вимоги до них:

- в умовах широкого спектра усталених експлуатаційних режимів треба забезпечувати дозування циклової витрати палива при керуванні кутом випередження, тривалістю і формою характеристики вприскування з адаптацією керованих параметрів до змін якості палива, зовнішніх умов, спрацювання приводу ПНВТ та інших обмежень при мінімумах експлуатаційної витрати палива й рівня токсичних викидів;
- в умовах перехідних процесів (неусталені режими) необхідно забезпечити з потрібною швидкістю циклічність дії на дозатор палива для зменшення тривалості таких процесів при дотриманні паливно-екологічного критерію;
- повинна бути закладена реальна можливість реалізації максимального тиску вприскування до 150–200 МПа за рахунок використання (створення) виконавчих пристроїв зі зменшеними перестановочними зусиллями; треба також забезпечувати підвищення тиску вприскування при низьких n та малих N_e за рахунок акумуляторних схем паливоподачі, тощо. Слід передбачити ступінчасте, багатофазне вприскування та інші заходи щодо ефективності розпилювання і згоряння;
- у цілому, для конкретної моделі експлуатації двигуна потрібно забезпечити оптимізацію керування роботою паливної апаратури за мінімальним g_e або за іншою цільовою функцією при накладених обмеженнях.

Сучасні КПСК здатні виконувати складні функціональні задачі, націлені на реалізацію сформульованих вимог, у тому числі:

- гнучко регулювати циклову паливоподачу відповідно до заданого швидкісного режиму двигуна та забезпечувати зовнішню швидкісну його характеристику (не обов'язково жорстко задану);
- забезпечувати мінімальну нерівномірність паливоподачі та кута випередження вприскування (КВВ) для кожного циліндра;
- оптимально регулювати КВВ відповідно до режиму роботи;
- автоматизувати пуск; збагачувати за необхідності суміш при пуску; виключати паливоподачу на примусовому холостому ході та здійснювати регулювання α впродовж перехідного процесу;

- робити відключення циліндрів та робочих циклів на часткових режимах;
- діагностувати датчики й виконавчі пристрої, компенсувати ті, що вийшли з ладу, за допомогою резервних програм.

Для найпоширеної КПСК типу Common Rail додатково слід реалізувати:

- оптимальне регулювання тиску й характеристики (закону) вприскування;
- двофазне вприскування, в тому числі з мінімальною усталеною запалювальною порцією, з керованим інтервалом між вприсками;
- регульоване додаткове вприскування (після основного) для розігріву нейтралізатора на часткових режимах.

Перспективність різних КПСК звичайно оцінюють з урахуванням забезпечення зазначених функцій.

3.2.3. Схемні та конструктивні особливості підсистем керування паливоподачею у дизелях

Електронізація дизелів відстає від могутньої мікропроцесорної техніки у двигунах з іскровим запалюванням. На те є причини.

По-перше, широка дизелізація автотранспорту почалася зовсім недавно. По-друге, електронізація керування паливоподачею у дизелях супроводжується значними труднощами. Основна з них – необхідність реалізувати командні сигнали в умовах надвисокого тиску вприскування, який на декілька порядків перевищує таке у ДВЗ іскрового запалювання (200 МПа та більше); при цьому зростають переставні зусилля для пересування дозувальних елементів паливної апаратури за командними сигналам КПСК. Це потребує створення виконавчих пристроїв з електромагнітами, що мають особливо потужні магніторушійні сили. Слід також враховувати, що у дизелях паливоподача до циліндрів скорочується (за часом) у декілька разів порівняно з двигунами іскрового запалювання, тому потрібно різко підвищити швидкодію керувальних електромагнітів КПСК. Кращі фірми світу ще не подолали зазначені труднощі.

Сьогодні вже розроблено й запроваджено дизельні КПСК паливоподачею, де спочатку закладено принцип адаптивності, досвід реалізації якого на бензинових ДВЗ є вже достатньо накопиченим. Тому поділяти КПСК

паливоподачею у дизелях на програмні та програмно-адаптивні недоцільно.

КПСК паливоподачею у дизелях реалізовані в таких формах:

- електронні регулятори n та N_e;
- електронне керування характеристикою вприскування палива у традиційних паливних системах;
- керування вприскуванням у паливних системах з акумуляторами високого тиску й електрокерованими форсунками;
- керування вприскуванням в електронних паливних підсистемах з гідропосиленням;
- гібридні схеми з електронним керуванням паливоподачею.

Перейдемо до розгляду кожного варіанта КПСК паливоподачею у дизелях.

Електронні регулятори швидкості і потужності. Електронні пристрої отримують все більшого поширення для керування дизелями у зв'язку з тим, що можливості подальшого удосконалення механічних регуляторів практично вичерпані.

Переваги електронних регуляторів (ЕР) виявляються у їх здатності, завдяки дуже швидкій реакції на зміни n та N_e, здійснювати керування цикловою витратою палива залежно від теплового стану двигуна, тиску й температури повітря для наддуву, питомої ваги палива та інших параметрів, а не тільки від однієї частоти обертання колінчастого валу.

З урахуванням такої важливої переваги саме ЕР й досягли найбільшого розвитку при запровадженні мікропроцесорної техніки у системи керування паливоподачею у дизелях.

Головним напрямком розробки ЕР є нарощування функціональних можливостей КПСК шляхом підключення до неї все більшої багатопараметрової інформації щодо факторів та обмежень, які впливають на циклову витрату палива.

На рис. 3.71 показана принципова схема ЕР дизеля, розробленого японською фірмою Nippon Denso [1]. На дизелі розташовані датчики: частоти обертання n, моменту початку вприскування – θ, положення рейки ПНВТ – h; тиску й температури повітря для наддуву – p_s, t_s; температур охолоджувальної рідини й мастила – $t_{охол}$, $t_м$. Крім сигналів датчиків вхідними діями на БСІ є сигнали 1–5. Керування рейкою 7 паливного насоса та

муфтою зміни КВВ 8 здійснюється виконавчими механізмами частоти обертання ВМ (ω) та ВМ (θ), що включають лінійні електромагніти й мастильні серводвигуни.

У комп'ютерний БСІ входять два восьмирозрядних мікропроцесори: головний і допоміжний.

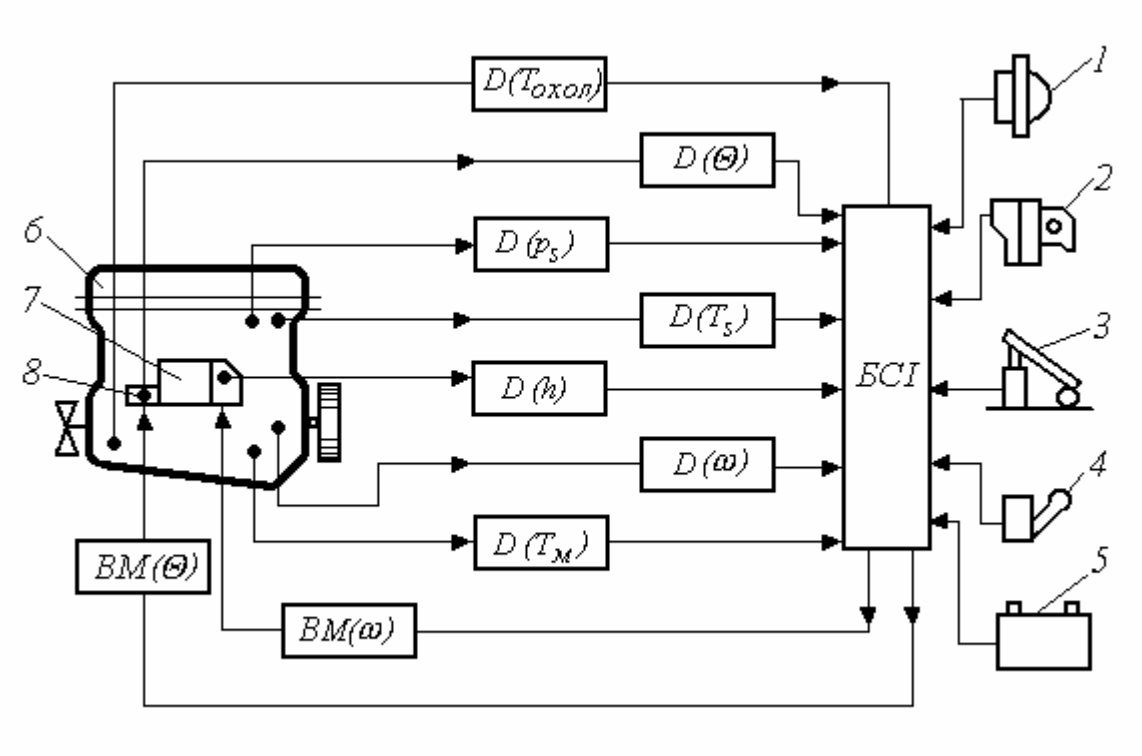


Рисунок 3.71 – Принципова схема ЕР швидкохідного дизеля:

1 – індикатор; 2 – стартер; 3- педаль керування; 4 – тумблер блока діагностування; 5 – акумулятор; 6 – дизель; 7 – паливний насос високого тиску (ПНВТ); 8 – муфта випередження вприскування палива; 9 – БСІ (блок синтезу інформації); D – датчики; ВМ – виконавчі механізми (пристрої)

Головний процесор на основі сигналів визначає циклову подачу $g_{ц}$ палива й КВВ. Сигнал про $g_{ц}$ подається у допоміжний мікропроцесор, що контролює роботу виконавчого механізму переміщення рейки шляхом порівняння сигналів реального та потрібного положень. Допоміжний процесор контролює також аналого-цифровий перетворювач (АЦП) й передає цифрові сигнали до головного мікропроцесора.

Підкреслимо, що цифрові схеми керування на базі мікро ЕОМ дозволяють здійснювати програмно-адаптоване, а в перспективі й адаптоване,

тобто таке, що само налагоджується з урахуванням вихідних показників двигуна. Схема рис. 3.71 ґрунтується на рядному ПНВТ.

Розглядаючи електронне керування цикловою подачею й КВВ КПСК з насосами розподільного типу, треба мати на увазі, що для переміщення як дозатора $g_{ц}$ так і роликової шайби керування кутом θ необхідні значно менші переставні зусилля. Це створює передумови для упровадження такої конструкції у серійне виробництво.

Комп'ютерне керування одночасно цикловою подачею $g_{ц}$ та КВВ може бути реалізовано не так як на рис. 3.71 (традиційне золотникове дозування), а в результаті клапанного регулювання, тобто йдеться про принципово нові паливні системи з КПСК, які розглядатимуться далі.

Підкреслимо також, що електронні регулятори, як правило, не потребують принципової реконструкції всієї традиційної системи паливоподачі. Чутливі елементи, виконавчі механізми вбудовуються або обладнуються на існуючі ПНВТ. Для реалізації ЕР необхідно лише створення відповідних (і різноманітних) приводів і механізмів та підключення до дизеля мікро-ЕОМ.

Розглянемо приклади розробки ЕР діючих дизелів різного призначення.

Почнемо з ЕР автомобільного дизеля фірми Bosch [6]. На рис. 3.72, 3.73 подано функціональну схему ЕР та його блоки для шестициліндрового дизеля з рядним ПНВТ.

Бачимо, що ЕР здатний керувати такими параметрами, які механічними регуляторами не могли контролюватися. Йдеться про температуру повітря для наддуву та його тиск, температуру палива та охолоджувальної рідини тощо. ЕР також здійснює обмін даними з іншими електронними системами автомобіля, наприклад, керування тягою, трансмісією; це означає, що ЕР може бути вбудовано у КСК автомобіля.

ЕР складається з трьох системних блоків (рис. 3.73):

1 – датчики і генератори зовнішніх впливів (від педалі акселератора, вимикача гальм, зчеплення та ін.);

12 – БСІ, який використовує програмні алгоритми керування для переробки сигналів датчиків у відповідні вихідні командні сигнали;

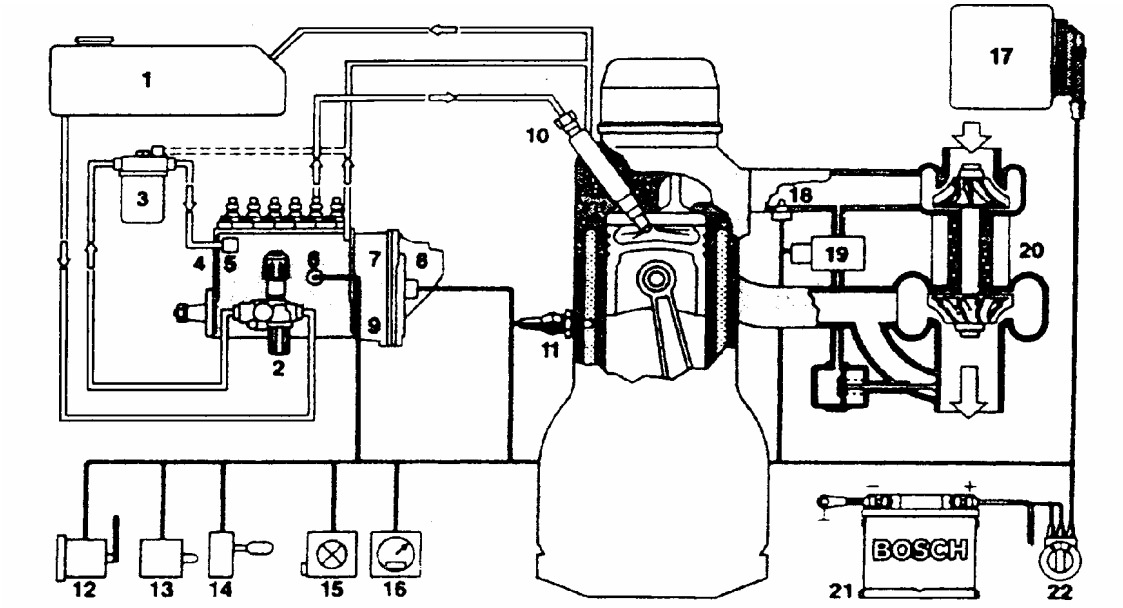


Рисунок 3.72 – Функціональна схема електронного регулятора фірми Bosch:

1 – паливний бак; 2 – паливоподавальний насос низького тиску; 3 – паливний фільтр; 4 – рядний ПНВТ; 5 – електричний пристрій зупинки двигуна; 6 – датчик температури палива; 7 – датчик ходу рійки; 8 – виконавчий механізм з соленоїдом лінійного переміщення; 9 – датчик обертів ПНВТ; 10 – форсунка; 11 – датчик температури охолоджувальної рідини; 12 – датчик на педалі акселератора; 13 – вимикачі гальм, стояночного гальма, зчеплення; 14 – робоча панель; 15 – контрольна лампа та підключення для діагностики; 16 – тахограф або датчик швидкості автомобіля; 17 – БСІ (електронний блок керування); 18 – датчик температури повітря; 19 – датчик тиску повітря для наддуву; 20 – турбокомпресор для наддуву; 21 – акумулятор; 22 – вимикач стартера й накальник свічок

17 – виконавчий механізм (соленоїдний привід) для перетворення вихідних сигналів від ЕР у механічний рух керованої рейки ПНВТ. Виконавчий механізм закріплено на паливному насосі (він пересуває керовану рейку за допомогою лінійного соленоїда).

ЕР використовує цифрові технології. Схема електричних кіл електронного регулятора показана на рис. 3.74.

Перейдемо до вітчизняної розробки ЕР [23].

Фахівцями Харківського КБ з двигунобудування (ХКБД) та науково-виробничого підприємства “ТОР” уперше в Україні було створено й упроваджено мікропроцесорний регулятор n та N_e для дизель-генераторної установки дизель-потягу ДЕЛ-01 виробництва холдингової компанії “Лу-

ганськтепловоз". Розробки проводилися з 1994 року і ведуться й сьогодні згідно з програмою розвитку залізничного транспорту України.

Особливістю цього ЕР є те, що він практично повністю створений на елементній базі українського виробництва.

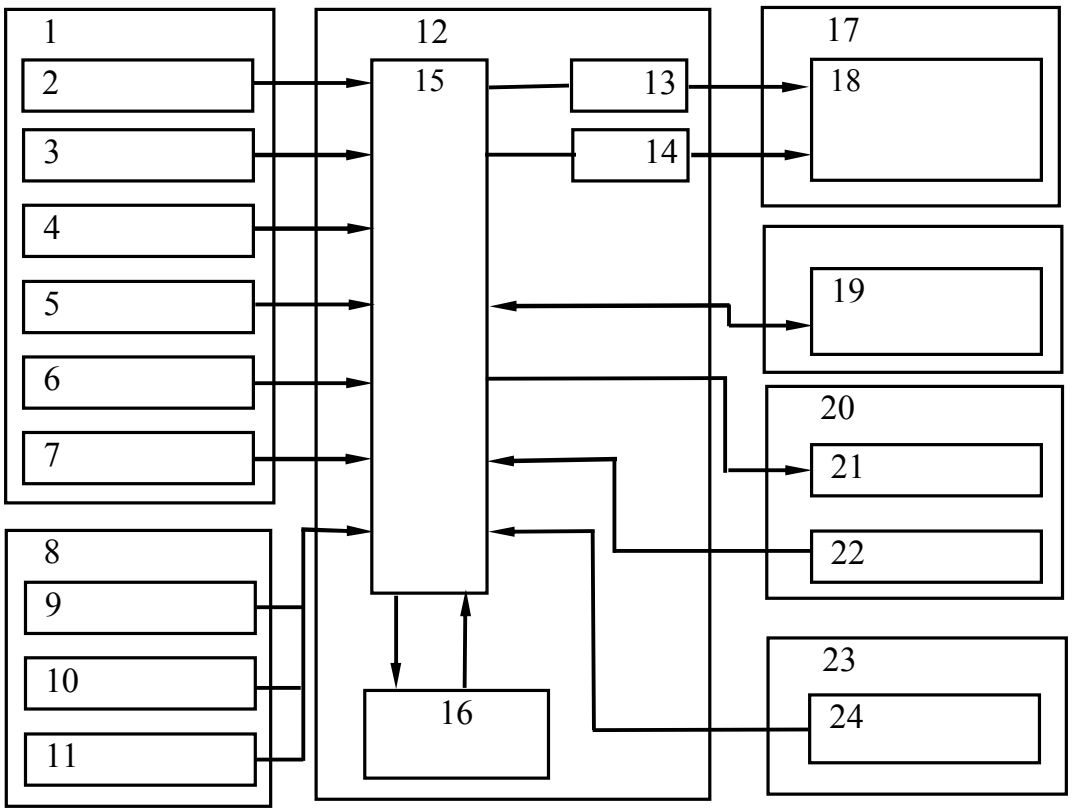


Рисунок 3.73 – Блоки електронного регулятора:

1 – датчики: 2 – датчик тиску повітря для наддуву; 3 – температурні датчики (охолоджувальна рідина, повітря, паливо); 4 – датчик обертів ПНВТ; 5 – установочний сигнал обертів; 6 – датчик ходу рейки ПНВТ; 7 – датчик швидкості автомобіля; 8 – генератори зовнішніх впливів; 9 – датчик на педалі акселератора; 10 – робоча панель (оберти двигуна, проміжні оберти); 11 – вимикачі гальм, зупиночного гальма, зчеплення; 12 – БСІ (блок керування): 13 – кількість вприскнутого палива; 14 – зупинка; 15 – мікропроцесор; 16 – бази даних, криві характеристик; 17 – приводи; 18 – ПНВТ; 19 – діагностичний блок; 20 – КСК автомобіля; 21 – надходження даних; 22 – перевищення паливоподачі; 23 – програмування варіантів; 24 – пристрій програмування (тільки для програми даних)

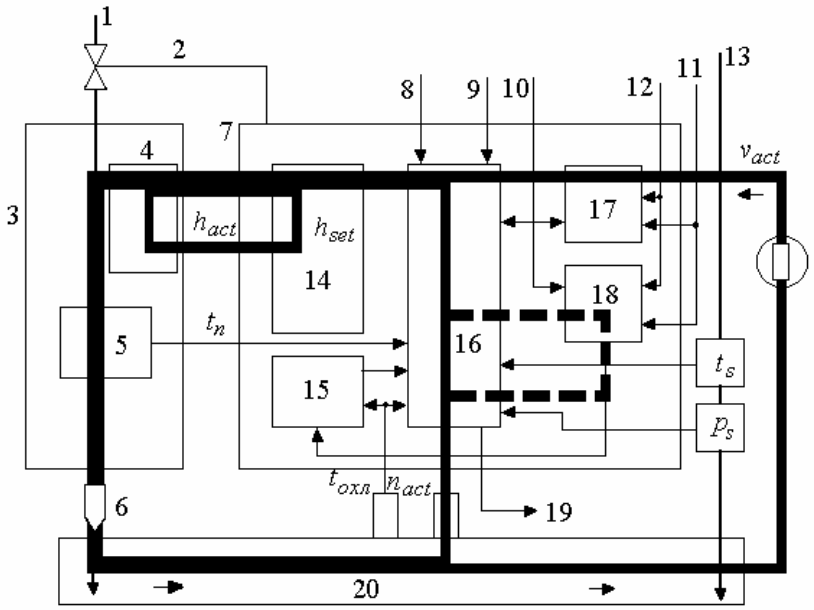


Рисунок 3.74 – Керувальні кола ЕР:

$n_{акт}$ – дійсна кількість обертів ПНВТ; n_{set} – установочне значення обертів ПНВТ; p_s – тиск повітря наддуву; h_{act} – дійсний хід рейки; h_{set} – установочне значення ходу рейки; h – сигнал про дійсний хід рейки; $t_{пал}$ – температура палива; t_s – температура повітря; $t_{охл}$ – температура охолоджуючої рідини; $V_{акт}$ – дійсна швидкість автомобіля; V_{set} – установочне значення швидкості автомобіля;
1 – паливо; 2 – увімкнення / вимикання пристрою зупинки двигуна; 3 – рядний ПНВТ; 4 – механізм приводу; 5 – температура палива; 6 – форсунка; 7 – БСІ; 8 –установка педалі акселератора; 9 – надлишкова кількість палива; 10 – гальма, стояночне гальмо; 11 – зчеплення; 12 – робоча панель (V_{set}, n_{set}); 13 – повітря; 14 – керування положенням рейки; 15 – керування кількістю палива при запуску; 16 – керування $g_ц$; 17 – контролер швидкості автомобіля; 18 – керування холостим ходом / проміжними обертами; 19 – вихід сигналу на дозування паливоподачі; 20 – двигун та автомобіль

При розробці автори керувалися такими основними вимогами:

▲ надійність та стабільність – на сучасному рівні;

▲ підвищення паливної економічності дизеля та його екологічних показників;

▲ зниження вартості та строку окупності.

Враховуючи, що строк служби транспортного засобу на залізниці перевищує 10 років, зрозуміла вагомість забезпечення надійніших характеристик обладнання для ЕР.

Для ЕР було створено оригінальний швидкодіючий електрогідравлічний виконавчий механізм переміщення рейок паливних насосів. У його

конструкції використано як підсилювач елементи серійного, відпрацьованого роками й дуже надійного гідравлічного регулятора. Як керувальний елемент застосовано малопотужний електровиконавчий двигун ЕВД (актуатор). Таке рішення дозволяє суттєво знизити вартість виконавчого механізму практично при зберіганні його надійнісних показників та керованості на рівні будь-якого транспортного дизеля. У розроблену концепцію вписуються малопотужні актуатори як українського, так і зарубіжного виробництва.

Створений ЕР реалізує такі основні функції:

- дистанційний пуск і роботу дизеля в режимі х.х.;
- дистанційне керування режимами роботи дизеля залежно від положення контролера машиніста;
- підтримання з точністю до 1 % частоти обертання *n* дизеля й формування логіки керування частотою;
- керування перехідними процесами (формування сповільнення виставлення частоти за позиціями контролера при розгонах і гальмуваннях);
- забезпечення аварійної зупинки дизеля;
- формування оптимальної навантажувальної характеристики дизеля за умовами найкращої паливної економічності й логіки забезпечення роботи дизеля на даній характеристиці (для керування генератором);
- організація режимів самотестування та діагностування.

Слід відзначити, що наведені вимоги є жорсткими.

БСІ (мікропроцесорний блок) електронного регулятора частоти і потужності містить ряд функціональних вузлів (рис. 3.75).

Взагалі ЕР має два контури керування – частоти й потужності. У контурі частоти реалізовано ПІД-алгоритм керування, а в контурі потужності – ПІ-алгоритм керування. Аналіз результатів модельних, моторних та експлуатаційних випробувань на борту дизель-потяга з перевірки налагодження кожного з контурів ЕР окремо та у спільній роботі дозволив обрати параметри ЕР (ПІД та ПІ законів керування, час уповільнення установки *n* та ін.), які забезпечують потрібні показники якості.

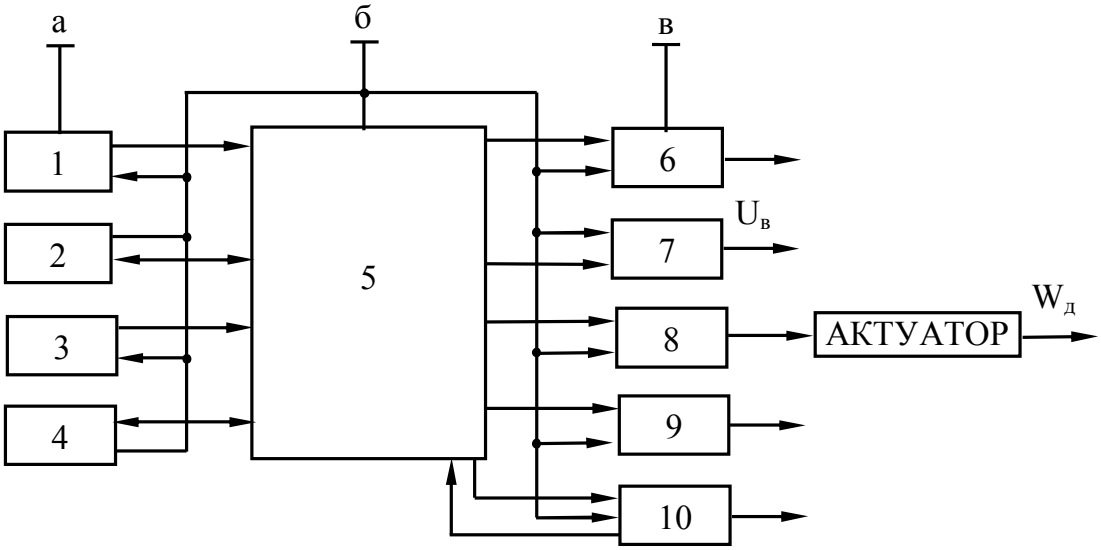


Рисунок 3.75 – Функціональна схема ЕР частоти і потужності для дизель-генератора (ДГ) дизель-потягу ДЕЛ-1 [23]:

а – *від пульта керування дизель-агрегатом;* б – *формування напруги живлення;* в – *до блока керування пуском; 1 – введення дискретних команд керування режимами роботи ДГ від пульта керування; 2- введення імпульсного сигналу датчика частоти обертання n; 3 – введення й перетворення сигналу датчика положення рейки паливного насоса; 4 – введення дискретних сигналів аварійної зупинки дизеля від датчиків мінімального тиску масла й "Пожежа"; 5 – вузол обробки вхідних сигналів та формування керуючих дій; 6 – виведення дискретної інформації про режими роботи дизеля, щодо причини аварійної зупинки ДГ та від сигналів керування пуском; 7 – виведення аналогового сигналу про резерв потужності дизеля; 8 – виведення сигналу керування малопотужним акумулятором; 9 – сполучення з зовнішнім діагностичним пристроєм; 10 – сполучення з комп'ютером*

Так, на осцилограмах (рис. 3.76, 3.77) бачимо, що обрані параметри ПІД закону керування *n* та введення уповільнення щодо установки цієї частоти дозволили реалізувати перехідні процеси (розгону й гальмування) поміж холостим ходом і навантаженням практично без перерегулювання з заданим темпом. При цьому вдалося уникнути виходів рейок на зовнішню характеристику (крім режиму номінальної потужності) і тим самим знизити динамічність у перехідному процесі.

Зниження експлуатаційної витрати палива становить 6–8 %, що забезпечує ЕР за рахунок:

- кращої якості перехідних процесів;
- зниження n_{xx} на 10–20 %;

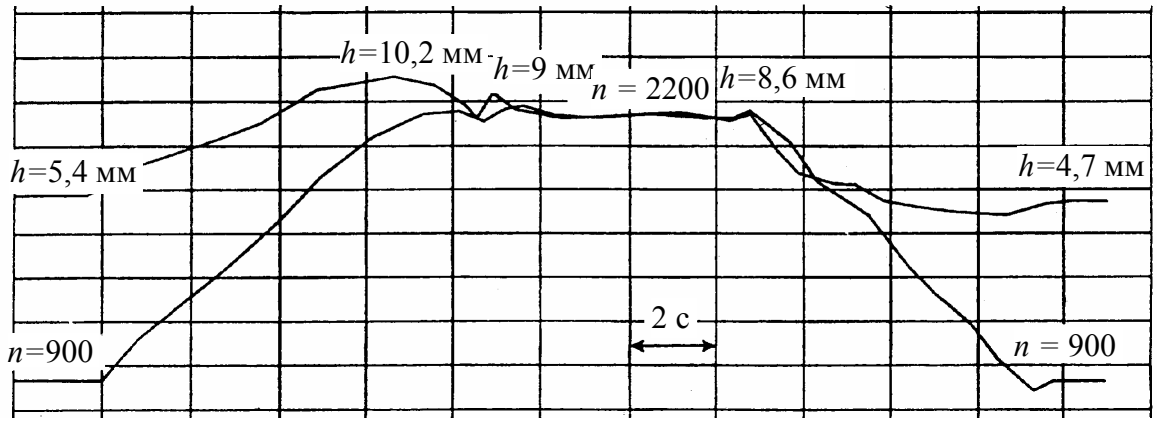


Рисунок 3.76 – Розгін і гальмування дизеля з ЕР під навантаженням з уповільненням команди керування в перехідному процесі:
n – частота обертання колінчастого вала (хв$^{-1}$); *h* – положення рейок ПНВТ

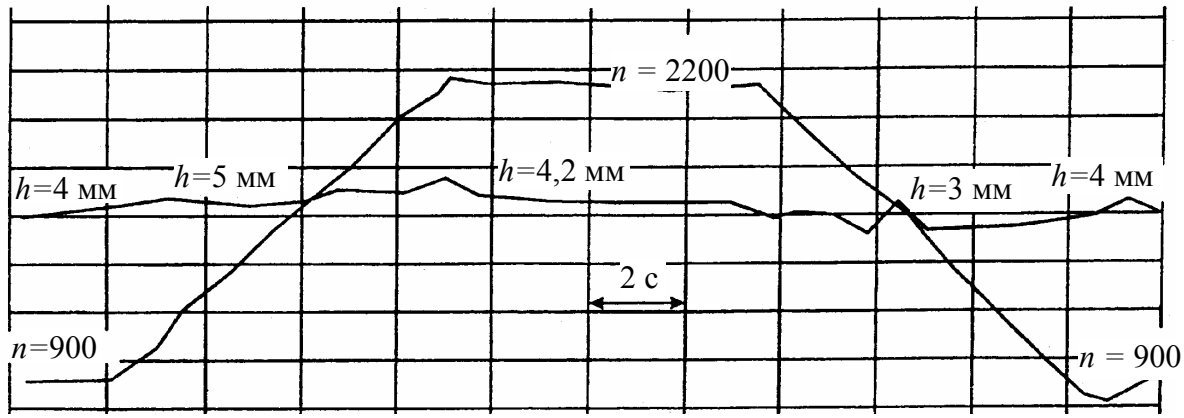


Рисунок 3.77 – Розгін та гальмування дизеля з ЕР на холостому ході з уповільненням команди керування в перехідному процесі:
n – частота обертання колінчастого вала (хв$^{-1}$); *h* – положення рейок ПНВТ

- примусового переведення дизеля в зону найкращої економічності.

До інших переваг ЕР слід віднести:

- ▲ розширення кількості автоматично керованих параметрів;
- ▲ відсутність практично розрегулювань параметрів дизеля за наявності датчиків зворотних зв’язків (положення рейки ПНВТ тощо);
- ▲ зниження рівнів токсичності та шуму дизеля.

Важливими показниками при упровадженні ЕР частоти обертання та потужності є його ціна і строк окупності. На практиці вартість серійної системи регулювання не повинна перевищувати 10–15 % вартості дизеля; строк окупності має займати 1–1,5 роки. Розроблений ЕР задовольняє ці критерії і є суттєво дешевшим за іноземні аналоги.

Таким чином, досвід експлуатації ЕР доводить, що він є важливим засобом поліпшення експлуатаційних якостей тепловозних дизелів і суттєво підвищує їхню конкурентоспроможність на внутрішньому та зовнішньому ринках збуту.

Нарешті, підкреслимо, що саме ця розробка продемонструвала можливість і реальність керування перехідними процесами дизеля й досягнення на такій основі значного економічного ефекту.

Становить інтерес розробка ВАТ "Саратовдизельапарат" (Росія) ЕР частоти обертання колінчастого вала для судових і промислових дизель-генераторів. Ведеться серійний випуск цих регуляторів [26].

Зазначений регулятор складається з електронних блоків, датчиків та виконавчого пристрою 3.78. Базовий блок призначено для регулювання *n*. У ньому здійснюється обробка сигналів датчика частоти обертання колінчастого вала дизеля, задатчика стартових імпульсів і формується сигнал керування, який надходить на вхід виконавчого пристрою. Блок забезпечує пропорційно-інтегральний закон регулювання частоти обертання *n*. Передбачено регулювання пропорційного й інтегрального коефіцієнтів (їх корегування), що дозволяє виконати настройку блока (за якістю перехідного процесу). Регулювання *n* може здійснюватися як за статичною, так і за астатичною характеристиками; перемикання з астатичного на статичний режим здійснюється з пульта керування.

Блок вимірювання потужності служить для розподілення навантаження при паралельній роботі дизель-генератора. У даному блоці виконується обробка сигналів датчиків сили струму і напруги, а потім виробляється команда керування, яка надходить на вхід зміни подачі палива базового блока. Розподілення навантажень може здійснюватися у будь-якій пропорції за статичною або астатичною характеристиками. Використаний принцип розподілу навантажень функції активної потужності виключає вплив теплового та експлуатаційного станів дизеля.

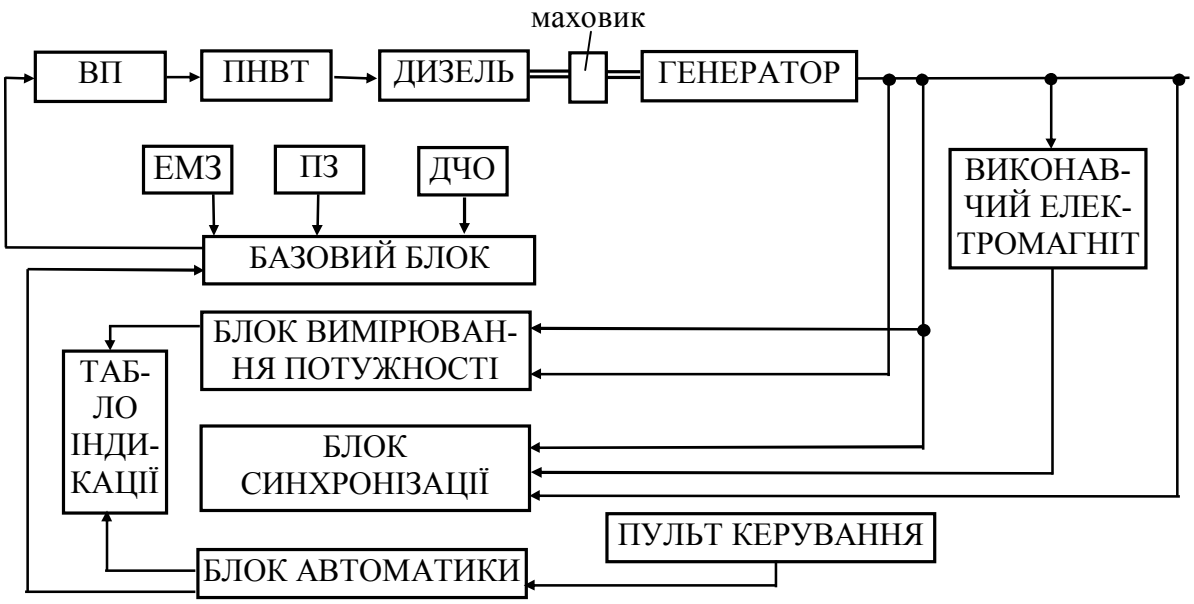


Рисунок 3.78 – Функціональна схема ЕР частоти обертання n судового дизель-генератора АДГ-1000 [24]:

ВП – виконавчий пристрій; ДЧО – датчик частоти обертів; З – задатчик

Блок синхронізації забезпечує автоматичне введення дизель-генератора у паралельну роботу з іншим двигуном або мережею, при цьому час синхронізації складає не більше п’яти секунд.

Блок автоматики забезпечує видачу на табло індикації сигналів щодо чотирьох фіксованих значень n, а також керування клапаном подачі додаткового продувального повітря. Датчик n виробляє електричний сигнал з частотою, пропорційною n. Датчик може обладнуватись поблизу будь-якої шестірні дизеля, що обертається з частотою, кратною n.

Виконавчий пристій здійснює переміщення рейки ТНВТ за законом керування, що формується базовим блоком. Підключення генератора до мережі (його живлення) здійснюється контактом, що приводиться виконавчим електромагнітом.

Використання ЕР дозволило значно розширити функції дизель-генератора. Суттєво поліпшується якість перехідних процесів при коливаннях навантаження, інших змінах зовнішніх умов.

Виявлено економію палива у 2–3 % при роботі дизеля з ЕР. Вона отримується за рахунок зменшення забросів n та часу, що припадає на неусталені режими (рис. 3.79, а, б). Цей ЕР пройшов успішні випробування

на АТ “Турбомоторний завод” (Росія) і сьогодні експлуатується у складі судових дизель-генераторних установок АДГ-1000.

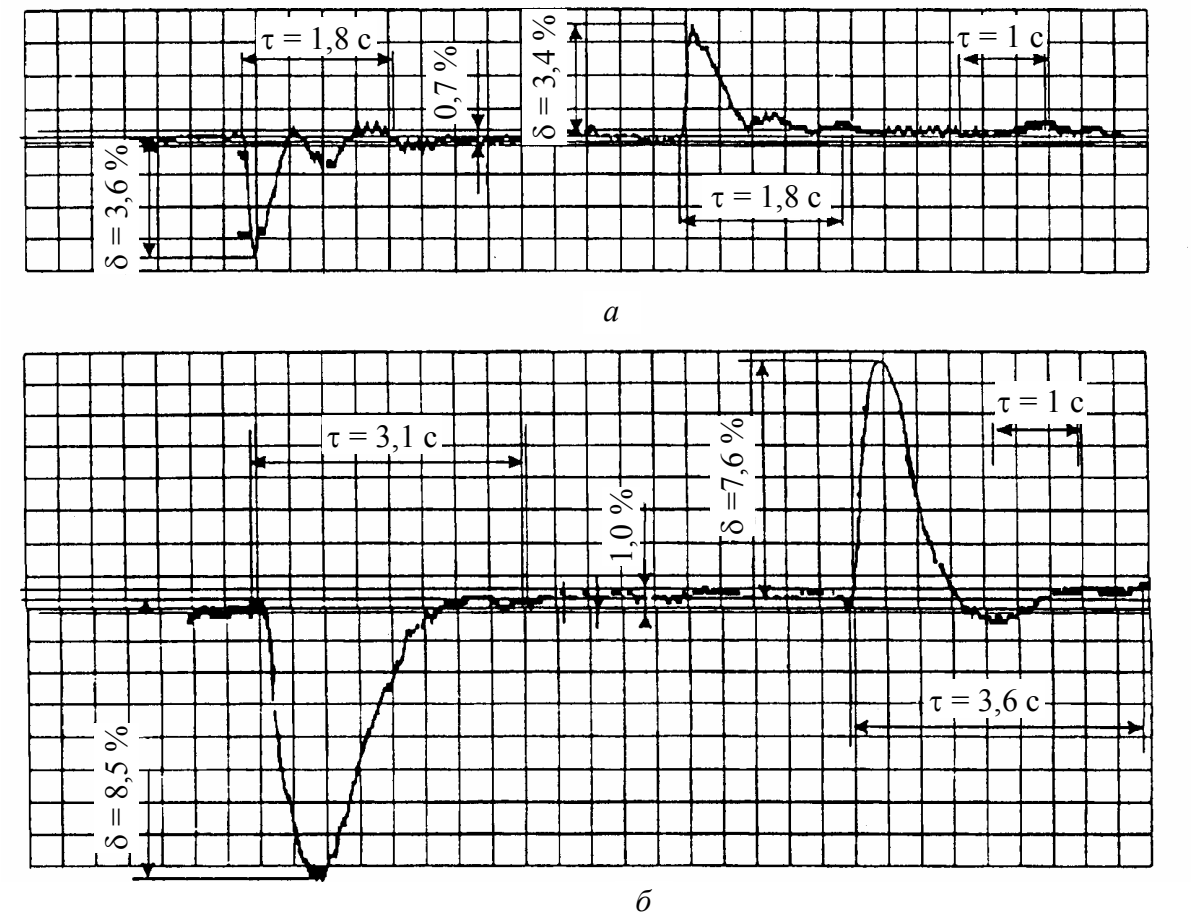


Рисунок 3.79 – Тахограми дизель-генератора (дизель 4Ч 10,5х13) з ЕР (а) та гідромеханічним регулятором швидкості (б)

Особливий інтерес викликають електронні регулятори для дизелів з ПНВТ розподільного типу. Такі паливні насоси позбавлені головного недоліка рядних насосів: переставні зусилля на переміщення дозаторів палива у них є мінімальними, що суттєво спрощує розробку ЕР. Другою перевагою розподільного ПНВТ є суттєве зменшення кількості рухомих деталей, що позитивно впливає на його надійність. Це зрозуміло, оскільки розподільний насос має тільки один плунжерно-втулочний комплект для живлення кількох циліндрів. Плунжер не тільки створює потрібний тиск палива під час його робочого ходу, але однозначно, обертаючись, розподіляє його за окремими вихідними отворами, тобто – за циліндрами.

Найбільш сучасним варіантом такого ЕР є модель VP-44 фірми Bosch [22], що використовується на останніх модифікаціях дизелів Opel-Ecotec та Audi.

При n = 4200 хв$^{-1}$ тиск нагнітання і ПНВТ сягає 100 МПа, а тиск у форсунках – 130–150 МПа і навіть 180 МПа. Це спростовує застарілу точку зору, ніби розподільні ПНВТ не спроможні забезпечити тиск вприскування, більший 60–80 МПа.

Функціональна схема ЕР з цим ПНВТ наведена на рис. 3.80.

Електронний блок складається з блока керування ПНВТ та БСІ. Кінцеві каскади живлення електромагнітів розміщуються на корпусі ПНВТ.

Конструкцію ЕР показано на рис. 3.81

Кулачкова шайба за поводок може повертатися в корпусі для керування КВВ; його межі помітно ширші та ті, що раніше застосовувалися: до 20° по валу ПНВТ.

Як виконавчі механізми у ПНВТ рис. 3.80 вбудовано два клапани з електромагнітним приводом, у тому числі індукційний для вимірювань миттєвої частоти n та грубої (приблизної) оцінки положення колінвала. Перший сигнал (щодо n) дозволяє діагностувати потужність кожного циліндра дизеля, другий – здійснювати фазування вприскування при роботі за резервними програмами керування. Більш точно, з похибкою лише 1 град. П.К.В., фазу вприскування визначають за сигналом датчика 13 (див. рис. 3.80). Посилення сигналу з датчика забезпечують розташовані у перпендикулярній площині два підковоподібні магніти. Підмагнічування стало необхідним тому, що магнітна проникність палива у 20 разів вища, ніж повітря.

Наведені приклади переконують, що ЕР підтвердив такі суттєві та реальні переваги при використанні на сучасних дизелях різних призначень:

- двигун може запускатися та зупинятися за допомогою ключа;
- вільний вибір зовнішніх швидкісних характеристик;
- максимальна кількість вприскнутого палива точно скоординована з тиском наддуву для дотримання норм на димність;
- можливість коректировки паливоподачі залежно від температур повітря і палива;

- збагачення суміші під час пуску;

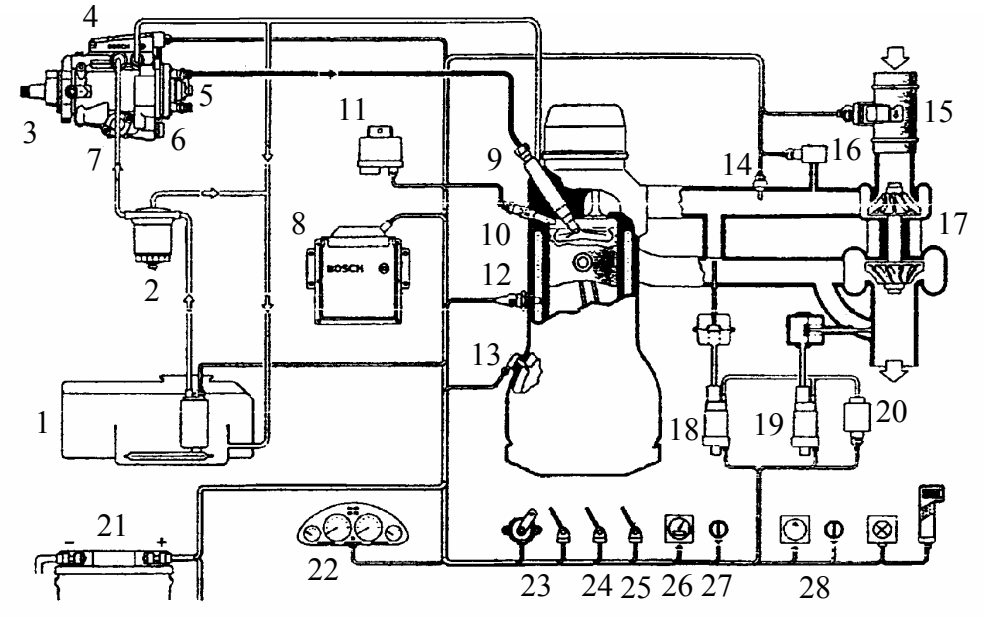


Рисунок 3.80 – Функціональна схема електронного регулятора з ПНВТ VP-44 швидкохідного дизеля:

1 – паливний бак, фільтр, електричний паливо-підкачувальний насос; 2 – фільтр тонкого очищення; 3 – ПНВТ; 4 – блок керування ПНВТ; 5 – нагнітальні клапани; 6 – електроклапан керування КВВ; 7 – гідропривід ВМ КВВ; 8 – БСІ (центральний блок керування); 9 – форсунка; 10 – пускова свічка накалювання; 11 – реле свічки; 12 – датчик температури охолоджуючої рідини; 13 – датчик положення колінчастого вала; 14 – датчик температури повітря; 15 – витратомір повітря; 16 – датчик тиску повітря; 17 – турбокомпресор; 18 – регулятор рециркуляції відпрацьованих газів; 19 – регулятор тиску наддуву; 20 – компресор; 21 – електроакумулятор; 22 – панель приладів; 23 – педаль акселератора; 24 – датчики трансмісії; 25 – датчики агрегатів, системи гальмування; 26 – датчик швидкості; 27 – регулятор швидкості; 28 – компресор і регулятор кондиціонера; 29 – лампа самодіагностики й роз'єднувач для електронного мотор-теста

- контроль *n* для допоміжних пристроїв;
- регулювання максимальної швидкості руху транспорту;
- стабільність n_{xx};
- регулювання сили тяги при автоматичній коробці передач;
- передача сигналу для тахометра і дисплея витрати палива;
- інтегральна діагностика відмов.

Бачимо, що сучасний ЕР здатний виконувати більшість функцій КПСК паливоподачею при простоті конструктивних рішень.

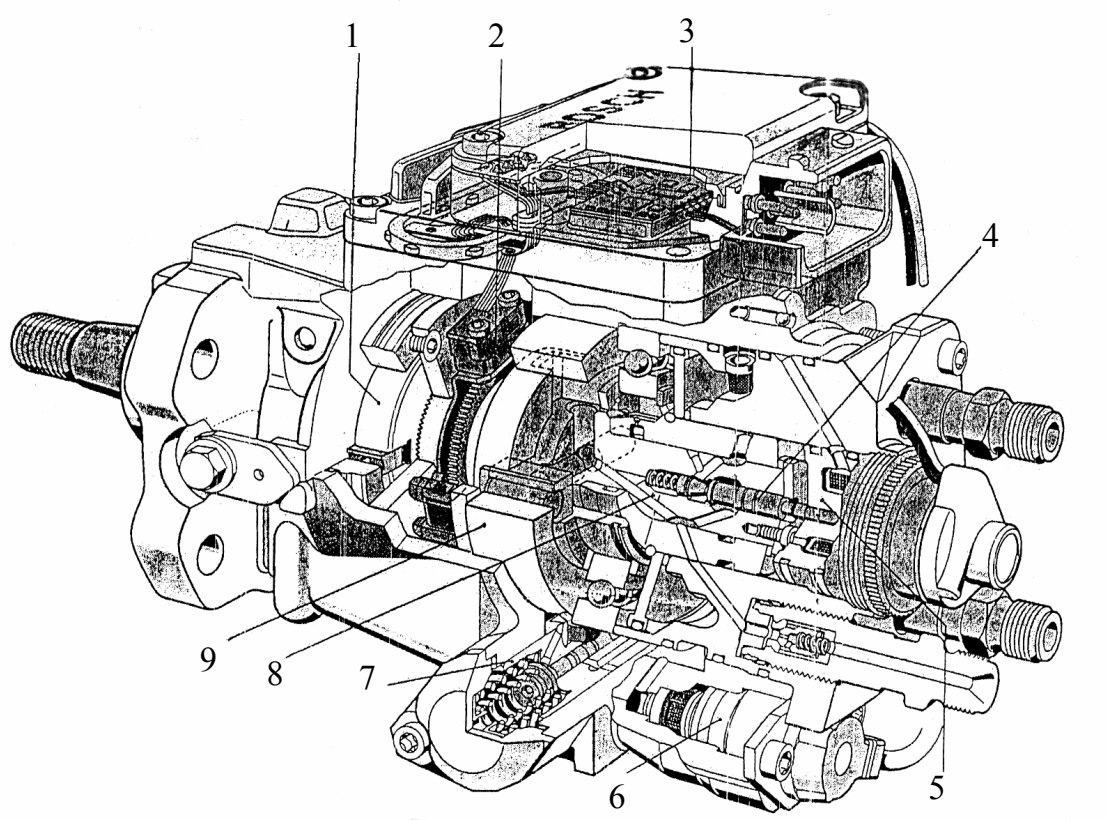


Рисунок 3.81 – ПНВТ типу VP-44:

1 – паливно-підкачувальний насос; 2 – датчик частоти обертання та положення колінчастого валу; 3 – БСІ; 4- золотник; 5 – електромагніт паливоподачі; 6 – електромагніт приводу керування КВВ; 7 – гідропривід (ВМ) КВВ; 8 – ротор; 9 – кулачкова шайба

Електронне керування характеристиками паливоподачі. Вище показано, що ЕР здатні керувати n та N_e на експлуатаційних режимах за сигналами датчиків – ідентифікаторів двигуна та зовнішніх факторів. Цей ефект отримується за рахунок відповідних змін активного робочого ходу h рейки ПНВТ (тобто за рахунок змін циклової витрати палива $g_ц$) а також регулювання кута випередження вприскування КВВ (θ).

Однак цим не вичерпуються резерви поліпшення паливно-економічних показників дизелів, у тому числі на неусталених режимах.

Значно повніше цю проблему вирішують при керуванні (крім h та θ на кожному експлуатаційному режимі) законом-характеристикою вприскування.

Це надає можливість втручатися в згоряння й впливати на індикаторний процес двигуна. Йдеться про зменшення жорсткості циклу (визначається швидкістю нарощування тиску $\Delta p/\Delta\varphi$ на ділянці згоряння палива у циліндрі, а також максимумом цього тиску $p_{макс}$).

Керування характеристикою паливоподачі дозволяє, як свідчить досвід, значно поліпшити експлуатаційну економічність та знизити токсичність викидів.

Розглянемо шляхи керування характеристикою вприскування.

Ефективним способом такого керування є додаткове гідрокероване запирання голки форсунки, що забезпечує керування: об'ємною швидкістю надходження палива у трубопровід високого тиску паливного насоса; тиском початку вприскування палива; початковим (залишковим) тиском у трубопроводі.

Керування об'ємною швидкістю надходження палива у трубопровід можна здійснити за допомогою рекомендованого МАДІ гідрозапирання голки форсунки.

На рис. 3.82 наведено схему паливної системи з гідрозапиранням та електронним керуванням [1]. Таке гідрозапирання суттєво змінює характеристики вприскування палива, особливо їх заключну фазу.

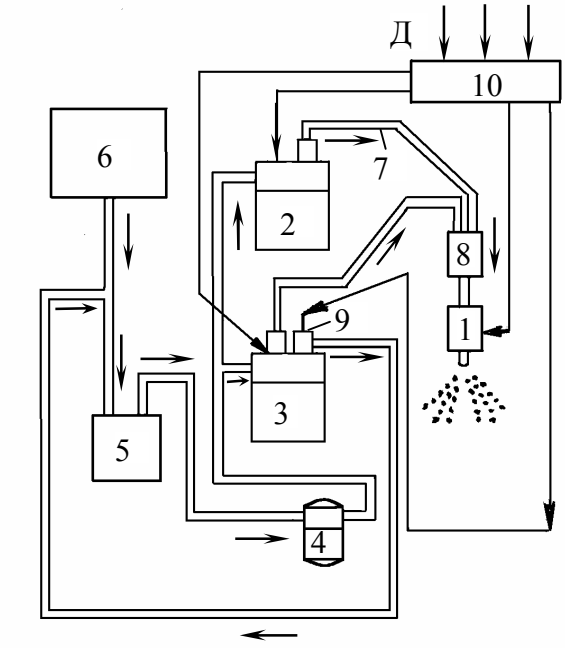


Рисунок 3.82 – Принципова схема паливної системи з додатковим гідрозапиранням розпилювача:

1 – форсунка; 2 – допоміжна секція паливного насоса; 3 – ПНВТ; 4– фільтр; 5 – підкачувальний насос; 6 – паливний бак; 7 – тракт гідрозапирання; 8 – гідроакумулятор; 9 – перепускний клапан; 10 – БСІ; Д – датчики

Як бачимо з рис. 3.83, закінчення вприскування стає більш різким, зменшується частка палива, яка вприскується із швидко падаючим тиском у кінці подачі. Змінюється й передній фронт характеристики вприскуван-

ня: він стає більш крутим. Як результат, суттєво підвищуються швидкості й тиск вприскування (p_{max}), зменшується тривалість подачі циклової порції палива, поліпшується паливна економічність дизеля.

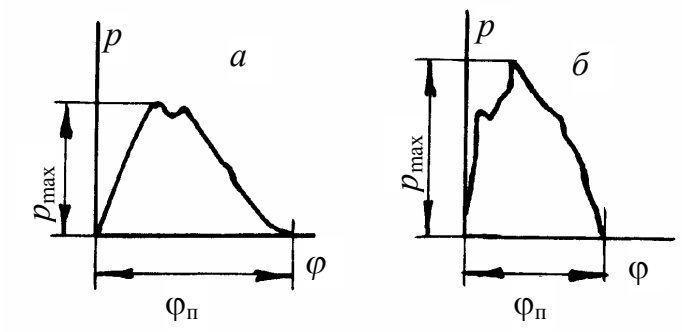


Рисунок 3.83 – Осцилограми змін характеристик вприскування форсункою з гідрозапиранням:
а – штатна форсунка; *б* – форсунка з гідрозапиранням; р – тиск вприскування; φ – кут п.к.в.; $φ_п$ – період паливоподачі, град. П.К.В.

Передбачена додаткова секція ПНВТ (рис. 3.82), що забезпечує підтримання заданого тиску гідрозапирання в акумуляторі, з яким сполучені надголкові порожнини всіх форсунок штатного виконання. Керувати гідрозапиранням можна за допомогою рейки додаткової секції ПНВТ, який має відповідну плунжерну пару спеціальної конструкції, а також за рахунок перепуску палива через клапан 9 з підібраним дроселем.

Керування залишковим (початковим) тиском здійснюється рідко.

Зміна гідрозапирання голки форсунки при переході з режиму на режим, як відомо, змінює $g_ц$ та θ. Так, на режимах номінального і максимального крутного моменту дизеля КамАЗ-740 зростання тиску гідрозапирання на 20 МПа призводить до зменшення кута випередження вприскування відповідно на 5,6 й 6 %, а циклова подача зменшується відповідно на 25 та 64 %. Тому зміна тиску додаткового гідрозапору повинна супроводжуватися одночасним корегуванням відміченого кута й циклової подачі, що може ефективно здійснюватися КПСК паливоподачі.

При розробках КПСК дизеля, що грунтується на принципі гідрозапирання, треба керуватися схемою рис. 3.71, де показано логіку відзначеного корегування КВВ й $g_ц$.

Наймасовіші КПСК, що мають значні можливості для оптимального керування паливоподачею у дизелях, є підсистеми, в яких додатково до циклової подачі й КВВ здійснюється керування власне характеристиками вприскування (тиском, тривалістю за кутом П.К.В.). По суті здійснюється багатопараметрична оптимізація робочого процесу дизеля. В подібних під-

системах звичайно відбувається циклічне діяння на дозатор палива, і тому вони володіють більшою здібністю по швидкодії, що важливо, оскільки дозволяє керувати перехідними процесами.

До означеного класу КПСК відносяться, в першу чергу, акумулювальні підсистеми. Тут до акумулятора великої ємності плунжерним або іншого типу паливним насосом подається паливо. В акумуляторі за допомогою регулювального пристрою створюються та підтримуються потрібні рівні тисків при вприскуванні.

Системи з акумуляторами роблять можливим поєднання КПСК вприскування з різними дистанційно виконавчими функціями; в той же час дозволяють підвищувати якість і точність керування процесом згоряння.

Відміна схеми із загальним трубопроводом (акумулятором) полягає в тому, що розділені вузли створення тиску та вприскування. Це робить можливим підвищувати тиск вприскування палива.

Основу акумуляторної КПСК складає резервуар-акумулятор, що включає розподільний трубопровід (загальна рейка), лінії подачі палива й форсунки.

За допомогою електромагнітнокерованих золотникових пристроїв здійснюється керування відкриттям форсунок, а головне, забезпечується керування характеристикою паливоподачі за максимальним тиском вприскування, його тривалості, що є принциповою перевагою акумуляторних КПСК.

Рівень тиску регулюється діяннями на баланс палива, що подається в акумулятор й зливається з нього, а початок і кінець вприскування й відповідно випередження, тривалість вприскування, циклова подача – моментом спрацьовування керуючого золотникового пристрою.

У таких КПСК золотникові пристрої можуть розташовуватися у різних місцях: у акумулятора в нагнітальному трубопроводі або у форсунці, причому останній варіант є кращим.

Отримали поширення такі схеми керування форсунками:

- з безпосереднім електромагнітним керуванням підйому голки;
- з електрогідравлічним керуванням цим підйомом.

Розглядаючи голку форсунки як перемикальний пристрій гідросистеми високого тиску, можна виявити дві вимоги до її приводу: швидкодія й високі переставні зусилля.

Перевагою безпосереднього електромагнітного керування голкою є виключення втрат енергії з паливом, що перепускається на злив (при високому тиску). Швидкодія таких підсистем складає 0,3–0,5 мс; це прийнято для керування паливоподачею у дизелях середньої швидкохідності (1500–2500 хв$^{-1}$).

Очевидно, що швидкодія форсунок дизелів повинна бути більшою, ніж у форсунок вприскування бензину у двигунах з іскровим запаленням. Це пов'язане з тим, що вприскування дизельного палива звичайно не перебільшує 40 град. П.К.В., тоді як вприскування бензину займає, як відмічалося вище, до 120–130 град. П.К.В. (треба мати на увазі, що за останні роки оберти швидкохідних дизелів практично зрівнялися з такими у бензинових ДВЗ й сягають рівня 4000–5000 хв$^{-1}$ проти 5000-6000 хв$^{-1}$ у останніх). Якщо швидкодія форсунок бензинових дизелів складає 0,5–0,7 мс, то у високообертових дизелів вона повинна бути ще більшою, ніж у середньошвидкохідних, й складати не вище 0,1-0,2 мс. Тобто постає дуже складна задача створення електрокерованих дизельних форсунок зі швидкістю, що знаходиться за межею освоєної.

Спостерігаються й інші недоліки – труднощі створення швидкодіючого силового магніту для приводу голки й пристрою його живлення при обмеженнях на габарити форсунок.

Тому набуває все більшого поширення електрогідравлічний привід форсунок у сучасних КПСК паливоподачею в дизелях. Це ті ж акумуляторні підсистеми, але голка форсунки приводиться до руху самим паливом, а малогабаритний (малопотужний) клапан з електромагнітним керуванням відіграє роль гідравлічного перемикача. Даний принцип керування дозволяє на два й більше порядків зменшити потрібну потужність командних імпульсів, що формуються БСІ. Останнє пов'язане з тим, що в схемах з електрогідравлічним приводом форсунок забезпечуються малі зусилля, які потрібні для електроприводів, що керують розвантаженими від зусиль золотниками. Недоліки такої КПСК – суттєвий й негативний вплив витіків палива в керуючому клапані на характеристики його подачі до форсунок; тому мають місце й втрати енергії з паливом, що перепускається на злив.

Загальні недоліки підсистем акумуляторного типу – ускладнення конструкції, нагрів палива.

Однак у цілому, з урахуванням досягнень останніх років щодо КПСК акумуляторного типу, склались умови для широкого розповсюдження таких підсистем вприскування зі значним ефектом.

Слід підкреслити, що підсистеми з електрогідравлічним приводом виявилися працездатними в зоні надвисоких для дизелів обертів колінчастого вала, впритул до 5000 $хв^{-1}$.

Схема КПСК паливоподачею автомобільного дизеля з акумулятором високого тиску й електрогідравлічними форсунками, що випускається серійно, показана на рис. 3.84.

Тут КПСК з електрогідравлічними форсунками (*ЕГФ*) складається з паливного бака (*ПБ*), паливопідкачувального насоса (*ППН*) з редукційним клапаном (*КО1*), паливним фільтром (*ПФ*), керованим ПНВТ, який нагнітає паливо через паливний холодильник (*ПХ*) в акумулятор великої ємності (*ПА1*). Паливний акумулятор обладнаний запобіжним клапаном (*КО2*), який обмежує тиск в акумуляторі й запобігає руйнуванню паливної апаратури у випадку аварійного зростання тиску, а також керованим клапаном (*КК*), що регулює тиск в акумуляторі й розвантажує паливну магістраль після зупинки дизеля. Паливний акумулятор великої ємності поєднаний трубопроводом з акумулятором малої ємності (*ПА2*), який улаштовано безпосередньо у ЕГФ.

ЕГФ керується електричними імпульсами, які виробляються БСІ, сигнал на який передається від мікропроцесора, що обробляє сигнал від датчиків стану $Д_c$ й навколишнього середовища $Д_o$ й виробляє необхідний сигнал з використанням закладених в його пам’ять програм. Момент початку вприскування палива реєструється датчиком тиску *Д2*, тиск в акумуляторі *ПА1* контролюється датчиком тиску *Д1* й змінюється за заданою програмою шляхом зміни продуктивності ПНВТ.

Дизель пускається електричним стартером, який до моменту запуску відключений від дизеля й обертає вал ПНВТ через обгінну муфту (*ОМ*). Після підвищення тиску в акумуляторі вмикається гвинтова муфта з соленоїдним приводом (*ЕМ*) та виконується пуск дизеля. Після вимкнення стартера вал ПНВТ розкручується від колінчастого вала дизеля через друге плече обгінної муфти. Можливе також і використання у пристрої пуску двох електромагнітних муфт з почерговим ввімкненням.

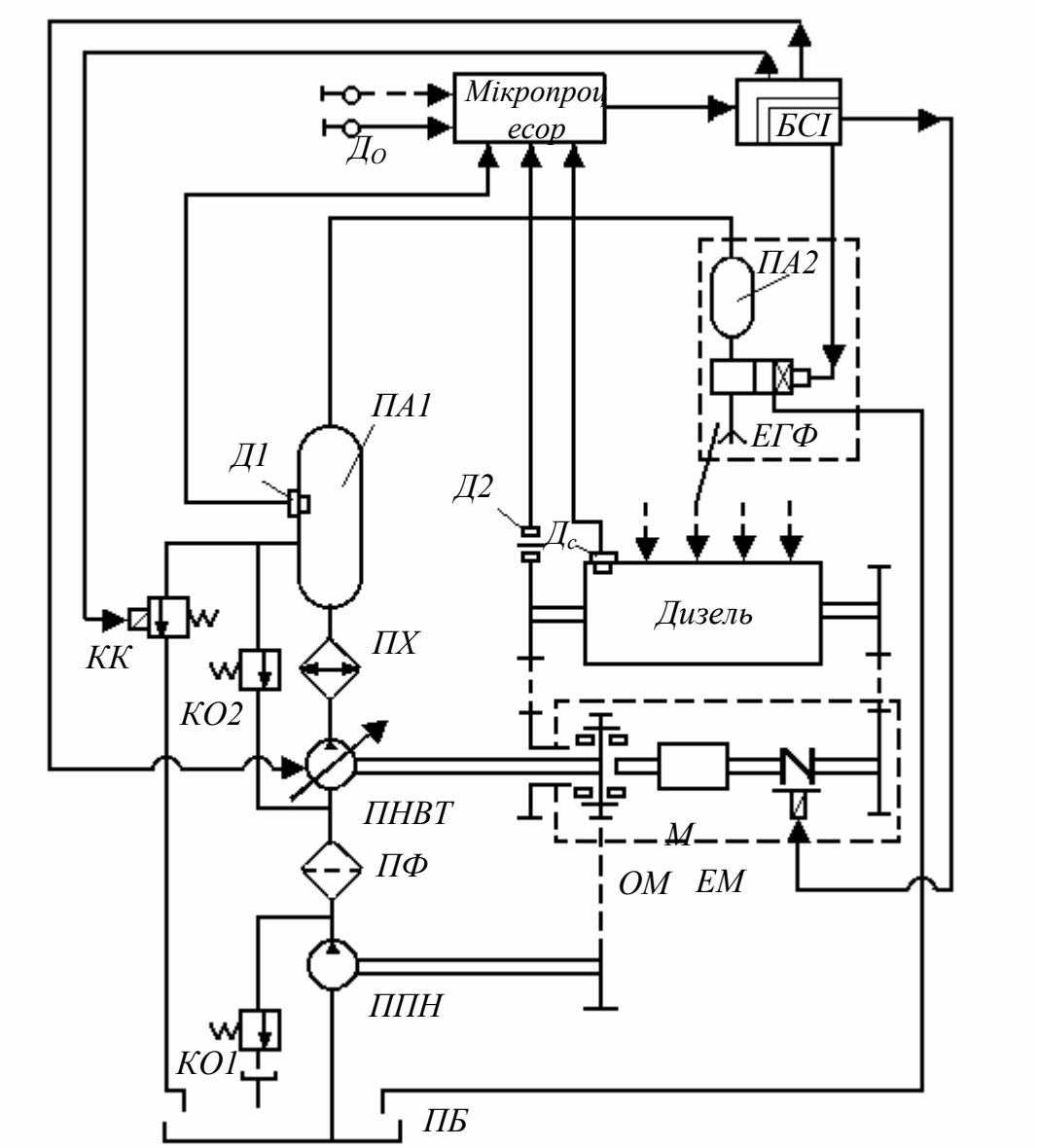


Рисунок 3.84 – Схема КПСК з акумулятором й електрогідравлічними форсунками автомобільного дизеля [1]

Ця схема підтверджує переваги акумуляторної КПСК паливоподачі. Перш за все, показана можливість керувати максимальним тиском нагнітання палива перепуском його через клапан КК й керування продуктивністю ПНВТ за командами мікропроцесора.

Інші важливі параметри характеристики вприскування – тривалість його та КВВ (θ) – керуються за командами БСІ, які вона видає на ЕГФ та муфту ЕМ за сигналами датчиків, що обслуговують КПСК.

Перейдемо до найсучаснішої КПСК акумуляторного типу. Об'єднання зусиль провідних фірм Fiat, Bosch та Daimler-Benz увінчалося створенням та запровадженням у промислове серійне виробництво найпоширенішої системи паливоподачі із сучасним мікропроцесорним керуванням для високообертових дизелів легкових автомобілів конструкції Common Rail. Починаючи з 1997 року, вона встановлюється на серійні легкові автомобілі фірми Daimler-Benz [25].

При її розробці фірма Daimler-Benz переслідувала такі цілі:

- подальше зниження витрати палива;
- виконання прийнятих в усьому світі норм по токсичності відпрацьованих газів;
- поліпшення їздових якостей автомобіля за рахунок високих рівнів крутного моменту навіть при низьких частотах обертання колінчастого вала дизеля;
- зниження шуму до рівня двигунів з іскровим запаленням;
- зменшення виробничих втрат за рахунок максимально можливої уніфікації з двигунами іскрового запалення;
- збереження надійності, притаманної дизелям (як і бензиновим двигунам) фірми Daimler-Benz.

Такі амбіційні цілі вимагали системного керування паливоподачею, коли оптимізується не тільки характеристика (закон) вприску, а й реалізується комплекс інших заходів.

Саме тому означена програма була реалізована застосуванням акумуляторної системи паливоподачі у сполученні з 4-клапанним механізмом газорозподілу, центральним розташуванням форсунки й симетричною камерою згоряння у поршні. Крім того, застосовані турбонаддув з проміжним охолодженням наддувного повітря, рециркуляція охолоджуваних відпрацьованих газів й окислювальний каталітичний нейтралізатор.

У табл. 3.4 показані результати роботи дизеля з підсистемою Common Rail (КПСК акумуляторного тиску) у порівнянні з іншими серійними дизелями [25].

Таблиця 3.4 – Технічні дані дизелів фірми Daimler-Benz

Параметр	Моделі дизелів		
	OM-604	OM-611	OM-602
Модель автомобіля	C220 Dizel	C220 CDI	E290 TUR-BODIZEL
Тип камери згоряння	передкамера	нерозділена	
Вид приладу вприскування	рядний ПНВТ	акумуляторна КПСК пали-воподачею	рядний ПНВТ
Вид керування паливоподачею	ЕР		ЕР
Кількість циліндрів	4	4	5
Кількість клапанів на циліндр	4	4	2
Кількість верхніх розподільних валів	2	2	1
Наявність трубопроводу	–	+	+
Наявність охолоджувача повітря для наддуву	+	+	+
Наявність системи рециркуляції відпрацьованих газів	+	+	+
Зниження температури повітря для наддуву, °С	–	–	60
Робочий об'єм дизеля, см^3	2155	2150,6	2874
Діаметр циліндра, мм (D)	89	88	89
Хід поршня, мм (S)	86,6	88,4	92
Відношення S/D	0,973	1,005	1,034
Ступінь стиску	22	19	19,5
Номінальна потужність, N_e, кВт	70	92	95
Частота обертання при номінальній потужності, хв$^{-1}$	5000	4200	4000
Максимальний крутний момент, $M_{e\max}$, Н·м	150	300	300
Частота обертання при $M_{e\max}$, хв$^{-1}$	3600	1800–2600	1800–2400
Літрова потужність, кВт/дм^2	32,48	42,78	33,1
Середній ефективний тиск при N_e, МПа (p_e)	0,780	1,222	0,992
Середній ефективний тиск при M_e, МПа (p_e)	0,875	1,753	1,312
Коефіцієнт запасу за крутним моментом	1,12	1,43	1,32
Середня витрата палива, л/100 км	7,4	6,1	6,8
Максимальна швидкість автомобіля, км/ч	175	198	200

ПРИМІТКА: позначки "+" або "– "означають відповідно "існує" або "не існує".

Дизель ОМ-611 з акумуляторною КПСК паливоподачі має такий же робочий об'єм, що й дизель ОМ-604, але $N_{e_{\text{ном}}}$ та $M_{e_{\max}}$ відповідно більші у 1,3 та вдвічі, ніж у дизеля ОМ-604. Літрова потужність збільшена на 32 %, p_e на цих режимах збільшився у 1,6 та вдвічі відповідно. Паливна економічність нового дизеля вище на 20 %.

Не менш разючі й такі результати. 4-циліндровий двигун ОМ-611 з акумуляторною КПСК паливоподачі має такі ж N_e та $M_{e_{\max}}$, як і 5-циліндровий дизель ОМ-602, робочий об'єм котрого більше на 25 %. Інші показники у дизеля ОМ-611 також значно кращі.

На рис. 3.85,а показана схема підсистеми Common Rail (CR), а на рис.3.85,б – схема БСІ підсистеми Common Rail.

Ця схема з вичерпною повнотою пояснює діяльність каналів управління КПСУ паливоподачею та їх взаємозв'язки з каналами управління повітропостачанням й функціями руху автомобіля чи його гальмування а також життєдіяльності, комфорту у салоні, тощо.

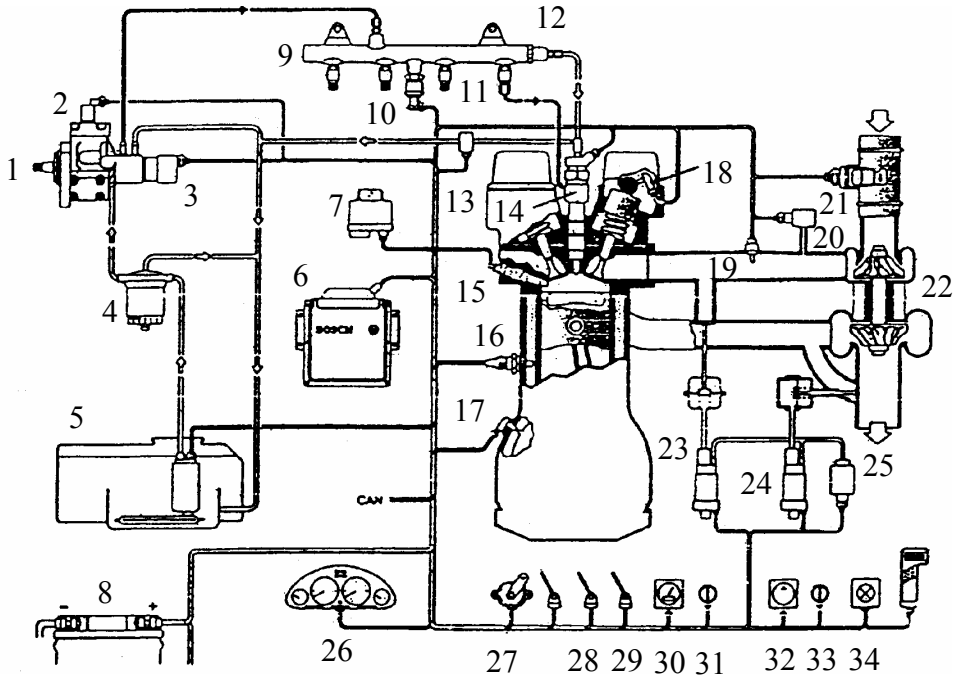
Характерно, що більшість датчиків обслуговують різних споживачів, наприклад, датчик обертання викликається виконавчими пристроями каналів управління форсунками, рециркуляції, ПНВТ, наддуву і т. ін. Це зменшує їх кількість у межах припустимого.

КПСК з гідропосиленням вприскування. Однією з тенденцій розвитку дизелебудування є прагнення підвищувати тиск вприскування, що вкрай необхідно при розробках перспективних форсованих двигунів. Це суттєвий резерв покращення сумішоутворення на основі ліпшого розпилювання збільшених циклових порцій палива.

Вимоги до збільшення тиску вприскування цілком задовольняють паливні схеми цієї групи керування, які забезпечують останнє більш гнучко. При цьому можна отримати високий й надвисокий для швидкохідних дизелів рівень тиску вприскування (200 МПа і більше).

Для створення тиску перед гідропосилювачем може бути використаний насос або акумуляторна підсистема середнього тиску (10–20 МПа).

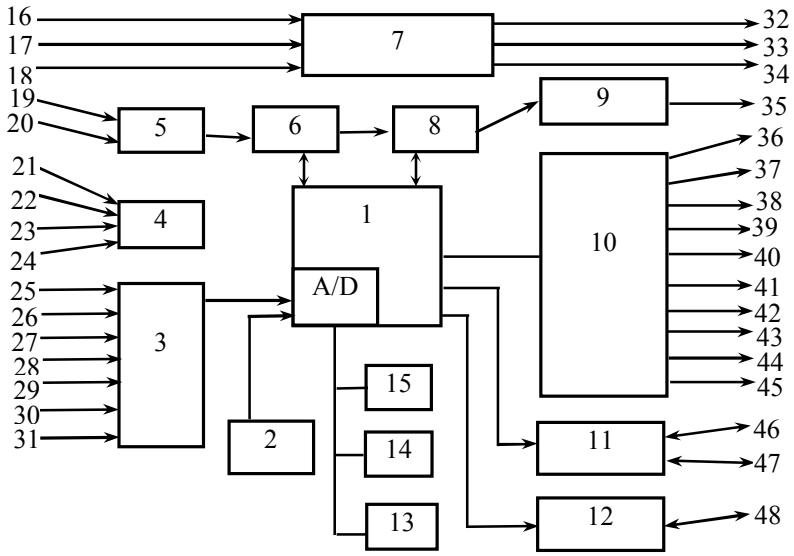
Основний елемент – гідропосилювач, який частіше вмонтовується у форсунку, перетворюючи її в насос-форсунку з гідроприводом, але він може налаштовуватися і в окремому корпусі.



а

Рисунок 3.85 – Схема Common Rail:
а – функціональна схема КПСК паливоподачею швидкісного автомобільного дизеля з Common Rail [22] (а):

1- ПНВТ;
2- впускний електроклапан;
3- електроклапан перепуску;
4- фільтр тонкого очищення;
5- бак, фільтр, електричний ППН;
6- БСІ;
7- реле свічки;
8- електроакумулятор;
9- гідроакумулятор CR;
10- датчик тиску;
11- аварійний обмежувач подачі;
12- запобіжний клапан;
13- датчик температури палива;
14- електрогідравлічна форсунка;
15- свічка накалювання;
16- датчик охолоджувальної рідини;
17- датчик частоти і положення К.В.;
18- датчик такту дизеля;
19- датчик температури повітря наддуву;
20- датчик тиску повітря наддуву;
21- витратомір повітря;
22- турбокомпресор для наддуву;
23- електромеханічний перетворювач регулятора рециркуляції відпрацьованих газів;
24- електромеханічний перетворювач регулятора наддуву;
25- компресор;
26- панель приладів;
27- педаль акселератора;
28- датчики трансмісії;
29- датчики агрегатів, гальмівних пристроїв;
30- датчик й показник швидкості;
31- задавач швидкості;
32- компресор кондиціонера;
33- задавач роботи кондиціонера;
34 - лампа самодіагностики й роз’єднувач для електронного мотортестера



б

б - схема електронного блока керування швидкохідного автомобільного дизеля з Common Rail фірми Bosch [22]:

1 – мікропроцесор з аналого-цифровим перетворювачем; 2 – датчик атмосферного тиску; 3 – аналогові входи; 4 – цифрові входи; 5 – блок частоти обертання; 6 – кут обертання; 7 – живлення й контролер процесора; 8 – керування форсунками; 9, 10, 11, 12 – кінцеві каскади; 13 – оперативний запам'ятовувальний пристрій; 16, 17, 18, 22 – клеми (напруги, маси); 19, 20 – датчики обертів, положень колінчастого, розподільного валів; 21 – зчеплення; 23, 24 – сигнали зіткнення, швидкості автомобіля; 25 –- витрата повітря; 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33 – датчики положення педалі, тиску в акумуляторі, тиску наддуву, температури охолоджувальної рідини, повітря, палива і мастила, маси; 32 – живлення датчиків; 34 – реле блока живлення; 35 – форсунки; 36 – клапан регулятора тиску; 37 – вимикач плунжерної пари ПНВТ; 38 – вимикальний клапан; 39 – пускове реле; 40 – кондиціонер; 41 – клапан рециркуляції; 42 – регулятор наддуву; 43 – перемикач впускного клапана; 44 – вентилятор системи водяного охолодження; 45 – частота обертання; 46 – діагностика; 47 – свічки накалювання; 48 – шина обміну даними з електронними пристроями автомобіля

Принципова схема КПСК паливоподачею з гідропосилювачем наведена на рис. 3.86. З акумулятора середнього тиску 1, в якому тиск підтримується насосом 7, паливо подається через золотниковий розподільник 4, що керується електромагнітом, у порожнину над сервопоршнем гідропосилювач 5. Сервопоршень, рухаючись униз, переміщує плунжер, який нагнітає паливо через трубопровід у форсунку 6. За командою БСІ 2 золотниковий розподілювач сполучає порожнину над сервопоршнем гідропосилювач зі зливом, поршень зупиняється й вприскування закінчується. Тут D–датчики, аналогічні тим, що показані на рис. 3.85,а.

Таким чином, дозування здійснюється електронним блоком (БСІ) за допомогою розподільника, керованого електромагнітом.

Після закінчення вприскування БСІ посилає сигнал на клапан 3, який сполучає акумулятор 1 з трактом високого тиску, тобто об'ємом перед форсункою, паливопроводом й порожниною над плунжером. Здійснюється наповнення, одночасно плунжер та сервопоршень підіймаються уверх.

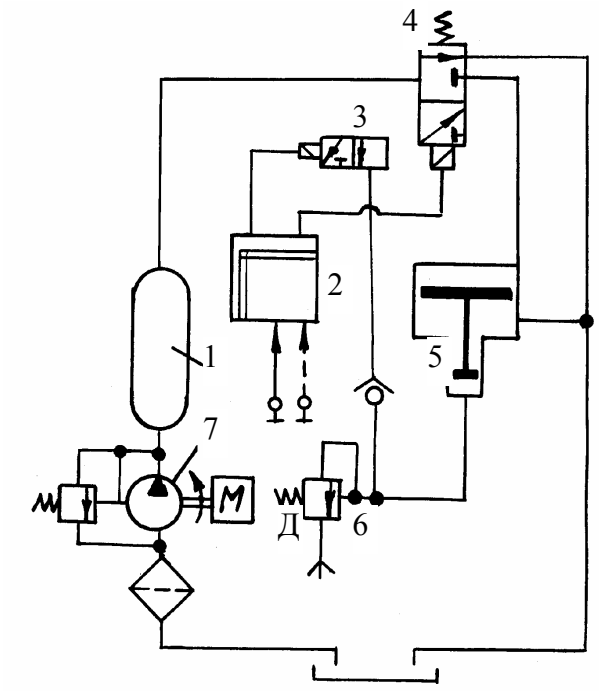


Рисунок 3.86 – Схема КПСУ паливоподачею з гідропосилювачем фірми Komatzy, Японія [1]

Дослідження, які проведені МАДІ (Росія), показали, що при використанні таких систем паливоподачі тиск вприскування практично не залежить від діаметра плунжера й прохідних соплових отводів. При визначеному конструктивному рішенні прохідні перерізи цих отворів мало впливають на циклову подачу палива.

Розглянута підсистема є складною. Простіше вирішується задача гідропосилення у підсистемах з насос-форсункою. Однак вони скоріше відно-

сяться до гібридних КПСК паливоподачею.

Гібридні КПСК паливоподачею. Підвищення інтересу до насос-форсунок в останні роки було обумовлено найбільш повною відповідністю при максимальній простоті конструкції двом важливішим тенденціям вдосконалення дизельної паливної апаратури: інтенсифікації вприскування і введенню електронного керування.

Здавна відомі переваги насос-форсунок: підвищення тиску вприску за рахунок мінімізації об'ємів стислового палива; відсутність підвприскувань (немає трубопроводів високого тиску і коливань тиску в них); зменшення номенклатури деталей; різка відсічка подачі; менша закоксованість й більший ресурс розпилювача; менші втрати потужності; відсутність необхідності у нагнітальному клапані; зниження запізнення вприскування відносно нагнітання плунжера, що зменшує розброс КВВ по частотах обертання й зменшує діапазони його регулювання. Насос-форсунки забезпечують відносно більш пологий передній фронт подачі, що відповідає екологічним вимогам.

Обмежували застосування насос-форсунок їхні недоліки: ускладнені умови компоновки головки; збільшений діаметр форсункової частини, більше зниження тиску на часткових режимах роботи; ускладнені й менш точні умови регулювання рівномірності подачі по циліндрах, ускладнення приводу рейок й спеціального приводу автоматичного регулятора.

У зв'язку з використанням електронного керування кількість переваг зросла, а недоліків – зменшилася. Так, плунжерна пара максимально спрощена, ліквідований механізм повороту плунжера, відпала необхідність вирівнювання паливоподачі по циліндрах, виникла можливість забезпечення двофазної подачі, регулювання КВВ. Тому підвищились економічність, надійність пуску, знизилась емісія токсидів.

На рис.3.87 показана принципова схема насос-форсунки, що забезпечує поєднання високих тисків подачі палива з гнучкістю мікропроцесорного керування; саме такий шлях є перспективним, що підтверджується широким розповсюдженням саме такої насос-форсунки в останній час.

Бачимо, що тут вдало поєднуються механічний привід плунжера від кулачка і циклічно діючий дозатор, який має електромагнітний привід, що й дозволяє регулювати циклову подачу палива та КВВ.

Така гібридна підсистема призначена для вантажних автомобілів потужністю до 300 кВт при n = 1700 – 2100 хв$^{-1}$ й забезпечує тиск при нагнітанні палива до 140 МПа.

Слід підкреслити, що в подібній насос-форсунці за допомогою невеликого клапана високої швидкодії, керованого електромагнітом, може здійснюється принцип електронного керування подачею для високообертових дизелів (до n = 5000 хв^{1}) і, головне, забезпечується вприскування палива під надвисоким тиском (до 200 МПа і вище). Це, як відомо, відкриває шлях до впровадження нерозділених камер згоряння з властивою їм високою паливною економічністю.

Принципові переваги КПСК з насос-форсунками, керованими за допомогою мікропроцесорів: суттєве зменшення, локалізація й наближення до соплового апарата об'єму високого тиску палива й наявність у каналах керування палива із суттєво меншими тисками, ніж тиски вприскування в мірі, що дорівнює відношенню площин сервопоршня й нагнітального плунжера (рис. 3.87). Тому подібні системи розробляються багатьма фірмами.

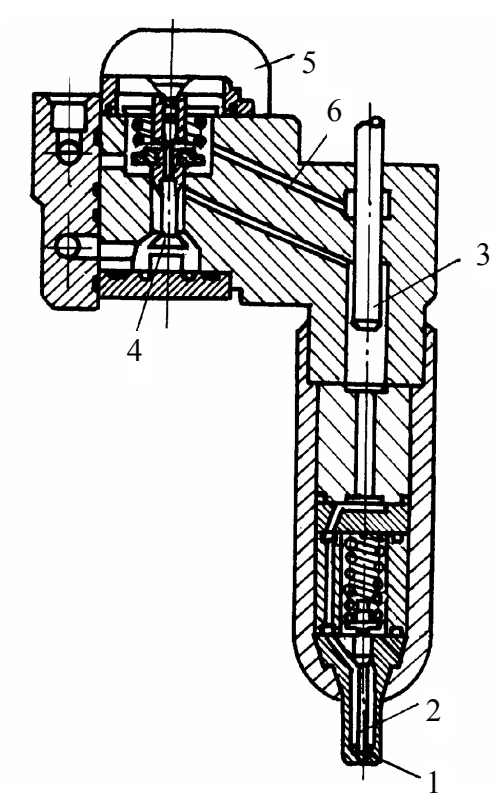


Рисунок 3.87 – Принципова схема насос-форсунки з мікропроцесорною схемою керування:

1 – розпилювач;
2 – запірна голка;
3 – плунжер насоса з механічним приводом;
4 – клапан з електромагнітним керуванням;
5 – електромагнітний привід клапана;
6 – дренажний злив

Сьогодні насос-форсунки використовуються з КПСК паливоподачею на дизелях фірм Caterpillar, Detroit Dizel Allison (відділення General Motors), Lucas, Bosch та інш.

Конструктивна схема насос-форсунки фірми Bosch наведена на рис. 3.88.

Конструкції сучасних насос-форсунок з мікропроцесорним керуванням розглядаються далі.

Підкреслимо, що КПСК з насос-форсунками дозволяють здійснювати регулювання параметрів паливоподачі (циклова подача, максимальний тиск вприскування, тривалість й КВВ), причому для керування форсунками можуть використовуватися принципово такі ж мікропроцесорні схеми, як і для акумуляторних підсистем паливоподачі. Реалізація підсистем з насос-форсунками вимагає для їх установки відповідної реконструкції головок циліндрів дизелів.

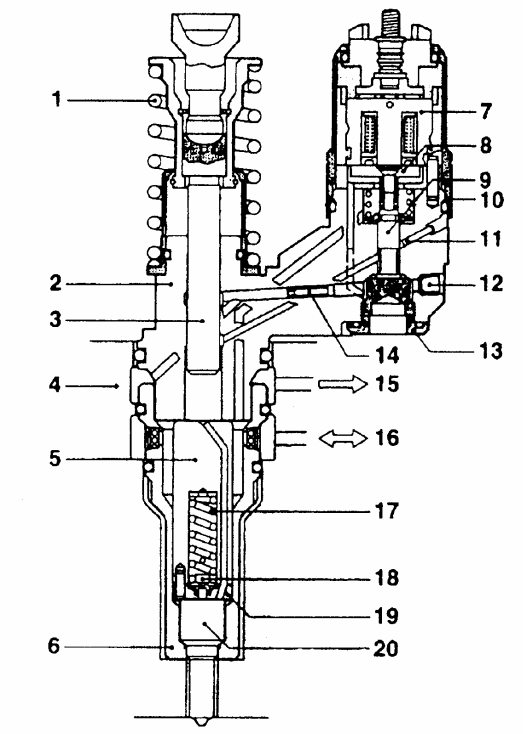


Рисунок 3.88 – Конструктивна схема насос-форсунки фірми Bosch [6]:

1 – пружина; 2 – корпус насоса; 3 – плунжер насоса; 4 – головка циліндрів; 5 – тримач пружини; 6 –стягувальна гайка; 7 – статор; 8 –якірна пластина; 9 – голка соленоїдного клапана; 10 – стягувальна гайка соленоїдного клапана; 11 – заглушка каналу високого тиску; 12 – заглушка каналу низького тиску; 13 – упор голки соленоїду; 14 – дросель (жиклер); 15 – повернення палива; 16 – подача палива; 17 – інжектор; 18 – натискний штифт; 19 – прокладка; 20 – розпилювач

Можливі й інші гібридні підсистеми керування паливоподачею в дизелях. В деяких з них використовуються насоси високого тиску, а кінець й початок подачі палива регулюються електромагнітно-керованими золотниками [1].

Рядом зарубіжних фірм (Bosch, Mitsubishi, Nippon Denso та інш.) розроблені конструкції рядних плунжерних насосів, які мають механізм

зміни ходу плунжера до геометричного початку подачі, що дозволяє поряд з регулюванням циклової подачі палива керувати КВВ. Це досягається за допомогою плунжера, що має золотниковий дозатор з електричним приводом (від соленоїда або шагового електродвигуна) й БСІ з мікропроцесором. Недоліком такої схеми регулювання є зменшення тиску вприскування при збільшенні кута випередження вприскування, що деформує характеристику паливоподачі на номінальному й близьких до нього режимів, хоча й підвищуються тиски при вприскуванні в зоні низьких частот обертання.

3.2.4. Огляд сучасних розробок щодо КПСК паливоподачею у дизелях провідних фірм світу

Більшість фірм вирішують насущні проблеми покращення існуючих й створення перспективних КПСК паливоподачею в дизелях. Вони займаються:

- розробками нових або модернізацією вузлів паливних систем, пристосованих до роботи з КПСК різних видів;
- збільшенням кількості впливаючих та контролюючих параметрів й підвищенням надійності та стабільності роботи датчиків;
- вдосконаленням електронних блоків, пристроїв керування в напрямку розробки програмно-адаптивних (й адаптивних) КПСК із зворотними зв’язками по вихідних сигналах;
- вдосконаленням виконавчих пристроїв;
- оптимізацією спільної роботи дизеля і силової установки;
- розробками оптимальних алгоритмів керування, що забезпечують потрібний рівень адаптивності дизелів різних призначень;
- підвищенням надійності й стабільності роботи КПСК тощо.

Вирішення цих проблем дозволить у цілому створити багатомірні КПСК паливоподачею в дизелях, які б здійснювали оптимальні діяння на їхню роботу за заданою цільовою функцією (наприклад, за мінімальною експлуатаційною витратою палива, найбільшою продуктивністю силового агрегата, комплексним паливно-екологічним критерієм тощо) при заданих обмеженнях й умовах: фракційний склад і цетанове число палива; технічний стан дизеля, особливо його паливної апаратури; температура і тиск на вході та виході з турбокомпресора та інш.

Розглянемо та проаналізуємо нові здобутки конструкторів – двигунобудівників.

Дослідницький центр фірми Fiat, який створив 1987 року дизель з безпосереднім вприскуванням для першого в світі серійного легкового автомобіля Fiat Chroma, таким чином окреслив вимоги й напрями своєї розробки:

- підтримання більш високого тиску вприскування у всьому діапазоні частот обертання к.в. у порівнянні з можливостями традиційної паливоподачі; це забезпечить краще співвідношення рівнів токсичних викидів (NO_x, тверді частинки), в тому числі і у нижньому діапазоні частот обертання для оптимального крутного моменту;
- більш точне керування цикловою подачею й забезпечення попереднього вприскування для зниження шуму згоряння;
- гнучке керування характеристикою вприскування (КВВ та тиск) для досягнення оптимального співвідношення емісійних та експлуатаційних показників дизеля;
- більш широкий діапазон n для поліпшення динаміки автомобіля.

Всім цим вимогам задовольняє перспективна КПСК вприскуванням палива Unijet, розроблена фірмою Fiat для дизелів з безпосереднім вприскуванням [25].

У цій підсистемі здійснено акумуляторне вприскування, електронне керування не тільки цикловою подачею й КВВ, а і тиском вприскування, тобто керується характеристика паливоподачі. Систему спроектовано для роботи дизеля в діапазоні n=100–6000 хв$^{-1}$, при максимальній подачі палива 100 мм^3/ход поршня. Тиск вприскування – до 130 МПа. Здійснюється поциліндрове й потактове керування паливоподачею та КВВ.

На рис. 3.89 подано схему КПСК Unijet.

Електронний блок керування виконує також функції керування: тиском наддуву, включенням свічей накалювання для пуску дизеля; діагностикою та ін.

При малих навантаженнях на двигун передбачена можливість відключення однієї насосної секції з трьох за допомогою двопозиційного електромагнітного клапана.

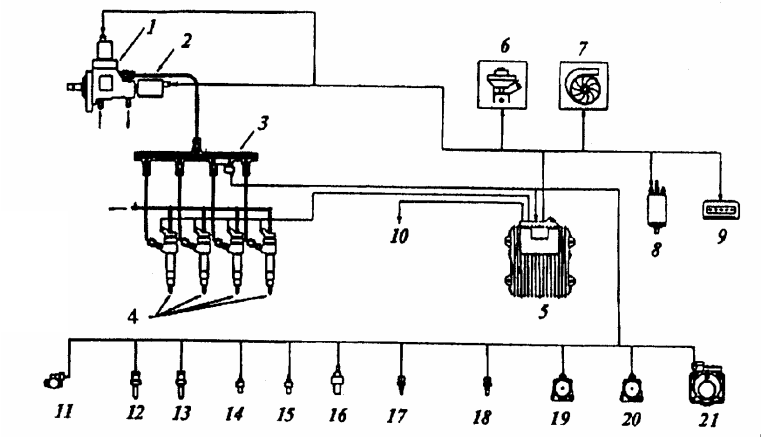


Рисунок 3.89 – Схема акумуляторної КПСУ паливоподачі типу Unijet для автомобільного дизеля фірми Fiat [25]:

1 – ПНВТ; 2 – регулятор тиску; 3 – акумулятор з датчиком тиску; 4 – електрогідравлічні форсунки; 5 – електронний блок керування (БСІ); 6 – система рециркуляції; 7 – турбокомпресор; 8 – помпа з електроприводом; 9 – блок керування свічками накалювання; 10 – допоміжні пристрої: сигнальна лампа; вимикач компресору кондиціювання повітря; послідовний інтерфейс; дисплей; 11 – датчик положення акселератора з перемикачем х.х; 12 – перемикач гальма; 13 – перемикач зчеплення; 14 – датчик n; 15 – датчик ВМТ; 16 – датчик швидкості автомобіля; 17 – датчик температури охолоджувальної рідини; 18 – датчик температури повітря; 19 – датчик тиску наддуву; 20 – датчик атмосферного тиску; 21 – витратомір повітря

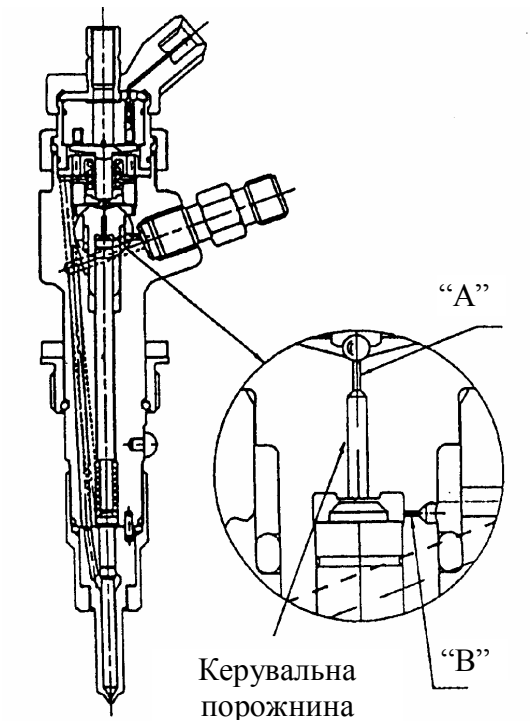


Рисунок 3.90 – Пристрій електрогідравлічної форсунки Unijet [26]

Конструкція гідравлічної частини ПНВТ підсистеми Unijet значно простіша конструкції розподільного насоса VP фірми Bosch, тому що функції дозування палива й регулювання КВВ передані електроніці.

На рис. 3.90 зображена схема електрогідравлічної форсунки Unijet. По команді БСІ електромагніт підіймає затвор керувального клапана, відкриваючи канал з каліброваним отвором А. Внаслідок цього у порожнині над штоком форсунки (так званій керувальній порожнині) тиск палива починає різко падати. Ця порожнина пов’язана з акумулятором каналом з каліброва-

ним отвором В. Тому тиск в ній знижується до величини, що складає визначену частину тиску в акумуляторі. Тривалість імпульсу току обумовлює тривалість підйому голки розпилювача, отже й кількість палива, яке вприскується при заданому тиску в акумуляторі. По закінченні часу збудження імпульсу електромагніт обезточується, затвор пружиною повертається у початкове (вихідне) положення, закриваючи отвір А. Тиск у порожнині над штоком форсунки зростає до тиску в акумуляторі, й голка розпилювача запирається. Інтервали за часом підйому та запирання залежать від розмірів каліброваних отворів А і В.

На рис. 3.91 показана схема електронного блока БСІ керування вприскуванням типу Unijet. У цьому блоці містяться всі елементи КПСК (керування паливоподачею, діагностикою, допоміжними функціями, а також джерелами живлення привода електрогідравлічних форсунок). Ці джерела здатні забезпечити великі пікові струми (до 30 А) з високою швидкістю їх підвищення, аби забезпечити швидке спрацьовування сервоклапанів електрогідравлічних форсунок.

Для керування форсунками застосовують синхронізуючий процесор.

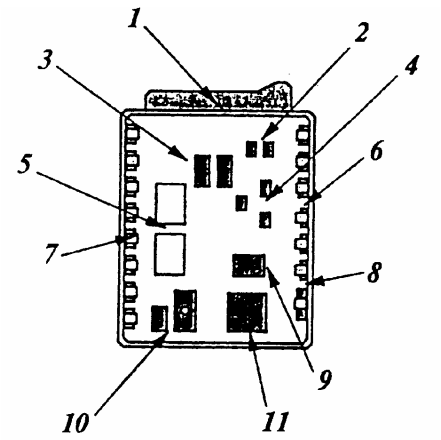


Рисунок 3.91 – Структурна схема електронного блока керування Unijet:

1 – роз'єднувачі з 55 контактами; 2 – інтерфейс; 3 – формувачі імпульсів малої потужності; 4 – інтерфейсний блок датчиків; 5 – конденсатор; 6 – формувачі імпульсів великої потужності; 7 – силовий блок; 8 – блок енергопостачання; 9 – синхронізуючий процесор; 10 – блок пам'яті; 11 – мікроконтролер

На рис. 3.92 показані типові карти тиску вприскування, отримані при використанні підсистем Unijet й Bosch на одному й тому ж дизелі з безпосереднім вприскуванням фірми Fiat. При середніх частотах обертання колінчастого вала, що перевищують 2000 хв$^{-1}$, й повному навантаженні потрібний тиск вприскування для підсистеми Unijet 130 МПа, який забезпечує середній ефективний тиск більше 1,5 МПа. Двигун з КПСК фірми Bosch не спроможний розвивати такий p_e, бо обмежений тиском вприскування 90 МПа.

При малих n й $N_{e\max}$ підсистема Unijet видає оптимальні рівні тисків (у два рази вищі рівнів традиційної підсистеми Bosch).

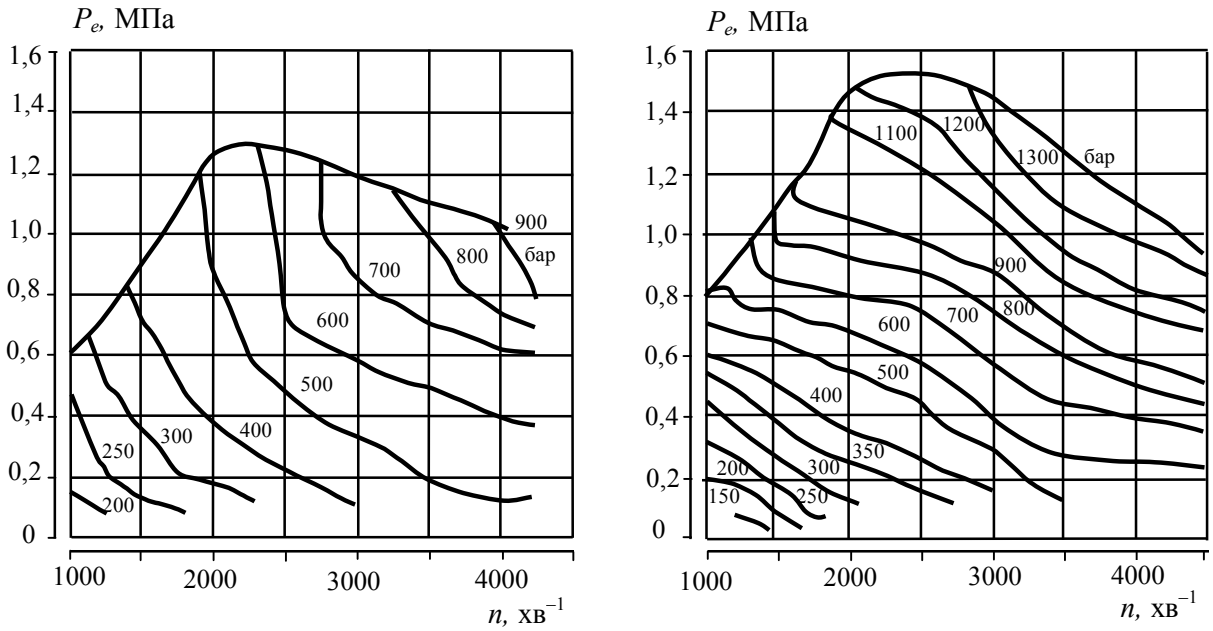


Рисунок 3.92 – Карти тиску вприску з підсистемами Bosch (а) і Unijet (б) на дизелі з безпосереднім вприском фірми Fiat – 1,9 л

При малих n й $N_{e\max}$ підсистема Unijet також спроможна підтримувати оптимальний тиск, що поряд з попереднім вприскуванням суттєво зменшує шум згоряння й знижує токсичність викидів.

Перехідними процесами не можна керувати на основі карт, що складаються при усталених режимах. Це можна підтвердити на такому прикладі. У дизеля з оптимізованими емісійними показниками за рахунок запізненого вприскування на деяких неусталених режимах (при перехідних процесах) може статися переохолодження камери згоряння, інерційне запізнення турбокомпресора й збільшення запізнення спалахування, що в свою чергу може призвести до проблем з шумом (детонація) або пропусками спалахів. У КПСК Unijet для керування перехідними процесами застосовуються особливі алгоритми, які розробники називають перехідними управляючими стратегіями. Це забезпечило точність потактового керування характеристикою паливоподачі ($g_ц$ й КВВ). В результаті стали кращими шумові й екологічні показники дизеля.

Підсистема Unijet здатна здійснювати попереднє вприскування, яке є ефективним засобом зниження шуму згоряння й покращення показників дизеля. Таке вприскування (по суті зміна характеристики паливоподачі) вдвічі знизило пік швидкості тепловиділення (рис. 3.93) й дещо знизило тиск згоряння. Це пояснюється впливом попереднього вприскування на меншу затримку спалахування основної дози палива й більш раннім початком його згоряння [25].

Показано, що попереднє вприскування значно ефективніше поліпшує екологічні показники дизеля, ніж зниження тиску вприскування.

Фірма Bosch створила промислову (серійну) акумуляторну КПСК на базі підсистеми Unijet з використанням власних мікропроцесорних елементів, датчиків й промислової апаратури. Маються лише деякі відміни в несуттєвих питаннях. Наприклад, регулятор тиску розміщено на акумуляторі високого тиску, а не на паливному насосі, як в підсистемі Unijet.

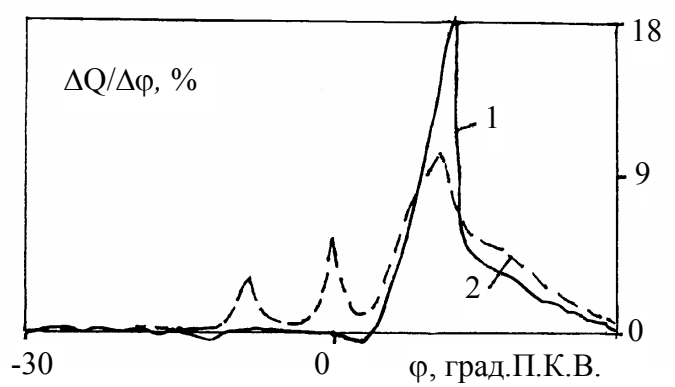


Рисунок 3.93 – Характеристика тепловиділення з попереднім вприскуванням при 26 град. П.К.В. до ВМТ (φ = 0)*:*
1 – без попереднього вприскування;
2 – з попереднім вприскуванням

До розробки подібних підсистем паливоподачі приступили й інші фірми, зокрема фірма Lucas, яка також створює свою акумуляторну підсистему. Контракти на неї укладені з фірмами Ford і Renault. Продукція фірми вийде на ринок, починаючи з XXI сторіччя.

Японська фірма Isuzi розробила нову акумуляторну підсистему паливоподачі типу Common Rail для автомобіля Wizard.

Фірма Simens для своєї Common Rail System II з максимальним тиском 160 МПа розробила конструкцію форсунки з п'єзоелектричним перетворювачем. Характерною рисою її є гранично швидке безпосереднє керування голкою розпилювача форсунки за допомогою такого перетворювача [25]. П'єзоелементи можуть працювати в інтервалі температур (–40) – (+150) °С. Для роботи п'єзомодуля не потрібна висока напруга. Швидко-

дія складає 30 мкс, що у декілька разів перевищує швидкодію електромагнітного клапана. Стійкість п'єзомодуля доведена до 10^9 циклів навантаження, що не буде лімітувати надійність форсунок. Форсунки з п'єзоелектричними перетворювачами у порівнянні з електромагнітними клапанами за інших рівних умов характеризуються можливістю зниження мінімальних циклових подач для попереднього вприскування у 2-3 рази, а мінімальних основних подач в 2 рази при тиску в акумуляторі до 120 МПа.

Фірма МТИ також віддала перевагу акумуляторній системі вприскування для швидкохідних дизелів.

Підсистема Common Rail встановлюється й на автомобілі фірми Alfa Romeo.

Сказане наводить на таку думку: напрямок щодо акумуляторних КПСК паливоподачею у зв'язку з великими її перевагами стане визначальним у проблемі удосконалення дизелів на найближчу та віддалену перспективу. Саме в ній містяться великі можливості вирішення екологічних й економічних проблем дизельних двигунів.

Робиться наголос в колах фахівців, що вихід акумуляторних підсистем типу Unijet на ринок викликає переворот у дизелебудуванні, який можна зіставити з запровадженням електронного вприскування у бензинових ДВЗ.

Інтеграція України (як і Росії, Білорусії та інш.) в світову економічну спільноту ставить перед вітчизняним двигунобудуванням задачу виконання вимог європейських й світових стандартів, яку спрямовано на мінімальне забруднення навколишнього середовища й безпеку для життя й здоров'я людства. Вимоги вітчизняних державних стандартів все в більшій мірі наближаються до вимог світових стандартів, залишаючи автомобілетракторобудівникам все менше часу на запобігання відставання вітчизняної техніки. Відомі спроби вирішення цієї проблеми за рахунок купівлі ліцензій й освоєння ліцензійної моторної техніки. Але цей шлях закріплює відставання тому, що фінансові ресурси витрачатимуться тільки на зарубіжні цілі. В цих умовах розробка й освоєння виробництва вітчизняної акумуляторної підсистеми являє унікальну можливість подолати відставання вітчизняного двигунобудування від зарубіжного рівня.

3.2.5. Датчики та виконуючі пристрої КПСК паливоподачею

При розробках сучасних програмно-адаптивних КПСК паливоподачею в дизелях головною проблемою є створення простих, надійних датчиків з майже гранично високою швидкодією (меншою ніж 0,2 мс), а також виконавчих пристроїв, здатних переборювати значні труднощі, наприклад, обумовлені значним пересувним зусиллям в паливозапірних вузлах, що функціонують при надвисоких тисках (200 МПа й більше).

Пов'язано це з тим, що як і в бензинових ДВЗ, саме датчики та виконавчі пристрої відіграють вирішальну роль у забезпеченні стабільної та ефективної роботи КПСК паливоподачею в дизелях.

Слід відзначити, що такі конструкції дуже різноманітні у зв'язку з великою кількістю типів КПСК.

Але розроблено обов'язковий (базовий) набір датчиків, які формують прямі керуючі командні імпульси, в тому числі датчики:

- частоти обертання колінчастого вала (n);
- тиску наддуву й температури наддувного повітря (p_s, t_s);
- положення рейки ПНВТ (h);
- моменту початку вприскування (θ);
- тиску в магістралі високого тиску – в каналі розпилювача форсунки $p_П$;
- для дизель-генераторів використовують також датчик навантаження: відсліжується накид-скидання навантаження (N_e) та інш.

На відміну від двигунів бензинових до складу КПСК паливоподачею дизелів не включаються датчики витрати палива, тому що мікроЕОП однозначно відстежує відзначену витрату за сигналами датчиків h і θ.

В КПСК означений набір датчиків більш-менш доповнюється для формування зворотних зв'язків каналів адаптації для пристосування процесів у дизелях до змін умов експлуатації, навколишнього середовища та інш. Мова йде про датчики: режимних параметрів, положення педалі керування й швидкості транспортного засобу; тиску і температури в системах охолодження, мастильної; тиску і температури навколишнього середовища; температури палива; зупинки двигуна; циркуляції охолоджувальної рідини і мастила; токсичних компонентів у випускних газах тощо.

В цьому розділі не торкаючись додаткових функцій КПСК паливоподачею, розглянемо базовий набір датчиків. Інші датчики розглядати-

муться разом з блоками локального керування токсичністю, кліматичною адаптацією, надійністю і т.д.

Датчики частоти обертання колінчастого вала, тиску і температури повітря для наддуву. За принципами дії, конструктивним оформленням й метрологією як в дизелях, так і в бензинових ДВЗ використовуються однакові датчики n, t_s, p_s. Вони описані вище.

Датчики тиску в магістралі високого тиску. Для вимірювань тиску у паливному тракті (до 200 МПа і більше) можна використати тензометричні, п'єзометричні та ємкісні первинні перетворювачі.

П'єзоелектричні перетворювачі володіють високими динамічними якостями й стабільністю показань. Однак їх використання супроводжується витіком електричного заряду, що унеможливлює застосування таких датчиків у КПСК.

Ємкісні датчики також мають високі динамічні характеристики й чутливість, але їхні показання у значній мірі залежать від впливу навколишнього середовища, усунення якого ускладнює схему КПСК.

Тензометричні датчики не мають відзначених недоліків й прості за конструкцією (рис. 3.94, а).

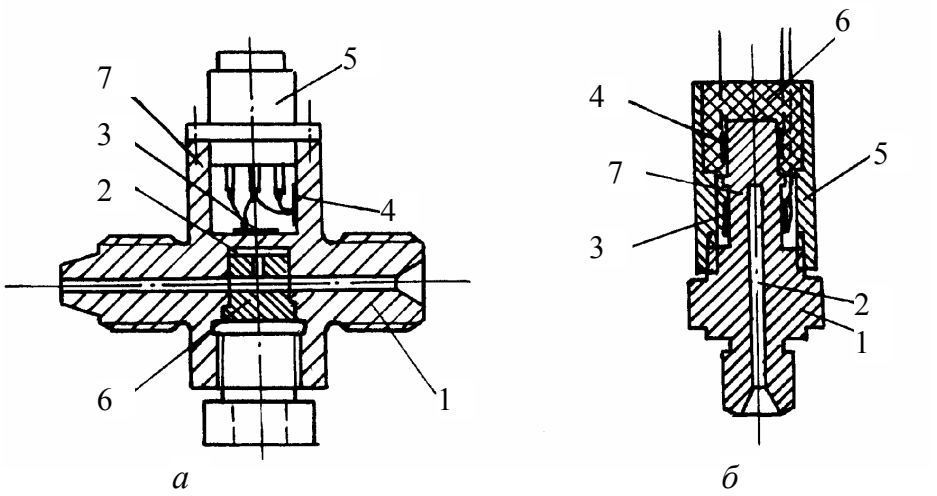


Рисунок 3.94 – Паливні датчики високого тиску:

а – *тензометричний датчик повногабаритний:* 1 – корпус; 2 – робоча порожнина; 3 – робочий тензометр; 4 – компенсаційний тензометр; 5 – електронний рознім; 6 – витискувач; 7 – стінка;

б – тензометричний датчик малогабаритний: 1 – корпус; 2 – робоча порожнина; 3 – робочий тензометр; 4 – компенсаційний тензометр; 5 – кожух; 6 – ізолятор із епоксидної смоли; 7 – трубчастий елемент

Плоскі мембрани (чутливі елементи), діаметром біля 10 мм, товщиною 1-3,5 мм виконані як одне ціле з корпусом датчика; на них наклеєні дротові перетворювачі. Характеристика датчика лінійна. Діаметр внутрішнього каналу 2-5 мм.

Для виключення впливів на вимір тиску корпус, витискувач і штуцер мають достатню масу. Остаточно розміри пружного елемента визначаються експериментально, при цьому механічна напруга у стінці під діянням тиску палива повинна бути не більше, ніж межа пружності матеріалу.

Подібні датчики високого тиску звичайно встановлюються у нагнітальному трубопроводі ПНВТ.

При використанні насос-форсунок крупногабаритні тензодатчики не підходять; їх замінюють малогабаритними, які можна встановлювати у нагнітальній порожнині насос-форсунки (рис. 3.95).

Пружний трубчастий елемент 7 виконаний разом з корпусом. Для ліквідації впливу вібрацій у ньому на сигнал датчика товстостінний запобіжний кожух 5 створює з корпусом 1 моноліт, оскільки порожнина 6 залита епоксидною смолою. Подібні датчики монтуються в спеціальних отворах стінки насос-форсунки.

Датчики переміщення рейки ПНВТ. Для запису великих переміщень рейки паливного насоса високого тиску використовуються індуктивні датчики. На рис. 3.95 показаний варіант одного з таких датчиків, який працює за принципом розмагнічування магнітного потоку котушки за рахунок магнітного поля вихревих струмів, що ініціюються у рухомому мідному трубчастому осерді 1. Деталі 2, 3, 7-10 виготовляються із сталі й створюють замкнуту систему магнітопроводу.

Такий датчик має лінійну характеристику у межах приблизно до 90 % довжини котушки.

На рис.3.96 інший варіант такого датчика. Він складається із магнітно-м’якого сталевого ламінованого осердя з двома зовнішніми (відкритими) кінцями. Котушки вимірювальна та контрольна закріплені біля цих кінців осердя.

У датчику фірми Bosch використовуються індукційні котушки. Принцип дії датчика пояснюється рис. 3.96.

Рисунок 3.95

обмоток 3, 5, що досягається переміщенням котушки 4 разом з корпусом 9 у штуцері 1, після чого корпус фіксують болтом 8. Недоліки датчика цього типу: не дуже висока точність реєстрації кута θ через те, що початок вприскування палива відстає від моменту відриву голки від сідла, а також потреба установки у форсунці спеціальної подовженої штанги.

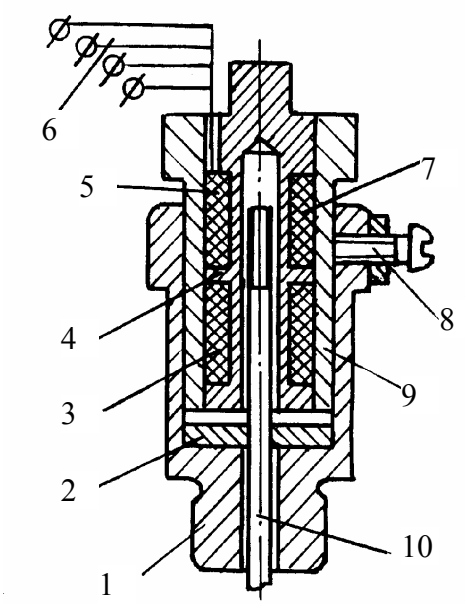


Рисунок 3.97 – Індуктивний датчик ходу голки форсунки:

1 – штуцер; 2 – фторопластова шайба; 3, 5 – обмотки; 4 – котушка; 6 – проводи; 7 – сталеве осердя; 8 – болт; 9 –- корпус; 10 – латунний шток

Суттєво більш якісний сигнал про момент початку вприскування можна отримати на основі вимірювання тиску палива перед розпилювальними отворами форсунки. Відповідний датчик показаний на рис. 3.98. Для підвищення його чутливості перед наклеюванням робочого тензометра 3 обточують сопловий наконечник 1 розпилювача. Компенсаційний тензометр 2 наклеюють на корпус форсунки. Суттєвий недолік цього датчика – можливий перегрів і, як результат, – низька надійність.

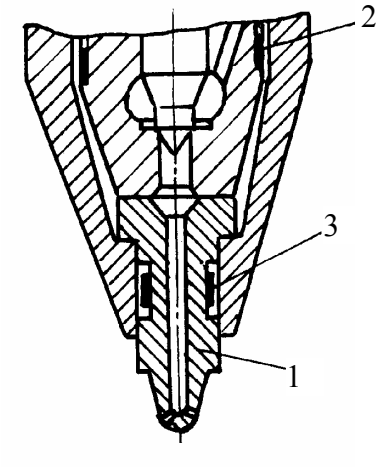


Рисунок 3.98 – Схема установки тензометрів у розпилювачі форсунки для вимірювання тиску палива у підголковій порожнині форсунки

Перспективними є прості датчики θ, дія яких пов’язана з переміщенням голки форсунки, коли сигналом для ввімкнення електричної схеми вимірювання служить початок підйому голки фор-

сунки. Він і призводить до розмикання контактів переривача, пов'язаних з індукційною котушкою.

Цікавим є варіант такого датчика, у якого в момент початку вприскування палива магнітна опора пружини форсунки переміщується відносно магнітного чутливого елемента. При цьому генерується сигнал, який підводиться до вузла електронного керування.

Значні перспективи мають оптичні датчики початку вприскування, що використовуються окремими фірмами (Toyota та інш.).

Датчики навантаження. Подібне вимірювання базується на реєстрації крутного моменту M_e дизеля, що й дозволяє, знаючи M_e й частоту обертання n колінчастого вала (за показаннями відповідного датчика, обов'язкового для КСК ДВЗ), отримувати ефективну потужність дизеля (навантаження) за формулою:

$$N_e = k\, M_e \cdot n, \tag{3.1}$$

де k – коефіцієнт.

У КСК ДВЗ використовуються два типи датчиків:

- такі, що базуються на вимірюванні M_e за кутом закручування поєднувального вала дизеля й гальмуючого пристрою за допомогою тензометрії;
- такі, що використовують фазоімпульсний метод для вимірювання кута закручування позначеного вала.

Розглянемо ці типи первинних перетворювачів.

Тензометричне вимірювання M_e за кутом закрутки поєднувального вала базується на відомій формулі:

$$\gamma = \frac{l}{GJ} M_e \quad , \tag{3.2}$$

де l – довжина ділянки вала, для якої визначається кут закручування γ; G – модуль зрушення матеріалу вала; J – полярний момент інерції поперечного перерізу вала.

Тензометри для вимірювання γ наклеюються на поверхню скрученого валу під кутом 45° до його осі (відповідно до напрямку деформації поверхневого шару вала).

Для підвищення чутливості й виключення похибки, обумовленої деформацією вала в осьовому напрямку, тензометри підключаються за мостовою схемою. Остання значно знижує похибку, викликану впливом коливань опору ковзних контактів (струмознімання).

Як контактні пристрої для передачі сигналу з датчика оборотного вала (разом з колінчастим валом дизеля) на БСІ (нерухомий контакт) використовуються збірні або латунні кільця із щітками (графітовими, мідно-графітовими, срібно-графітовими). Такі ковзні контакти у вимірювальному цепу (тобто коливання опору) є джерелом значних випадкових похибок, які повністю виключити неможливо навіть у мостовій схемі. Іншим недоліком тензодатчика M_e є невелика надійність самого ковзного струмознімання при тривалій роботі у зв'язку з підвищеним зносним спрацюванням, особливо при високих частотах обертання колінчастого вала дизеля.

Фазоімпульсне вимірювання M_e не має означених вище недоліків. Фазоімпусний метод полягає в тому, що на з'єднувальному валу закріплюються на відомій відстані один від одного два однакових диски з зубцями.

Два індукційних датчика розташовуються кожний проти свого диска (торця) із зазором поміж полосами магніту й торцями зубців 0,5–1,0 мм. При проходженні зубців мимо датчиків останні генерують імпульс напруги з частотою $f = \omega m,$ де ω – кутова швидкість колінчастого вала двигуна; m – кількість зубців. Дві послідовності імпульсів, що генеровані обома датчиками з однаковою частотою f, будуть зміщені відносно одна однї на час τ, пропорційний куту закручування γ одного диска відносно іншого.

Послідовності позначених імпульсів подаються на вхід електричної схеми, яка й виробляє напругу тока, пропорційну куту γ.

Датчики частоти обертання ротора турбокомпресора. В КПСК з адаптивністю подібний датчик видає сигнал зворотного зв'язку при корекції командних сигналів паливо- й повітроподачі з метою поліпшення якості перехідних процесів, як відомо, залежної й від інерційності ротора турбокомпресора. Частоту $\omega_{тк}$ частіш всього реєструють за допомогою індукційного датчика. Реєстрація іншими засобами значно утруднена, бо частоти $\omega_{тк}$ сягають надвеликих значень 200–300 тис. хв$^{-1}$ й більше.

На рис. 3.99 показаний варіант конструкції датчика $\omega_{тк}$. Він має магніт 2 й обмотку індуктивності 1. При обертанні гайки 3, що розташована на

торці ротора ТК, змінюються повітряний зазор магнітного цепу, його повний магнітний опір та магнітний потік.

На цьому розгляд датчиків базового набору для КПСК паливоподачі в дизелях завершуємо, але слід відзначити, що такі КПСК постійно вдосконалюються.

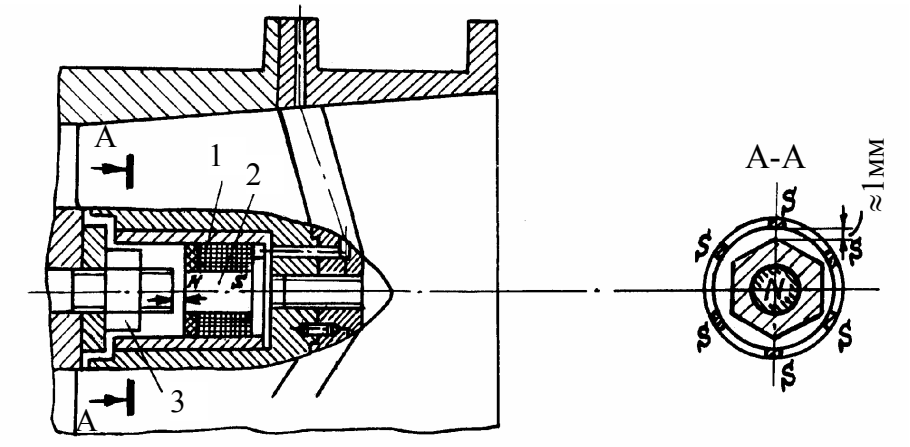


Рисунок 3.99 – Датчик частоти обертання турбокомпресора швидкохідного дизеля

Ряд датчиків перспективних КПСК паливоподачею ще належить розробити, використовуючи й нові фізичні, хімічні ефекти.

Сформулюємо основні напрямки створення датчиків нових поколінь:

- датчики для вимірювання глибинних параметрів процесів у двигунах і характеристик якості ДВЗ (концентрації відповідно кисню, залишкових газів, перекисних сполучень та видів токсидів у вихлопі; поточної температури робочого тіла; крупномасштабної турбулентності у циліндрах; швидкості нарощування тиску при згорянні; поточних рівнів шумів, вібрацій; товщини відкладень на стінках систем охолодження, мастильної; зазорів у парах тертя і т. інше);
- комбіновані датчики, які поєднують декілька первинних вимірювань комплексних характеристик процесів у дизелях (середня експлуатаційна витрата палива; сумарні теплові витрати в систему охолодження; статті теплового балансу; завантаження дизеля тощо);
- датчики залишкового ресурсу і багато інших.

Форсунки та насос-форсунки. Форсунки (насос-форсунки) є основними виконавчими пристроями КПСК паливоподачею у дизелях.

Розроблені форсунки з безпосереднім приводом. Вони базуються на використанні магнітоелектричних принципів для керування голкою форсунки. Приклад такої форсунки показаний на рис.3.100, а.

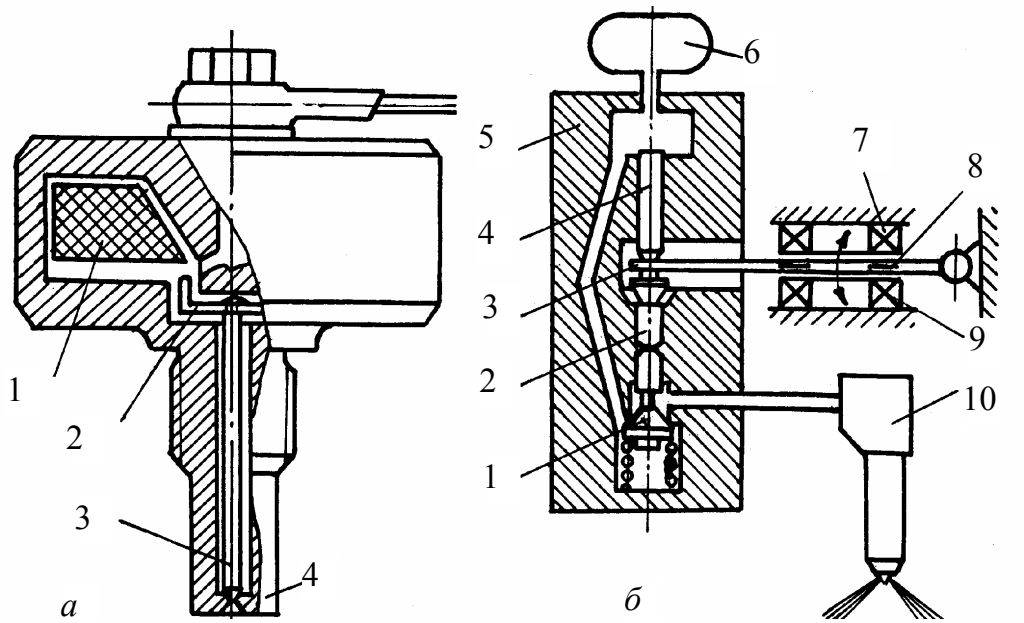


Рисунок 3.100 – Магнітоелектричні та електродинамічні пристрої дозування та розпилювання палива у дизелях:

а – форсунка з магнітоелектричним (електромагнітним) приводом:
1 – котушка електромагніта; 2 – рухома котушка; 3 – запираюча голка;
4 – розпилювач;

б – електродинамічний привод форсунки з голчастим запором

Швидкодія цих форсунок сягає 0,2-0,5 мс, що задовольняє керування паливоподачею у дизелях середньої швидкості (1500–2500 хв$^{-1}$). На жаль, форсунка має $p_{n\max} = 60\ M_{\max}$, що припустимо лише для малофорсованих дизелів. Форсунки з безпосереднім керуванням мають й інші недоліки, наприклад, потребують значних електричних потужностей для керування, навіть при обмеженні тиску палива.

Форсунки з електромагнітним приводом, виконані з використанням феромагнітопроводу, мають обмеження, пов’язані з межею насичення матеріалу магнітопроводу.

Розроблені форсунки з підвищеною швидкодією, привід яких є електродинамічним, що використовує саме взаємодії поміж вихровими струмами, наведеними у замкнутому контурі змінним магнітним потоком й самим вихрем струменів. Існують і комбіновані приводи, у яких поєднуються елементи з використанням електромагнітного й електродинамічного ефектів.

На рис. 3.100, б подано магнітоімпульсний пристрій з акумулятором тиску для вприскування палива в дизель (завод ДР, Росія). У ньому електродинамічний привод використовується для керування подачею палива із акумулятора 6 до форсунки 10. Якір 3 пластинчатої форми, виготовлений із немагнітного матеріалу з впресованим у нього мідним кільцем 8, може вільно рухатись поміж закріпленими плоскими електричними котушками 7 та 9 з малою кількістю витків. При подачі від конденсаторної батареї імпульсів струму на котушку 7 навкруги останньої виникає змінне магнітне поле, яке ініціює у мідному кільці 8 вихрові струми, що взаємодіють з магнітним полем. У результаті виникає імпульс електродинамічної сили, яка й відштовхує якір від котушки; при цьому розміщені в корпусі 5 пристрої закривають клапан 2, а запірний клапан 1 відкривається – починається вприскування. Для припинення вприскування на котушку 9 подається імпульс струму, який дозволяє перевести якір, а отже, й клапани в положення відсічки паливоподачі.

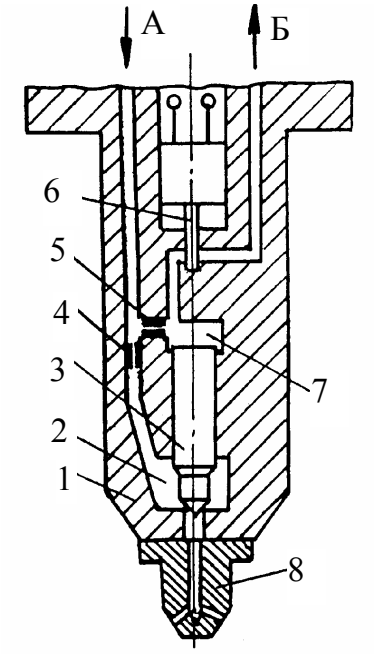


Рисунок 3.101 – Схема електрогідравлічної форсунки:

1 – корпус форсунки; 2 – камера вприскування; 3 – голка; 4 – жиклер камери вприскування; 5 – жиклер камери керування; 6 – золотниковий керуючий клапан з електромагнітом; 7 – камера управління; 8 – розпилювач;
А – нагнітання; Б - злив

Найбільшого поширення набули форсунки (насос-форсунки) з гідроелектричним керуванням запірною голкою. На рис. 3.101 ілюструється принцип дії однієї з цих конструкції (Коломенського філіалу ВЗПІ [1]).

Керуючим елементом форсунки служить клапан з електромагнітним приводом; у конкретному випадку він виготовлений як золотник. Відкрит-

тя й закриття клапана у сполученні з наявністю жиклерів створює гідравлічні зусилля, які викликають підйом голки і її посадку на сідло.

При виконанні клапана золотниковим через нього допускається витік палива, що знижує енергетичну ефективність КПСК паливоподачею.

Однак при цьому клапан практично врівноважений і тому має високу швидкодію при малих зусиллях переміщення і, значить, невеликих габаритах електромагніта. Для зменшення витіку палива через закритий клапан 6 передбачені: висока жорсткість його деталей, малий зазор в парі та високий ступінь фільтрації палива. Останнє знижує темп зносу клапана при експлуатації. Зменшення протікання палива через клапан може бути досягнуто застосуванням двох – і трьох клапанів.

Суттєве зменшення втрат стиснутого палива може бути забезпечено при використанні неврівноважених клапанів, наприклад, кулькового типу (рис.3.102). При цьому, однак, обмежуються можливості значно підвищувати тиск в акумуляторі, оскільки потребуються значні зусилля електромагніту аби перебороти силу пружини, що утримує клапан від відкриття під діянням гідравлічного зусилля. Характерною особливістю цієї форсунки є мінімальний об'єм камери керування (над голкою), що також сприяє зменшенню втрат стиснутого палива. Форсунки такого типу застосовує фірма Bosch на автомобільних дизелях Mercedes та ін.

На рис. 3.103 показана електрогідравлічна форсунка середньообертового дизеля. Головні вузли: сопловий наконечник 1, розпилювач 16, дросельний блок 3 й електромагнітний клапан 9. Дросельний блок являє собою стальну шайбу з двома дроселювальними отворами на вході в розпилювач 16 та в камеру керування 4. Керуюча камера 5 запирається притертою парою корпус 6 – втулка 12. Верхня частина втулки 8 є рухомим елементом якоря електромагніта, який складається з котушки 10, підключеної до КПСК й нерухомого осердя 11, які вбудовані у корпус 12. Клапан фіксується в корпусі 13 гвинтом 17. Втулка 8 клапана утримується у вихідному стані пружиною.

Форсунка працює так. У вихідному стані, коли клапан 9 закритий, тиски у камерах 5 і 2 рівні й відповідають тиску p_a в акумуляторі. Голка розпилювача щільно притиснута до сідла за рахунок різниці їх площин, на які тисне паливо зверху й знизу. При подачі електричного імпульсу на електромагніт клапан втулки 8, підіймаючись вверх до упору, відкриває злив

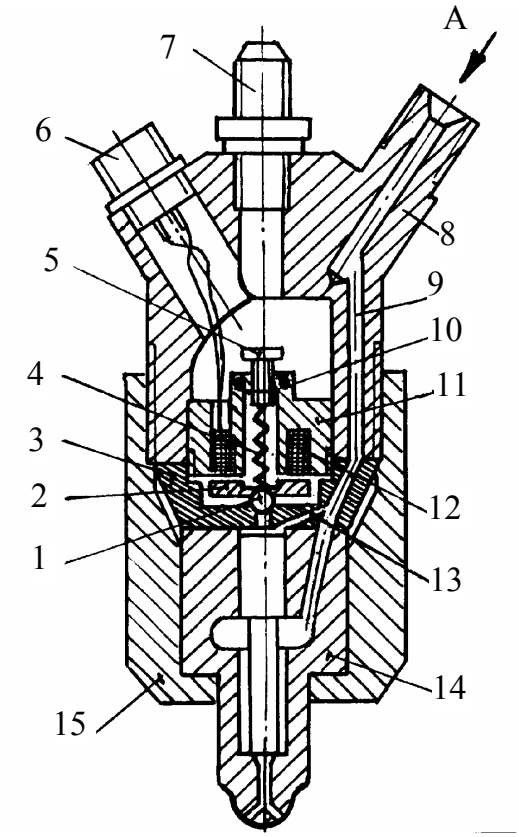


Рисунок 3.102 – Електрогідравлічна форсунка з кульковим керуючим клапаном (фірма Bosch):

1 – кулька;
2 – якір;
3 – проставка;
4 – запірна пружина;
5 – регулювальний гвинт;
6 – електричний роз'єднувач;
7 – штуцер зливу;
8 – корпус форсунки;
9 – канал підводу палива;
10 – стопор;
11 – магнітопровід;
12 – обмотка електромагніта;
13 – дросель;
14 – розпилювач;
15 – гайка стягувальна;
А – від акумулятора високого тиску

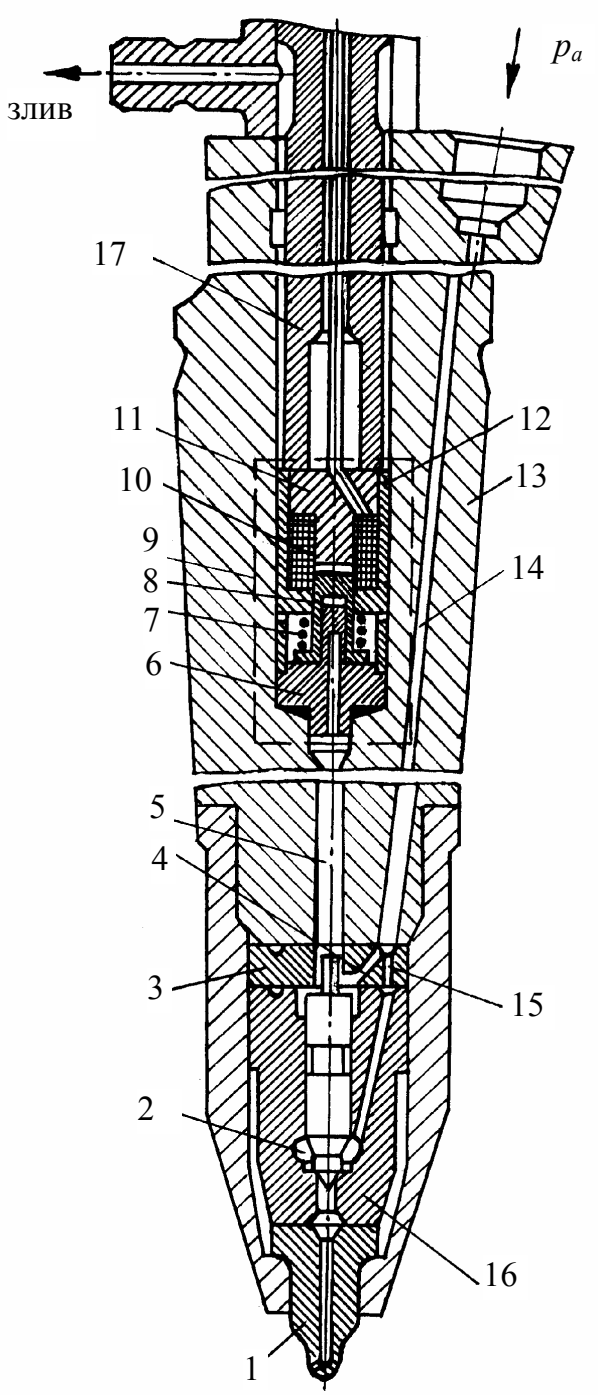


Рисунок 3.103 – Електрогідравлічна форсунка тепловозного дизеля 8 ЧН26/26, Коломенський завод (Росія)

палива з камери 5. При цьому через дроселювання потоку палива в дроселі 4 тиск у камері, отже й зусилля, яке діє на головку зверху, зменшується. Під тиском на диференціальну площинку голки вона відривається від сідла й різко підіймається до упору. При відключенні електричного сигналу втулка 8 повертається у вихідне положення пружиною 7. Тиск у камері 5 починає зростати, наближаючись до тиску на вході до форсунки. Тиск в камері 2 через дроселювання потоку в дроселі 15 стає меншим, ніж на вході у форсунку, тому різниця сил, які діють на голку, приведе до посадки голки на сідло.

У зв'язку з бурхливою дизелізацію автотранспорту за останні роки майже всі провідні фірми, в першу чергу Bosch, розробили чимало нових електрогідравлічних форсунок з принциповими перевагами [25], [6] та інш.

Зупинимося на їхніх загальних особливостях.

У конструкцію L'Orange (рис. 3.104) закладено технічні рішення, аналогічні форсунці Bosch. Поряд з електромагнітним приводом 1 пілотного клапана 2 й мультиплікатора запирання 5, форсунка містить ще додатковий керуючий золотник 3 з проміжним клапаном 4, які зменшують витрату на керування й збільшують швидкодію голки.

Форсунка Societe призначена для дизеля МТИ (рис.3.105). Тут застосований гідравлічно розвантажений двозатворний клапан. Електромагніт 1 підіймає якір 2 з клапаном 4. При цьому надголкова порожнина 8 роз'єднується з каналами нагнітання 11 по перерізу 6 між клапаном й нерухомою напрямною 5 й сполучається через переріз 7 з каналом зливу 3. Тоді голка 10 долає зусилля від штанги 9 і починається вприскування. Форсунка не має витрати на керування; її не бажано використовувати для $n > 2000–2500$ хв$^{-1}$; складно пристосовувати сполучення деталей по двох прецизійних поверхнях клапана.

Форсунка Siemens (рис.3.106) відрізняється виконавчим п'єзоприводом клапана. Для збільшення ходу клапана застосований механічний мультиплікатор переміщення (рис.3.107). С початку свого ходу через нього передається максимальне зусилля, протидіюче високому тиску; зниження зусилля (збільшення переміщення) майже немає: $a/в \approx 1$ (позиція I на рис.3.107). В кінці ходу зусилля зменшується, а хід збільшується у $a/в>1$ разів (позиція II на рис.3.107).

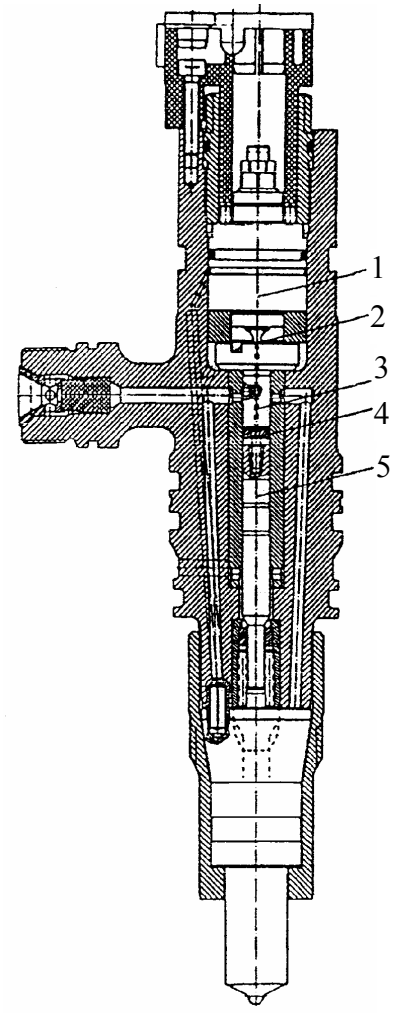


Рисунок 3.104 – Електрогідравлічна форсунка L'Orange (Франція)

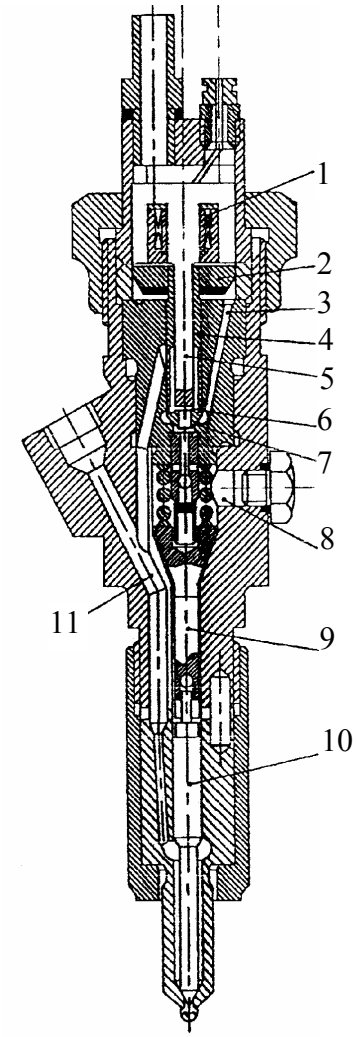


Рисунок 3.105 – Електрогідравлічна форсунка Societe ВИДІ (Франція)

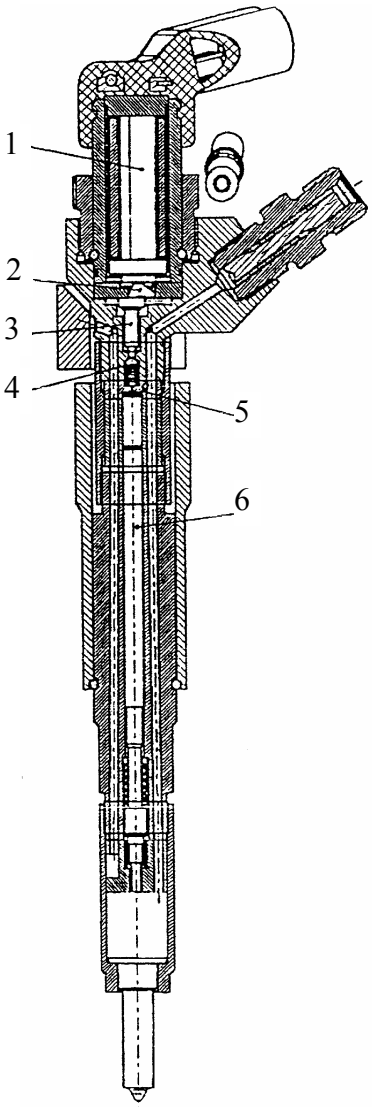


Рисунок 3.106 – Електрогідравлічна форсунка фірми Siemens:

1 – *п'єзопривод;*
2 – важільний мультиплікатор переміщення;
3 – шток;
4 – клапан керування;
5 – жиклер камери керування;
6 – мультиплікатор гідрозапирання

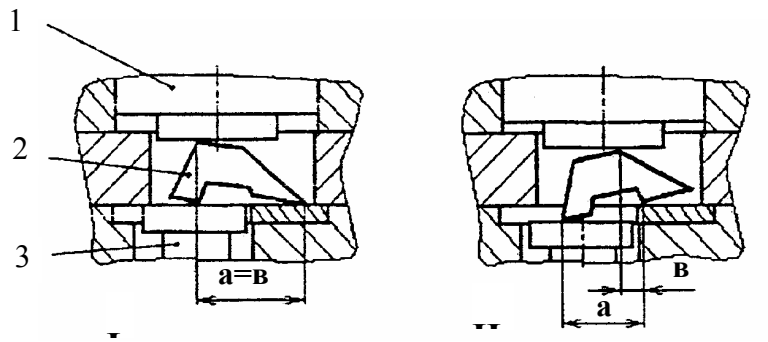


Рисунок 3.107 – Важільний мультиплікатор Siemens:

I – у вихідному положенні;
II – у час вприскування

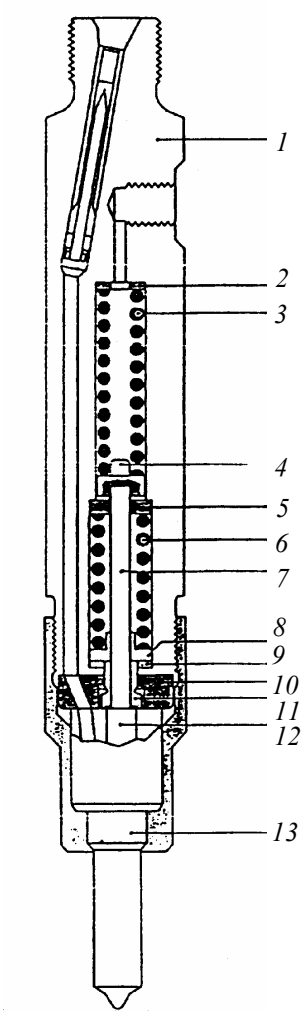


Рисунок 3.108 – Двопружинна форсунка Bosch

Для дизелів 90-х років минулого сторіччя з відкритою камерою згоряння та n=4000–4500 хв$^{-1}$ фірма Bosch випускає двопружинні форсунки (рис.3.108) [25]. Вони міняють закон паливоподачі: забезпечують ступінчастість переднього фронту характеристики вприскування за рахунок бистрішого відкриття голки 12 за першою пружиною 3, що запирає її через тарель 4 і шток 7. При дальшому підвищенні тиску голка вибирає зазор між верхнім торцем й піднутренням у нижньому торці втулки 11. Тоді через неї й тарель 8 голка стискує другу пружину 6. Ход по другій пружині обмежується упором буртика втулки 11 й проставкою 6. Таким чином, кероване вприскування надає можливість знизити жорсткість процесу згоряння на режимі холостого ходу з загальним зменшенням шуму від цього процесу, про що мова йшла вище.

Переходимо до вивчення сучасних насос-форсунок, які все ширше розповсюджуються як головні виконавчі пристрої КПСК паливоподачею.

Їх можна поділити на дві групи: без гідропосилення; з гідропосиленням.

До першої групи відноситься (рис.3.109) гідроелектрична насос-форсунка, розроблена фірмою General Motors. Постановці її на серійне виробництво передував великий обсяг довідних робіт, пов’язаних з розв’язанням складних проблем розробки надійного соленоїда, що забезпечуватиме високу швидкодію керуючого клапана, розробка запобігання відмов елементів від вібрацій, захисту від радіо- та магнітних полів тощо.

У даній насос-форсунці реалізовано керування одночасно дозуванням паливоподачі й КВВ у вигляді клапанного регулювання подачі замість традиційного золотникового. Слід підкреслити доцільність й ефективність установки електромагнітного керуючого клапана в насос-форсунку з механічним нагнітанням палива.

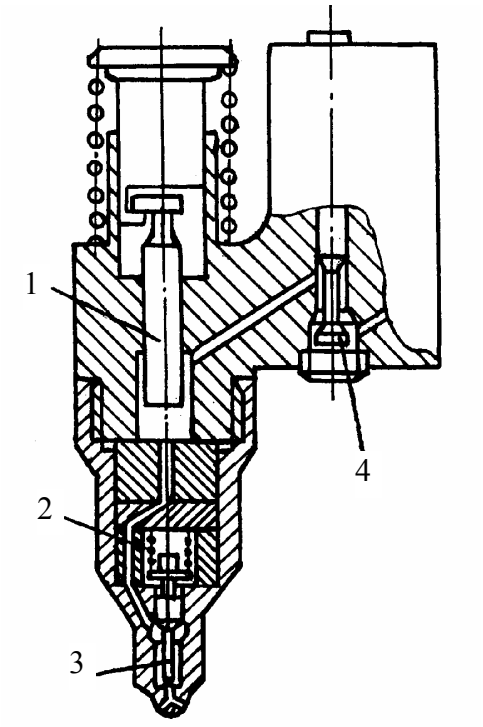


Рисунок 3.109 – Насос-форсунка з механічним приводом та електронним керуванням дозування паливоподачі й КВВ:
1 – плунжер; 2 – пружина;
3 – голка розпилювача;
4 – дозувальний клапан, керований електромагнітом

Перспективні значніше насос-форсунки з гідропосиленням тиску вприскування палива та комп'ютерним керуванням.

У високофорсованих дизелях необхідно прискорити вприскування збільшених циклових подач, аби не допустити зростання тривалості вприскування, зробити якісним розпилювання й сумішоутворення, що вкрай доцільно з точки зору паливної економічності дизеля. Це все вимагає зростання тиску вприскування до 150–200 МПа на швидкохідних дизелях з n до 4000 – 5000 хв$^{-1}$. Високі тиски вприскування також стають необхідними й тоді, коли сумішоутворення в умовах підвищеного нагрівання стінок камер згоряння повинно бути об'ємним, що потребує збільшення енергії вприскнутого палива.

Таким чином, підвищення тиску вприскування є одним з найбільш радикальних засобів вдосконалення сучасних масових двигунів транспорту і т.п.

В традиційних паливних насосах з механічним (кулачковим) приводом збільшення контактних напруг поміж кулачком й роликом штовхача обмежує збільшення тиску нагнітання. Для рядних ПНВТ й подовжених їхніх паливопроводів великого тиску значну небезпеку викликають коливання палива в цих трактах, що призводить до підтікання палива й небажаної (й некерованої) деформації характеристики вприскування. Ці проблеми успішно вирішуються застосуванням КПСК паливоподачі у поєднанні з гідропосилювачем (мультиплікаторним гідроприводом), що вбудовується в електрогідравлічну насос-форсунку, яка дозволяє реально отримувати надвисокі (більші 200 МПа) тиски вприскування без негативних наслідків (рис. 3.110). Тут мультиплікаторний гідропривід виконаний у вигляді східчастого плунжера 4. Поступання палива з акумулятору до ступінчастого

плунжеру здійснюється під час відкриття диференційного клапана 3. Електромагнітний клапан 2 служить для злива палива із порожнини над диференційним клапаном для його відкриття. Великий прохідний переріз у диференційного клапана та його швидке відкриття сприяють надходженню відносно значної кількості палива при високій швидкості руху східчастого плунжера й, отже, підвищенню тиску вприскування. Під час руху східчастого плунжера палива під високим тиском надходить у підголкову порожнину 5, відкіля через соплові отвори вприскується у камеру згоряння дизеля. Електромагнітний клапан 1 відкривається після закриття клапана 2, тобто працює з ним у протифазі. В період поміж вприскуваннями електромагнітний клапан 1 відкрито, що сприяє стабілізації тиску палива у підголковий простір 5 для запобігання підтікання палива через соплові отвори у камеру згоряння дизеля. Керування рухом електромагнітних клапанів 1 і 2 здійснюється за допомогою мікро-ЕОМ КПСК паливоподачі.

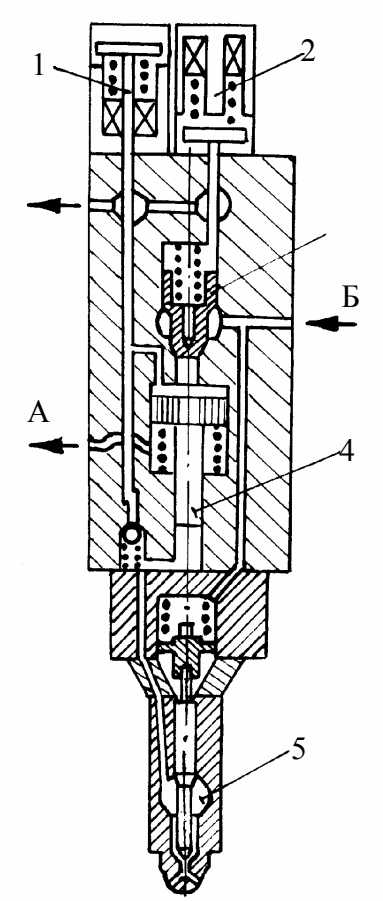


Рисунок 3.110 – Електрогідравлічна насос-форсунка з гідропосилювачем тиску вприскування палива
А – злив; Б – від акумулятора

Розглянута форсунка призначена для швидкохідних автотракторних дизелів.

На рис.3.111 показаний мікропроцесорний головний виконавчий пристрій паливоподачі у дизелях, розроблений фірмою ВКМ (США) у вигляді насос-форсунки з посилювачем тиску. Ця насос-форсунка забезпечує керування цикловою подачею, КВВ й тиском вприскування. Її функції реалізовані таким чином.

Особливістю конструкції є застосування вбудованого акумулятора, до порожнини якого з початку вприскування паливо нагнітається плунжером. Плунжер приводиться до руху від гідропоршня 3 мультиплікатора (посилювача). У сполученні з соленоїдним клапаном 4 створюється своєрідний електронний регулятор тиску, який застосовується для регулювання тиску вприскування залежно від n та N_e. За сигналами датчиків, що реєст-

рують ці параметри, формується командний імпульс, що діє на електронну схему соленоїда клапана.

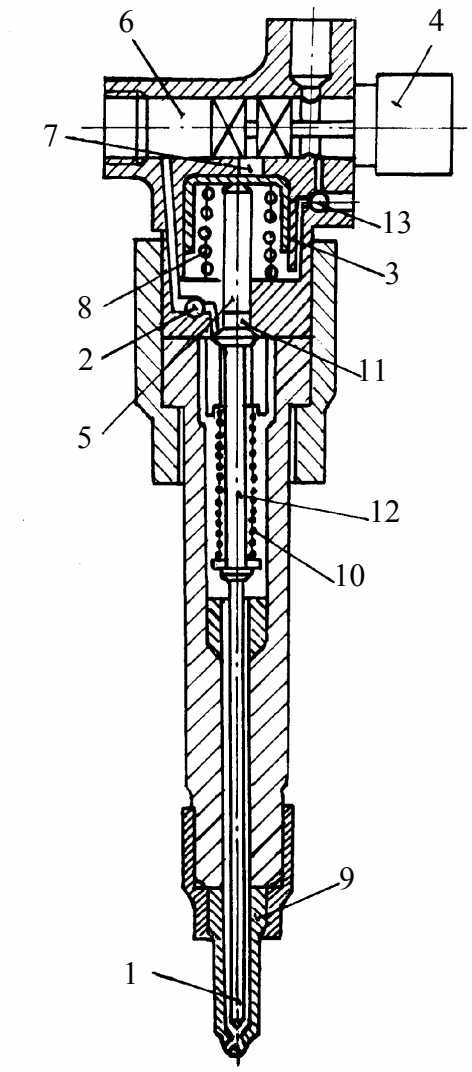


Рисунок 3.111 – Насос-форсунка з гідроприводом та електромагнітно-керованим клапаном:

1 – голковий клапан; 2 – зворотний клапан; 3,5 – поршень та плунжер мультиплікатора; 4 – соленоїдний клапанний вузол; 6 – акумулятор; 7 – надпоршнева порожнина; 8 – пружина мультиплікатора; 9 – розпилювач; 10 – пружина голчастого клапана; 11 – порожнина підсилювача; 12 – шток голчастого клапана; 13 – клапан зливу (зворотний)

Принцип роботи насос-форсунки такий. Для ініціювання вприскування модуль КПСК за сигналом про положення (кутове) колінчастого вала подає живлення на соленоїдний клапан 4, який, відкриваючись, забезпечує діяння тиску в акумуляторі 6 на поршень 3, безпосередньо поєднаний з плунжером 5 при співвідношенні площин 15:1. Плунжер переміщує потрібний об'єм палива, що вприскується до акумулятора, а його залишок стискує від тиску в акумуляторі до потрібного тиску вприскування; таким чином, реалізується мультиплікаторний ефект у розпилювачі.

Голчастий клапан упродовж цього часу не піднімається завдяки посиленому вхідному тиску, що докладається до верхньої частини пристрою. Такий тиск зростає до потрібного рівня, поки живиться струмом соленоїдний клапан. Акумуляторна камера поєднана з порожниною гідропосилювача зворотним клапаном 2. Вприскування починається, коли зупиняється живлення соленоїда, дозволяючи тим самим поршню і плунжеру зайняти вихідне положення під діянням пружини. Циклова подача палива регулюється шляхом зміни тиску в акумуляторі, яке прямо пропорційне тиску в магістралі.

Особливість цієї КПСК в тому, що може бути змінена і циклова подача палива для окремого циліндра шляхом регулювання тривалості живлення соленоїдного вузла 4, що впливає на величину тиску, який досягається у гідромультиплікаторі. Тривалість вприскування залежить тільки від моменту його початку, оскільки кінець вприскування визначається характеристикою форсунки.

Переваги цієї КПСК зрозумілі з рис.3.112, де зіставлені характеристики вприскування підсистеми з насос-форсункою фірми ВКМ й традиційною КПСК (ПНВТ-трубопровід-форсунка) автомобільного дизеля при $n = 2300$ хв$^{-1}$.

До недоліків цієї підсистеми слід віднести не досить чітку відсічку палива в кінці подачі й падіння тиску при вприскуванні з зменшуваними $g_{ц.}$

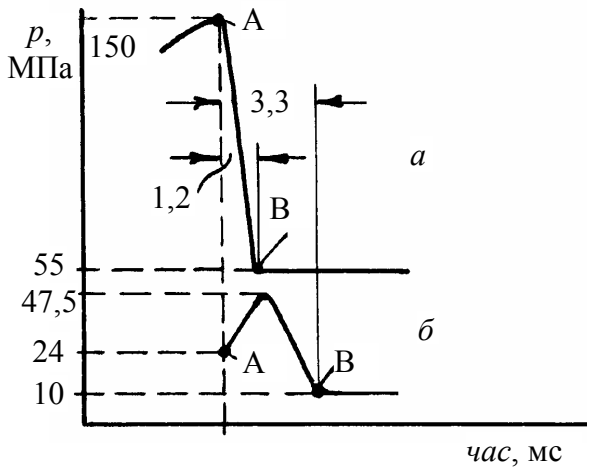


Рисунок 3.112 –Характеристики вприскування КПСК фірми ВКМ (а) й традиційної підсистеми паливоподачею (б):
A,B – відповідно початок і кінець вприскування

На кінець наведемо сучасні, найбільш вдалі й розповсюджені насос-форсунки серійного виробництва[25].

На рис. 3.113 наведена насос-форсунка, призначена для дизелів вантажних автомобілів. Зараз вже понад 4 млн таких насос-форсунок працюють на транспортних дизелях, в тому числі військового призначення.

На початку та в кінці руху плунжера 3 клапан 2 відкритий, що забезпечує злив палива із плунжерної порожнини 4. Закриття його на короткий час обумовлює активний хід плунжера, тобто циклову подачу. Момент його включення дозволяє в широких межах змінювати КВВ, зменшуючи емісію викидів, поліпшуючи пуск, покращуючи характеристики дизеля, в тому числі забезпечуючи зниження експлуатаційної витрати палива на 5-8 %.

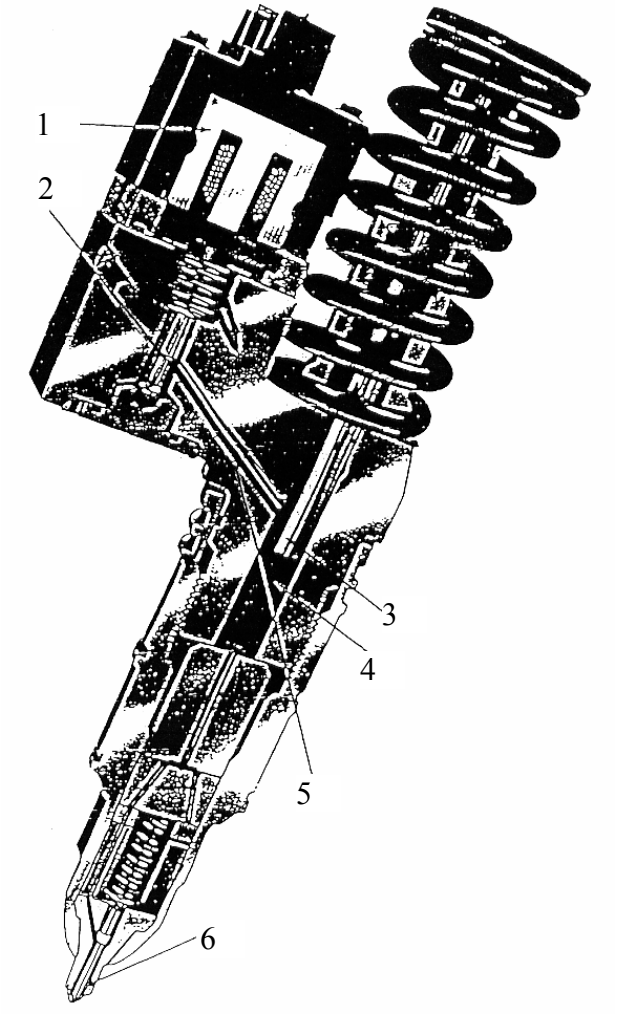


Рисунок 3.113 – Насос-форсунка з КПСУ фірми Detroit Diesel Allison:
1 – електромагніт; 2 – тарельчастий управляючий клапан; 3 – плунжер; 4 – плунжерна порожнина; 5 – канал керування; 6 – носик розпилювача

Наповнення плунжерної порожнини здійснюється також через клапан. Відсутність розріджувань при наповненні й короткі нагнітальні канали дозволяють обійтися без нагнітательного клапана. Керувальний клапан є частково гідравлічно розвантаженим. Його власна частота 10 кГц. Цього досить для організації двофазного вприскування (тобто зміни закону паливоподачі). Останній знижує шумність процесу згоряння в дизелі і робить надійнішим впуск, про що вище вже йшлося.

Насос-форсунки фірми Lucas (рис.3.114) призначені для малотоксичних дизелів з відкритою КС легкових автомобілів, вантажівок, позашляховиків. Такі насос-форсунки застосовуються на дизелях Volvo, John Deer, Detroit Diesel [25].

Конструкція насос-форсунки дещо складніша, ніж попередня: паливо надходить та зливається через фільтри 7 й порожнини, що оперізують корпус.

Канали високого тиску В і С поєднують клапан 14, розпилювач 10 з плунжерною порожниною, а канал А використовується для злива палива через клапан.

Наповнення плунжерної порожнини здійснюється через клапан та впускне вікно 6.

Забезпечена запальна доза двофазного вприскування тривалістю до 8 % від загальної, що відповідало 0,5 мс.

Насос-форсунка разом з КПСК паливоподачі забезпечує за допомогою швидкохідного клапана гнучке керування подачею й КВВ, в тому числі на неусталених режимах перехідних процесів. Забезпечено досконале сумішоутворення на холостому ході й при низьких навантаженнях дизеля.

Розгляд сучасних насос-форсунок показує, що при їх розробках використані останні досягнення моторобудування й перспективні спрямування.

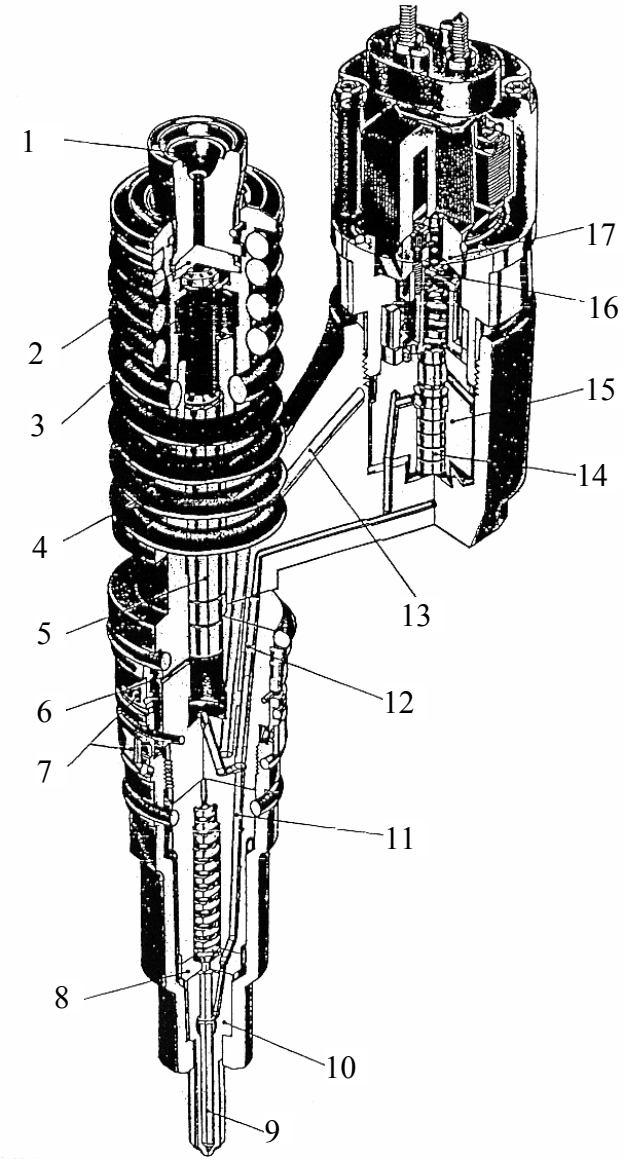


Рисунок 3.114 – Насос-форсунка з КПСК фірми Lucas:

1 – головка штовхача;
2 – подушка штовхача;
3 – пружинна шайба;
4 – воротня пружина;
5 – плунжер;
6 – впускне вікно;
7 – кільцеві фільтри;
8 – проставка;
9 – голка;
10 – розпилювач;
11 – канал С;
12 – канал В;
13 – канал А;
14 – канал керування зливом;
15 – напрямна пружина;
16 – воротня пружина;
17 – магнітопровід

Виконавчі пристрої подачі палива до форсунок

До них відносяться, наприклад, виконавчі пристрої КПСК, які обслуговують ЕР з традиційними ПНВТ. Командні імпульси КПСК паливоподачі за допомогою виконавчих пристроїв перетворюються в механічне переміщення рейки паливного насоса.

Як виконавчі механізми, що безпосередньо переміщують рейки ПНВТ, застосовуються пропорційні електромагніти, моментні, лінійні або шагові електродвигуни. Вони звичайно служать за безпосередній привід для дозатора палива у насосах з невеликими переставним зусиллями, наприклад, у малорозмірних рядних ПНВТ та насосах розподільного типу фірм Bosch (рис. 3.115), Lucas та інш.

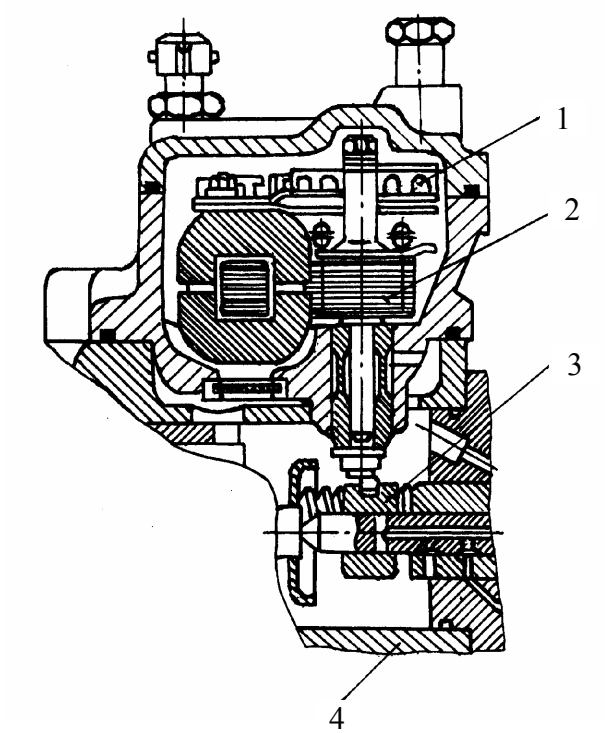


Рисунок 3.115 – Електромагнітний виконавчий механізм прямої дії (привід дозатора) насоса розподільного типу фірми Bosch:

1 – датчик дозатора;
2 – виконуючий пристрій пересування дозатора;
3 – дозатор;
4 – корпус клапана зміни КВВ з електромагнітним приводом

При підвищених пересувних зусиллях дозуючого органу у рядних багатоплунжерних насосах великих розмірів застосовуються гідромеханічні виконавчі механізми, керовані золотником, який має привід від електричних пристроїв (рис.3.116). Поршень 2 електромотора пересувається під дією робочої рідини, тиск якої у робочих порожнинах серводвигуна керується електрогідравлічним клапаном, що складається із золотникової пари та електромагніта.

На сьогодні розроблено багато різноманітних виконавчих пристроїв для обслуговування органів, що керують подачею палива в ПНВТ, при їх використанні в КПСК.

Загальними їх ознаками є надійність і стабільність при тривалій експлуатації, потрібна швидкодія, допустимі габарити і маса тощо. Цим і визначаються конструктивні характеристики означених виконавчих пристроїв.

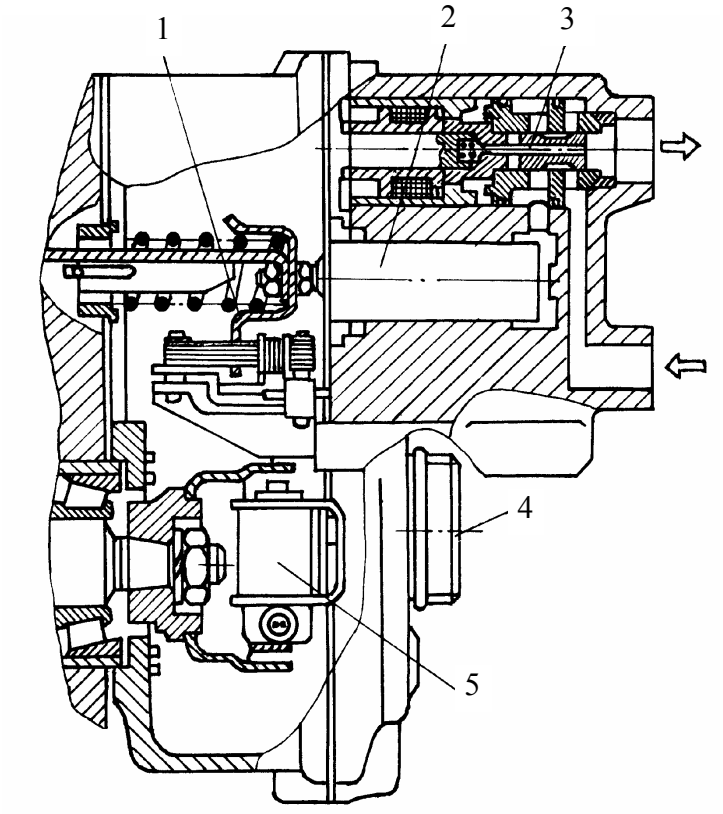


Рисунок 3.116 – Електромагнітний виконавчий механізм непрямої дії з гідроприводом паливного насоса Bosch:

1 – датчик положення (ходу) рейки;
2 – поршень;
3 – керуючий золотник;
4 – штепсельний роз'єднувач;
5 – датчик частоти циклів.

В КПСК вприскуванням палива з акумулятором високого тиску, в тому числі з гідропосилювачем, для створення постійного тиску в акумуляторі використовуються ПНВТ традиційного виконання. Їх особливості вивчаються при розгляді конструкцій дизелів різних типів.

У схемах КПСК використовуються паливопідкачувальні насоси, фільтри, паливні охолоджувачі тощо. Роль стабілізаторів тиску в акумуляторах КПСК паливоподачі в дизелях відіграють зворотні клапани (рис.3.111). Конструкції цих елементів КПСК загальновідомі.

Електронні виконавчі пристрої. Розглянемо виконавчі пристрої мікропроцесорної частини КПСК паливоподачі в дизелях.

При розробці таких пристроїв широко використовується багатющий

досвід створення КПСК подачею палива у бензинових двигунах, оскільки у принципі КПСК паливоподачі (вприскування) слабо залежить від способу спалахування.

При будь-якому способі спалахування горючої (робочої) суміші електронні виконуючі пристрої повинні включати пристрої розподілу – формувач й розподілювач командних імпульсів по циліндрах у відповідності з порядком їхньої роботи на двигуні.

Природно, що до їх складу входять, окрім мікро-ЕОМ, також пристрої сполучення, ОЗП, ПЗП, генератор тактових імпульсів і стабілізатор електроживлення, вихідні каскади.

Безконтактні пристрої розподілу командних пристроїв, що застосовуються в КПСК дизелів, потрібні тим, що описані вище у розділі 3.1.5 . Там же розглянуті і біполярні формувачі командних імпульсів, що дозволяють забезпечувати високу швидкодію клапанів керування форсунок з електронним керуванням.

Як і для бензинових ДВЗ, інші пристрої, що обслуговують мікропроцесорну схему (пристрої сполучення, ОЗП, стабілізатори електричного живлення, посилювачі потужності та ін.), відбираються з ряду уніфікованих електронних пристроїв, описаних у відповідній літературі.

Зупинимося на специфіці побудови електронних виконавчих пристроїв КПСК паливоподачею у дизелях. Мова йдеться про необхідність подолати труднощі керування паливоподачею при тисках до 200 МПа й вище. Такий височенний рівень тиску вприскування не може й зіставлятися з низьким тиском паливоподачі у бензинових ДВЗ, що звичайно не перевищує 0,3 МПа.

Електронні виконавчі пристрої КПСК спроможні подолати такі труднощі. В першу чергу – забезпечити надійність й експлуатаційну стабільність дозувальних пристроїв. Прикладом є використання спеціального електромагнітного клапана, який забезпечує зняття функцій відсічки й організації початку вприскування з плунжера насос-форсунки (форсунки) за рахунок пропускання палива із зони високого тиску. В результаті підвищується ресурс роботи плунжера при можливості подальшого збільшення тиску вприскування.

Стабілізації характеристик вприскування у період експлуатації сприяє введення додаткового каналу адаптації паливоподачі залежно від зносу

прецизійних пар паливної апаратури. Цей канал вбудовується в схему КПСК вприскуванням. У розробці, наприклад, фірми Bosch подібна адаптація здійснюється застосуванням датчика зворотного зв'язку по КВВ.

Контрольні запитання та завдання

1. Сформулюйте резерви поліпшення експлуатаційної паливної економічності й інших показників технічного рівня й конкурентноздатності ДВЗ. Яке місце в них належить КПСК?
2. Які вимоги ставляться до КПСК паливоподачею у бензинових двигунах та в дизелях?
3. Які форми реалізації КПСК у сучасних бензинових двигунах та дизелях?
4. Які особливості КПСК паливоподачею й запаленням у бензинових двигунах?
5. Які особливості КПСК паливоподачею й запаленням у дизелів?
6. Назвіть та поясніть датчики КПСК паливоподачею й запаленням двигунів з іскровим запаленням.
7. Назвіть та поясніть датчики КПСК паливоподачею й запаленням дизелів.
8. Проаналізуйте виконавчі пристрої КПСК паливоподачею й запаленням двигунів з іскровим запаленням.
9. Проаналізуйте виконавчі пристрої КПСК паливоподачею й запаленням дизелів.
10. Які типи вприскувальних форсунок використовуються у КПСК паливоподачею ДВЗ з іскровим запаленням?
11. Які типи вприскувальних форсунок використовуються у КПСК паливоподачею дизелів.
12. Охарактеризуйте насос-форсунки сучасних дизелів з комп'ютерним керуванням.
13. Проаналізуйте виконавчі пристрої подачі бензину до вприскувальних форсунок.
14. Проаналізуйте виконавчі пристрої подачі дизельного палива до вприскувальних форсунок.

15. Які виконавчі пристрої застосовуються у мікропроцесорній частині КПСК паливоподачею та запаленням бензинових двигунів?

16. Які виконавчі пристрої застосовуються у мікропроцесорній частині КПСК паливоподачею та запаленням дизелів.

17. Які заходи вживаються для підвищення швидкодії електрокерованих форсунок ДВЗ з іскровим запаленням?

18. Які заходи вживаються для підвищення швидкодії електрокерованих форсунок дизелів.

19. Яку роль відіграють КПСК у адаптації двигуна з іскровим запаленням до моделі експлуатації, зовнішніх (кліматичних) умов тощо?

20. Яку роль грають КПСК у адаптації дизелів до моделі експлуатації, зовнішніх (кліматичних) умов тощо?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шеховцов А.Ф. Компьютерные системы управления ДВС: Уч. пособие. – Харків: ХДПУ, 1995. – 256с.

2. Газетин С., Васильев М.. Впрыск. // Автопилот, 1995. – №10. – С.71–75.

3. Будем непосредственнее (новый двигатель Mitsubishi). // Реферат. – М.: Авторевю, 1996. – №2. – С.22–23.

4. Эфрос В.В. и др. Системы центрального впрыска топлива. – М.: Автомобильная промышленность, 1996. №9. – С.20–21.

5. Двигатели автомобилей BMB 316/318i. // Реферат. – М.: Моторостроение за рубежом, 1999. – №8. – С.18–24.

6. Автомобильный справочник (Bosch): Пер. с англ. Первое русское издание. – М.: Изд-во «За рулем», 2000. – 896с.

7. Покровский Г.П.. Потенциальные возможности применения биосистем и искусственного интеллекта для управления рабочими циклами автомобильных двигателей.. – С. – П.: Двигателестроение, 2002. – №2. – С. 6–7.

8. Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», – М.: ВИНИТИ, 2001, №5.

9. Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», – М.: ВИНИТИ, 2001, №7.

10. Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», – М.: ВИНИТИ, 2001, №2.

11. Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», – М.: ВИНИТИ, 2001, №4.

12. Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», – М.: ВИНИТИ, 2002, №8.

13. Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», – М.: ВИНИТИ, 2002, №2.

14. Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», – М.: ВИНИТИ, 2002, №4.

15. Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», – М.: ВИНИТИ, 2001, №11.

16. Autoelectrik, Autoelectronic am Ottomotor/Bosch. – 2. Ausg. – Düsseldorf: VDI – Verlag, 1994. – 380s.

17. Спинов А.Р. Системы впрыска бензиновых двигателей. – М.: Машиностроение, 1995. – 112с.

18. Автомобильная промышленность, 1996. – №9.

19. Драгомиров С.Г. Современные системы топливоподачи автомобильных бензиновых двигателей. – С. – П.: Двигателестроение, 1999. – №4.

20. Драгомиров С.Г. и др. Системы впрыска бензина с пленочно-вихревым смесеобразованием/ Совершенствование мощностных, экономических, экологических показателей ДВС // Материалы VII международного научно-практического семинара. – Владимир: 1999. – С.20–23.

21. O. Probst. Bosch Fuel Injection and Menegement. – Massachussetts. 1991.

22. Н.А. Иващенко, Л.В. Грехов и др. Дизельные топливные системы с электронным управлением: Уч.-практ. Пособие. – Барнаул: Изд-во Алт. ГТУ, 2000. – 111с.

23. Богачевский А.Б., Бородин Ю.С. и др. Микропроцессорная система управления частотой вращения и мощностью дизель-генераторной установки дизель-поезда ДЭЛ – 01 // Вестник НТУ «ХПИ» - Тематический

сб. научн. работ «Двигатели внутреннего сгорания». Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – №26. – С.52–58.

24. Фурман В.В. и др. Перспективные системы автоматического управления дизелями ОАО «Саратовдизельаппарат». – С.-П.: Двигателестроение, 1997. – №3. – С.34–36.

25. Современные подходы к созданию дизелей для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков / А.Д. Блинов, П.А. Голубев и др. / Под. ред. В.С. Папонова и А.М. Минеева. – М.: НИЦ «Инженер», 2000. – 332 с.

26. В.М. Гареев, В.А. Карачинов. Бортовой волоконно-оптический измеритель расхода топлива. // Автомобильная промышленность. – 1995. – №11. – с. 35–36.

27. Жилин В.Г. Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 112с.

Глава 4. ЕЛЕКТРОННЕ КЕРУВАННЯ ПОВІТРОПОСТАЧАННЯМ У ДВИГУНАХ

Керування робочим процесом двигуна має кінцевою метою визначення для кожного експлуатаційного режиму оптимального складу робочої суміші, який оцінюється коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha_{опт}$.

Оптимізація α ведеться за обраними критеріями (середня експлуатаційна витрата палива, токсичність викидів, літрова потужність, теплонапруженість деталей та інш).

Досвід свідчить, що регулювання α треба здійснювати як за рахунок паливоподачі, так і за рахунок повітропостачання. В іншому випадку можна не задовольнити обрані критерії. Наприклад, форсування двигуна за літровою потужністю за рахунок $g_ц$ при незмінному повітряному заряді циліндра неминуче знижує надійність двигуна, тоді як одночасне підвищення $g_ц$ і повітряного заряду в циліндрі взагалі не змінює α.

Керування робочим процесом двигуна потребує комплексного регулювання паливо- повітряпостачання.

Тому проблема покращення повітроподачі в двигунах із застосуванням електронного керування потребує всілякої уваги.

4.1. Шляхи поліпшення повітропостачання в ДВЗ та вимоги до КПСК

Доцільно розглянути ці питання окремо для дизелів та бензинових двигунів.

4.1.1. Проблеми повітряподачі у дизелях

Одним з напрямків розвитку моторобудування є форсування двигунів за літровою потужністю за рахунок організації ефективного вигоряння

збільшених циклових подач палива, що в першу чергу вимагає наддуву, в тому числі дизелів.

Застосування для наддуву турбокомпресора, наприклад, надало можливість значно поліпшити потужність дизеля без збільшення робочого об'єму й кількості циліндрів.

Крім того, збільшення кількості повітря, яке надходить у двигун, дозволяє працювати на збіднених сумішах ($\alpha > 1$), що знижує вихід токсидів CO й C_nH_m з відпрацьованими газами.

Ефективність наддуву залежить від ефективності роботи турбокомпресора.

Однак турбокомпресор працює з максимальним КПД тільки на розрахунковому режимі, яким для більшості двигунів є режим номінальної потужності. При роботі ж дизеля за експлуатаційною характеристикою у міру відхилення навантаження й інших параметрів (частоти обертання колінчастого вала й інш.) КПД турбокомпресора знижується, відповідно, падає і ефективний КПД дизеля.

Зниження КПД турбокомпресора у нерозрахункових умовах, а також неузгодженість гідравлічної характеристики двигуна з розбіжними характеристиками турбіни і компресора призводять до того, що робота двигуна з турбонаддувом на знижених швидкісних режимах супроводжується зростанням питомої витрати палива й неможливістю отримання бажаних значень крутного моменту на колінчастому валу. Тому у дизеля з некерованим газотурбінним наддувом при роботі, наприклад, за зовнішньою характеристикою, коефіцієнт пристосованості (відношення максимального крутного моменту на частковому швидкісному режимі до $M_{e_{\text{ном}}}$) й швидкісний коефіцієнт (відношення частот обертання колінчастого вала, відповідних вказаним крутним моментам) нижчі, а зниження ефективного КПД навіть більше, ніж у дизеля без наддуву. Погіршуються також показники дизеля на пускових режимах й при перехідних (розгінних чи скидних процесах) у зв'язку з інерційністю системи наддуву й відставанням зростання тиску наддуву від динаміки росту паливоподачі.

Сказане можна проілюструвати швидкісними характеристиками дизеля, обладнаного турбокомпресором, доцентрова турбіна якого має керований сопловий апарат, а компресор – керований дифузор (рис.4.1). З графіків видно, що характеристики, отримані при визначеній й постійній на-

стройці турбіни і компресора, показують, що з метою підвищення коефіцієнта пристосованості дизеля турбокомпресор можна реально настроювати не тільки на номінальний режим (характеристики 2), а й на середній швидкісний режим (характеристики 3) або на малий швидкісний режим (характеристики 4). Останні два способи настроювання турбокомпресора можуть дещо поліпшити експлуатаційні характеристики дизеля. Але одночасно вони призведуть до небажаних наслідків, оскільки при переході з обраного оптимального режиму настройки на режими з підвищеною кутовою швидкістю колінчастого вала недопустимо збільшиться частота обертання ротора турбокомпресора й, значить, тиск згоряння p_z, а при переході на режими з пониженою частотою обертання, як правило, недопустимо зростає температура відпрацьованих газів.

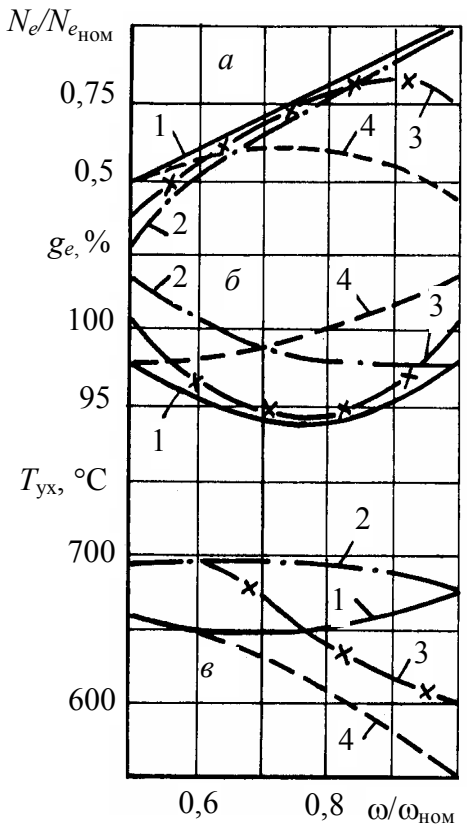


Рисунок 4.1 – Зміни швидкісних характеристик дизеля при визначеній настройці турбокомпресора (а – потужність; б – g_e; в – температура відпрацьованих газів):

1 – керований наддув; 2 – при настройці ТК на номінал; 3 – при настройці ТК на режим $M_{e\text{ном}}$ (ω=0,75$\omega_{ном}$); 4- при настройці ТК на режим $M_{e\text{ном}}$ (ω = 0,5$\omega_{ном}$)

Такі недоліки некерованого наддуву виявляються ще більш виразно (чіткіше) у міру збільшення на перспективних дизелях їхньої літрової потужності, ступеня наддуву та розширення діапазону робочих режимів.

З урахуванням сказаного, важливим засобом, який дозволяє поліпшити узгодженість характеристик окремих елементів комбінованих ДВЗ у широкому діапазоні їхніх швидкісних й навантажених режимів є застосування керованого наддуву.

Продовжимо аналіз рис.4.1. Характеристику 1 можна, наприклад, реалізувати при обладнанні дизеля системою комп'ютерного керування наддуву при автономному ТК, турбіна якого має поворотний лопатний сопловий апарат, а компресор – поворотний лопатний дифузор. По-

рівняння обвідної характеристики 1 з характеристиками 2,3,4 наочно ілюструє переваги керованого наддуву.

Даний спосіб керування турбонаддувом є й найбільш складним, тому що потребує вибора залежно від режиму роботи двигуна таких положень лопаток соплового апарата турбіни й дифузора компресора, при яких цей дизель повинен розвивати необхідний крутний момент, компресор повинен працювати усталено (без помпажу) у всьому діапазоні витрати повітря через дизель. Параметри робочого процесу в циліндрах й ТК (температура відпрацьованих газів $T_г$, максимальний тиск згоряння p_z, частота обертання ротора ТК ($\omega_{тк}$), питома витрата палива g_e та інш.) не повинні виходити за межі встановлених обмежень.

Все це свідчить про безумовну корисність застосування КПСК наддувом, особливо для тих перспективних дизелів, що працюють у широкому діапазоні швидкісних й навантажувальних режимів, перш за все – автотракторних.

На більшості силових установок, перш за все транспортних, подібне керування не може бути іншим ніж на основі КПСК, тому що зміни швидкісних режимів в умовах експлуатації трапляються настільки часто, що ручне регулювання не дозволить отримати необхідний ефект. Тим більше це стосується керування перехідними процесами дизеля, яке без швидкодіючих засобів керування взагалі неможливе.

Приходимо до загального висновку, що всі такі й інші труднощі (наприклад, урахування багатьох впливаючих факторів) поліпшення повітроподачі у сучасних дизелях з наддувом ефективно можуть бути подолані й успішно долаються за допомогою КПСК наддувом. Вона єдина здатна забезпечити системну й повну оптимізацію повітропостачання за обраними критеріями при заданих обмеженнях й для конкретної моделі експлуатації дизеля визначеного призначення.

Підкреслимо, що керування повітропостачанням у двигунах невідривно від керування паливоподачею в них. Це випливає з того, що метою такого комплексного керування, про що мова йшла вище, є забезпечення оптимального $\alpha_{опт}$. Тому обидві КПСК (повітро- й паливоподачі) повинні діяти узгоджено у складі єдиної КСУ ДВЗ, керуючись сигналами головних датчиків, датчиків адаптації та діагностування.

Вимоги до КПСК паливоподачею у дизелях обумовлені способом та

схемою керування наддувом. Такі способи і схеми вивчаються в спеціальній дисципліні, присвяченій системам наддуву ДВЗ.

Однак зупинимося на їх особливостях, оскільки їх треба враховувати при побудові сучасних КПСК повітроподачею у дизелях.

Способи керування можна поділити на дві групи:

→ *зовнішнє керування*, коли зовнішнім діянням на умови функціонування лопатних машин змінюється положення режимних точок на характеристиках їх роботи при незмінності самих характеристик;

→ *внутрішнє керування*, у результаті якого отримуються нові характеристики роботи лопатних машин.

Точно кажучи, дроселювання повітря й інші засоби зовнішнього керування, як показали експерименти, дещо змінюють характеристики компресора і турбіни. Тому відзначене поділення на групи здається дещо умовним.

До зовнішнього керування відносяться:

- дроселювання повітря на вході в компресор або на виході з нього;
- перепуск повітря з нагнітального патрубка компресора в усмоктувальний; стравлювання його в атмосферу або на вхід в турбіну;
- дроселювання газу при вході в турбіну або на виході з неї;
- перепуск частини випускних газів у атмосферу поза турбіною.

Отримали поширення в КПСК повітряпостачанням й такі способи внутрішнього керування:

- зміна кута α_1 входу повітряного потоку на лопатки колеса компресора, що забезпечується вхідним направляючим апаратом;
- поворот лопаток дифузора компресора;
- поворот лопаток вхідного направляючого апарата й лопаточного дифузора компресора;
- зміна висоти каналу дифузора;
- зміна ступеня парціальності або імпульсності турбіни;
- зміна висоти соплового апарата турбіни;
- зміна кута α_1 в турбінах з регульованим сопловим апаратом;
- одночасне регулювання турбіни та компресора.

Значна кількість способів керованого наддуву свідчить про увагу до цього питання, але з іншого боку й про відсутність єдиної думки щодо оптимальності тієї чи іншої концепції керування.

Але у всякім разі, з енергетичної точки зору найбільш доречні способи внутрішнього керування, які забезпечують оптимальну, без втрат енергії відпрацьованих газів спільну настройку дизеля й ТК за будь-яких умов експлуатації. Під оптимальною розуміють таку настройку, при якій забезпечуються максимальні значення КПД турбопоршневого дизеля на кожному експлуатаційному режимі.

Підкреслимо, що для сучасних найбільш масових автотракторних турбокомпресорів, з урахуванням тенденцій зменшення їхніх габаритів з одночасним підвищенням тиску наддуву, застосування зовнішніх способів керування поєднано із значними труднощами у зв'язку із складністю та коштовністю забезпечення надійної роботи пристроїв керування при досить малих розмірах їхніх елементів. З точки зору простоти і дешевизни зовнішні способи керування наддувом більш придатні для КПСК повітряподачі швидкохідних дизелів; однак за економічними міркуваннями вони програють, тому що основані на неповному використанні енергії відпрацьованих газів на турбіні або ступеня підвищення тиску повітря в компресорі.

Проведений аналіз шляхів поліпшення повітряподачі у дизелях з наддувом дозволяє сформулювати основні вимоги до відповідних КПСК:

- ❖ забезпечення потрібного узгодження характеристик турбокомпресора й дизеля за рахунок настройки ТК на режим $M_{e\max}$ з частковим керованим перепуском відпрацьованих газів перед турбіною на режимах, близьких до номінального, що підвищує коефіцієнт пристосованості автомобіля;
- ❖ забезпечення високого значення коефіцієнта запасу крутного моменту за рахунок соплового регулювання компресора та (або) турбіни ТК при відповідному корегуванні паливоподачі. Наприклад, впровадження керованого наддуву на дизелі 6ЧН15/18 підвищило коефіцієнт пристосованості κ_n до 1,75 при $n_{Me=\max}=0{,}4n_{\text{ном}}$. Фірма Percins на двигуні з керованим наддувом забезпечила $\kappa_{\text{п}}$ більше 2,0, що вражає;
- ❖ застосування соплового регулювання турбіни у цілях розгону ТК. Здійснене, наприклад, зменшення площини прохідного перерізу соплового апарата турбіни веде до збільшення тиску газів перед нею й, значить, сприяє підвищенню потужності на валу ТК та більш інтенсивному розгону агрегату наддуву. Результатом такого керування є більш повне за-

безпечення двигуна потрібною для нового режиму кількістю повітря. По мірі завершення перехідного процесу площина прохідного перерізу соплового апарата зростає до потрібного рівня на кінцевому режимі цього процесу;

❖ забезпечення прискорення розгону ТК керованою подачею пари у проточну частину турбіни для підкрутки ротора ТК. Пар отримують або вприскуванням води до впускного колектора (крізь спеціальні форсунки), або шляхом утилізації теплоти, що відводиться в систему охолодження двигуна та з випускними газами. Подачу пари із утилізованого акумулятора (де утримується пароводяна суміш під тиском при температурі більше 100°С) на турбіну можна реалізувати через електромагнітний клапан, який відкривається у момент початку перехідного процесу; при відкритті клапана (в результаті різкого падіння тиску) в акумуляторі відбувається миттєве пароутворення. Найбільш зручно реалізувати цей спосіб при високотемпературному охолодженні дизеля. Експеримент показав, що такий спосіб керування повітроподачею скорочує перехідний процес накиду навантаження біля 60 %.

Відзначені вимоги охоплюють способи керування повітроподачею у сучасних двигунах, що отримали розповсюдження.

По мірі розробки нових способів такого керування необхідно сформулювати й нові вимоги до КПСК, які призначені їх реалізувати.

4.1.2. Особливості повітропостачання у бензинових двигунах

Наддув при одночасному зменшенні робочого об’єму (літражу) двигуна є альтернативною стратегією поліпшення паливної економічності й бензинових ДВЗ.

При цьому основна перевага полягає в тому, що та ж віддача двигуна із зменшеним робочим об’ємом реалізується при більшому відкритті дроселя, внаслідок чого автомобільний двигун працює більшість часу в зоні режимів, які відповідають найменшим питомим витратам палива; резерв потужності для розгону і форсованих режимів забезпечується наддувом.

Природно спрощується створення на основі вихідної моделі спектра двигунів, які охоплюють широкий діапазон потужностей; з’являється можливість отримати ті ж ефективні показники двигуна при відносно меншому ступені стиску ε, що ослаблює обмеження щодо якості використаних па-

лив. Наприклад, у процесі розробки фірмою Volkswagen перспективного бензинового двигуна з наддувом (тиск наддуву p_s = 150 кПа, ε = 8,2) було показано, що в двигуні без наддуву ε = 11,0 при практичній рівності тисків і температур кінця стиску (без охолодження наддувного повітря) індикаторний КПД суттєво нижче, ніж у першого двигуна на основних експлуатаційних режимах. Крім зазначеного вище, це пов'язане із тим, що при правильному виборі камери згоряння наддув веде до додаткового генерування турбулізації згоряння без допоміжних заходів. Вживаються заходи щодо поліпшення динамічних характеристик двигуна з наддувом, наприклад, за рахунок зменшення об'єму його впускного тракту і моменту інерції ротора ТК.

Другою задачею, яку дозволяє вирішувати турбонаддув, є підвищення прийнятності, що для автомобільних бензинових двигунів не менш важливо, ніж для транспортних дизелів.

На відміну від дизеля, де регулювання потужності здійснюється зміною подачі палива, у бензиновому двигуні аналогічні дії не припустимі, оскільки склад горючої суміші був би на долевих режимах настільки бідним, що спалахнення її було б негарантованим. Тому подача палива на режимах максимальної частоти обертання ТК повинна бути обмежена, тобто повинна керуватися.

Із ряду способів керування наддувом в бензинових двигунах отримує поширення байпасування (перепуск) повітря у зв'язку зі зручністю електронного керування таким повітропостачанням та практичною недоречністю спроб регулювати власне лопатні машини такої малої розмірності. У звичайних підсистемах весь повітряний заряд проходить у впускний трубопровід двигуна через компресор та регулюється дроселем на вході (виході). В підсистемі керованого наддуву на часткових навантаженнях повітря направляється через байпасний канал (зі своєю заслінкою) до впускного трубопроводу. При конкретному навантаженні основна заслінка пропускає через компресор тільки частину повітря; при високих навантаженнях відсічна заслінка закриває байпасний канал, тому все повітря направляється у двигун через компресор.

Бачимо, що проблеми покращення повітропостачання у бензинових двигунах по суті аналогічні таким у дизелях, оскільки, перш за все, пов'язані з забезпеченням найліпшої прийнятності двигуна.

Природно, КПСК повітроподачею у двигунах з іскровим запаленням повинні у принципі відповідати вимогам до таких підсистем для дизелів, що сформульовані у розділі 4.1.1.

Але при цьому треба врахувати, що наддувом у бензинових двигунах почали займатися значно пізніше у порівнянні з дизелями транспортного типу. Тому для таких двигунів використовується обмежена поки що кількість способів керованого наддуву (при малому його тиску). Це й не дозволяє поширити на КПСК повітроподачею бензинових двигунів всі вимоги й конструктивні рішення, притаманні комп'ютерним підсистемам керування цим процесом в дизелях.

Певно, сьогодні достатньо обмежитися такою вимогою до КПСК повітропостачанням в бензинових двигунах: забезпеченням потрібної відповідності характеристик ТК й проточної частини двигуна за рахунок настройки турбокомпресора на режим максимальної потужності (або $M_{e\max}$) з частковим керованим перепуском повітря поза компресором у випускний трубопровід на неномінальних режимах; це сприяє підвищенню як прийнятності, так і експлуатаційної паливної економічності двигуна.

В процесі розробки нових способів керування повітряподачею у малорозмірних надшвидкохідних двигунах з іскровим запаленням треба суттєво розширяти вимоги до КПСК цими процесами, як і заходи щодо їх реалізації.

4.2. Основи побудови КПСК повітроподачею в ДВЗ

Вище особливо підкреслювалося, що проблеми керування повітропостачанням у ДВЗ невідривно пов'язані зі способами керування паливоподачею в них, бо кінцевою метою керування робочим процесом є оптимізація α на експлуатаційних режимах, який визначається співвідношенням у циліндрі двигуна поміж зарядами палива і повітря.

У загальному плані проблеми узгодження цих двох процесів живлення двигунів розглянуті вище у главі 3. Наведені й схеми КПСК паливой повітропостачанням сучасних двигунів.

Однак підсистема керування наддувом не є додатком до КПСК паливоподачі. Вона, крім узгоджених задач забезпечення керування й оптимізації складу суміші (робочої, горючої) в циліндрах двигуна, повинна вирішувати й питання підвищення ефективності власне повітропостачання, з

нею пов'язані проблеми надійності та стабільності цієї підсистеми. Вона вирішує специфічні задачі адаптації повітропостачання, наприклад, до кліматичних (зовнішніх) впливових факторів, відіграє вирішальну роль в запобіганні детонації тощо.

Проілюструємо ці проблеми і задачі, що ставляться перед сучасними КПСК повітряподачею, на прикладі автомобільного дизеля з газотурбінним керованим наддувом, розробленого японською фірмою Isuzy. Ця комплексна КСК паливо- й повітропостачанням дозволяє автоматично:

- *забезпечувати подачу додаткового повітря* для завихрення заряду циліндра на режимі холостого ходу;
- *змінювати прохідний переріз соплового апарата турбіни шляхом повороту лопаток* для забезпечення змін наддуву залежно від режиму експлуатації двигуна;
- *обмежувати подачу палива при недопустимо високому наддуві;*
- *сигналізувати про необхідність переключення коробки передач;*
- *організувати рециркуляцію й нейтралізацію відпрацьованих газів і т.д.*

Вже такий перелік простежує і підкреслює основні функції КПС повітропостачанням й каналів адаптації.

Прикладом вбудування КПСК турбонаддувом може бути КСУ двоциліндровим двигуном мотоцикла CX500T японської фірми Honda (рис.4.2). Вона дозволяє суттєво підвищити його потужність й знизити експлуатаційну витрату повітря.

Значна кількість елементів цієї сучасної КСК обслуговує потреби комп'ютерної підсистеми керування наддувом, зокрема, до них відносяться позиції 1-13, 32-34 схеми на рис.4.2.

Застосування турбокомпресорів у двигунах з невеликим літражем має труднощі, пов'язані з необхідністю отримання таких же тисків повітря (наддуву), як і в двигунах великої потужності, а при малих витратах повітря. Тому потребуються частоти обертання ротора ТК до$n_{тк}$=240000 хв$^{-1}$.

При зростанні $p_s > 0{,}13$ МПа відкривається клапан перепуску відпрацьованих газів, що керується за сигналами датчика p_s, і частина з них, поза турбіною, направляється у впускний трубопровід, що обмежує подальше зростання $n_{тк}$.

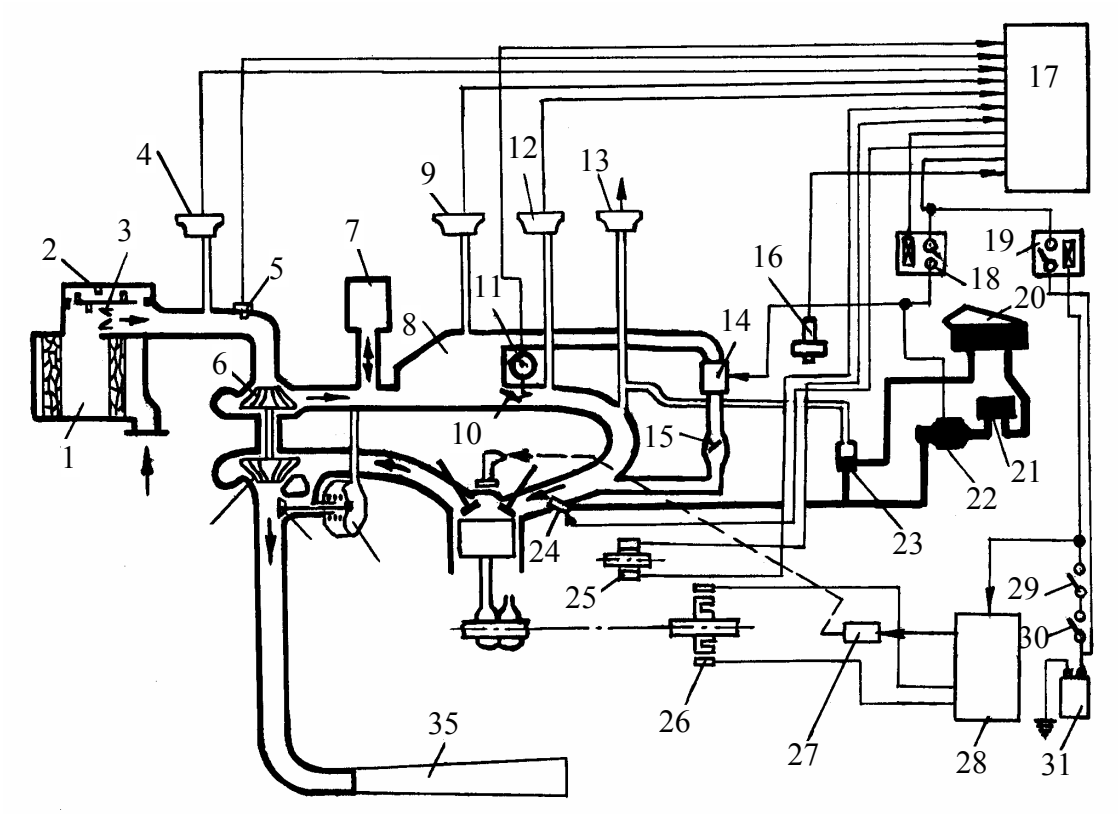


Рисунок 4.2 – КСК двигуна з турбонаддувом мотоцикла Honda-CX500T:

1 – повітряний фільтр; 2 – заглушувач; 3 – пластинчатий зворотний клапан; 4 – датчик тиску повітря; 5 – датчик температури повітря, що всмоктується; 6 – робоче колесо компресора; 7 – резонансна камера; 8 – демпфірувальний ресивер; 9 – датчик тиску повітря у ресивері; 10 – дросельна заслінка; 11 – датчик положення дросельної заслінки; 12 – датчик тиску за дросельною заслінкою; 13 – датчик тиску повітря при холодному пуску; 14 – карбюратор холодного пуску; 15 – пластинчастий зворотний клапан; 16 – датчик температури охолоджувальної рідини; 17 – БСІ; 18 – реле; 19 – реле; 20 – ємкість для палива (бак); 21 – паливний фільтр; 22 – паливний насос; 23 – стабілізатор тиску палива; 24 – форсунка; 25 – датчик частоти обертання розподільного вала; 26 – переривник підсистеми запалювання; 27 – індукційна котушка; 28 – регулятор системи запалювання; 28 – вимикач підсистеми запалювання; 30 – центральний перемикач; 31 – акумулятор електричний; 32 – робоче колесо турбіни; 33 – клапан перепуску відпрацьованих газів; 34 – камера керованого тиску клапана перепуску; 35 – випускний трубопровід

Мікро-ЕОМ, розміщена над заднім колесом мотоцикла, крім дозування $q_{ц}$, збирання інформації про p_s, також обробляє сигнали датчиків температур повітря і таке інш.

Великі коливання тиску повітря у впускному трубопроводі двоциліндрового двигуна з нерівномірним порядком робити циліндрів гасяться ре-

зонансною камерою 7 та демпфірувальним ресивером 8. При пуску двигуна зворотні клапани 3 і 15 застерігають зворотність потоку поступаючого повітря, що надходить і яке виникає у зв'язку з великим перекриттям фаз газорозподілу.

У порівнянні з безнаддувним варіантом витрата палива зменшилась з 4,8 до 4,28 л/100км. Динамічні якості й максимальна швидкість (174 км/год) у цього мотоцикла такі ж, як у мотоцикла з вдвічі більшим робочим об'ємом.

Все це свідчить про високу ефективність керованого наддуву.

Аналогічні підходи використовуються при створенні КСК автомобільними, тракторними, судовими двигунами провідними фірмами Bosch, Man, Dietz, Ford, Cummins, Daimler-Benz, Caterpillar, Toyota, John Deer та інш. [1,2,3,4,5,6].

Значна увага приділяється також ролі КПСК повітропостачанням в адаптації процесів у двигунах, зокрема детонації.

На рис.4.3 показаний канал адаптації турбонаддуву за критерієм детонації бензинового двигуна [1]. Наприклад, відкриття клапана 4, збільшуючи тиск на мембрану механізму 5, привідкриває прохід (перепуск) відпрацьованих газів поза турбіною, що зменшує наддув й ліквідує небезпеку детонації. В цьому випадку використаний принцип усунення детонації шляхом діяння на склад горючої суміші за рахунок зміни тиску наддува (й масового наповнення циліндрів повітряним зарядом).

Для побудови подібних КПСК повітроподачею (наддувом) необхідно, перш за все обрати керований параметр. Серед можливих – тиск наддуву p_s, температура відпрацьованих газів $t_г$, частота обертання $n_{тк}$.

Серед названих параметрів тиску наддуву займає особливе положення у зв'язку з тим, що, судячи по p_s, можна достатньо повно судити про витрату повітря через двигун на будь-якому режимі роботи, й, отже, мати уяву щодо якості робочих процесів у циліндрах. Вагомий позитивний фактор, який сприяє вибору p_s як керованому параметру – простота пристрою для його вимірювання не тільки в статиці на усталених режимах, але і в динаміці при роботі двигуна на неусталених режимах (при перехідних процесах).

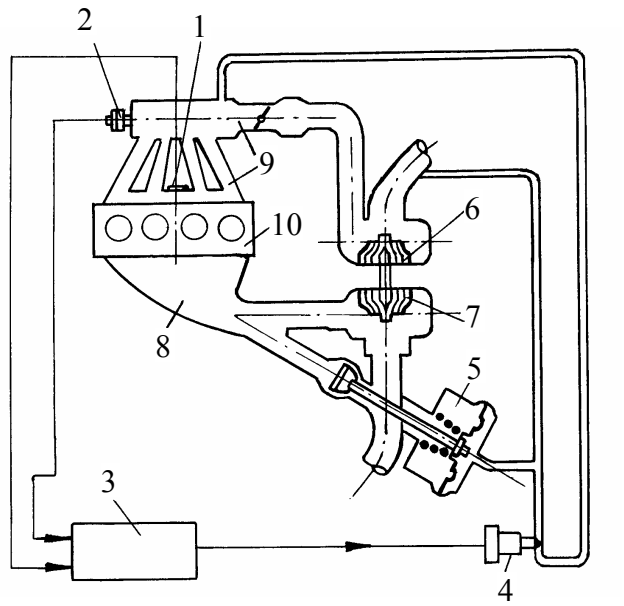


Рисунок 4.3 – Канал адаптації турбонаддуву за критерієм детонації:

1,2 – відповідно датчики детонації й тиску наддуву;
3 – КБК;
4 – клапан керування;
5 – виконавчий механізм з пневматичним приводом;
6 – компресор;
7 – турбіна;
8 – випускний колектор;
9 – впускний колектор;
10 - двигун

Температуру відпрацьованих газів можна обирати як керований параметр, тобто можна побудувати таку КПСК наддувом, яка здатна підтримувати постійне значення $t_г$ (незалежно від режиму роботи двигуна) або програмно змінювати її залежно від режимного фактора, наприклад від навантаження чи частоти обертання n. Слід відзначити, що така КПСК наддувом зможе забезпечити добру економічність при роботі двигуна на всіх експлуатаційних режимах, оскільки підтримання оптимальної середньої $t_г$ свідчить про задовільний перебіг робочого процесу у циліндрах двигуна. Застосування КПСК з керованою $t_г$ потребує надійних й малоінерційних високотемпературних датчиків з достатньо потужним вихідним сигналом.

Вибір частоти обертання ротора турбокомпресора як керованого параметра стосовно двигунів, що мають широкий діапазон навантажених режимів роботи, не є ефективним, тому що за $\omega_{тк}$ можна лише непрямим чином судити про витрату повітря через двигун. Крім того, точне вимірювання $\varpi_{тк}$ викликає труднощі, зважаючи на невирішеність ще проблеми якісних датчиків. Тому кутову швидкість $n_{тк}$ використовують в КПСК наддувом переважно як обмежуючий параметр у захисних пристроях, що запобігають ТК від недопустимого перевищення інерційних навантажень.

За результатами подібних оцінок можна зробити висновок, що основним керованим параметром в КПСК наддувом треба обирати p_s.

Такий принцип побудови КПСК повітропостачанням як дизелів, так і бензинових двигунів й використовується в практиці.

Як правило, сучасні КПСК відстежують як сигнал p_s, так і сигнал t_s, що сприяє адаптації двигуна до моделі експлуатації двигуна конкретного призначення і до зворотних діянь.

В розробках КСК дизелів з наддувом, як і бензинових ДВЗ, перелічених вище, керування характеристиками паливо- і повітроподачі, як правило, здійснюється за програмами, що записані в пам'яті мікро-ЕОМ. Приклад такої програми наведений в главі 2 на рис.2.1, де показані по суті дві програми керування паливо- і повітропостачанням, оскільки циклове дозування подачі палива тісно пов'язане з цикловим дозуванням повітря, командним параметром для якого є $p_{\text{труб}}$ (тиск у впускному колекторі).

У сучасних складних багатомірних КПСК повітроподачею за керований параметр призначається p_s або комплекс (p_s/t_s), про що вище йшла мова. Сигнали відповідних датчиків зіставляються з цими програмами та при їх розходженні виконавчі пристрої діють на органи зміни паливоподачі й КВВ, а також на засоби повітропостачання.

При розробці програм керування наддувом виходять з основної вимоги до КПСК повітроподачею, яка сформульована вище, – забезпечення за робочою характеристикою двигуна таких співвідношень кількості повітря і палива, що подаються до циліндра, які дозволяють мати мінімальну середньоексплуатаційну витрату палива при обмеженні за токсичністю випускних газів, тепловим станом деталей і т. ін. Це вимагає рішення задачі визначення зон регулювання турбокомпресора для заданих режимів роботи двигуна (швидкісних і навантажувальних). Маючи такі зони регулювання ТК, можна обрати раціональні способи, схеми автоматичного керування наддувом. У таких схемах реалізується функціональна залежність коефіцієнту надлишку повітря від циклової витрати палива, швидкісного режиму роботи двигуна тощо. Кожному такому режиму (швидкісному, навантажувальному) відповідає оптимальний рівень α. Далі забезпечується й вирішується основна задача КПСК наддувом: програмно-адаптивні зміни α залежно від n, $q_{\text{ц}}$. При цьому, як показали дослідження, слід зменшувати α при постійному навантаженні по мірі зменшення n; зменшення α повинно бути забезпечено і у випадках, коли n не змінюється, а навантаження падає та ін.

Для забезпечення обраного α в КПСК повітропостачанням відслі-

жуються сигнали, пропорційні сигналам подачі палива і повітря. Отримані обидва сигнали, відповідно скореговані, надходять у БСІ, де й виробляється командний сигнал, пропорційний (залежний) від α. Командний імпульс за допомогою виконавчих пристроїв забезпечує, наприклад, поворот лопаток соплового апарата турбіни (або дифузора компресора) або реалізує інший зовнішній (перепуск, дроселювання випускного, впускного трактів двигуна) спосіб керування наддувом.

Слід відзначити, що й без спеціальних адаптивних каналів сучасні КПСК забезпечують адаптивність керування наддувом. Ступінь наддуву залежить від характеристик турбіни ТК, які, в свою чергу, визначаються параметрами робочого циклу двигуна (й енергетичним потенціалом відпрацьованих газів – робочого тіла перед турбіною), адаптивність якого до конкретного експлуатаційного режиму може забезпечуватися відповідною корекцією паливоподачі, що розглядалося у гл. 3.

Схемні й конструктивні особливості КПСК повітроподачі як складової частини загальної КСК двигуном залежать від особливостей виконавчих пристроїв та датчиків, які забезпечують зміни витрати повітря на різних експлуатаційних режимах. Це обумовлено тим, що електронна частина КСК двигуна в цілому обслуговує й потреби КПСК повітропостачанням (поряд з обслуговуванням КПСК паливоподачею й запалюванням).

4.3. Датчики та виконавчі пристрої комп'ютерних підсистем керування повітроподачею

Як показано вище, первинними перетворювачами, які формують сигнал КПСК повітропостачанням ДВЗ, є датчики тиску і температури на всмоктуванні, а також частоти обертання ротора. Вони описані в главі 3.

Датчики повітроподачі двигунів з іскровим запалюванням (витратоміри повітря, положення дроселя) також були розглянуті.

Перейдемо до вивчення виконавчих пристроїв повітропостачання у двигунах різних типів.

Спочатку ознайомимося з конструктивними особливостями пристроїв для зовнішнього управління наддувом й проаналізуємо їхні переваги і недоліки, виходячи з вимог до КПСУ повітропостачанням й енергетичної ефективності кожного з таких пристроїв.

Дроселювання за рахунок спеціальних заслінок повітря на вході в компресор або виході з нього, як і інші способи зовнішнього керування наддувом, дозволяють змінювати тиск наддуву й, отже, масову витрату повітря на режимах роботи дизеля відповідно до заданої програми й за сигналами датчиків зворотного зв'язку при адаптації повітроподачі до змін умов експлуатації двигуна.

Пояснимо цей факт. При прикритті, наприклад, дросельного пристрою на вході в компресор ТК зменшується тиск повітря, яке надходить до компресора; при дроселюванні повітря на виході з компресора падає тиск повітря, що нагнітається компресором. В обох випадках при зниженні тиску наддуву падає й тиск газу перед турбіною, внаслідок чого встановлюється новий розрахунковий режим спільної роботи двигуна і ТК, який більш відповідає умовам експлуатації.

Встановлено, що дроселювання повітря на виході із компресора більш ефективне, ніж на вході в нього, оскільки у першому випадку сильніше змінюється режим сумісної роботи двигуна і компресора, хоча в обох випадках недоліком є збільшення гідравлічних втрат на дроселювання.

Перевагою дроселювальних пристроїв для керування наддувом є простота конструктивних рішень при високій надійності, яка обумовлена їх розташуванням в зоні досить помірних температур газоповітряного тракту двигуна. Наприклад, заслінка може повертатися залежно від параметрів наддуву повітря (температури, тиску) за допомогою гідравлічного або іншого приводу.

В більшості випадків засоби керування компресора дроселюванням повітря застосовують в КСК дизелів з помірними вимогами за коефіцієнтом пристосування (наприклад, дизель-генераторів для тепловозів і судів), а також в КСК бензинових двигунів.

На рис. 4.4 наведено варіант схеми конструктивного оформлення дросельного керування компресором. Тут заслінка 6 забезпечує дроселювання повітря на вході у компресор.

У деяких КПСК наддувом використовуються виконуючі пристрої для перепуску повітря із компресора в атмосферу. Розробляються й заходи щодо використання енергії робочого тіла, яке перепускається.

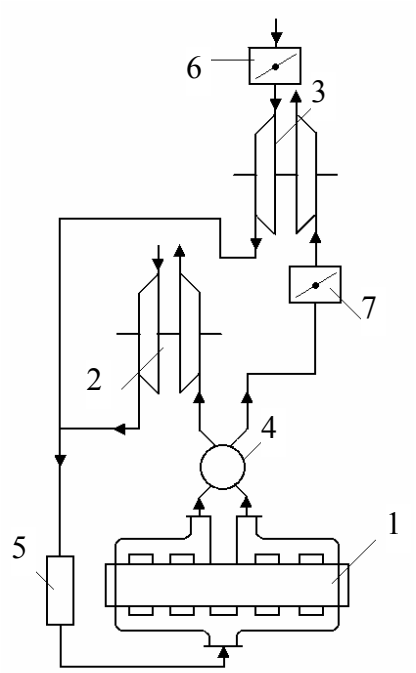


Рисунок 4.4 – Схема виконавчих пристроїв КПСК наддувом двигуна фірми Volvo (літраж 12,0 л; кількість циліндрів 6; N_e = 310 кВт; n = 2200 хв$^{-1}$):

1 – дизель з безпосереднім вприскуванням;
2 – великий турбокомпресор;
3 – малий турбокомпресор;
4 – перетворювач імпульсів;
5 – охолоджувач повітря для наддуву;
6 – заслінка керування потоком повітря на впуску;
7 – заслінка керування потоком відпрацьованих газів

Так, стиснуте компресором повітря по каналу перепуску направляють на вхід в турбіну або вихід з неї (для використання ефекту ежекції, обумовленого великою швидкістю газового потоку). Це корисно для часткових режимів знижених частот обертання колінчастого вала, коли різко зменшується прокачка робочого тіла через двигун. Крім того, перепуск на турбіну дозволяє відсунути межу помпажу компресора. Подібні пристрої знайшли застосування в КПСУ наддувом автотракторних двигунів. На рис. 4.5 показаний виконуючий пристрій фірми Shvitzer Corporation (Швейцарія), у якому передбачено канал 2 для перепуску стиснутого повітря із завитка компресора 1 в турбіну 5.

В результаті цього тиск наддуву знижується. Така система перепуску конструктивно проста. Крім того, для автомобільних бензинових двигунів, турбіни яких працюють у жорсткому температурному режимі у зв'язку з порівняно низьким ступенем стиску двигуна, такий спосіб корисний і тим, що дозволяє знизити нагрівання лопаток колеса турбіни за рахунок перепуску частини відносно холодного повітря після компресора.

Як недолік, треба відзначити те, що всі способи керування перепуском потребують перерозмірених турбін, оскільки кількість повітря, що перепускається, за нерозрахункових умов експлуатації може сягати 80 % всієї його прокачки через компресор, тобто треба добиватися майже вдвічі більшої потужності турбіни у порівнянні з іншими способами зовнішнього регулювання.

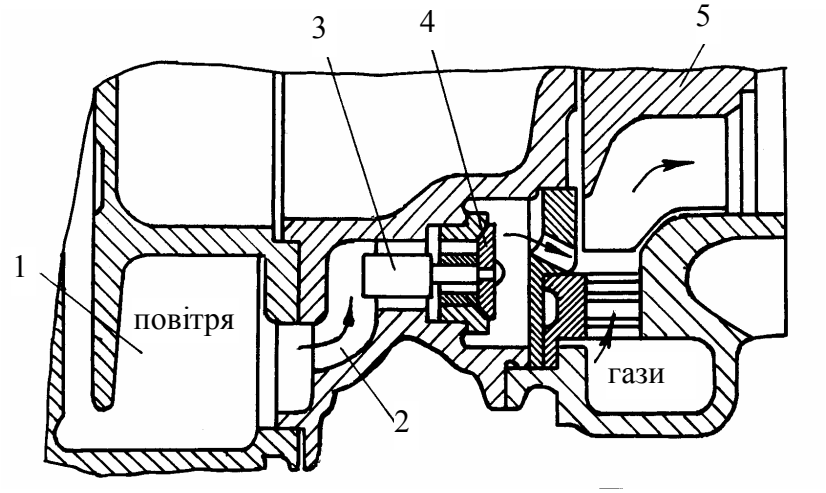


Рисунок 4.5 – Пристрій для перепуску стиснутого повітря із компресора на турбіну ТК [1]

Іншу групу виконавчих пристроїв КПСК наддувом складають ті, які дроселюють потік випускних газів заслінками перед або за турбіною ТК. В обох випадках можна змінювати тиск газу (перед турбіною або за нею), що дозволяє підтримувати потрібну потужність (й частоту обертання ротора ТК) турбіни відповідно до програми керування наддувом. При виборі цього способу керування слід враховувати і його недоліки. Адже при дроселюванні потоку газів змінюється ККД турбіни (при заслінці на виході з турбіни – помірно, а при заслінці на вході до неї – в широких межах). В обох випадках збільшується тиск перед випускними клапанами, що супроводжується зростанням насосних втрат. Слід комплексно оцінювати виграш по паливній економічності при подібному керуванні наддувом, враховуючи можливі програші у насосних втратах та на турбіні.

Один з можливих варіантів такого керування наддувом показаний на рис. 4.4, де малий турбокомпресор 3 керується заслінкою на вході у турбіну цього ТК. Крім відзначеного вище недоліку, такий спосіб регулювання p_s має дещо малий діапазон керування потужністю ТК; при ньому значно росте тиск газів на виході із циліндрів, що пов’язано з ростом втрат на насосні ходи й перегрівом двигунів; розташування керувального органа в зоні високих температур негативно впливає на надійність виконавчого пристрою.

Інтересним є і зовнішнє керування наддувом шляхом непрямого регулювання потужності турбіни турбокомпресора за рахунок відповідного автоматичного регулювання (керування) фаз газорозподілу. Фірма Mer-

cedes Bens на 6(8)- циліндровому чотириклапанному двигуні легкового автомобілю 300 Sh (500 Sh) застосовує КСК, що виробляє залежно від швидкохідностей й навантаження двигуна сигнал, по якому повертається кулачок розподільного вала для корегування фаз клапанів [1].

Потрібна у різних умовах витрата повітря через компресор забезпечується й регулюванням потужності турбіни шляхом часткового перепуску випускних газів двигуна в атмосферу мимо турбіни. Такий спосіб (рис. 4.3) знаходить застосування в КСК як дизелів, так і бензинових автотракторних ДВЗ.

На рис. 4.6 показана схема підсистеми обвідного керування наддувом цього типу з перепускним клапаном, яка може керуватися гідравлічним пристроєм за сигналом датчика p_s або за сигналом, що реагує на співвідношення p_s/t_s. За енергетичними показниками цей спосіб поступається перепуску частини наддувного повітря із компресора, наприклад, у турбіну.

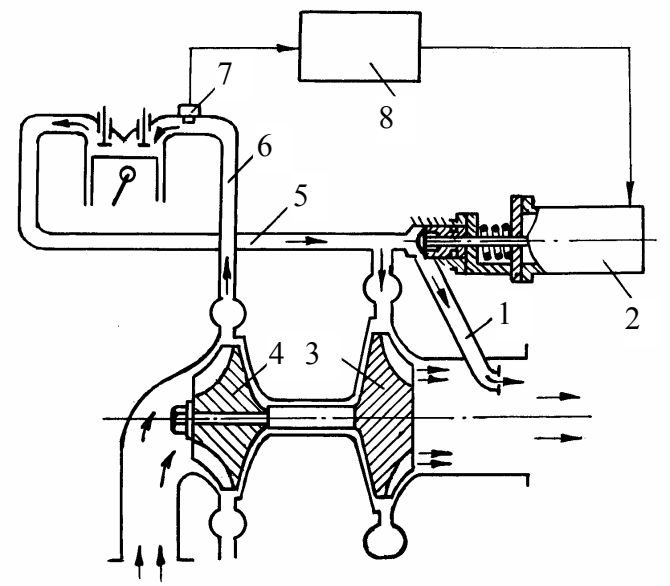


Рисунок 4.6 – Схема комп'ютерного блока керування турбонаддувом:
1 – обвідний (перепускний) трубопровід; 2 – керований клапан перепуску; 3 – турбіна; 4 – компресор; 5 – випускний тракт двигуна; 6 – впускний тракт двигуна; 7 – датчик тиску наддуву; 8 – електронний пристрій керування

Подібний канал керування наддувом використаний шведською фірмою SAAB на автомобільному бензиновому двигуні регулювання p_s. Обмеження p_s здійснюється клапаном, що регулює потік відпрацьованих газів на турбіну ТК перепуском частини потоку мимо турбіни через перепуск-

ний канал в атмосферу. Останній відкривається при виникненні розрядження у впускному трубопроводі, яке, в свою чергу, керується дросельною заслінкою з електроприводом, який отримує командні імпульси від БСІ за сигналами датчиків p_s, детонації й n. Забезпечується динаміка двигуна, наприклад, при швидкому обгоні в умовах інтенсивного руху автомобіля. При цьому швидко переводять двигун на $p_{s\max}$, тому що детонація у відносно холодному двигуні (працював на малих навантаженнях) не виникає миттєво. По закінченні кількох секунд, коли збільшаться температури й почнеться детонація, за сигналом датчика детонації керуючий пристрій зменшить p_s.

Завершуючи вивчення принципів побудови виконавчих пристроїв зовнішнього керування наддувом, підкреслимо, що деяке зниження паливної економічності, характерне для цього способу керування на режимах, близьких до номінального (пов'язане з перерозміреністю ТК й зниженим його ККД), сповна компенсується зменшенням витрати палива на часткових (розвантажених) режимах й поліпшенням роботи двигуна на режимах розгону.

Переходимо до виконавчих пристроїв КПСК наддувом, що базуються на внутрішнім керуванні p_s.

Для турбокомпресорів автотракторних двигунів, як вже відзначалося, запровадження пристроїв автоматичного внутрішнього керування викликає труднощі, оскільки складно забезпечити роботу виконавчих пристроїв при малих розмірностях як ТК так і елементів його регулювання.

Мабуть, в таких випадках доречно шукати варіанти, що поєднують переваги схем зовнішнього й внутрішнього керування наддувом, тобто способи (і заходи) деформації (коригування) характеристик лопатних машин без змін їхніх проточних елементів або за рахунок зміни режимів їх роботи. Приклад – регулювання ТК зміною ступеня імпульсності або парціальності турбін. У такому випадку конструкція виконавчого пристрою дещо спрощується, отже підвищується надійність його роботи при достатньо високій ефективності системи керування за різних умов експлуатації.

Розглянемо конструктивні особливості виконавчих пристроїв КПСК з внутрішнім регулюванням ТК, виділяючи, як і раніш, питання ефективності (енергетичної) і надійності кожного з них.

Використовуються компресори з керуванням лопатками вхідного напрямного апарата для забезпечення потрібної витрати повітря відповідно до програми зміни коефіцієнта надлишку повітря α на режимах робочих характеристик двигуна. При такому керуванні змінюється не тільки прохідний переріз компресора, а й закрутка потоку на вході, що змінює напір компресора, тобто p_s, що, власне, являється є метою керування.

Конструктивний варіант виконавчого пристрою КПСК наддувом у вигляді напрямного апарата з поворотними лопатками показаний на рис. 4.7; подібні пристрої зустрічаються на тепловозних, судових дизелях.

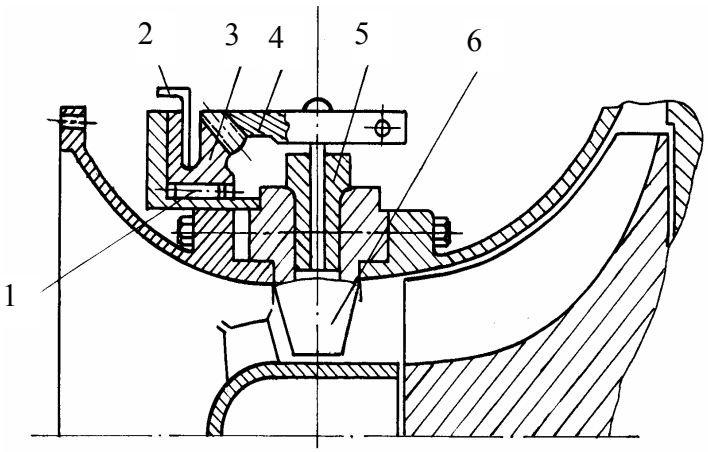


Рисунок 4.7 – Конструкція виконавчого пристрою напрямного апарата компресора з поворотом лопаток:

1 – роликопідшипник; 2 – лімб; 3 – зубчастий вінець; 4- важіль; 5 – втулка; 6 – поворотна лопатка

Розроблені також компресори з регулюванням прохідного перерізу компресора іншим способом – поворотом лопаток його дифузора. При цьому характеристика компресора зміщується у бік потрібної витрати повітря. Запропоновані різні виконавчі пристрої для повороту лопаток дифузора (рис. 4.8). У ряді конструкцій передбачено сумісне повертання й тих чи інших лопаток одночасно.

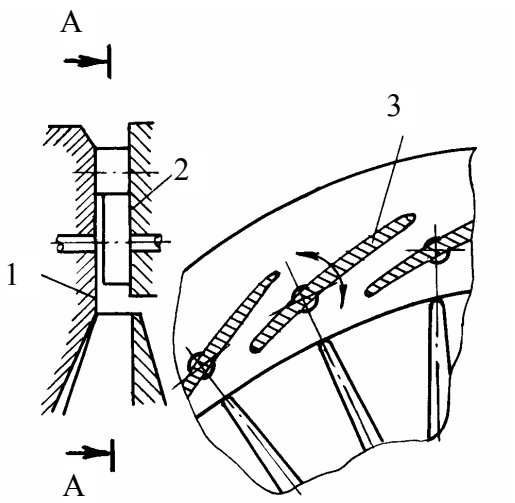


Рисунок 4.8 – Дифузор з поворотними лопатками:

1,2 – торці; 3 – поворотні лопатки

Ефективність таких виконавчих пристроїв сучасних КПСК наддувом двигунів очевидна із рис. 4.9, де G – відносна витрата повітря на нерозрахунковому режимі (відношення поточної витрати повітря до такої витрати на розрахунковому режимі). При

цьому поточний і розрахунковий режими визначаються відповідними положеннями поворотних лопаток. Бачимо, що регулювання компресора сумісним поворотом лопаток вхідного напрямного апарата і дифузора значно розширює його робочий діапазон й, безумовно, вигідніше, ніж інші способи керування, визначені кривими 1 та 2. Таке керування застосовується на форсованих дизелях транспортного типу.

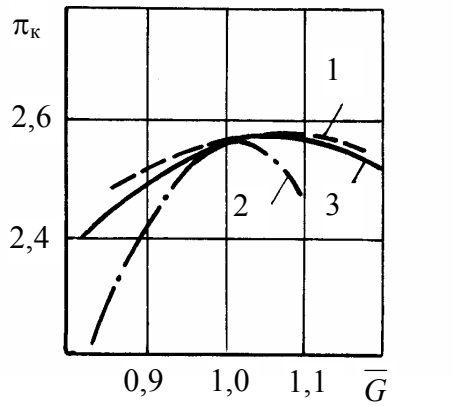


Рисунок 4.9 – Зміна параметрів компресора в залежності від способу його керування:

1 – поворот лопаток дифузора у діапазоні 2°30′ – 23°30′

2 – поворот лопаток вхідного напрямного апарата в діапазоні 60-114°;

3 – одночасний поворот лопаток дифузора і вхідного напрямного апарата

Автоматизація роботи виконавчих пристроїв повороту лопаток напрямного апарата або дифузора компресора здійснюється по-різному. Але, звичайно, керування поворотом лопаток здійснюється спеціальним важільно – шарнірним механізмом з приводом від повітряних (мастильних) циліндрів за сигналами клапана чутливого елемента, що реагує на зміну тиску наддуву.

Ряд фірм (США та ін.) використовують додаткові легко керовані виконавчі пристрої, що сприяють внутрішньому керуванню компресорів у різних кліматичних умовах. Прикладом може служити пристрій на рис. 4.10. Турбокомпресор з прямолінійним всмоктувальним трубопроводом 2 має заслінку 3. поміж цією заслінкою і колесом 1 компресора виконана кільцева щілина 4 з розміщеними у ній тангенціальними лопатками. Щілина поєднує всмоктувальний отвір колеса 1 з атмосферою крізь канали (що звужуються), розташовані між лопатками. Якщо заслінка 3 відкрита, то опір всмоктувального трубопроводу значно менший, ніж опір каналів; повітря надходить на колесо 1 по прямолінійному каналу. При закритій заслінці повітря проходить крізь тангенціальні канали, закручуючись; при неповному перекритті всмоктувального трубопроводу заслінкою повітря до компресора частково заходить по прямолінійному трубопроводу, а час-

тково через тангенціальний канал, й інтенсивність його закрутки залежить від положення керованою КПСК заслінки. Тобто, повертаючи заслінку, можна керувати ступенем закрутки потоку повітря, таким чином змінювати тиск наддуву p_s.

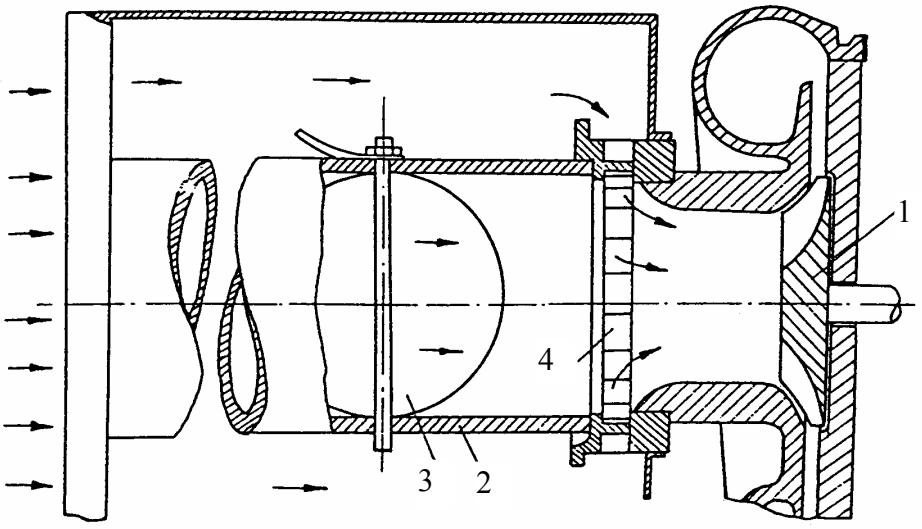


Рисунок 4.10 – Виконуючий пристрій для закрутки повітря на вході в компресор наддуву

Крім внутрішнього регулювання компресора для узгодження характеристик двигуна й ТК, в КПСК наддувом застосовують і внутрішнє регулювання турбіни.

З теорії лопатних машин відомо, що витрата газу через турбіну (їй пропорційна потужність турбіни) може керуватися зміною ступеню парціальності, висоти соплового каналу (лопаток) або кута виходу потоку газів із соплового апарата, що широко застосовується у різних конструкціях виконавчих пристроїв КПСК наддувом, які використовують внутрішнє регулювання турбін.

Пристрої регулювання ступеня парціальності дозволяють відключати частину соплового апарата конкретної турбіни; при постановці на двигун двох турбін можна при зміні умов експлуатації відключити один з них, змінюючи тим самим тиск наддуву.

На рис. 4.11 показана сучасна схема парціального регулювання турбіни ТК потужного тракторного дизеля; таку схему використовують фірми Німеччини, США та ін.

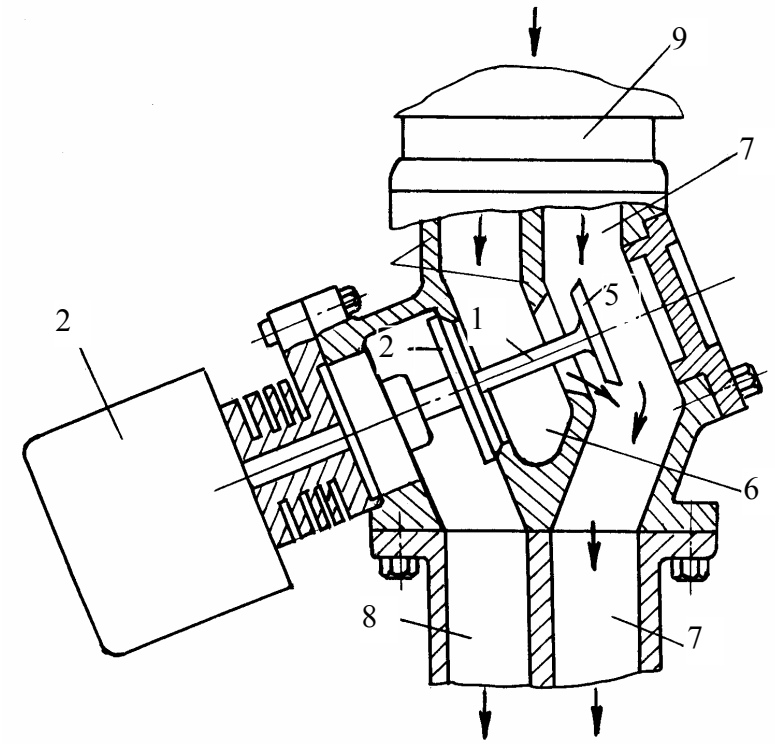


Рисунок 4.11 – Виконуючий пристрій – перехідник для перекриття груп сопел турбіни

Поділений на сектори (групи) сопловий апарат турбіни поєднаний з випускним колектором 9 каналами 7 і 8. При цьому канал 7 – наскрізний, а 8 – тупиковий. Другий тупиковий канал 6 зв'язаний з колектором 9. У перегородці 4 поміж каналами встановлено клапани 3 та 5, розміщені на загальному штоці 1 з електромагнітним приводом 2, який керується за сигналами датчика тиску наддуву. Якщо, наприклад, треба знизити тиск наддуву (відповідно програми забезпечення α на експлуатаційних режимах), то з ростом тиску наддуву шток переміщується й клапан 3 поєднує між собою тупикові канали 6 та 8; гази з колектора виходять по двох каналах 7 і 8 до обох груп сопел турбіни з меншою швидкістю потоків; розкрутка турбіни (й тиск наддуву) зменшується. Недолік такого виконавчого пристрою КПСК повітропостачанням – зменшення ККД турбіни у випадку парціального підводу газу.

Керування наддувом шляхом зміни висоти лопаток соплового апарата використовують в КПСК транспортних двигунів з доцентровими турбінами. Витрата газу через турбіну змінюється пропорційно висоті лопаток; на відміну від дросельного регулювання турбіни використовується більша

частина кінетичної енергії газу, забезпечується ліпша рівномірність потоку, ніж при керуванні зміною ступеня парціальності. Таким чином, керування наддувом за рахунок зміни висоти лопаток соплового апарата більш ощадливо.

В одному з конструктивних варіантів виконавчого пристрою парціального керування турбіною (рис. 4.12,а) її сопловий апарат розділено перегородкою по висоті.

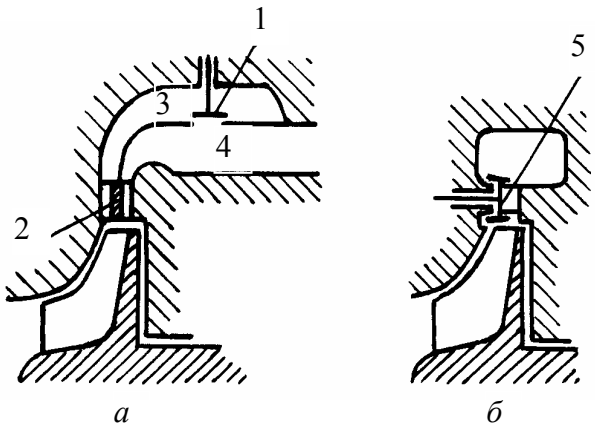


Рисунок 4.12 – Схеми керування доцентрової турбіни зміною висоти соплового апарата:
а – ступінчасте; *б* – безступінчасте; 1 – клапан; 2 – нерухома перегородка; 3, 4 – канали підводу газу до частин соплового апарата; 5 – рухома перегородка

Газ подається в турбіну по двох трубах 3, 4 до обох половин соплового апарата або через одну трубу тільки до половини соплового апарата (якщо клапан закривається по командним сигналом у залежно від запрограмованого значення p_s на конкретному режимі експлуатації). У другому випадку (рис. 4.12,б) рухома перегородка 5 плавно змінює висоту соплового каналу відповідно до програми керування наддувом.

В КПСК повітропостачанням все ширше використовується принцип керування турбіною шляхом зміни кута α_1 виходу потоку газів із соплового апарата.

Конструктивно його здійснюють поворотом лопаток соплового апарата за допомогою автоматичного виконавчого пристрою за сигналами датчика тиску наддувного повітря. Такий спосіб використовують як в осьових так і в доцентрових турбінах, причому в останніх простіше застосувати схему соплового апарата з поворотними лопатками. Турбіни з керуванням на основі зміни кута α_1 називаються турбінами з керованим сопловим апаратом. При повороті соплових лопаток змінюється витрата газу в результаті зміни прохідних перерізів турбіни, що в кінцевому підсумку, впливає на тиск наддуву.

На рис 4.13, 4.14 показані конструктивні варіанти турбін із поворотними лопатками.

Виконавчий пристрій у вигляді групового приводу є типовим для більшості КПСК наддувом швидкохідних двигунів за рахунок повороту соплових лопаток ТК. За допомогою важеля виконавчого механізму (привода), керованого за сигналами датчика тиску наддуву, повертається кільце – синхронізатор, тягнучи кулісу (рис. 4.12), яка, переміщаючись, повертає соплову лопатку навколо осі. Залежно від повороту лопаток змінюється прохідний переріз соплового апарата, причому різниця поміж максимальним і мінімальним значеннями прохідного перерізу може становити до 40 %, що гарантує потрібний діапазон зміни p_s при суттєвій зміні режиму експлуатації двигуна. Для середньообертових (тепловозних, судових) дизелів частіше використовують варіант керованого соплового апарата, який показано на рис. 4.13 (турбокомпресор типу ТКР-40); корпус виконавчого пристрою повороту лопаток має водяне охолодження, що збільшує надійність та стабільність роботи КПСК наддувом.

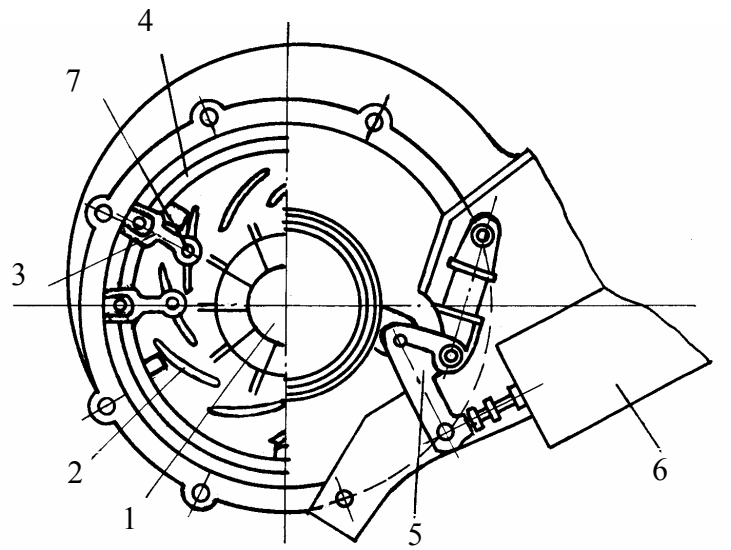


Рисунок 4.13 – Виконавчий пристрій керування сопловим апаратом доцентрової турбіни з груповим приводом поворотних лопаток дизеля вантажного автомобіля х безпосереднім вприскуванням фірми Isuzy, Японія (S/D = 145/120):

1 – ротор турбіни; 2 – соплова лопатка; 3 – куліса керування поворотом лопаток;
4 – поворотне кільце – синхронізатор; 5 – важіль приводу кільця –синхронізатора;
6 – керований привід повороту лопаток; 7 – вісі повороту лопаток

На швидкохідних малорозмірних дизелях (легкових автомобілів, малопотужних тракторів) використовують турбіни ТК з безлопатними сопловими апаратами. Можливе внутрішнє керування й цих турбін (рис. 4.14), наприклад, переміщенням профільованої перегородки у порожнині газоприймального патрубку. При цьому змінюється переріз проточної його частини. Зменшення перерізу при незмінності ступеня зниження тиску на турбіні $\pi_т$ зменшує ступінь реактивності турбіни, кут α_1 й витрату газу через неї, тобто – тиск наддуву t_s.

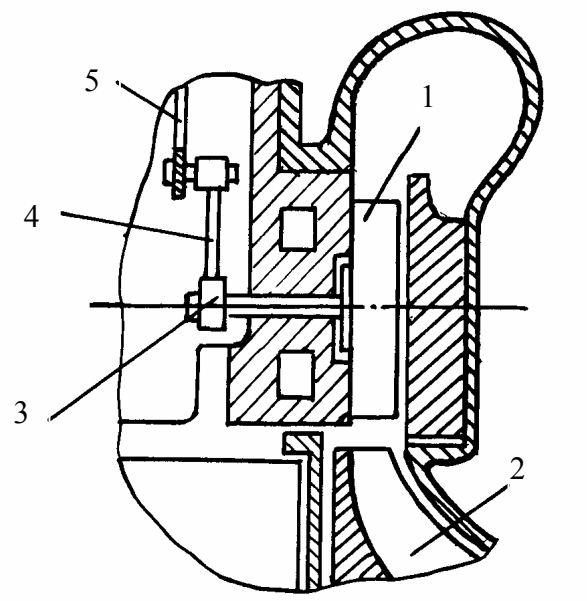


Рисунок 4.14 – Виконуючий пристрій для соплового керування центростримкої турбіни середньо обертового дизеля:
1 – поворотна лопатка; 2- турбіне колесо; 3- ось поворотної лопатки; 4- важіль; 5- тяга від приводу з комп'ютерним керуванням

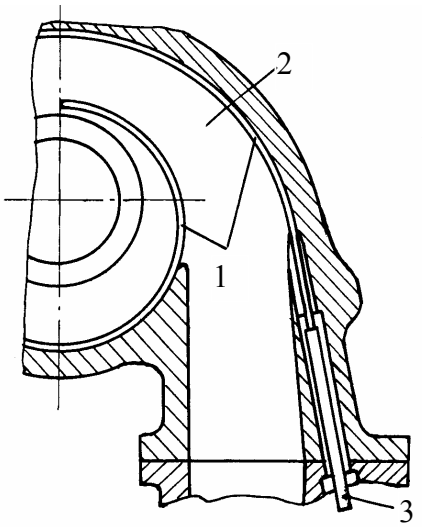


Рисунок 4.15 – Радіальна турбіна ТК з безлопатним напрямним апаратом й керованим прохідним перерізом завитка

На рис. 4.15 зображена радіальна турбіна тракторного двигуна з керованим прохідним перерізом підвідного завитка. Керування натягуванням (й профілем) стрічкової ширми 1 завитка 2 здійснюється виконавчим механізмом, який діє на тягу 3 залежно від тиску наддуву (або співвідношення p_s/t_s).

Відзначимо, що для кращого узгодження режимів роботи ТК та двигуна при високому форсуванні останнього за середнім ефективним тиском (літровій потужності) з метою забезпечення більшого коефіцієнта пристосування

й поліпшення середньоексплуатаційної паливної економічності одночасно використовується керування компресором і турбіною.

У таких випадках при зміні режимів роботи ТК працює з найбільшим ККД $\eta_{тк}$.

З урахуванням висловленої раніше думки про тісний взаємозв'язок паливо- та повітроподачі в ДВЗ, слід мати на увазі, що електронні виконавчі пристрої, як і самі КПСК повітропостачанням, є, як правило, невід'ємною частиною всієї КСК двигуном, як і КПСК паливоподачею. Такі КСК розглядатимуться в наступній главі, хоча їх приклади вже розглядалися вище на схемному рівні.

На закінчення розглянемо напрямок поліпшення наповнення повітрям циліндрів двигуна з наддувом, не пов'язаний з лопатними машинами.

Відомі фірми ведуть перспективні розробки щодо вирішення цієї проблеми за рахунок кардинальної зміни конструкції механізму газорозподілу та електронізації керування його фазами.

Саме електронізація дозволила реалізувати керування цими фазами на кожному експлуатаційному режимі, що практично неможливо при жорсткому зв'язку між колінчастим й розподільним валами, як на традиційних двигунах. У результаті вирішується задача оптимізації фаз газорозподілу залежно від впливу багатьох факторів. Виконавчі пристрої КПСК паливоподачею мають багато спільного з такими пристроями керування газорозподільними клапанами. Так, соленоїди підйому цих клапанів отримують імпульси від датчика аналогічно імпульсу на підйом клапана електромагнітної форсунки паливоподачі.

При переході на електронне керування клапанами газорозподілу відпадає необхідність дроселя на впуску, можна відмовитися взагалі від механізму газорозподілу й проміжних елементів механічного приводу клапанів. Відповідно, фази газорозподілу можуть бути оптимально встановлені за сигналами датчиків $g_{ц}$, N_e, n та ін. на кожному експлуатаційному режимі. Видано численні патенти на засоби електронного керування газорозподілом [7].

Контрольні запитання та завдання

1. Назвіть шляхи поліпшення повітроподачі у дизелях. Яку роль відіграють КПСК у їхній реалізації?

2. Які способи і заходи керування наддувом використовуються у сучасних дизелях?

3. Які основні вимоги ставляться до КПСК повітропостачанням у дизелях?

4. Які можливості поліпшення експлуатаційних показників двигунів з іскровим запалюванням пов'язані з поліпшенням повітропостачання?

5. Які основні вимоги ставляться до КПСК повітроподачею у двигунах з іскровим запалюванням?

6. Зупиніться на специфічних особливостях комп'ютерних підсистем керування наддувом ДВЗ. Що входить до їх складу?

7. Обґрунтуйте вибір раціонального керованого параметра для означених підсистем.

8. Обґрунтуйте вибір програм керування наддувом ДВЗ.

9. Які використовуються датчики КПСК повітропостачанням двигунів?

10. Які можна виділити конструктивні й функціональні особливості виконавчих пристроїв для зовнішнього керування наддувом ДВЗ?

11. Які можна виділити конструктивні й функціональні особливості виконавчих пристроїв для внутрішнього керування наддувом ДВЗ?

12. Порівняйте переваги та недоліки способів зовнішнього й внутрішнього керування наддувом ДВЗ.

13. Які можливості надають КПСК повітроподачею у поліпшенні приємістості й експлуатаційної паливної економічності і токсичності викидів ДВЗ?

14. Які взаємозв'язки існують поміж КПСК паливо- і повітропостачанням у ДВЗ?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шеховцов А.Ф.Компьютерные системы управления ДВС: Уч. пособие. – Харків: ХДПУ, 1995. –256 с.

2. Конструктивные отличия и особенности технической эксплуатации ДВС в условиях стран Азии, Африки и Латинской Америки. Основы климатической приспособленности ДВС. – Ч.2/ Коллектив авторов: Под ред А.Ф.Шеховцова. –К.: УМК ВО, 1998. –275 с.

3. Автомобильный справочник (Bosch): Пер. с англ. Первое русское издание. –М.: Изд-во «За рулем», 2000. –896с.

4. Autoelectrir, Autoelectronic am Ottomotor/ Bosch. –2/ Ausg/ -Dդsseldorf: VDI – Verlag, 1994/ -380S.

5. O.Probst. Bosch Fuel Injection and Management/ -Massachusetts, 1991.

6. Современные подходы к созданию дизелей легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков/А.Д. Блинов, П.А.Голубев и др. Под ред. В.С.Попонова и А.М.Минеева. –М.: НИЦ «Инженер», 2000. –332 с.

7. Реферативный журнал «Двигатели внутреннего сгорания», – М.: ВИНИТИ, 2000-2002 г.г.

Глава 5. ЕЛЕКТРОННІ БЛОКИ І КАНАЛИ АДАПТАЦІЇ ДВЗ ЗА ОБРАНИМИ КРИТЕРІЯМИ

Вище йшлося про головні функції КСУ ДВЗ – керування паливо- та повітропостачанням циліндрів двигуна.

Крім того, система має виконувати й інші дуже важливі функції на основі створення й використання каналів адаптації двигуна.

Мова йде про задачі керування, перш за все, рівнем токсичності викидів, а також кліматичним пристосуванням, вторинним використанням (глибокою утилізацією) скидної теплоти, розподілом навантаження поміж циліндрами, теплонапруженим станом і надійністю двигуна, тощо.

Вирішення таких задач покладено на спеціальні КБК ДВЗ з відповідними каналами адаптації (зворотними зв'язками).

Розглянемо означені допоміжні КБК.

5.1. Електронне керування рівнем токсичності викидів двигунів

Глобальною тенденцією розвитку ДВЗ є радикальне зниження токсичності викидів до рівня, що на порядок нижчий, ніж сьогодні [1].

Для цього, по-перше, безперервно поглиблюється комп'ютерне керування процесом згоряння у двигунах для отримання умов зменшення кількості викидів. Цей резерв оцінюється у 50–60 % теперішньої кількості токсидів, що суттєво, але недостатньо, щоб задовольнити найжорсткіші міжнародні стандарти. Сюди ж віднесемо й рециркуляцію, бо вона також зменшує концентрацію токсидів у відпрацьованих газах (ВГ).

Другим напрямом боротьби за екологічну безпеку ДВЗ є знешкодження (нейтралізація) відпрацьованих газів, очікуваний ефект від якої у декілька разів перевищуватиме той, що пов'язаний з оптимізацією робочого процесу за критерієм токсичності.

5.1.1. Проблеми нейтралізації ВГ та вимоги до КПСК паливо-повітропостачанням та КБК рівнем токсичності двигунів

У двигунах з іскровим запалюванням основними токсичними компонентами відпрацьованих газів є: монооксид вуглецю CO; оксиди азоту NO_x (NO, NO_2, N_2O), залишки палива C_nH_m та ін.

Концентрація цих токсичних речовин залежить від складу горючої суміші (рис.5.1). Точка А відмічає значення коефіцієнта надлишку повітря α, яке обумовлює мінімальну токсичність. При дуже глибокому збідненні горючої суміші токсичність поступово знижується, але двигун починає працювати неусталено, з'являються в окремих циліндрах пропуски запалювання, внаслідок чого у відпрацьованих газах збільшується кількість вуглеводнів.

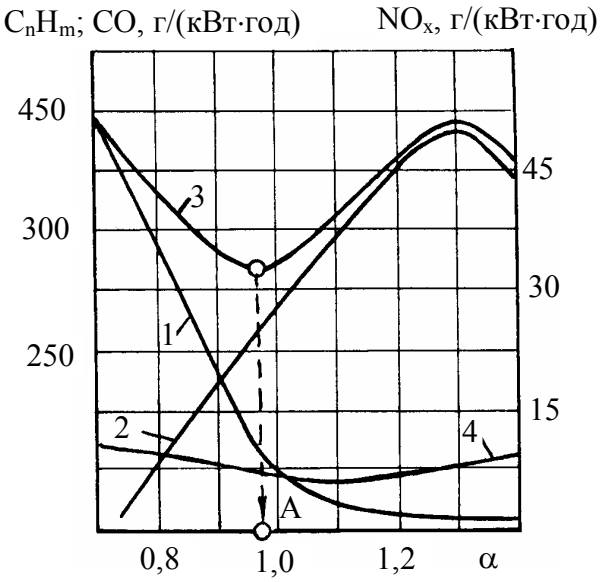


Рисунок 5.1 – Сумарний зміст токсичних речовин у відпрацьованих газах при постійному навантаженні й частоті обертання колінчастого валу бензинового двигуна:
1 – монооксид вуглецю;
2 – оксид азоту;
3 – сумарний зміст токсидів, приведений до змісту монооксиду вуглецю ($CO:NO_x:C_nH_m = 1:10:0,67$);
4 – C_nH_m

Токсичність випускних газів залежить також від кута випередження запалювання $\varphi_{зап}$, режиму роботи двигуна, температури навколишнього середовища, рециркуляції відпрацьованих газів тощо. На рис. 5.2, 5.3 показано, як впливають ці фактори на токсичність викидів двигунів. Бачимо, що при постійних n та N_e (рис.5.2) зниження викидів токсидів може бути досягнуто при зменшенні (запізненні) кута випередження запалення (КВВ) від оптимального за g_e. Це пов'язано з неповним згорянням палива та відведенням підвищеної кількості теплоти з ВГ, що сприяє догорянню C_nH_m у випускному колекторі. Однак в даному випадку зниження токсичності ВГ

досягається за рахунок відхилення КВЗ від оптимального, що супроводжується збільшенням g_e.

У випадку рециркуляції ВГ (перепуску їх частини з тракту випуску на впуск) й збільшенні кількості рециркульованих газів при незмінним $\varphi_{зап}$ питома ефективна витрата палива й емісія C_nH_m зростають (рис. 5.3), що є наслідком зменшення вигоряння суміші й рівнозначно деякому запізненню запалювання. Однак, якщо збільшення кількості рециркулюючих газів буде супроводжуватися збільшенням КВЗ, то, як і в попередньому випадку, кількість NO_x буде зменшуватися, а зростання g_e та концентрації C_nH_m буде більш плавним.

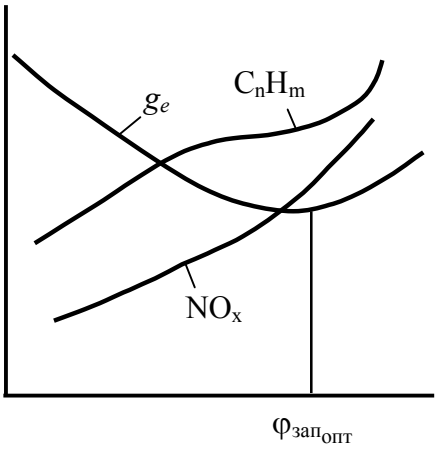


Рисунок 5.2 – Якісна залежність токсичності й витрати палива від кута випередження запалення при незмінних n та N_e

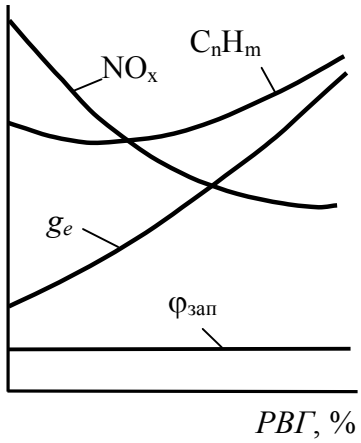


Рисунок 5.3 – Якісна залежність токсичності й витрати палива від рециркуляції відпрацьованих газів при незмінних n, N_e, $\varphi_{зап}$

Наведені графіки дозволяють оцінити складний взаємозв'язок регульованих параметрів й, відповідно, всю складність задач КБК при їх оптимізації.

Взагалі, як свідчить рис. 5.1, вихід токсидів визначається α. Так, вихід CO зростає із збагаченням ($\alpha < 1$) суміші. Концентрація NO_x (при $\alpha > 1$) також залежить від α, причому швидкість створення NO_x залежить від температури в зонах окислення азоту. Тому на вихід NO_x впливають всі фактори, що сприяють підвищенню $T_{газ_{max}}$: збільшення ε та θ, підігрів суміші, тощо. Зміст C_nH_m також залежить від α, зростаючи на малих навантаженнях і на холостому ході (особливо на примусовому).

Проведений аналіз свідчить, що головним для КБК токсичністю є його здатність керувати перш за все складом горючої суміші на кожному експлуатаційному режимі, забезпечуючи його оптимізацію згідно з рис. 5.1, в тому числі при перехідних процесах.

Крім того, треба вживати й інші заходи щодо поліпшення екологічних характеристик робочих процесів двигунів, в тому числі:

- підвищувати однорідність горючої суміші (гомогенність), ідентичність її складу по циліндрах й за робочими циклами;
- підвищувати стабільність спалахування горючої суміші й ідентичність циклів при малих навантаженнях, при перехідних процесах;
- використовувати різні способи розшарування заряду в камері згоряння шляхом подачі (вприскування) палива у зону свічки запалювання з одночасним збідненням суміші в решті об'єму КЗ; це зменшує концентрацію NO_x, CO у викидах;
- використовувати спеціальні присадки до бензинів, переводити двигуни на газ, що вдвічі знижує NO_x;
- застосовувати часткову рециркуляцію відпрацьованих газів шляхом перепуску 10–15 % ВГ з випуску на впуск; загально визнано цей захід одним з ефективніших для зменшення токсидів (NO_x) у відпрацьованих газах. Рециркуляція зменшує $T_{газ_{max}}$ у циліндрах двигунів й знижує до 60 % концентрацію NO_x у ВГ, хоча дещо зменшує N_e та g_e. Аналогічний ефект дають добавлення води у паливо (водопаливна емульсія) або вприскування води у впускний трубопровід.

Більш детально зупинимося на найбільш ефективному заході забезпечення екологічної безпеки двигунів – на нейтралізації їх викидів.

У термічних (двокомпонентних) регенераторах можливе проведення лише окислювальних реакцій, що сприяє допалюванню CO, C_nH_m до повного згоряння.

Тому термічні нейтралізатори практично витіснилися каталітичними (трикомпонентними) регенераторами, в яких можливі не тільки окислювальні, але й відновлювальні реакції, що сприяє розкладенню NO_x у вихідні речовини O_2, N_2.

Для хімічної нейтралізації ВГ бензинових двигунів можуть застосовуватися різні каталізатори: металеві (платина, паладій – гостродефіцитні й коштовні) й із окислів перехідних дешевих металів (мідь, нікель, хром, за-

лізо та ін.). Останній тип каталізаторів запропонований вченими НТУ "ХПІ". Треба пам'ятати, що нормальна робота окислювальних каталізаторів для допалення CO, C_nH_m можлива тільки при стехіометричному складі горючої суміші ($\alpha \approx 1$).

Відновлення NO_x йде шляхом відторгнення кисню відновлювального середою, наприклад, за реакцією $NO_x+CO=CO_2+N$, яка відбувається у присутності відповідного каталізатора.

При подальшому добавленні додаткового повітря в каталізатор токсиди CO й C_nH_m під впливом каталізатора або (та) високих температур окислюються до CO_2, H_2O.

Для всіх цих антитоксичних заходів, перш за все, для підвищення їх ефективності й стабільності на сучасних двигунах вирішальну роль відіграють КБК токсичністю (забезпечують керування нейтралізатором викидів) і КПСК паливо-повітропостачанням (забезпечують керування складом горючої суміші, змінюють θ, фази газорозподілу тощо). Все це дозволяє суттєво знизити рівень токсичності двигунів.

З урахуванням проведеного аналізу можна сформулювати основні вимоги до комп'ютерних блоків керування рівнем токсичності й відповідних каналів КПСК паливо-повітроподачею:

- КБК повинен забезпечити на кожному експлуатаційному режимі стехіометричний склад горючої суміші ($\alpha \approx 1$) для нормального функціонування каталізаторів-окислювачів при допаленні в камерах нейтралізатора токсидів CO й C_nH_m;
- КБК повинен забезпечити на тих же режимах спеціальні відновлювальні середовища для розкладання токсиду NO_x на нетоксичні речовини у камері нейтралізатора цього токсиду;
- обидві КПСК повинні на усталених режимах та при перехідних процесах оптимізувати склад горючої суміші (по α) та параметри двигуна (θ, t_z, p_z тощо) за критерієм мінімізації концентрації токсидів у ВГ, в тому числі на холостих ходах, примусовому холостому ході, режимах $N_{e\max}$, $M_{e\max}$ й переходах до них і з них;
- КБК повинен на експлуатаційних режимах здійснювати керування схемою рециркуляції ВГ за критерієм зниження токсичності викидів за умови несуттєвого погіршення g_e;

г КБК повинен керувати подачею додаткового повітря в окислювальні камери.

Повинні бути складені й реалізовані в КПСК, КБК програми керування ДВЗ, рециркуляцією й нейтралізатором на основі зняття регулювальних характеристик токсичності викидів двигуна в умовах експлуатації.

Дуже принциповою є загальна вимога: програми керування токсичністю ДВЗ повинні відповідати діючим та враховувати перспективні норми на токсичність бензинових двигунів. Для прикладу наведемо такі норми для США (табл. 5.1). Підкреслимо, що таких норм дуже багато, оскільки вони встановлюються за регіонами, країнами для самих різних класів двигунів.

Таблиця 5.1 – Граничні значення викидів токсичних речовин з ВГ легкових автомобілів, встановлені у США [4]

Рік	Викиди, г/мілю		
	CO	C_nH_m	NO_x
1993	3,4	0,25	0,4
2003	1,7	0,125	0,2

У дизелях при згорянні отримуються токсиди, дещо відмінні від таких у двигунах з іскровим запалюванням. Основні компоненти дизельних викидів: оксиди азоту NO_x й і сажеві частинки з канцерогенними адсорбентами. Концентрація CO, C_nH_m у відпрацьованих газах дизелів звичайно невелика, бо у робочій суміші завжди є значний надлишок кисню ($\alpha > 1$).

На швидкість створення NO_x, як і у бензинових двигунах, дуже впливає T_{max} в локальних зонах спалахування з α = 0,8...1,0. З урахуванням підвищених ступенів стиску ε у сучасних дизелів (ε =20 та вище) зміст NO_x у відпрацьованих газах приблизно такий же, як і у двигунів з іскровим запаленням (з можливим перевищенням у 2 рази).

Частинки сажі також створюються у зонах $T_{газ_{max}}$ та недоліку кисню й характеризують димність.

Як і для бензинових двигунів, токсичність викидів залежить від режимів роботи, ε , θ, і т.ін. Ці викиди також жорстко нормуються (табл.5.2).

Таблиця 5.2 – Нормативи емісій ЄЕС для дизелів легкових автомобілів [5], г/мілю

Емісія	Норматив [5]			
	1993 – EURO I	1996 – EURO II	2000 – EURO III	2005 – EURO V (план)
Тверді частки	0,29	0,20	0,10	0,06
CO	8,00	1,50	0,95	0,74
$C_nH_m+NO_x$	2,00	1,60	0,86	0,46

Для зниження токсичності й димності відпрацьованих газів дизелів застосовують різні способи, в тому числі:

- удосконалюють процеси сумішоутворення й згоряння шляхом підбору конструкцій камер згоряння й випускного тракту, характеристик паливоподачі й розпилювання, тиску наддуву, ε , θ та ін.;
- поліпшують фізико-хімічні характеристики палива, в тому числі добавленням відповідних присадок, які роблять більш ефективним процес вигоряння;
- застосовують автомати, або виконавчі механізми в КПСК, що застережують перезбагачення суміші при перехідних процесах, пов'язане з відставанням повітроподачі від паливоподачі до циліндрів у зв'язку з інерційністю ТК;
- застосовують часткову рециркуляцію відпрацьованих газів на режимах малих навантажень й холостого ходу (до 20 % від об'єму заряду), що може зменшити на 40–50 % концентрацію NO_x. Цей ефект, як і у двигунах з іскровим запалюванням, пов'язують зі зменшенням максимальної температури робочого циклу та концентрації кисню в горючій суміші. На жаль, рециркуляція ВГ у дизелях збільшує витрату палива й викиди CO;
- застосовують каталітичні (трикамерні) нейтралізатори, що вбудовуються у випускні колектори дизеля. В них під впливом каталізатора або високих температур газів у циліндрах окислюється значна кількість CO, C_nH_m, що містяться у ВГ.
- специфікою робочого процесу дизелів є те, що на будь-якому режимі в циліндрах $\alpha > 1$, тобто у відпрацьованих газах завжди присутній

вільний кисень. Це утруднює створення в нейтралізаторі відновлювальні середи для розкладання в ній токсиду NO_x на нетоксичні речовини.

Для подолання цієї труднощі вже розроблені конкретні заходи [3].

Так, в патентах США, Японії, Німеччини та інших провідних країн рекомендуються засоби, що базуються на знешкодженні ВГ дизелів від NO_x використанням аміаку (відновлювач, що важливо, бо треба зменшити α до 1,0), який вприскується у випускний колектор з подальшою подачею ВГ в каталітичний нейтралізатор окислювального типу. Засоби забезпечують ступінь нейтралізації ОГ від NO_x на 80 % при t = 200–600 °С, залежно від навантаження і $t_{газ}(t_{вг})$. Рідинний аміак, що зберігається в окремому балоні, вприскується у трубопровід форсункою під тиском 1,4 МПа окремою секцією паливного насоса. Витрати аміаку складають 0,1–10 % від витрати палива.

У японській розробці аналогічного заходу для відновлення NO_x передбачено отримання NH_3 (аміаку) в одному з нейтралізаторів.

Запропоновані й спеціальні каталізатори для очищення ВГ від NO_x. Подібний каталізатор забезпечує розпад NO_x в окислювальній атмосфері на N_2 й O_2; в ньому використані метал Re й суміш його із CO; додається присадка Li_2O (0,2 %).

Інший нейтралізатор каталітичного очищення ВГ від NO_x запропонований на основі двооксиду ванадію та оксиду титану з додатком окису алюмінію та інш. До ВГ підмішують NH_3, який на поверхні матриці нейтралізатора вступає в реакцію з NO_x з утворенням азоту та води.

Серед відзначених заходів, як і у бензинових двигунах, досить ефективні ті, які сприяють оптимізації на експлуатаційних режимах складу суміші (α) , θ, й $T_{газ_{max}}$.Такою оптимізацією керують КПСК у складі КСК ДВЗ; вони ж регулюють рециркуляцією.

Керування нейтралізатором покладено на КБК рівнем токсичності.

Проведений розгляд проблеми токсичності дизелів дозволяє сформулювати вимоги до означених КПСК та КБК.

Практично вони повторюють вимоги для бензинових двигунів за винятком пункту про забезпечення стехіометричного складу суміші на експлуатаційних режимах, оскільки в дизелях завжди $\alpha > 1$.

Додаються вимоги до КБК стосовно керування вприскуванням NH_3 до першої (по ходу ВГ) відновлювальної камери нейтралізатора (тут відбу-

вається розпад NO_x).

Природно, як і для бензинових двигунів, треба мати програми керування ДВЗ, рециркуляцією, нейтралізатором на основі робочих регулювальних характеристик викидів дизелів в експлуатаційних умовах. Ці програми повинні відповідати міжнародним нормативам на токсичність дизелів різних призначень.

5.1.2. Особливості побудови КБК рівнем токсичності ДВЗ

Зупинимося на особливостях побудови таких КБК, що складаються з датчиків, виконавчих пристроїв, електронних засобів формування командних імпульсів й електронізованих каналів зворотних зв'язків (адаптації).

Спочатку розглянемо програмне забезпечення КБК рівнем токсичності. Складанню програми керування каталітичним нейтралізатором повинно передувати складання програми керування робочим процесом двигуна, включаючи регулювання рециркуляцією (реалізується КПСК паливоповітропостачанням). Це надасть можливість настроювати нейтралізатор на зниження токсичності викидів після того, як її вже зменшено за рахунок попередньо проведеної оптимізації робочого процесу дизеля й процесу рециркуляції ВГ.

Складення програми дозування паливо- і повітропостачанням у дизелі із умов мінімальної токсичності є більш складною задачею, ніж, наприклад, програмування найкращої паливної економічності.

Адже у відпрацьованих газах двигунів, наприклад, з іскровим запалюванням, присутні й найбільш шкідливі два токсиди: CO (при $\alpha < 1$) та NO_x (при $\alpha > 1$).

З рис. 5.1 випливає, що оскільки поява кожного токсиду обумовлена різними процесами, вплив факторів на їх концентрації у ВГ різні. Треба складати дві програми, що переускладнює КПСК, тобто не є бажаним.

Краще скласти єдину програму, якщо виходити з оцінок токсичного ефекту кожного з них, визначивши ці оцінки у відносних величинах в порівнянні з одним із них. Врахуємо, що на базі санітарних нормативів на граничний зміст токсидів у навколишньому середовищі можна у першому наближенні так оцінити агресивність компонентів ВГ по відношенню до токсичності монооксиду вуглецю: $CO:NO_x:C_nH_m=1:10:0,67$. Тепер можна знайти сумарну токсичність ΣT на вході в нейтралізатор, приведену до CO

у г/(кВт·год), тобто поділену на N_e. Далі знаходимо сумарну мінімальну токсичність для кожного експлуатаційного режиму, тобто для конкретних N_e, g_e, n, θ, α, p_s, t_s та ін.

У результаті й отримуємо програму керування у вигляді співвідношення $G_п=f(p_s/t_s)$ або $G_п=\varphi(p_{труб})$, де позначення відповідають рис.2.1. Ці співвідношення, природно, відповідають умові $\Sigma T_{ДВЗ}=\min$ та іншим обмеженням.

За такою програмою керування (для КПСК) й складають власне програму керування КБК за критерієм мінімуму токсичності викидів $\Sigma T_{вик}$ після нейтралізатора, тобто на останній покладається задача нейтралізації кількості оксидів, що являє собою різницю $\Delta\Sigma T=\Sigma T_{ДВЗ}-\Sigma T_{вик}$.

Звичайно, програма $\Delta\Sigma T_{ДВЗ}$ складається з урахуванням ефекту рециркуляції ВГ.

На рис. 5.4–5.5 показані функціональні схеми мікропроцесорного керування рівнем токсичності ДВЗ, які забезпечують реалізацію програм такого керування.

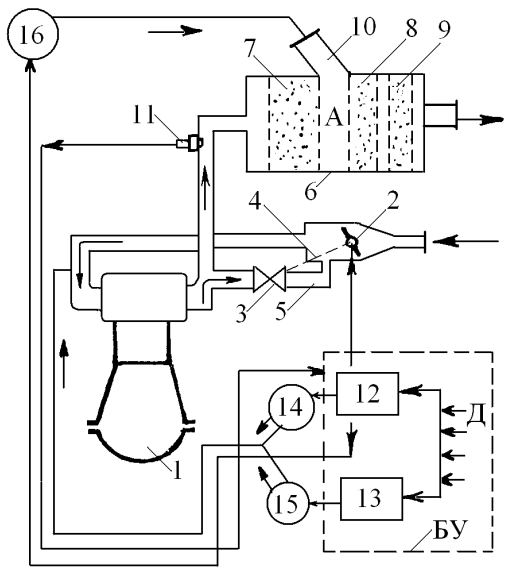


Рисунок 5.4 - Функціональна схема КБК очищенням ВГ двигуна з іскровим запалюванням на основі трикомпонентного (трикамерного) нейтралізатора й рециркуляції ВГ:

1 – двигун; 2 – дросель; 3 – клапан перепуску; 4 – зв'язок цього клапана й дроселя; 5 – тракт перепуску; 6 – нейтралізатор; 7 – відновлювальний реактор; 8 – окислювальний реактор допалювання CO; 9 – окислюючий реактор допалювання C_nH_m; 10 – подача вторинного повітря; 11 – λ-зонд; 12 – повітроподавальна магістраль; 15 – паливоподавальна магістраль; 16 – агрегат подачі вторинного повітря; 17 – датчик КСК ДВЗ

Запропоновані конструкції КБК токсичністю викидів ДВЗ різних типів, але, як правило, такі блоки вбудовуються у комплексні КСУ ДВЗ.

Прикладом такого підходу являється КСУ фірми BMW для дизеля з турбонаддувом легкового автомобіля. По закладеній у пам'ять мікроЕОМ багатопараметричної характеристиці (програми) КСК за сигналами відпо-

відних датчиків оптимізує значення $\varphi_{зап}$, $g_ц$, p_s із умови отримання мінімальної витрати палива при забезпеченні на кожному експлуатаційному режимі димності випуску, викидів NO_x з ВГ, а також шуму.

Подібні підходи використовуються й в розробках КСК двигунами різних фірм: Daimler Benz, General Motors, Toyota, Hitachi, Caterpillar, Lucas тощо.

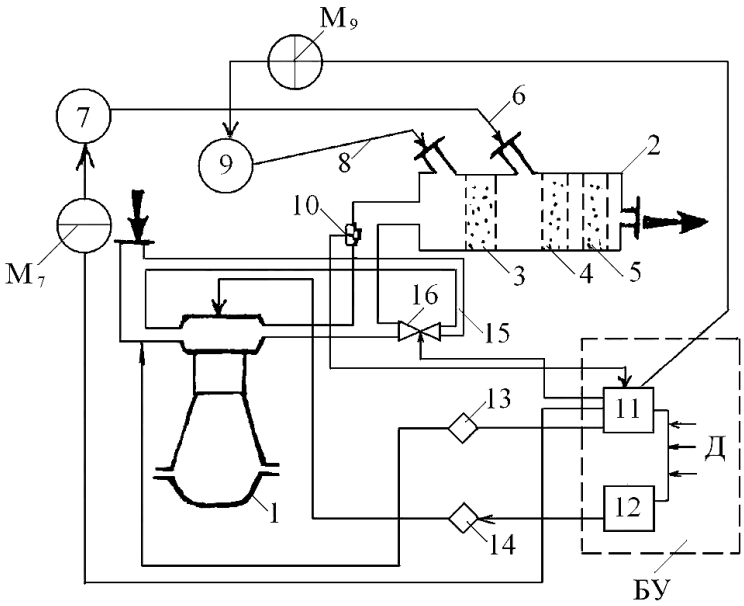


Рисунок 5.5 - Функціональна схема КБК очищенням ВГ дизеля на основі трикомпонентного нейтралізатора й рециркуляції ВГ:

1 – дизель; 2 – нейтралізатор; 3 – відновлювальний реактор для нейтралізації NO_x; 4 – окислювальний реактор допалювання CO; 5 – окислювальний реактор допалювання C_nH_m; 6 – подача вторинного повітря; 7 – агрегат подачі цього повітря; 8 – подача аміаку для відновлення NO_x; 9 – агрегат подачі аміаку; 10 – λ-зонд; 11 – КПСК повітроподачею; 12 – КПСК паливоподачею; 13 – повітроподвальна магістраль; 14 – паливоподавальна магістраль; 15 – тракт перепуску; Д – датчики КСК ДВЗ; M_7 – пристрій подачі вторинного повітря; M_9 – пристрій подачі аміаку

5.1.3. Датчики та виконавчі пристрої КБК екологічними характеристиками ДВЗ

Трикомпонентний каталітичний нейтралізатор, в принципі, здатний вирішувати задачу забезпечення нормативних значень екологічних показників ДВЗ.

Однак для його нормального функціонування необхідно, як вказувалося вище, створити умови роботи двигуна на стехіометричному ($\alpha \approx 1$) складі робочої суміші.

Складення жорсткої програми для КБК токсичністю із умов виготовлення горючої (робочої) суміші постійного стехіометричного складу традиційними засобами не вдається. Дуже різноманітні режими роботи, наприклад, автомобільного двигуна й умови його експлуатації.

Очевидно, що без адаптивного автоматичного каналу дозування у складі КПСК паливо - і повітроподачею поставлену задачу вирішити неможливо.

Для такого рішення розроблено спеціальний датчик, що регіструє стехіометричний склад горючої суміші за присутністю кисню у ВГ. Датчик отримав назву – λ-зонд (тобто зонд, що фіксує склад суміші за коефіцієнтом надлишку повітря; по-англійські λ – адекватно нашому α).

Якщо ВГ подати на такий датчик, то при появі в них кисню ($\alpha > 1$) на контактах датчика різко падає напруга; якщо горюча суміш переходить в зону збагачення ($\alpha < 1$), то відмічена напруга струму в колі датчика зростає. Таким чином, датчик дає можливість використовувати його при автоматичній стабілізації складу горючої суміші у зоні її стехіометричного складу і, тим самим, забезпечує ефективне функціонування каталітичного нейтралізатора.

При включенні λ-зонда в КСК ДВЗ канал адаптації стає замкнутим з контуром зворотного зв’язку й набуває всі властивості програмно-адаптивних каналів.

Виконавчим пристроєм КБК є все та ж повітряна заслінка, яка своїм власним установочним пристроєм прикривається чи відкривається на визначений кут. При переході, наприклад, в зону збагаченої суміші в ОГ зникає вільний кисень, датчик O_2 подає командний імпульс й повітряна заслінка трохи відкривається до моменту появи у ВГ вільного O_2. Таким чином, забезпечується адаптивне підтримання стехіометричного складу горючої суміші, необхідне для нормальної роботи каталізатора окислювальних камер.

Будова λ-зонда подана на рис.5.6. Чутливим елементом є ковпачок, виконаний із кераміки (диоксиду цирконію).

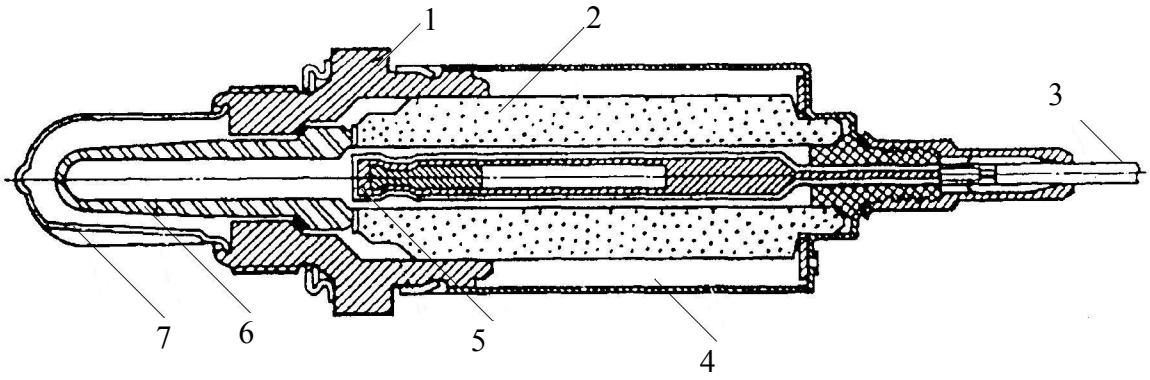


Рисунок 5.6 – Датчик кисню (λ-зонд) на основі диоксида цирконію:

1 – металевий корпус із різьбою; 2 – керамічний корпус; 3 – поєднуючий кабель; 4 – зовнішній корпус; 5 – контактний наконечник; 6 – активний керамічний ковпачок; 7 – захисний ковпачок з прорізями

Внутрішня й зовнішня поверхні ковпачка вкриті пористою платиною або її сплавом, який відіграє роль як каталізатора, так і токопровідника електродів. Диоксид цирконію ZrO_2 при високих температурах набуває властивості електроліту, електричний потенціал якого залежить від співвідношення парціальних тисків кисню у зовнішній та внутрішній поверхнях, а також від температури ковпачка. Датчик набуває властивостей гальванічного елемента й встановлюється у випускному трубопроводі двигуна, його чутливий елемент омивається ВГ, та якщо в їх складі відсутній кисень ($\alpha < 1$), то на його виході з'являється різниця потенціалів біля 0,9 В. При появі у ВГ кисню ($\alpha > 1$) різниця потенціалів на виході датчика різко зменшується до 0,1 – 0,15 В (рис.5.7).

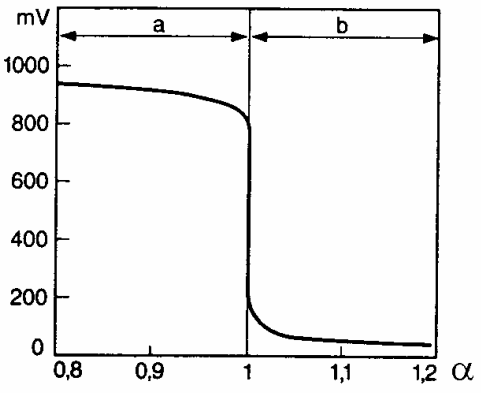


Рисунок 5.7 – Електричний сигнал λ-зонда на основі диоксиду цирконію

Таким чином, датчик працює у релейному режимі, що й дозволяє автоматично керувати складом суміші, підтримуючи його близько стехіометричного. Датчик працює у діапазоні температур газу 350-900 °С. Вище температури 900 °С датчик гріти не слід, тому що це призведе до швидкого його руйнування. Зовнішнє покриття виведено крізь корпус на масу.

Велике значення для нормальної роботи датчика має місце розташування на випускному трубопроводі двигуна. Чим ближче встановлений датчик до двигуна, тим вище сигнал (напруга) й тим менша його затримка. Але слід враховувати, що при невеликих відстанях від двигуна починає виявлятися неодномірність складу ВГ, що поступають у випускний колектор з різних циліндрів, а при віддаленні – зростає затримка сигналу, що спотворює динамічну характеристику КБК токсичністю. Найбільш прийнятними зонами встановлення датчика є зони на відстані 300–500 мм від фланця кріплення випускного трубопроводу до колектора.

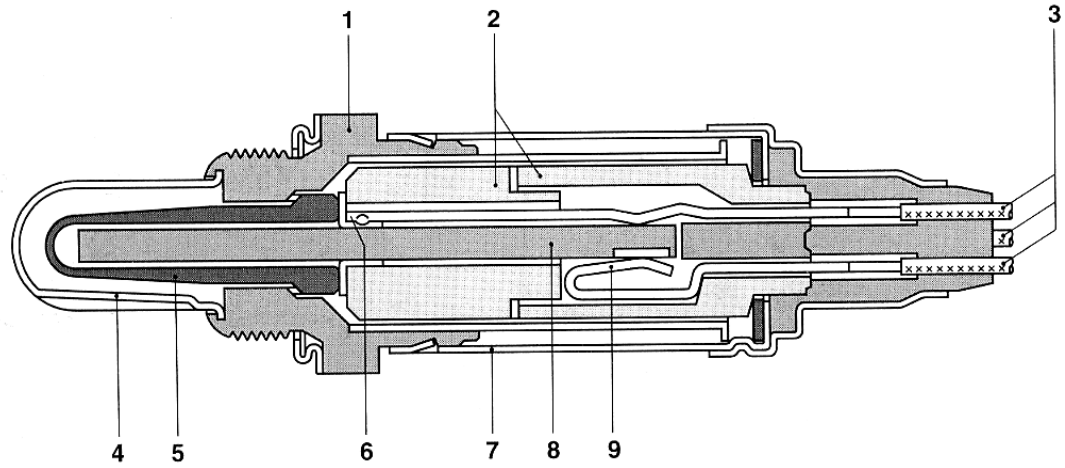


Рисунок 5.8 – Обігрівальний λ-зонд цирконієвого типу:

1 – корпус зонда; 2 – керамічна захисна труба із шлицями; 3 – приєднувальний кабель; 4 – захисна труба із шлицями; 5 – чутлива кераміка; 6 – контактна частина; 7 – захисна гільза; 8 – нагрівальний елемент; 9 – з'єднувальний контакт для нагрівального елемента

При температурах менше 300 °С датчик практично вже не працює, тому при прогріві двигуна й на режимах холостого ходу й малих навантажень, особливо при значних зниженнях температури навколишнього середовища, система нейтралізації ВГ стає малоефективною. Для розширення діапазону роботи застосовують датчики з електричним підігрівом (рис. 5.8). Зовнішній вид λ-зондів показаний на рис.5.9.

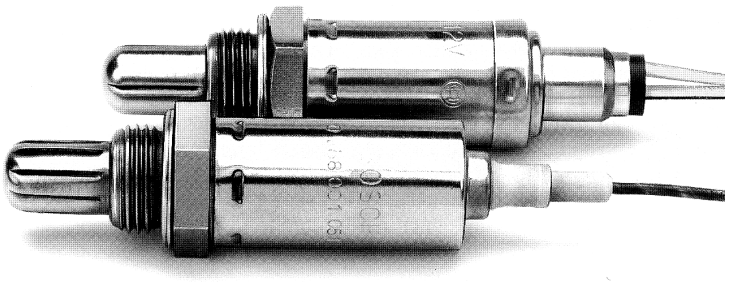


Рисунок 5.9 – Зовнішній вид λ-зондів цирконієвого типу

Крім цирконієвих датчиків кисню розроблено датчик на основі диоксиду титану T_iO_2, який являє собою (рис. 5.10) напівпровідник, що має при звичайній температурі активний омічний опір.

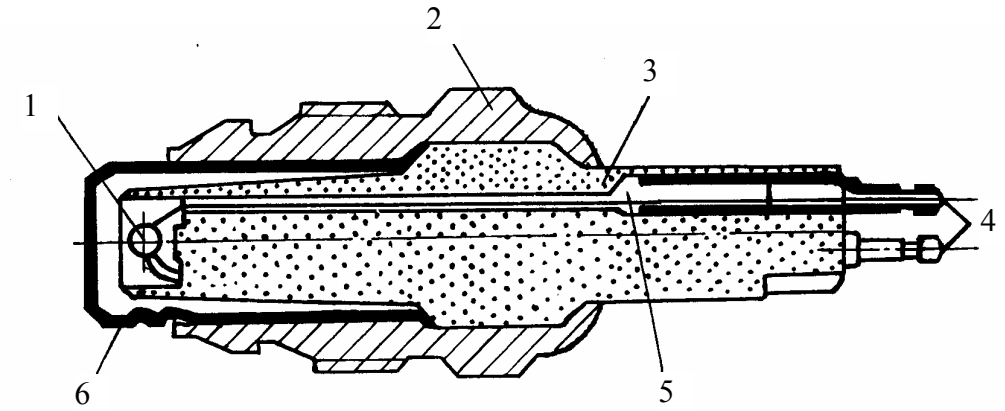


Рисунок 5.10 – Датчик кисню на основі TiO_2:

1 – елемент з TiO_2; 2 – металевий корпус з різьбою; 3 – керамічний ізолятор; 4 – вивідні контакти; 5 – керамічний цемент; 6 – захисний ковпачок

У середовищі з меншим парціальним тиском кисню, ніж у повітрі, наприклад у ВГ (при $\alpha > 1$), опір диоксиду титану падає, що фіксується вимірювальною потенціометричною схемою. Причому з підвищенням температури даний процес проходить більш інтенсивно й на більш низькому рівні електричного опору.

За даними випробувань обидва типи датчиків кисню для КПСК з зворотним зв'язком, що працює по програмно-адаптивній схемі, показують практично однакові результати за рівнем й стабільністю сигналу.

Слід підкреслити, що цирконійні λ-зонди, які найбільш поширені, створюють електричний сигнал безпосередньо (працюють як електрогальваничні елементи), тоді як титанові датчики діють як резистори, що змінюють електричний опір від складу ВГ, у яких вони знаходяться, тобто формують сигнал непрямим шляхом.

При реалізації заходів щодо обмеження рівня токсичності ВГ шляхом оптимізації складу горючої (робочої) суміші, значень θ, $T_{\text{газ}_{\max}}$ на експлуатаційних режимах роботи двигуна, включаючи неусталені (при перехідних процесах), використовуються датчики і виконавчі пристрої КПСК паливо- та повітроподачі. Ці датчики і пристрої розглянуті вище у гл. 3, 4.

Для подальшого покращення екологічних показників ДВЗ використовуються також й виконавчі пристрої, в яких безпосередньо змінюється хімічний склад (за компонентами) викидів.

Конструкції таких виконавчих пристроїв КБК токсичністю двигунів залежать від способу нейтралізації токсидів ВГ.

Найбільше поширення знайшли пристрої для хімічної нейтралізації та рециркуляції ВГ. Оптимальним вважається одночасне використання каталітичної нейтралізації разом з рециркуляцією ВГ.

Трикомпонентний нейтралізатор (рис. 5.11) улаштований та працює так.

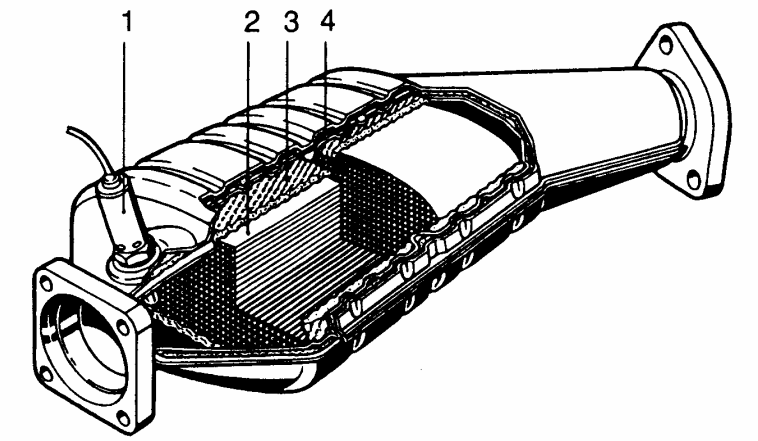


Рисунок 5.11 – Трикомпонентний каталітичний нейтралізатор з λ-зондом [4]:

1 – λ-зонд;
2 – керамічний моноліт;
3 – дрібно-сітчастий фільтр;
4 – термостійкий корпус з подвійною стінкою

Каталітичний нейтралізатор має у середині корпусу носій, на поверхню якого наноситься покриття з каталітичного матеріалу. За носій застосовується гранульована або монолітна керамічна основа. Монолітна структура характеризується такими перевагами: максимальним використанням каталітичної поверхні, довговічністю, фізичною міцністю, низькою тепловою інерційністю.

Активний каталітичний шар являє собою найтонше покриття дорогоцінними (благородними) металами (Pt, Rh, Pl), чутливими до змісту свинцю у паливі, при відкладенні якого активність каталітичного шару швидко спадає. Тому двигуни із каталітичними нейтралізаторами повинні експлуатуватися виключно на неетилірованому бензині.

Такий нейтралізатор з λ-зондом є найбільш ефективним виконавчим пристроєм КБК рівнем токсичності.

Три компоненти нейтралізатора (відновлювальний – для NO_x та два окислювальних – для CO й C_nH_m) включені послідовно (рис. 5.4, 5.5).

Спочатку ВГ надходять на відновлювальний реактор, який нейтралізує NO_x, потім для створення окислювального середовища в зону А нейтралізатора (рис. 5.4) підводиться вторинне повітря, кисень якого дозволяє послідовно допалити CO й C_nH_m.

Для забезпечення відновлювальної середи ВГ перед першим реактором нейтралізатора двигун за сигналами λ-зонда отримує горючу суміш з коефіцієнтом надлишку повітря α, близьким до стехіометричного, про що мова йшла вище.

Інакше вирішується питання нейтралізації ВГ у дизелях.

Отже дизелі завжди працюють з $\alpha > 1$ (окислювальна середа) й нейтралізації NO_x практично немає. Тому до NO_x у першому відновлювачі слід штучно додавати NH_3 (наприклад) й створювати відновлююче середовище ($\alpha \approx 1$); потрібні й відповідні нейтралізатори. Конкретні шляхи нейтралізації NH_3 розглянуті вище, у розділі 5.1.2.

До недоліків КБК токсичністю ДВЗ з нейтралізаторами відноситься необхідність вживати додаткові заходи для забезпечення стабільності роботи цих виконавчих пристроїв у процесі тривалої експлуатації. Ця проблема пов’язана з присутністю у ВГ речовин, що “отруюють” каталітичні покриття камер нейтралізатора (крім Pb ще й S); крім того, вічки каталізатора забиваються сажею, яка знижує його активність. Треба встановлювати перед нейтралізатором спеціальні сажевловлювачі, працювати на неетильованому бензині тощо.

На сучасних двигунах, крім λ-зондів й датчиків КПСК, встановлюються й інші датчики, перш за все – димоміри, а також інші, крім нейтралізаторів, виконавчі пристрої: вприскувачі води у впускний трубопровід, обмежувачі швидкості переміщення рейки ПНВТ в дизелях, або сповільнювачі такого переміщення, тощо.

На рис. 5.12 показаний пристрій для реєстрації рівня димності ВГ, що є датчиком адаптивного каналу керування рівнем диму на випуску двигуна. Димомір працює за принципом просвічування потоку ВГ за допомогою імпульсу вузькосфокусованого монохроматичного проміння від випромінювального діода. Випромінювання, яке частково поглинається частками сажі й аерозолями, що входять до складу ОГ, приймаються силіконовим фотодіодом. Основними елементами цього оптичного датчика димності ВГ дизеля є випромінювач й світлоприймач, замкнені у стакани, розта-

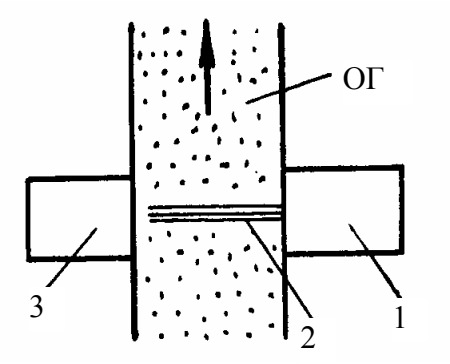


Рисунок 5.12 – Принципова схема оптичного димоміра КБК токсичністю:

1 – випромінювач;
2 – монохроматичний луч;
3 – фотодіод

шовані діаметрально протилежно на бокових стінках впускного трубопроводу й захищені світлопрозорими вікнами. Сигнал фотодіода обробляється в КБК.

На рис. 5.13 показаний пристрій обмежувача диміння дизеля типу СМД-60 (Україна). Він складається із діафрагмової коробки 2 та рухомого упора 5, який встановлено на осі 7, що запресована у корпус ПНВТ. При розгоні дизеля пружина 3 через шток 12 та рухомий упор 5 обмежують переміщення важеля 6 коректора у бік збільшення $g_{ц}$. Обмеження цикової подачі діє до моменту досягнення заданого тиску наддування. Зусилля від тиску p_s передається з ресивера по трубці 13 у порожнину А діафрагмової коробки, сприймається діафрагмою 1. Діафрагма прогинається та переміщує шток 12, який, перемагаючи опір пружини 3, відводить рухомий упор 5 від важеля коректора, знімаючи тим самим обмеження по цикловій подачі палива. Подальше дозування палива залежно від навантаження двигуна здійснюється КПСК паливоподачею ДВЗ.

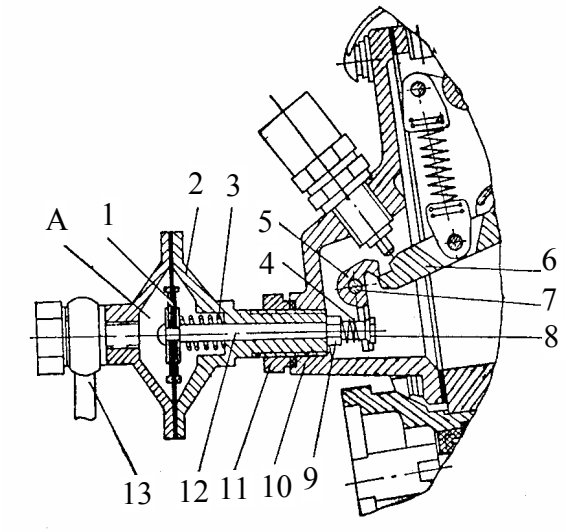


Рисунок 5.13 – Обмежувач диміння тракторного дизеля:

1 – діафрагма; 2 – коробка діафрагмова; 3, 4 – пружини; 5 – рухомий упор; 6 – важіль коректора; 7 – вісь рухомого упора; 8 – гайка контровочна; 9, 11 – гайки; 10 – кришка; 12 – шток; 13 – трубки підведення повітря із ресивера

На закінчення, детальніше зупинимося на рециркуляції ВГ як одному з ефективних засобів зниження концентрації NO_x у них.

Вона використовується за схемами:

- внутрішньої рециркуляції, що забезпечує відповідне регулювання фаз газорозподілу, а точніше, перекриття клапанів;
- зовнішньої рециркуляції з застосуванням керованих перепускних клапанів на випускному тракті.

В обох випадках ВГ направляються назад до КЗ для зниження максимальної температури згоряння з метою уповільнити створювання токсиду NO_x.

Проблема електронного керування фазами газорозподілу вже висвітлена вище, у гл. 4.

Розглянемо електричне керування зовнішньою рециркуляцією. На рис. 5.14 показаний приклад схеми означеної рециркуляції.

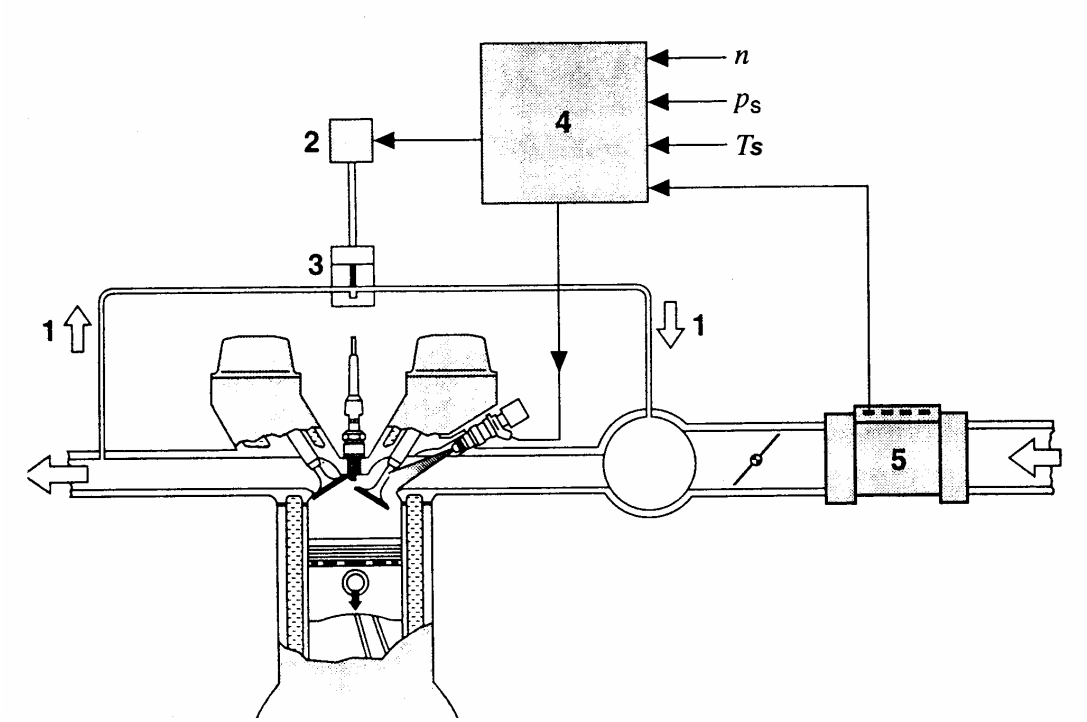


Рисунок 5.14 – Схема каналу рециркуляції ВГ у складі КСУ ДВЗ:

1 – рециркуляція ВГ; 2 – електропневматичний перетворювач; 3 – клапан рециркуляції; 4 – електронний пристрій керування; 5 – датчик масової витрати повітря; n – частота обертання колінчастого вала; p_s, T_s – відповідно тиск та температура наддуву

Практично вже всі сучасні системи рециркуляції функціонують за принципом саме зовнішньої рециркуляції ВГ.

Все частіше КПСК паливоподачею й КПСК повітропостачанням сучасних ДВЗ керують цим процесом на основі електромагнітного перетворювача, який включає в роботу клапан каналу рециркуляції.

Верхня межа ступеня рециркуляції ВГ залежить від збільшення викидів СО, зростання g_e та ін. У режимі холостого ходу рециркуляцію взагалі відключають, бо на такому режимі концентрація NO_x у ВГ несуттєва. Найбільший ефект вона дає на часткових режимах.

Одним з недоліків усіх схем рециркуляції є те, що на клапанах газорозподілу й каналу рециркуляції в трубопроводах створюються відкладення у вигляді нагару від ВГ, що поступово знижує ефективність рециркуляції по мірі відпрацювання моторесурсу двигуна.

5.2. Електронне керування кліматичною адаптацією ДВЗ

Специфіка кліматичних умов у регіонах світу суттєво впливає на роботу ДВЗ.

Такі зовнішні діяння, як запилення повітря, підвищені температури й вологість навколишнього середовища, падіння атмосферного тиску в умовах високогір'я та ін. погіршують основні техніко-економічні показники силових установок з двигунами і перш за все – продуктивність машин, паливну й мастильну економічність, моторесурс і безвідмовність тощо.

Узгоджене керування паливо – і повітроподачею в циліндри двигунів з використанням КПСК цими процесами являє собою найбільш плідний підхід в забезпеченні кліматичної універсальності ДВЗ.

5.2.1. Шляхи забезпечення кліматичної адаптації ДВЗ та вимоги до КБК з таким пристосуванням

У регіонах жаркого клімату та високогір'я треба в першу чергу забезпечити незмінність потужності, паливної економічності, динамічних якостей двигунів та їхню потрібну надійність.

Оскільки в таких випадках показники двигунів погіршуються, бо падає масова витрата повітря крізь циліндри (зменшується питома його вага), треба запроваджувати заходи щодо підтримання стабільності витрати повітря при зміні кліматичних умов. Не менш важливо здійснювати й корекцію паливоподачі, а точніше – адаптацію паливоподачі до кліматичних факторів, з тим, аби стабілізувати α.

У сучасних моделях двигунів такі проблеми вирішуються за рахунок розширення функцій КСК шляхом застосування електронних засобів керування кліматичною адаптацією.

Як і при керуванні рівнем токсичності, такі існуючі та додаткові засоби об'єднують у КБК кліматичної адаптації, що дозволяє задіяти всі необхідні зворотні зв'язки поміж двигуном і кліматом.

Зупинимося на шляхах узгодження результатів керування двигуном з кліматичними змінами на базі мікропроцесорної техніки.

Регульований наддув – ефективний засіб кліматичної адаптації двигуна, коли автоматично підтримується необхідний для кожного експлуатаційного режиму рівень наддуву при будь-якій зміні тиску навколишнього середовища. Без такої кліматичної адаптації тиску наддуву двигун при роботі на високогір'ї буде "задихатися", втрачаючи потужність турбіни ТК, p_s та t_s, g_e, N_e.

На відміну від кліматичної корекції повітроподачі, яка не потребує якихось особливих виконавчих пристроїв, крім традиційних для КПСК (оскільки не змінюється командний параметр (p_s / t_s), для здійснення кліматичної корекції паливоподачі доводиться розробляти спеціальні виконуючи засоби, що реагують саме на кліматичні характеристики. Такі пристрої вбудовуються в ЕР, КПСК.

Подібний системний підхід дозволяє відмовитися від використання спеціальних кліматичних коректорів дозування палива – висотних коректорів з некерованим керуванням або застосування термосилових елементів для заторможення подачі бензину. В дизелях можна відмовитись від коректорів паливоподачі анероїдного типу, муфт зміни випередження вприскування і т.д.

Аналіз шляхів кліматичної адаптації сучасних ДВЗ дозволяє сформулювати основні вимоги до КБК регіональною (кліматичною) адаптацією. До них відносять:

- ❖ стабілізацію номінальної (максимальної) потужності та високої паливної економічності двигуна у всьому діапазоні зміни кліматичного фактора при введених обмеженнях по токсичності викидів;
- ❖ збереження моторесурса двигуна, який функціонує в екстремальних кліматичних умовах;

❖ забезпечення уніфікації конструкцій виконавчих пристроїв для КБК з кліматичною адаптацією й КПСК паливо – та повітропостачанням.

5.2.2.Особливості КБК кліматичною адаптацією ДВЗ

Такі КБК повинні враховувати специфіку бензинових двигунів й дизелів. Тому розглянемо їх окремо.

КБК кліматичною адаптацією бензинових двигунів повинний задовольняти одну з важливих вимог, що ставиться до паливної апаратури сучасних ДВЗ – забезпечувати оптимальну автоматичну зміну паливоподачі та кута випередження запалювання залежно від параметрів навколишнього середовища й теплового стану двигуна. Останнє дозволяє врахувати й вимогу до кліматичної адаптації – підтримання високого моторесурсу при тривалій експлуатації двигуна в будь-якому регіоні з екстремальними умовами.

Із КСК ДВЗ з КБК кліматичною адаптацією треба виділити систему Bosch Motronic, в якій кліматичний фактор безпосередньо врахований при розробці КБК за рахунок адаптації складу горючої суміші за α до цього фактора. Командний сигнал керування паливоподачею формується за показниками датчика масової витрати повітря, тобто за комплексним критерієм, що найбільше реагує на будь-які зміни кліматичних умов. Калібровка (настройка) КПСК паливоподачею періодично корегується за сигналами датчика змісту кисню у ВГ. Таке корегування дозволяє виключити наслідки зміни характеристик витрати повітря під впливом кліматичного фактора, наприклад, запобігти перезбагаченню горючої суміші при експлуатації двигуна у висотних умовах. Фірмою розроблена й модифікація КБК наддувом при врахуванні швидкої зміни температури зовнішнього середовища. Система Bosch Motronic має особливості: вона забезпечує адаптацію паливоподачі при пуску й прогріві двигуна залежно від температури повітря на вході в нього, а також корекцію кута випередження запалювання на режимах холостого ходу й пуску в залежності від тієї ж температури. Крім того, КСК передбачує захист двигуна від перегріву, що особливо актуально при експлуатації двигуна в тропіках.

Аналогічні підходи використовують фірми Ford, Toyota, Nissan Motor та інш. [3].

Перспективними є багатомірні КСК автомобільними двигунами, які здійснюють одночасне керування α та $\varphi_{зап}$.

Підкреслимо, що всі розглянуті КСК мають добру кліматичну адаптацію, оскільки вона здійснюється за масовою витратою повітря (командний сигнал), тобто як за тиском, так і за температурою навколишнього середовища.

Прикладом адаптивного КБК у складі КСК двигуна є розробка фірми Daimler Bens та Bosch [3]. Цей електронний пристрій, крім звичайних датчиків і каналів керування (n, t_{ox} та ін.), включає адаптивний канал корегування кута випередження запалювання залежно від висоти над рівнем моря.

В КБК кліматичною адаптацією важливу роль відіграють датчики тиску навколишнього середовища (атмосферного тиску) p_0.

На відміну від механічних корегуючих засобів, дію яких важко розповсюдити на агрегати холостого ходу, в КБК регіональною адаптацією параметр p_0 як важлива кліматична характеристика врахований на всіх експлуатаційних режимах, включаючи холостий хід.

Датчик p_0 може виконуватися у вигляді анероїдного елемента, внутрішня порожнина якого запаюється при тиску 101 кПа. Із зміною p_0 анемометр деформується, приводячи у дію корегувальний потенціометр, який послідовно включений у коло інформації датчиків КБК (і КСК).

При складанні програми настройки датчиків p_0 слід виходити із залежності витрат повітря та витрат палива від p_0:

$$G_{н} = \mu G_0; \quad G_{п_н} \approx G_{п_0},$$

де μ - відношення тиску повітря $p_н$ на висоті H над рівнем моря до його тиску на рівні моря p_0.

З цих співвідношень бачимо, що із зменшенням p_0 й без корегування складу горючої суміші остання буде збагачуватися.

Така настройка дозволяє забезпечити складання програми адаптивного регулювання ТК, тобто наддуву (рис.5.15), при зміні висоти місця роботи двигуна над рівнем моря $p_н$. На цьому графіку всі параметри наведено у відносних величинах (по відношенню їх до значень при $H = 0$). Тут:

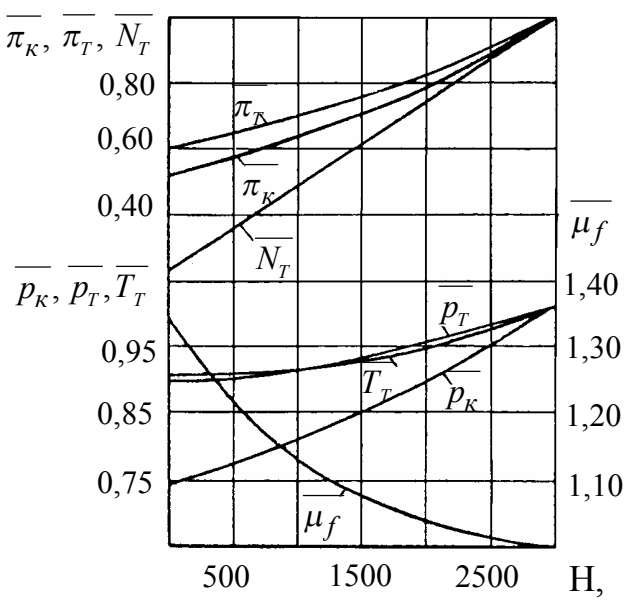


Рисунок 5.15 – Залежність параметрів настроєного газотурбонаддуву від висоти над рівнем моря

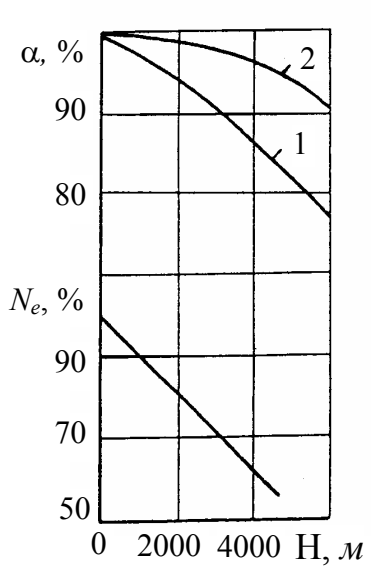


Рисунок 5.16 – Залежність коефіцієнта надлишку повітря α *й потужності* N_e *бензинового двигуна від висоти над рівнем моря:*

1 – факторний; 2 – оптимальний рівень α

$\overline{\pi_K}, \overline{\pi_T}$ – ступені підвищення тиску відповідно у компресорі і турбіні;

$\overline{p_K}$, $\overline{p_T}$ – тиски відповідно на вході в циліндр двигуна та на виході з нього;

$\overline{T_T}$ – температура ВГ перед турбіною;

$\overline{N_T}$ – потужність турбіни;

$\overline{\mu_f}$ – коефіцієнт місцевих аеродинамічних втрат.

На рис.5.15 показана програма КБК кліматичним повітропостачанням, яку слід реалізовувати регулюванням ТК, про що детально говорилося у главі 4.

Треба також складати, реалізувати й програму корегування паливоподачі при змінах кліматичного фактора. Про способи такого керування також детально говорилося у гл. 3.

Кінцевий результат адаптації КБК порівнює з занесеними у пам'ять мікро-ЕОМ залежністю $\alpha = f(H)$ та залежністю $N_e = \varphi(H)$, які реально повинні отримуватися як результат обробки відповідних регулювальних характеристик конкретного типу двигунів. На рис. 5.16 наведено такі залежності для бензинового двигуна [6].

КБК кліматичною адаптацією дизелів, як і для бензинових двигунів,

також вбудовують у КСК ДВЗ.

Прикладом такого підходу є КСК фірми Bosch [3], яка включає дві КПСК (паливо – та повітропостачанням), за допомогою яких, крім основних функцій, здійснюються висотна (за p_0) й температурна (за t_0) корекції складу робочої суміші (α). Це зберігає потужність й економічні показники дизеля при зміні кліматичного фактора у широкому діапазоні. Основна мета розробки – створення комп'ютерного керування сумішоутворенням у дизелі, що дозволяє оптимізувати подачі палива та повітря на всіх експлуатаційних режимах роботи дизеля з корегуванням цих подач залежно від кліматичного (зовнішнього) фактора, а також поліпшити холодний пуск й знижувати рівень димності ВГ на всіх режимах, у тому числі при розгоні.

КСК фірми Bosch показана на рис.5.17.

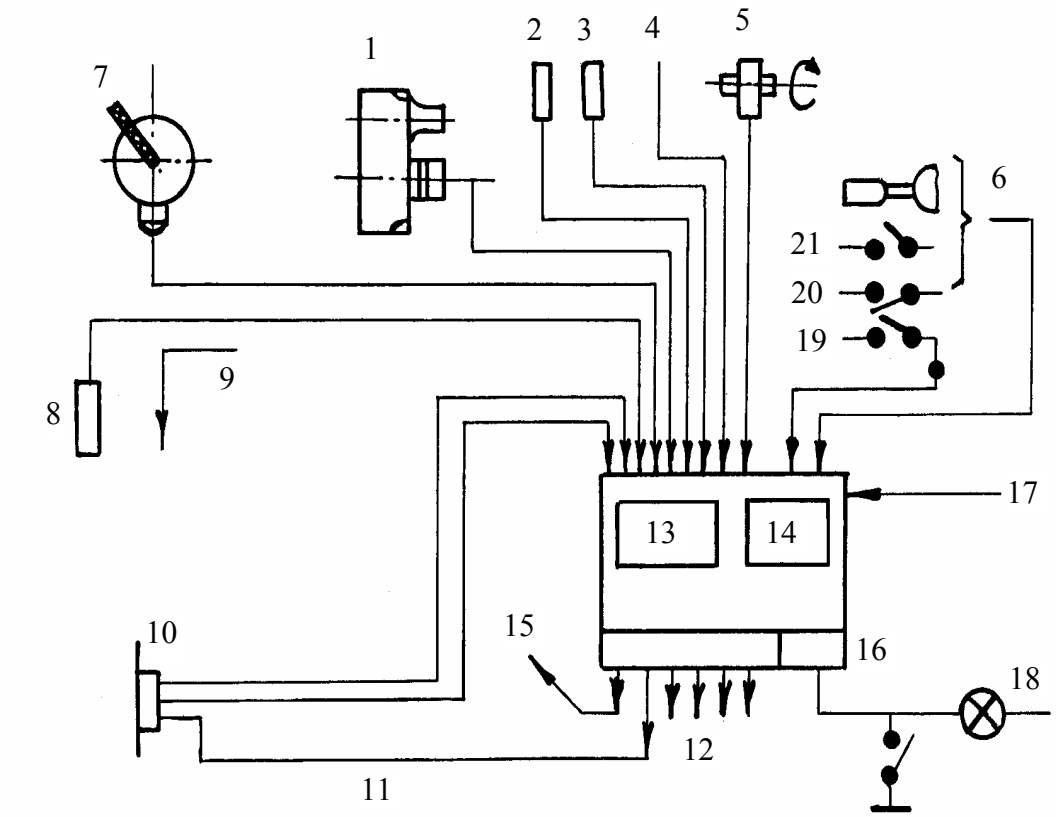


Рисунок 5.17 – Схема КСК фірми Bosch з ЕР:

1 – датчик тиску наддуву; 2 – датчик t_o; 3 – датчик t_{ox}; 4 – передача сигналу закінчення подачі палива; 5 – датчик швидкості автомобіля; 6 – регулювання швидкості руху; 7 – датчик положення педалі управління рухом; 8 – датчик температури палива; 9 – електромагнітний клапан зупинки; 10 – датчик положення рейки ПНВТ; 11 – передача режиму виконання діяння; 12 – передача режиму витрати; 13 – перший комп'ютер; 14 – другий комп'ютер; 15 – вихід КСК; 16 – діагностика підсистеми паливоподачі; 17 – режим захисту; 18 – контрольний показник; 19 – гальма двигуна; 20 – зчеплення; 21 – керування гальмами автомобіля

Керування здійснюється порівнянням вихідних параметрів дизеля (N_e, g_e, p_s, $T_{газ}$, димність) з програмою такого керування, яка показана на рис. 5.18. Маса повітря визначається за p_s, який враховує вплив кліматичного фактора (p_0, t_0). Встановлений датчик температури палива також сприяє корекції паливоподачі залежно від впливу t_0 на підігрів палива. Мова йде не тільки про корегування $g_ц$, а й про корегування θ (фаз паливоподачі). На рис.5.18 показані результати експериментів по кліматичній настройці КБК.

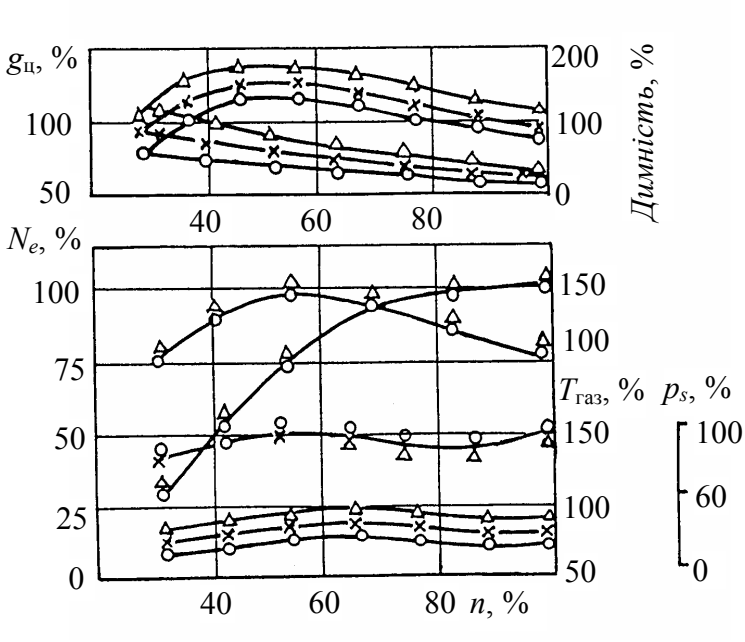


Рисунок 5.18 – Вплив температури наддуву t_s на N_e, M_e, димність, $T_{газ}$, p_s й $g_ц$ дизеля з ЕР (літраж 15 л) з проміжним охолодженням наддувного повітря):
о—о 4 °С
х—х 24°С
Δ—Δ 44 °С

На дизелі, оснащеному ЕР, встановлюється й датчик температури палива, отже, збереження маси палива при змінах температури навколишнього середовища може контролюватися й сприятиме кліматичній адаптації за критерієм незмінності N_e дизеля або димності при роботі дизеля в тропічних умовах.

5.3. КБК вторинним використанням теплоти в ДВЗ

Серед перспективних засобів поліпшення експлуатаційної паливної економічності дизелів відносною простотою, доступністю й широкими можливостями характеризується утилізація теплоти, відведеної від дизеля з відпрацьованими газами (ВГ) в систему його охолодження та далі – в навколишнє середовище. Ця теплота, що утилізується, може характеризуватися як потенційна теплота двигуна.

Отримані обнадійливі результати зменшення на 10 – 15 % витрати палива при використанні утилізації скинутої теплоти в автотракторних дизелях [7].

В НТУ "ХПІ" створено наукову школу з напрямку глибокої вторинної утилізації скинутої теплоти ДВЗ, досягнення якої загальновідомі [8, 9, 10, 11].

Ці розробки використовуються при створенні перспективних вітчизняних автотранспортних дизелів з метою підняти їхній технічний рівень до світових здобутків.

5.3.1. Наукові основи керування утилізацією теплоти в турбокомпаундних дизелях

Загальновідомо, що більша частина теплоти, підведеної до робочого тіла ДВЗ при згорянні палива в циліндрах, не перетворюється в ефективну роботу, а відводиться в навколишнє середовище (табл.5.3), причому доля цього тепловідводу ще здатна здійснювати роботу, бо містить її працездатну частку, або ексергію [7, 8, 9, 10]. У табл. 5.3: $q_{вг}$, $q_{ох}$ – відносні втрати теплоти з випускними газами та в охолоджувальну воду (ОВ).

Таблиця 5.3 – Часткові теплові баланси ДВЗ (%)

Тип ДВЗ	η_e	$q_{вг}$	$q_{ох}$
Бензинові	22 – 29	30 – 55	20 – 35
Дизельні, в тому числі	35 – 46	23 – 42	15 – 27
– без наддуву;	29 – 42	25 – 35	20 – 35
– з помірним наддувом;	35 – 45	25 – 45	10 – 25
– з високим наддувом	40 – 48	20 – 45	10 – 18

Підвищення ефективності теплових двигунів за рахунок утилізації теплоти, що відводиться в навколишнє середовище з ОВ та ВГ, є одним з найважливіших засобів вдосконалення КСК ДВЗ.

Комбіновані двигуни (КДВЗ) з силовими газовими турбінами (СГТ) Перспективним напрямом вдосконалення дизелів, в тому числі швидкохідних, визнано розробку КДВЗ з СГТ для первинного використання скинутої теплоти.

Ефективність КДВЗ обумовлена її схемою. Комбіновані двигуни можуть бути з послідовним або послідовно-паралельним розташуванням турбіни ТК й СГТ (рис. 5.19). З цих трьох схем кращою є схема *а*), у якій турбіна ТК стоїть першою за ходом руху ВГ [10].

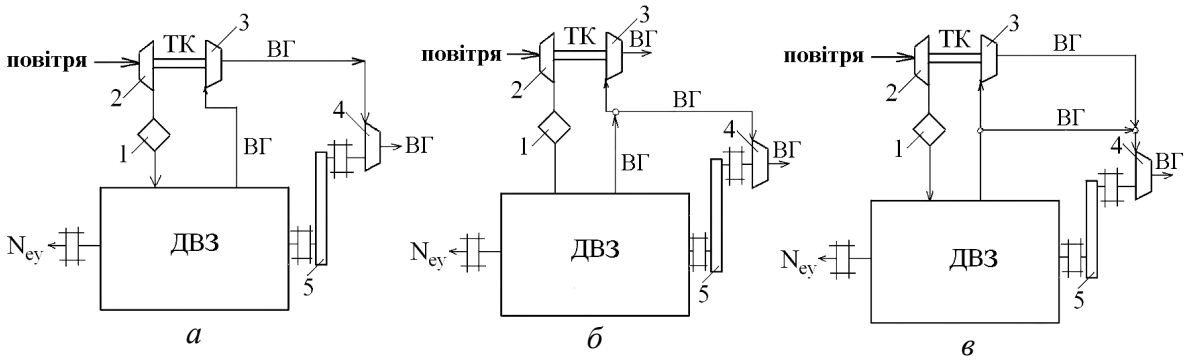


Рисунок 5.19 – Схеми КДВЗ з СГТ:

а –послідовне розташування СГТ та турбіни ТК;
б –паралельне розташування СГТ та турбіни ТК;
в – послідовно-паралельне розташування цих турбін;
1 – охолоджувач наддувного повітря; 2 – компресор ТК; 3 – турбіна ТК; 4 – СГТ; 5 – редуктор передачі потужності з СТ на колінчастий вал дизеля

В НТУ “ХПІ” проведено розрахунково-експериментальне дослідження тракторного дизеля типу СМД (4ЧН 12/14) з СГТ, додаткова потужність якої передається на колінчастий вал дизеля через варіатор, що регулює передаточне відношення між ротором СГТ та *n* двигуна. Варіатор дозволяє підтримувати практично постійний ККД цієї турбіни у робочому діапазоні навантажень. Отриманий реальний економічний ефект від застосування на дизелі СГТ, причому з варіатором на 2 % вищий.

Природно, що ефективність СГТ залежить від ККД цієї турбіни та турбіни ТК, які не повинні бути меншими, ніж 0,72 – 0,75.

Дизелі з утилізацією (вторинним використанням) зброснї теплоти

Найвищий рівень тепловикористання досягнуто у КДВЗ, оснащених пристроями утилізації теплоти [9, 10]. Виявлена тенденція розширення використання утилізаційних контурів в ДВЗ наземного транспорту [11].

Одною з найперспективніших є схема КДВЗ як силова установка трактора, розроблена фірмою Caterpillar (рис. 5.20).

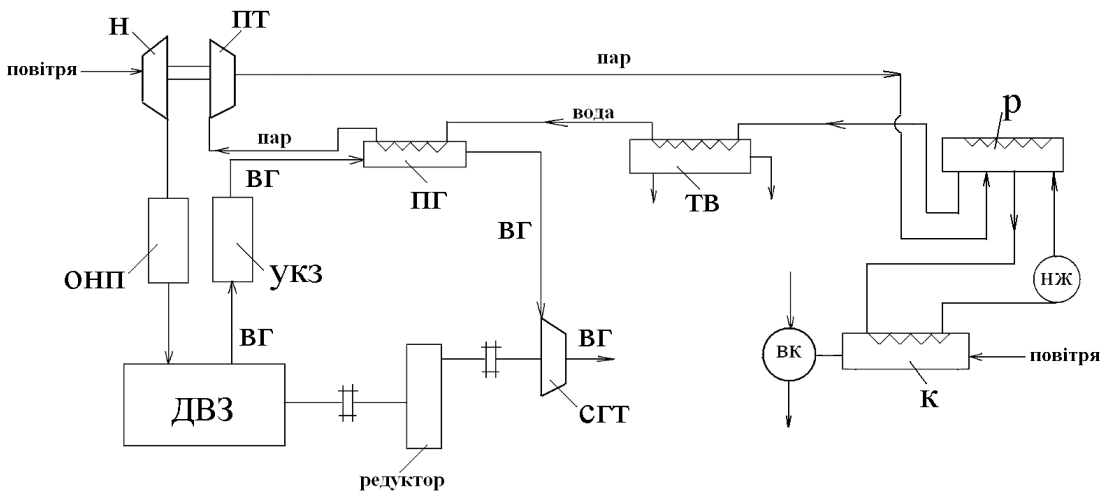


Рисунок 5.20 – Схема турбокомпаундного КДВЗ з силовими газовою й паровою турбінами:

Н – нагнітач; ПТ – парова турбіна; СГТ – силова газова турбіна; УКЗ – утилізаційна камера згоряння; ПГ – парогенератор; К – кондиціонер; НЖ – насос живлення; Р – регенератор; ТВ – теплообмінник водяний; ОНП – охолоджувач наддувного повітря; ВК – вентилятор системи тепловідводу парового робочого циклу

Її особливістю є застосування одночасно СГТ та парової турбіни (ПТ) для приводу компресора наддуву. Застосована додаткова утилізаційна КЗ, задача якої – підтримання потрібного режиму роботи ПТ. Принциповим є й те, що разом утилізуються два потоки теплоти – від ВГ й охолоджувальної рідини. Принципово й те, що теплоту від конденсату пристрою утилізації відводять за допомогою навколишнього середовища, тобто залежно від зовнішніх умов експлуатації трактора.

5.3.2. Оцінка ефективності утилізації теплоти в КДВЗ

Для такої оцінки застосовують співвідношення, що випливають з першого й другого законів термодинаміки.

Перший закон дозволяє сформулювати співвідношення теплових балансів у схемі КДВЗ, а другий – співвідношення працездатностей потоків енергії у тій схемі. Останнє поясняє справжні (реальні) резерви підвищення ефективності роботи схеми утилізації КДВЗ.

Проведемо такі оцінки. При цьому енергетичні потоки розглядаються як такі, що містять ексергію (працездатність) частки, відповідно, тепло-

ти E_Q, ентальпії Е та внутрішньої енергії E_U й непрацездатні частки (анергію) A_Q, A, A_U, коли

$$Q = E_Q + A_Q$$

$$H = E + A; \tag{5.1}$$

$$U = E_U + A_U$$

де Q, H та U – відповідно теплота, ентальпія й внутрішня енергія.

Звідси випливає енергетичний баланс КДВЗ на основі ексергетичних показників, що оцінюють працездатність потоків енергії:

$$\eta_e = 1 - \left(e_{\text{вг}} + e_{\text{нп}} + e_{\text{ох}}\right) - \sum d\,, \tag{5.2}$$

де η_e – ефективний ККД КДВЗ; e – відносна працездатна частка енергії; d – відносна втрата енергії.

Індекси ВГ, НП, ОХ відповідно відмічають відпрацьовані гази, наддувне повітря, охолоджувальну воду.

Ефективність утилізації в КДВЗ обумовлена втратами енергії у вузлах дизеля.

Резерви утилізаційного контуру КДВЗ залежать від величини $\left(e_{\text{вг}} + e_{\text{нп}} + e_{\text{ох}}\right)$.

Треба враховувати, що робочий цикл комбінованого ДВЗ з утилізацією є бінарним циклом, тобто таким, де присутні два робочі цикли теплових двигунів – основний та додатковий, причому додатковий цикл утилізує теплоту основного.

Може бути проведена оцінка ефективності утилізації в КДВЗ за ексергетичним його ККД на основі урахування втрат ексергії у всіх термодинамічних вузлах КДВЗ з утилізацією.

Для потреб настройки КБК утилізацією скинутої теплоти достатньо користуватися формулою для такої КДВЗ:

$$g_{e.\text{у}} = \frac{B_{\text{ч.у}}}{N_e + N_{\text{с.г.т}} + N_{\text{в.в.т}}} = \frac{B_{\text{ч.у}}}{N_{e.\text{у}}}, \tag{5.3}$$

де у – індекс, відмічаючий енергетичну установку;

N_e, $N_{\text{с.г.т}}$, $N_{\text{в.в.т}}$ – відповідні потужності: ефективна КДВЗ, силової газової турбіни; вторинного використання скинутої теплоти.

Складові співвідношення (5.3) обчислюються за відомими формулами для КДВЗ, СГТ й утилізаційного контуру [9, 10].

5.3.3. Побудова КБК утилізацією скинутої теплоти у КДВЗ

Мова йде про керування паросиловими контурами, наведеними на рис.5.20.

Перш за все треба обґрунтовано вибрати схему та параметри утилізаційного контуру КДВЗ на основі залежностей (5.1), (5.2), (5.3).

Далі необхідно скласти програму керування для КБК утилізацією, керуючись математичною моделлю. Така програма використовується для настройки цього КБК на оптимальні ефекти від утилізації залежно від режиму роботи КДВЗ. Настройка починається, природно, з вибору раціонального командного параметра, підхід до якого наведений у гл. 2.

У нашому випадку слід вибрати за командний параметр ефективної роботи контуру утилізації КДВЗ рівень $N_{в.в.т}$ при обмеженні за токсичністю викидів, оскільки чим нижче цей рівень, тим менше ефективність процесу утилізації енергії ВГ.

Можна обрати за командний параметр співвідношення $(p/T)_{вг}$, але це не зовсім коректно, тому що треба ще враховувати й масу ВГ.

Проблема реалізації $N_{в.в.т}$ як командного параметра КБК утилізацією скинутої теплоти у КДВЗ не є простою в тому, що стосується вимірювань потужності утилізаційного контуру. Тому можна обмежитися використанням вхідних параметрів парової силової турбіни (на виході з цього контуру), наприклад, тиску й температури пари, тобто співвідношення $(p/T)_{пари}$, що реалізуватиметься достатньо просто.

Треба, нарешті, вирішити питання щодо запровадження адаптивного каналу керування утилізацією скинутої теплоти у КДВЗ, тому що настройка такої КДВЗ виходить із жорсткої програми керування утилізацією, а в експлуатації силової установки з комбінованим двигуном можуть виникати випадкові ситуації відхилення від означеної програми, наприклад, коли зменшується потреба у запрограмованому збільшенні додатку потужності силової утилізаційної потужності до колінчастого вала КДВЗ. Такий адаптивний канал КБК утилізацією нічим не відрізняється від аналогічних каналів КПСК паливо- повітропостачанням при адаптації дизеля за N_e, про що детально розповідалося вище у гл. 3, 4.

Запропоновані схеми керування роботою елементів утилізаційного контуру КДВЗ показані на рис.5.21, 5.22, 5.23, 5.24. Всі вони й складають комп'ютерний блок керування вторинним використанням теплоти (утилізацією) ВГ.

КБК у такому складі забезпечує:

- перепуск ВГ мимо парогенератора (рис. 5.21) на режимах холостого ходу й малих навантажень відповідно до задавальних сигналів, що регламентує роботу заслінки ВГ залежно від положення рейки ПНВТ. Газова заслінка ЗВГ відключає парогенератор також і при аварійному підвищенні тиску робочого тіла після парогенератора, що функціонально потребує додаткового сигналу Д;

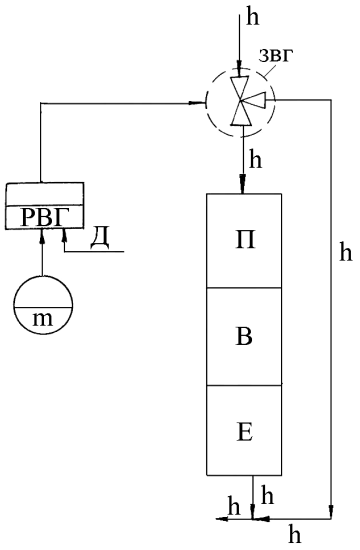


Рисунок 5.21 – Принципова схема комп'ютерного блока керування утилізаційного контуру автотранспортного КДВЗ (частина перша):

m – задавальний сигнал положення рейки ПНВТ; РВГ – регулятор витрати ВГ; П – перегрівач пару; ЗВГ – заслінка ВГ; Д – задавальні сигнали; В – випарювач; Е – економайзер; $h=h_{ji}$; h'_{ji}; h''_{ji} – ентальпії робочих потоків контуру утилізації

- керування роботою вузла тепловідводу у конденсаторі, що полягає в регулюванні частоти обертання вентилятора, який обслуговує конденсатор (рис.5.22). Локальний командний сигнал у цьому випадку подається залежно від температури конденсату, який надходить в насос Н живлення. Додатковий же сигнал Д формується залежно від положення рейки ПНВТ. При підвищенні температури робочого тіла в конденсаторі вище заданого рівня здійснюється збільшення частоти обертання $n_{вк}$ вентилятора, отже й буде зростати подача повітря $G_{вк}$ до теплообмінних поверхонь; навпаки, падіння цієї температури супроводжується зменшеннями $n_{вк}$, $G_{вк}$;

- керування витратою робочого тіла утилізаційного контуру залежно від режимів роботи КДВЗ (рис.5.23,.5.24). Воно реалізовано за сигналом

– перепадом температур Δt поміж робочим тілом і ВГ на початкових ділянках випарювальних поверхонь парогенератора ($\Delta t \approx 15 – 25$ °С), а також за другим коригувальним сигналом, який формується за температурою ВГ, що залишають парогенератор ($t_{ух} \geq 150$°С).

Зміна подачі робочого тіла у каналі ВВТ у випадку використання нерегульованого його насоса досягається шляхом шунтування потоку рідини (рис. 5.22). При цьому потік конденсату розділяється на два: один направляється у парогенератор ПГ, а другий – до нагнітувача Н. Якщо в контурі ВВТ використовується регульований насос, як показано на схемі рис. 5.24, то зміна витрати робочого тіла здійснюється за рахунок варіювання режиму роботи цього насоса РН.

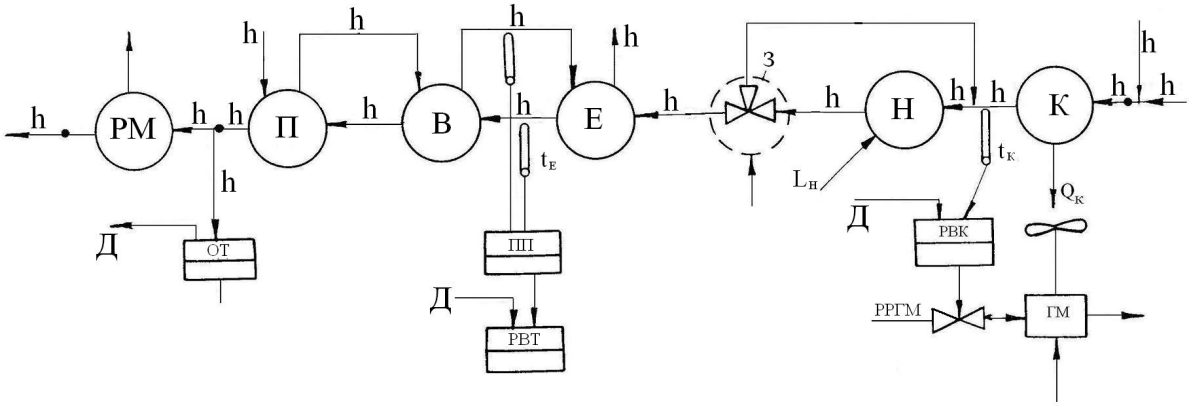


Рисунок 5.22 – Принципова схема КБК ВВТ (утилізацією) КДВЗ (частина друга):

ОТ – обмежувач тиску; ПП – підсумовчий пристрій; З –заслінка; РВРТ – регулятор витрати робочого тіла; РВК – регулятор вентилятора конденсатора; $Д_{1,2,3}$ – задавальні сигнали; ГМ – гідромуфта вентилятора конденсатора; РМ – розширювальна машина: Н – насос живлення; К - конденсатор; $L_{рм}$ –робота розширювальної машини; $L_н$ – робота для приводу насоса живлення; $t_н$ – температура насичення; $t_е$ – температура після економайзера; $t_к$ - температура після конденсатора; РРГМ – робоча рідина гідромуфти; $L_{вк}$ – робота для приводу вентилятора конденсатора, $Q_к$ – теплота, відведена в конденсаторі.

У наведених схемах КБК утилізаційним контуром додатковий задавальний сигнал D формується положенням рейки ПНВТ (чутливого елемента датчика рейки).

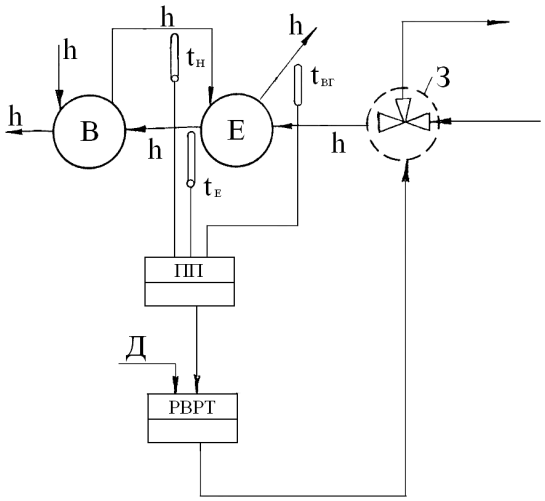


Рисунок 5.23 – Елемент схеми КБК утилізаційним контуром із другим корегуючим сигналом $t_{вг}$:

$t_е$ – температура робочого тіла після економайзера; $t_н$ – температура насичення; $t_{вг}$ – температура відпрацьованих газів

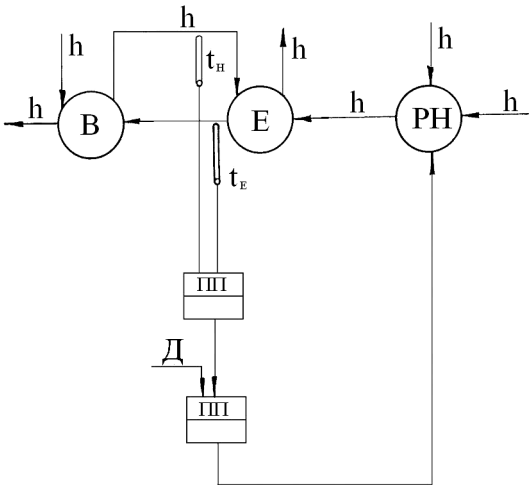


Рисунок 5.24 – Елемент схеми КБК утилізаційним контуром з регульованим насосом:

РН – регулятор насоса живлення ; інші позначки (як на рис. 5.23, 5.22)

Як показали випробування та розрахунки, застосування ВВТ дозволяє знизити питому ефективну витрату палива на номінальному режимі до 15 г/(кВт·рік) для силової установки з комбінованим дизелем, ТК та ВВТ; отримати економію палива біля 10 г/(кВт·год) для силової установки з комбінованим дизелем, ТК, СГТ й ВВТ.

Середня експлуатаційна витрата палива може бути знижена від 3–6 г/(кВт·год) для першого варіанту, та до 5–8 г/(кВт·год) для другого варіанта.

5.4. КБК розподілом навантаження поміж циліндрами ДВЗ

Комп'ютерні системи керування відкривають можливості реалізації нових функцій керування, що покращують експлуатаційні характеристики двигунів. До них відноситься автоматичне керування навантаженням окремих циліндрів за рахунок зміни структури двигуна безпосередньо у процесі експлуатації двигунів. Таке керування здійснюють шляхом відключення частини циліндрів двигуна при його роботі на холостому ході та на часткових режимах, що є суттєвим резервом підвищення експлуатаційної паливної економічності ДВЗ.

Якщо при частковому навантаженні багатоциліндрового двигуна виключити деякі циліндри, то інші будуть діяти при більшій циліндровій по-

тужності з кращим ККД. Крім того, охолоджувана поверхня КЗ зменшиться, тому зменшаться й втрати теплоти, що також підвищує η_e. Поліпшується й механічний ККД. При їзді по місту економія палива виявляється особливо. При русі під уклін виключені циліндри чинять менший опір, гальмування двигуном зменшується, й автомобіль по інерції проходить більший шлях.

У двигунах з іскровим запалюванням відключення циліндрів на холостому ході й малих навантаженнях здійснюється спеціальним КБК, який одночасно збільшує паливоподачу у працюючі (невідключені) циліндри. Блок керування циліндрів змінює порядок запалювання у цих циліндрах. Для ліквідації впливу насосних втрат в непрацюючих циліндрах передбачено виключення в них впускних і випускних клапанів.

Бачимо, що на КБК відключенням циліндрів покладається комплекс функцій.

Відключення циліндрів доцільно при використанні безпосереднього вприскування бензину у впускний трубопровід кожного циліндра.

Розроблені різні виконавчі пристрої відключення циліндрів. Так, на автомобілях Cadillac фірми Jeneral Motors (літраж 6 л) двигун облаштований електронною підсистемою вприску бензину, поєднаною з електромеханічним пристроєм закриття впускних та випускних клапанів у циліндрах, що виключаються за сигналами КБУ на електрокеровані клапани їх паливовприскувальних пристроїв. Клапани закриваються за сигналами мікроЕОМ електромагнітом, що переміщує осі гойдання коромисел механізму газорозподілу. На двигуні Orion MD фірми Mitsubishi клапани першого й четвертого циліндрів закриваються гідравлікою з електронним керуванням за сигналами датчиків режимних параметрів й теплового стану двигуна.

Застосовують й інші способи відключення циліндрів, наприклад, у двигунів з верхнім розташуванням розподільного вала. Так, половину циліндрів шестициліндрового двигуна BMW (Німеччина) виключають так, що у трьох циліндрів відключаються запалювання та вприскування, а відпрацьовані гази з трьох працюючих циліндрів відводяться через три відключені циліндри й можуть розширюватися і далі. Цей процес здійснюється клапанами у впускному та випускному трубопроводах. Перевагою такого способу є те, що виключені циліндри постійно підігріваються прохідними відпрацьованими газами, тобто завжди перебувають у стані готовності до пуску.

У восьмициліндровому V-подібному двигуні Porshe 928 з відключенням циліндрів є дві практично повністю відокремлені один від одного чотирициліндрові V-подібному секції, кожна з яких облаштована самостійним впускним трубопроводом; механізми газорозподілу при цьому не мають відключення приводу клапанів. Один з двигунів відключається закриванням дросельної заслінки й припиненням вприску бензину, причому випробування показали, що насосні втрати будуть найменшими при невеликому відкритті дросельної заслінки. Дросельні заслінки обох секцій оснащені незалежними приводами. Секція, що відключається, постійно подає невелику кількість повітря в загальний трубопровід, яке використовується для допалювання відпрацьованих газів у термічному реакторі каталітичного нейтралізатора викидів двигуна. А це включає застосування спеціального насосу для подачі вторинного повітря у хімічний регенератор.

Восьмициліндровий двигун розділяють на дві чотирициліндрові секції: одна з них відрегульована на великий крутний момент при низькій частоті n та постійно знаходиться у роботі, а інша – на $N_{e\,max}$ і включається тільки при необхідності мати потужність, близьку до максимальної. Багатопараметрові характеристики двигуна Porshe 928 при роботі 8-ми або 4-х циліндрів показані на рис. 5.25.

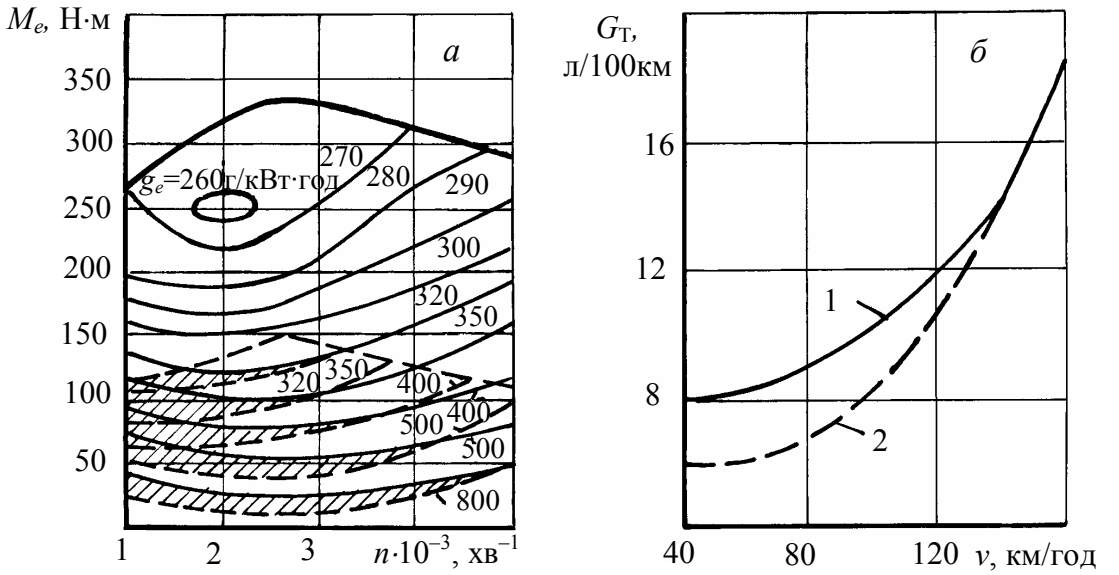


Рисунок 5.25 – Робочі характеристики й шляхова витрата палива двигуна Porshe 928:

а – характеристики; *б* – паливна витрата;
1 – включені 8 циліндрів; 2 – включені тільки 4 циліндри

Зони поліпшення питомої витрати палива за рахунок чотирьох циліндрів двигуна заштриховані. Наприклад, при частоті обертання n = 200 хв$^{-1}$ й крутному моменті M_e = 80 Н·м питома витрата палива при роботі всіх восьми циліндрів двигуна складає 400 г/(кВт·год), тоді як у двигуна з відключеними циліндрами на тому ж навантаженому режимі вона суттєво зменшується до 300 г/(кВт·год). Ще більш помітну економію палива можна отримати при низьких швидкостях руху автомобіля. При рівномірній їзді по горизонту (рис. 5.25, б) у двигуна з чотирма виключеними циліндрами (пунктирна крива) при швидкості 40 км/год витрата палива падає на 25% (з 6 до 8 л/100 км).

Фірма Mercedes-Benz також використовувала відключення циліндрів у 8-циліндровому двигуні для підвищення паливної економічності. Відключення робилося за допомогою електромагнітного пристрою, який розвиває жорсткий зв'язок поміж газорозподільним кулачком й клапаном. В умовах їзди по місту витрата палива при цьому знизилася на 32 %.

В бензинових двигунах віднаходить застосування й інший варіант КБК розподілом навантаження циліндрів на основі пропусків окремих робочих циклів у циліндрах.

Подібний блок керування автомобільним двигуном типу ЗМЗ-53 розроблений в Українській транспортній академії, м. Київ. Кількість пропущених циклів може бути будь-якою, що на відміну від метода виключення циліндрів дозволяє регулювати потужність двигуна з скільки завгодно малим кроком (за N_e), забезпечуючи зберігання у всіх циліндрах рівномірного температурного режиму. В цьому КБК використано програмне керування паливоподачею з регулюванням потужності двигуна пропусками частини окремих циклів. Пропуски окремих циклів реалізуються в системі розподілу командних імпульсів, які, на відміну від генерування стартових імпульсів, формуються не з однаковою скважністю за часом, а виробляються з пропусками, тобто зі змінною скважністю. Встановлено, що КБК пропусками циклів може сприяти підвищенню паливної економічності в зоні найбільш поширених експлуатаційних часткових режимів та на холостому ході, відповідно, на 17–25 % й на 45 %.

Відключення частини циліндрів починає застосовуватися й на дизелях – як середньообертових, так і швидкохідних.

Представляє інтерес розробка Коломенського філіалу ЗПІ щодо електронного керування кількістю працюючих циліндрів шляхом вбудування в загальну КСК дизеля комп'ютерного блока керування кількістю працюючих циліндрів (КБККЦ). Передбачені виконуючі пристрої індивідуального керування роботою кожного циліндра. Використовуються паливні системи без ПНВТ, частіш всього з електрогідравлічними насос-форсунками, електромагнітні клапани яких одночасно виконують функції виконавчих механізмів електронного регулятора швидкості й КБККЦ. Як і для бензинових ДВЗ, регулювання розподілу навантаження циліндрів сполучає відповідне керування паливоподачею із зміною параметрів повітряного заряду циліндрів й фаз газорозподілу (з одночасним виключенням клапанів).

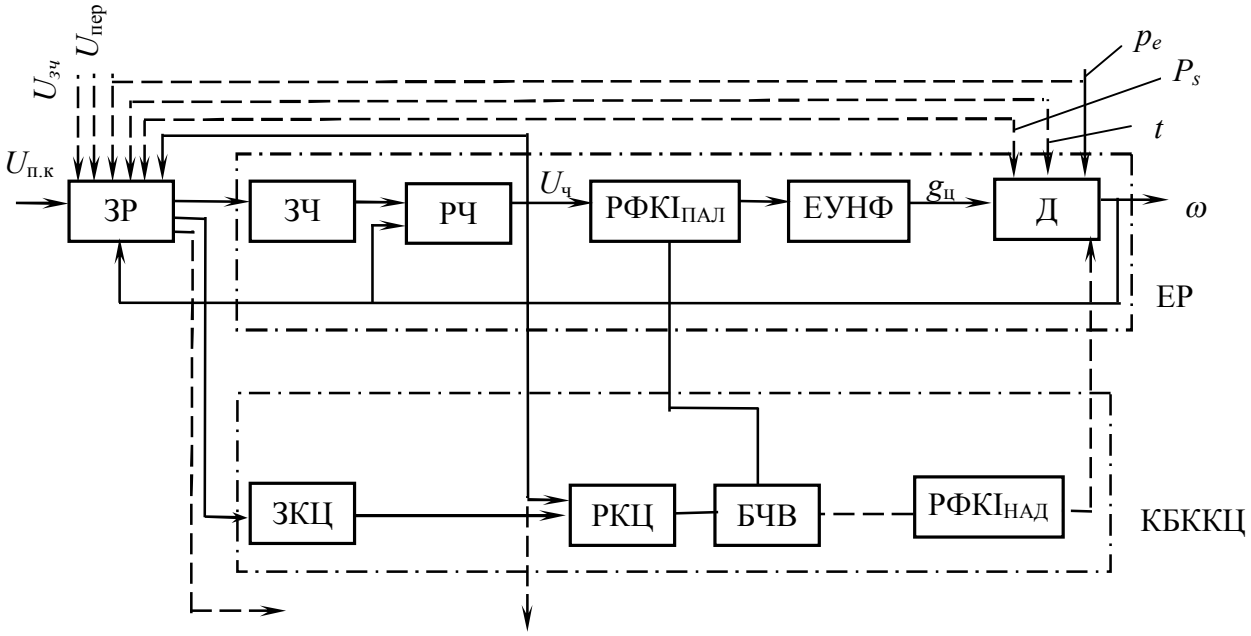
Проведено обґрунтування програмного керування кількістю працюючих циліндрів у функції дійсної частоти обертання n та навантаження N_e. При цьому використовувалися результати експериментальних досліджень конкретних дизелів, що дають чітке уявлення про оптимальну кількість циліндрів на кожному режимі моделі експлуатації дизеля (оптимальність розуміється з точки зору прийнятого критерію якості – експлуатаційної паливної економічності). Програма задається у вигляді співвідношення $z = f(n, N)$ й закладається у пам'ять мікроЕОМ для її реалізації за допомогою КБККЦ за сигналами командних датчиків n й $N_e(M_e)$.

Розглянемо один з варіантів відміченої КБККЦ, показаний на рис. 5.26, а.

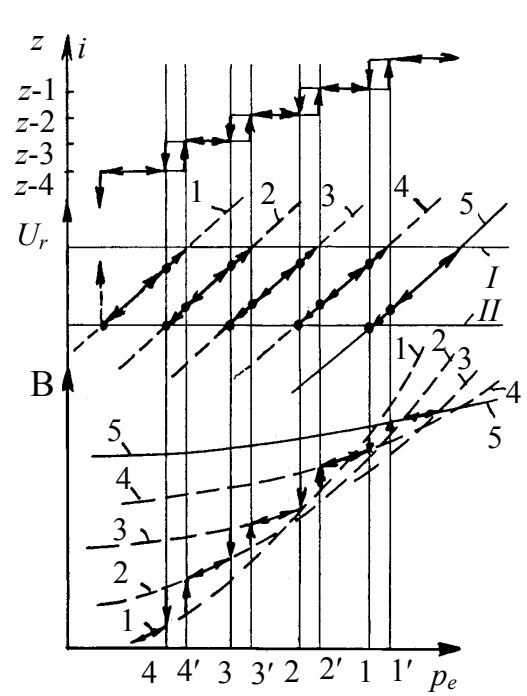
Керованим параметром тут є вихідний сигнал ЕР. Цей сигнал разом з сигналом КБККЦ визначає величину циклової подачі палива у працюючі (невідключені) циліндри. Стабілізація подачі палива шляхом зміни (за допомогою КБККЦ) кількості працюючих циліндрів забезпечує в останніх режими, близькі до оптимальних (номінального).

На схемі показаний, крім КАБУКЦ, також і ЕР, що дозволяє зрозуміти їх взаємодію у складі КСК ДВЗ.

Відмічений задавач режиму роботи дизеля ЗР, який на основі інформації про положення органу керування дизеля, наприклад, педалі керування $U_{п.к}$, про стан інших агрегатів силової установки (наприклад, про положення механізму зчеплення $U_{зч}$, включену передачу $U_{пер}$, навантаження дизеля p_e), стан дизеля (наприклад, тиску наддуву p_s, температур: $t_{ох}$, мастила $t_м$, $t_{вг}$), дійсної частоти обертання колінчастого вала ω й вихідного сигналу ЕР $U_ч$), виробляє завдання всім КБК параметрами дизеля, які забезпечать у сукупності близьке до оптимального програмне керування дизеля, в першу чергу, за витратою палива.



а



б

Рисунок 5.26 – Приклад КБККЦ:

схема КБККЦ;

б – діаграма регулювання кількості працюючих циліндрів дизеля з використанням КБУКЦ; 1 – $U_{вкл}(i, \omega, t, p_s, U_{пер}, U_{зч})$;
2 – $U_{викл}(i, \omega, t, p_s, U_{пер}, U_{зч})$;
1÷5 - I = s-4; z-3; z-2; z-1;z

У склад ЕР входять задавач частоти обертання колінчастого вала ЗЧ й регулятор частоти обертання РЧ, який видає команди на розподілювач – формувач електричних командних (керувальних) імпульсів $РКФІ_{пал}$ та електрично керовані насос-форсунки.

До складу КБККЦ включені задатчики кількості працюючих циліндрів ЗКЦ, регулятор кількості працюючих циліндрів РКЦ, блок чередування відключення циліндрів БЧВ, призначений для виключення надмірної зміни теплового стану відключених циліндрів. Пунктиром позначено канал керування повітроподачею зі своїм розподілювачем – формувачем електричних командних імпульсів $РФКІ_{над}$.

На рис. 5.26, б показана пояснювальна діаграма регулювання кількості працюючих циліндрів. У нижній частині показані залежності витрати палива В дизелем від навантаження для різних значень кількості працюючих циліндрів (z – загальна кількість циліндрів дизеля); в середній – залежності вихідного сигналу регулятора частоти від навантаження; у верхній частині – встановлене РКЦ.

ЗКЦ виробляє два значення вихідного сигналу РЧ ($U_{викл}$ й $U_{вкл}$), при яких повинні виконуватися включення циліндрів й включення раніш виключених циліндрів.

Інтервал від $U_{викл}$ до $U_{вкл}$ відповідає подачам палива, що забезпечують у працюючих циліндрах робочий процес, достатньо близький до оптимального (номінального) за витратою палива.

Сигнали $U_{викл}$ й $U_{вкл}$ подаються на вхід РКЦ, де з ними порівнюються поточні значення $U_ч$. Якщо при роботі усіх циліндрів навантаження дизеля знижується до рівня, позначеного 1, величина $U_ч$ стає рівною $U_{викл}$ й РКЦ подає команду на відключення одного з циліндрів. Ця команда через БЧВ надходить до $РКФІ_{пал}$, у результаті чого в обраний БЧВ циліндр не подається паливо (як і повітря). Тим самим робота дизеля переводиться з характеристики $i = z$ на характеристику $i = z - 1$.

При подальшому зниженні навантаження дизеля до рівня 2 величина $U_ч$ знову стає рівною $U_{викл}$ й РКЦ подає команду на відключення ще одного циліндра. Дизель починає працювати за характеристиками $i = z - 2$. При ще більшому зростанні навантаження дизеля аналогічно здійснюються переходи на характеристики $i = z - 3$; $i = z - 4$ і т.д.

Якщо ж навантаження дизеля, наприклад, з точки 2, починає збільшуватися, то значення $U_ч$, що змінюється за характеристикою $i = z - 2$, при навантаженні дизеля, позначеного 2′, дорівнюватиме $U_{вкл}$. При цьому РКЦ включає в роботу один з виключених циліндрів й дизель починає працювати за характеристиками $i = z - 1$. Включення в роботу циліндра, який залишився невключеним, здійснюється аналогічно при збільшенні навантаження дизеля до рівня 1.

Різниця $U_{викл} - U_{вкл}$ вибирається за умови усунення автоколивань у КБККЦ. Для цього треба, аби режими навантажень дизеля в точках 1 і 1′, 2 і 2′, 3 і 3′, 4 і 4′ і т.д., що визначені ΔU, були не менше, ніж розмахи коливань навантаження дизеля на усталених режимах, близько до відповідних точок переключення.

Для підвищення ефективності роботи дизеля величини $U_{викл}$ та $U_{вкл}$ можуть змінюватися в функції кількості працюючих циліндрів, n, p_s, t_s, стану інших агрегатів силової установки, температурного стану дизеля, тощо. При цьому залежності $U_{викл} = f(p_e)$ та $U_{вкл} = \varphi(p_e)$ нелінійні й неоднозначні. Чергування відключення циліндрів, що здійснюється БЧВ, доцільне для вирівнювання умов роботи всіх циліндрів. При цьому КБККЦ стає близьким до КБК відключенням робочих циклів у ДВЗ, про що вище йшла мова.

Розділення функцій керування n та z тут є принциповим, оскільки забезпечує збереження високої якості регулювання ω на усталених режимах й при перехідних процесах та одночасно забезпечує більш високий рівень оптимізації робочого процесу у працюючих циліндрах.

Головна особливість описаного КБККЦ – відсутність додаткових пристроїв, крім тих, що використовуються в ЕР. Поставлені цілі досягаються тільки алгоритмічними засобами на основі робочої інформації, що мається в основному ЕР.

Подальший розвиток КБККЦ можливий на шляху адаптивного пошукового керування, тобто коли програмне керування доповнюється зворотними зв’язками й перетворюється у програмно-адаптивне.

Розглянемо виконавчі механізми відключення каналів впускних й випускних для подальшого виключення циліндрів дизеля.

Використовуються різні виконавчі пристрої [3] у вигляді гідроштовхачів цих клапанів з електромагнітним керуванням.

Перший такий штовхач (рис. 5.27) конструкції ХДАЗТ (Україна) призначений для тепловозного дизеля й має змінне наповнення гідропорожнин, які керуються у відповідності до схеми рис. 5.26.

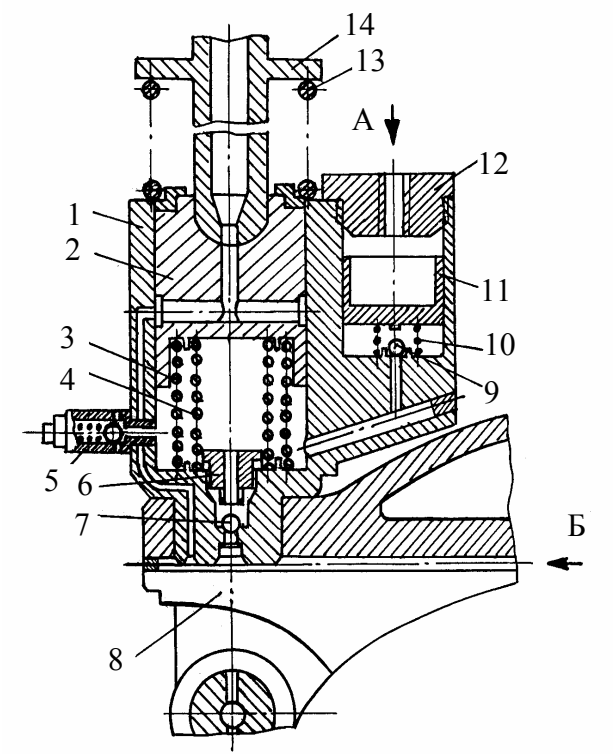


Рисунок 5.27 – Гідроштовхач, встановлений у важелі штовхача двигуна ПДГ1М маневрового тепловоза:

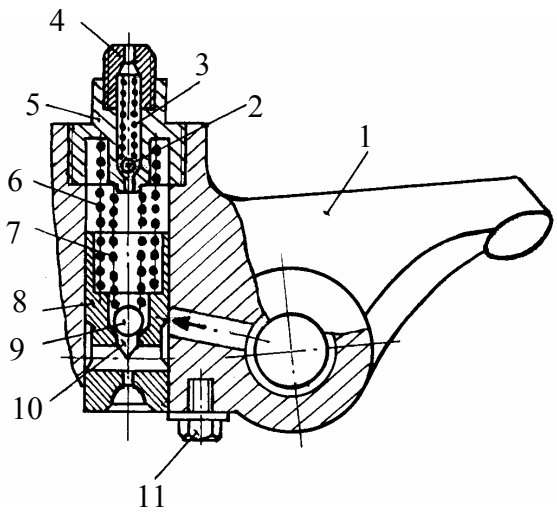
1 – корпус гідроштовкача; 2 – поршень; 3 – пружина велика; 4 – пружина мала; 5 – запобіжний клапан; 6 – дросель; 7 – шариковий клапан; 8 – важіль штовхача; 9 – кулька; 10 – пружина; 11 – поршень клапана скидання тиску мастила; 12 – кришка; 13 – додаткова пружина; 14 – штанга;

А – від керованого приводу маслоподачі;

Керування подачею мастила (за стрілками) здійснюється одночасно за допомогою електромагнітного клапана з пневмоприводу, а сама подача – з загальної масломагістралі. Запирання кульки 9 поршнем 11 вельми надійне за рахунок значної поверхні цього поршня, що сприймає тиск мастила.

Рисунок 5.28 – Гідроштовхач, встановлений у коромислі дизеля СМД-62 трактораТ-150К:

1 – корпус коромисла; 2 – шарик запобіжного клапана; 3 – пружина цього клапана; 4 – пробка; 5 – корпус запобіжного клапана; 6 – пружина плунжера; 7 – пружина відсічного клапана; 8 – плунжер гідроштовхача; 9 – шарик відсічного клапана; 10 – живильний отвір; 11 – монтажний болт; 12 – опора штанги штовхача; 13 – проточка для керованого підводу мастила



Другий штовхач (рис. 5.28) розроблений для тракторного двигуна СМД-62 спільно ХДАЗТ й ГСКБД (Україна).

Їх конструкції не потребують пояснень. Досвід експлуатації двигунів, обладнаних пристроями для відключення циліндрів, показав їхню високу ефективність на силових установках, специфікою яких є тривалість режимів холостих ходів й малих навантажень. Це відноситься до двигунів маневрових тепловозів, тривалість роботи яких на холостому ході складає більш 80 % загального часу їх експлуатації. Слід підкреслити, крім того, що дизелі магістральних тепловозів також досить тривалий час працюють на режимі холостого ходу, оскільки з метою підтримання так званого "гарячого" резерву та у зв'язку з відсутністю утеплених ангарів, таке дозволено на залізниці.

Робота тракторних дизелів, наприклад СМД-62, теж характеризується тривалою експлуатацією на холостих ходах, малих навантаженнях. Це пов'язано з великим обсягом транспортних робіт, включаючи переїзди з порожнім прицепом, а також з частою розрядкою акумуляторів. Робота дизелів на холостому ході призводить до закоксування деталей ЦПГ, паливної апаратури у зв'язку з неякісним вприскуванням (підтіканням) малих порцій палива у переохолоджений циліндр. На цих режимах має місце падіння індикаторного ККД через збільшення періоду індукції впритул до початку спалахування за ВМТ й вельми в'ялого згоряння погано розпиленого палива. Тож і тракторні дизелі повинні мати у складі КСК дизеля КБККЦ, яке покращить паливну їх економічність на означених режимах.

Експлуатаційні тривалі випробування [3] дали позитивні результати щодо впливу відключення частини циліндрів на показники дизелів. Так, на дизелі маневрового тепловозу виявлено зниження питомої експлуатаційної витрати палива на 5–6 %. Аналогічний ефект виявлено й у дизеля СМД-62 трактора Т-150К.

Збільшення собівартості транспортного двигуна й ускладнення його виробництва окупаються за кілька місяців, оскільки скорочується витрата палива на поширених режимах холостого ходу й малих навантажень. Якщо ж врахувати шкоду, яка завдаватиметься тривалою роботою на холостих ходах, коли паливо подається з здійсненням газообміну у всіх циліндрах, що сприяє закоксуванню форсунок та інших деталей ЦПГ, то термін окупності нового пристрою та КБККЦ суттєво скорочується.

5.5. КБК тепловим станом та надійністю ДВЗ

Проблемі забезпечення надійності двигунів при їх експлуатації приділяється підвищена увага. Це пов'язано з підвищенням вимог, що ставляться споживачами до якості силових установок з ДВЗ, важливішою складовою якої є довговічність й безвідказність систем, механізмів, вузлів та деталей двигунів.

Зазначена проблема загострюється у зв'язку з тенденцією форсування двигунів за літровою потужністю, прагненням підвищити їх навантаження при використанні на силових агрегатах, підвищенням нормативів щодо моторесурсу до першого капітального ремонту, скороченням витрат на обслуговування ДВЗ (перш за все – на запасні деталі), прагненням збільшувати продуктивність силових агрегатів за рахунок скорочення простоїв, пов'язаних з відказами, тощо.

Сказане підкреслює нагальну необхідність розробки засобів комп'ютерного керування надійністю ДВЗ, без чого неможливо взагалі враховувати нестаціонарні тепломеханічні навантаження на деталі двигунів, що обумовлюють утомні пошкодження, характерні для них, здійснювати миттєву адаптацію до впливових факторів.

5.5.1. Шляхи забезпечення експлуатаційної надійності ДВЗ й вимоги до КБК

В практиці моторобудування поширені різні ефективні шляхи й методи підвищення надійності двигунів, в тому числі:

- зниження теплової напруженості деталей;
- зниження жорсткості робочого циклу;
- пом'якшення пуску, навантажень;
- підтримання оптимальних регулювань;
- діагностичне обслуговування;
- послаблення суб'єктивних факторів при керуванні двигуном та ін.

Використовуються методи аварійного захисту, серед яких:

- обмеження діючих напруг;
- обмеження детонації;
- обмеження максимального навантаження;
- обмеження n і т. ін.

Значна частина цих діянь придатна для електронізації керування ними.

У більшості випадків, завдяки роботі КСК ДВЗ за оптимізацією навантажених й швидкісних режимів вдалося добитися зниження напруженості їхніх деталей, в тому числі, у зв'язку з поліпшенням паливної економічності (й зменшенням тепловиділення під час робочого циклу), а також у зв'язку із зниженням жорсткості циклу ($\Delta p/\Delta\varphi$). Про це свідчить, наприклад, досвід фірми MTZ (Німеччина), судові швидкохідні дизелі з КСК якої мають знижену термомеханічну напруженість деталей при форсуванні двигунів за літровою потужністю.

Така ж важлива перевага використання КСК ДВЗ виявляється в розробках інших провідних фірм Японії, США та ін.

У деякій мірі керування експлуатаційною надійністю двигунів виконують їхні комп'ютерні блоки керування кліматичною адаптацією. Забезпечувана такими КБК стабілізація параметрів робочого процесу (α, t_s, p_s та ін.) й теплового стану двигунів при їх роботі в екстремальних умовах тропічного (жаркого) клімату й високогір'я безумовно обмежує можливе погіршення надійності двигунів.

Однак ведучі фірми не зупиняються на цьому. Ряд з них ведуть інтенсивну розробку спеціальних КБК надійності двигунів. Всі вони базуються на принципі зворотного зв'язку, тобто володіють адаптивністю.

Природно, що КБК надійністю забезпечують реалізацію як окремих заходів, які підвищують довговічність й безвідказність за відповідними командними параметрами, так і комплексного керування надійності двигунів. Відповідно формуються і вимоги до конкретних КБК надійністю.

5.5.2. Електронне авторегулювання теплового стану ДВЗ

Надійність теплових двигунів, якими є ДВЗ, в першу чергу пов'язана з їхнім тепловим станом.

Тому й керування тепловим станом двигунів є ефективним засобом забезпечення високого рівня їх надійності.

Однак ця проблема далеко виходить за межі надійності, оскільки від теплового стану камери згоряння, наприклад, залежить якість згоряння палива в циліндрах, тобто – паливна економічність.

Підтримання оптимального теплового стану деталей ЦПГ визначає витрати на привід пристроїв, що забезпечують інтенсифікацію охолодження відзначених деталей із зростанням навантаження двигуна. Причому зменшення цих витрат без погіршення теплового стану деталей є суттєвим резервом підвищення ефективного ККД двигуна.

Тому у складі сучасних КСК ДВЗ з'являються також і блоки керування тепловим станом деталей двигунів.

Запропоновані різні способи авторегулювання теплового стану основних деталей (АРТСД) камер згоряння, поршнів, випускних клапанів, розпилювачів форсунок, головок циліндрів та ін. Мабуть, ще рано говорити про авторегулювання температурних полів, тим більше – нестаціонарних, таких деталей за сигналами щодо реальних рівнів нагріву в зонах найбільшої небезпеки.

Але АРТСД вже здійснюється у квазістаціонарній постановці.

Сьогодні подібне авторегулювання, як правило, здійснюється за сигналами про вихідні параметри ДВЗ, наприклад, таких, як N_e, $t_{вг}$ та ін. Природно, від цього страдає авторегулювання теплового стану деталей. Але й обмежене керування може принести суттєву користь з точок зору підвищення надійності теплонапружених деталей та зменшення втрат, пов'язаних з функціонуванням системи охолодження ДВЗ.

Особливу актуальність АРТСД отримує для форсованих двигунів.

Розглянемо комп'ютерні блоки керування тепловим станом ДВЗ (КБКТСД) при дискретній зміні умов охолодження деталей ЦПГ за сигналами про навантаження двигуна, наприклад.

До основи їхніх виконуючих пристроїв можуть бути покладені такі функції:

- відключення вентилятора системи охолодження на часткових режимах роботи двигуна;
- відключення на цих режимах подачі мастила (води) на охолодження поршнів;
- перепуску на часткових режимах частини повітря для наддуву перед його охолоджувачем в атмосферу;
- відключення потоку охолоджувальної рідини, що омиває зону гільзи циліндрів близько НМТ при роботі двигуна на часткових режимах;

- перепуск на часткових режимах роботи двигуна частини мастила перед його охолодженням у картер;
- локальний підігрів відміченої зони гільзи циліндрів на таких режимах;
- підігрів повітря для наддуву на холостому ході й малих навантаженнях двигуна теплотою відпрацьованих газів, водяного чи мастильного контурів.

Бачимо, що ці заходи націлені як на зниження рівнів температур деталей, так і на зменшення температурних градієнтів в них. Останнє, як відомо, сприяє зменшенню термічних напруг.

Для реалізації таких функцій сьогодні запропоновані КБК, що виконують функції двопозиційних вимикачів. Блоки керування включають непрямої дії терморегулятори з керуванням від бортової мікроЕОМ.

Настройка цих терморегуляторів здійснюється з урахуванням обраного способу АРТСД й програми керування (у вигляді залежності теплового стану деталі від N_e та n). Мова йде про зони цих деталей, де не припустимі перегрів, концентрація термомеханічних напруг та ін. Звичайно, відключення вентилятора, подачі охолоджувального мастила (води) на поршень, перепуск наддувного повітря або мастила перед відповідним охолоджувачем, а також інші засоби, які стабілізують тепловий стан деталей двигуна на часткових режимах, реалізується при зменшенні долевого навантаження після 70–50 % й нижче. При цьому, крім температурної компенсації, зменшуються витрати теплоти й втрати на тертя, що приводить до поліпшення експлуатаційної паливної економічності практично без погіршення надійності двигуна. Приклад відзначеної програми керування показаний на рис. 5.29.

Як виконавчі пристрої двопозиційних КБКТСД можуть використовуватись перепускні клапани та кінцеві вимикачі з електронним керуванням, конструкції яких загальновідомі.

Сучасні дизельні судові установки можуть оснащатися й КБКТСД безперервної дії. Мова йде про блоки керування температурами охолоджувальної рідини, змазувального мастила й наддувного повітря, без чого економічна, безвідказна й довговічна робота судових потужних дизельних установок взагалі неможлива.

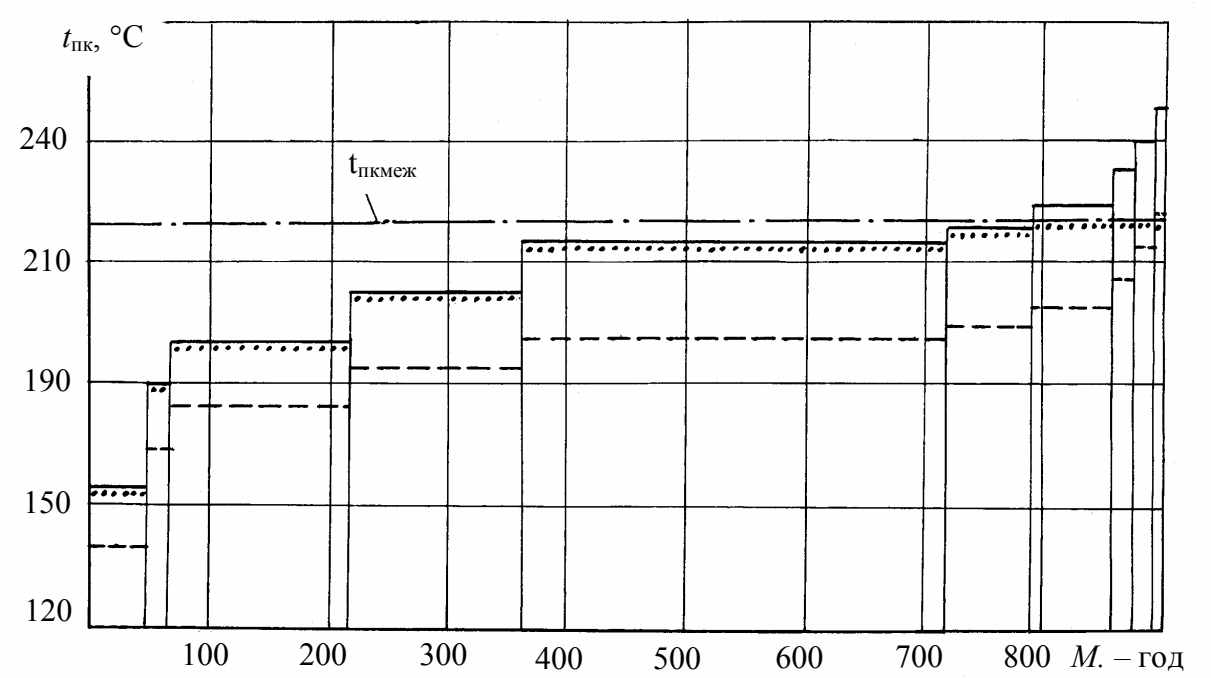


Рисунок 5.29 – Характеристики АРТСП в зоні верхнього компресійного кільця поршня за термін річної експлуатації тракторного двигуна СМД-62М:

• • • • • реальне АРТСП; — • — ідеальне АРТСП; — без мастильного охолодження поршня; — — — з нерегульованим охолодженням поршня ($G_м$ = 100 кг/год)

Застосування автоматичного регулювання температури наддувочного повітря t_s сприяє поліпшенню умов згоряння палива, запобіганню корозійного зношування втулки, кришки, клапанів та ін. На ці ж цілі спрямована стабілізація $t_{ох}$, $t_м$. В кінцевому разі підвищуються паливна економічність дизелів та їхній моторесурс на експлуатаційних режимах, особливо при низьких температурах зовнішнього повітря та забортної води.

Сьогодні ставляться вимоги, аби КБКТСД забезпечували підтримання регульованих температур теплоносіїв на долевих нагрузках на рівні температур, характерних для номінального режиму, та навіть на 15-35 °С вище цих величин (рис. 5.30).

Подібні характеристики АРТСД реалізуються шляхом вмонтовування в КСК дизелів нових блоків керування об'єднаними контурами охолодження зарубашечного простору, змазувального мастила й наддувного повітря, пов'язаними між собою крізь байпасні (обводні) трубопроводи фік-

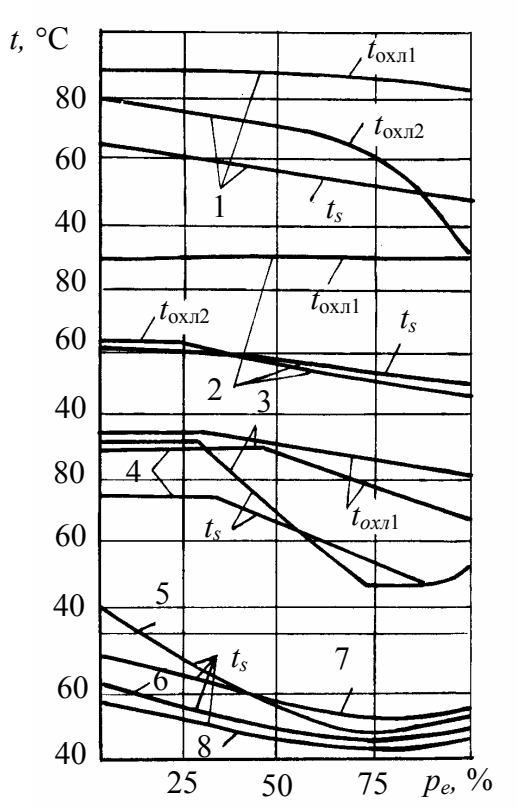


Рисунок 5.30 – Квазістатичні характеристики АРТСД води ($t_{охл1,2}$) й наддувного повітря (t_s) дизелів:
1 – ЧН18/22 (Росія); 2 – ЧН 32/35 (Росія); 3 – ЧН 27,5/33 фірми ČKD (Чехія); 4 – ЧН 32/38 фірми Grandi Motori (Італія); 5 – 8М601 фірми МАК Motor (Німеччина); 6 – ЧН 28/30 фірми Stork (Нідерланди); 7 – Г30 фірми Pollor Nohab (Швеція); 8 – S-12 фірми Allen (Англія)

сованого або змінюваного перерізу. Здійснюється в цих контурах підігрів наддувного повітря на холостому ході й малих навантажень в поверхневих теплообмінниках теплотою від гарячого контуру води дизеля або теплотою від змазувального мастила.

Як командні параметри в таких КБКТСД виступають: навантаження дизеля, температура води на виході із дизеля або мастила на виході із охолоджувача мастила. Використовуються й відповідні датчики навантаження, температур.

На рис. 5.31 показані схеми КБКТСД, в яких реалізовані принципово різні підходи [3].

КБК, розроблений ЦНДДІ (Росія), являє собою комбіноване рішення з використанням за пасивний ланцюг керування простого й надійного багатофункціонального терморегулятора з його активною корекцією від бортового (на судні) комп'ютера за заданими або обчисленими програмами керування (рис. 5.31,а). Блок електронного керування фірми Grandi Motori (рис. 5.31, б) є чисто активним з комп'ютерним забезпеченням.

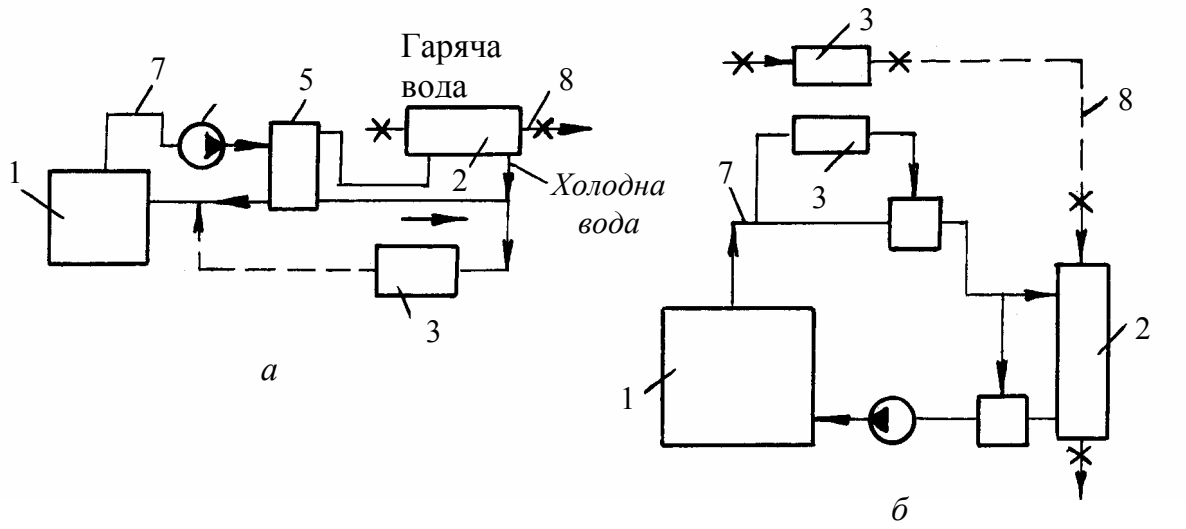


Рисунок 5.31 – Схеми КБКТСД сучасних середньообертових судових дизелів:

а – розробка УНДДІ (Росія); б – розробка фірми Grandi Motori (Італія);
1 – дизель; 2, 3 – теплообмінники води й повітря для наддуву; 4 – терморегулятор; 5 – насос; 6 – теплообмінник мастила; 7, 8 – внутрішній та зовнішній контури охолодження

Вивчимо ці підходи.

У КБК (рис. 5.31, а) за рахунок застосування одного компактного багатофункціонального терморегулятора із трьома термокерованими клапанами, розміщеними в загальному чотириходовому корпусі, шляхом раціонального включення керованого байпасу, відвідних та підвідних каналів в об’єднаному контурі охолодження води дизеля досягається керування підігрівом (охолодженням) наддувного повітря. Цим забезпечується підвищена точність терморегулювання потоків води та наддувного повітря при адаптації до екстремальних зовнішніх температурних умов експлуатації дизельної установки. Конструкція керованого мікро-ЕОМ терморегулятора 4 дозволяє в КБКТСД використовувати додаткове керування клапанами за допомогою електроприводів за сигналами датчика навантаження дизеля, які перетворюються у мікропроцесорі й передаються на ці приводи від бортового комп’ютера у вигляді команд керування. Таким чином, у КБКТСД, поряд з забезпеченням стабільного керування температурним режимом охолодження двигуна (з регульованим підігрівом або охолодженням над-

дувного повітря за допомогою терморегулятора), мається можливість активної корекції квазістатичних характеристик АРТСД залежно від навантаження двигуна, температури навколишнього середовища. Таку корекцію здійснюють за допомогою швидкодіючих електронних виконавчих пристроїв з реалізацією заданої або розрахованої програми діянь, наведених на рис. 5.30.

Вже зазначалося, що в КБКТСД фірми Grandi Motori використано концепцію активного керування температурами води дизеля й наддувного повітря за допомогою мікропроцесора. Останній визначає дійсно розвинену потужність двигуна, температуру наддувного повітря й охолоджувальної води, порівнює їх із заданими величинами, записаними у пам'яті комп'ютера, та здійснює за допомогою електроприводів керування двома регулювальними триходовими органами терморегуляторів доти, доки температури, які визначаються, не збігаються із заданими. Для охолодження (підігріву) наддувного повітря застосовані двоступінчасті теплообмінники 3. Недоліком КБКТСД є підвищена його вартість. Цей недолік компенсується перевагами, які надає керування теплообмінникам залежно від потужності двигуна, температур t_s, t_{ox}.

У розглянутих КБКТСД безперервної дії в основному використовуються ті ж датчики й виконавчі пристрої, які широко застосовуються в дизельних судових установках для експлуатаційного контролю за роботою контурів охолоджувальних рідин, мастила й наддувного повітря.

Електронні виконавчі пристрої цих КБК не відрізняються від таких, що застосовуються в інших функціональних КБК, які детально розглянуті в попередніх розділах.

У швидкохідних двигунах, наприклад автотранспортних, комп'ютерне безперервне керування тепловим станом ДВЗ, в тому числі для забезпечення надійності теплонапружених деталей, не виділяється в окремий КБК. Це пояснюється небажанням переускладнювати КСК ДВЗ. Тим більше, що функції керування, наприклад t_s, закладені в КПСК повітропостачанням. Безперервне керування тепловим станом таких двигунів замінюється захистом – у вигляді блокування, що розглядатиметься нижче.

5.5.3. Особливості КБК надійністю ДВЗ

Функціональні КБК, як правило, реалізують безперервне керування параметрами ДВЗ.

Винятком можна вважати КБК надійності, які крім каналів безперервного керування доповнюються автоматизованими блокувальними пристроями для запобігання відказів.

В цілому, складається контур захисту в складі КСК ДВЗ, що забезпечує функції корегування характеристик процесів у двигунах аж до переривання паливоподачі (горючої/робочої суміші) у циліндри при небезпеці пошкодження.

Таким чином, КБК надійністю забезпечує безперервне керування, що передбачає як головну функцію – адаптацію паливо-повітропостачання до змін внутрішніх та зовнішніх факторів, що обумовлюють недопустимі погіршення тепломеханічної напруженості деталей двигуна, інтенсифікацію зношування й втрату міцності матеріалів, кавітацію тощо.

Ця головна функція КБК доповнюється контурами блокування та обмежень для швидкого реагування на тенденції різкого зниження тиску мастила, перегріву охолоджувальної води, витіку цієї води або мастила, тощо. В усякому разі за сигналами відповідних датчиків (тиску, температури, витікання) КБК повинен профілактично захищати двигун, обмежуючи паливоподачу та, якщо двигун продовжує працювати у критичній ситуації, здійснювати зупинку двигуна.

При побудові КБК надійності виходять з командних сигналів, які треба сформувати в КСК ДВЗ для подальшої їх реалізації у двигуні.

Набір команд обумовлюється специфікою конструкції двигуна, умовами його експлуатації. Але в будь-якому випадку контрольовані параметри (тобто й командні сигнали) витікають із характеру можливих відказів й ознак їх появи. Це враховують багато фірм, закладаючи у КБК надійністю такий набір контрольованих параметрів:

- температура $t_{м}$ мастила у картері;
- тиск $p_{м}$ мастила в магістралі;
- температура $t_{ох}$ охолоджувальної води;
- рівень охолоджувальної води;
- зазор у характерних сполученнях;
- температура у найбільш теплонапружених зонах КЗ;

- градієнти цих температур в подібних зонах;
- градієнти механічних напружень у відповідних зонах;
- максимальний тиск p_z робочого циклу ДВЗ;
- частота обертання n колінчастого вала;
- частота обертання $n_{тк}$ ротора турбокомпресора;
- температура $t_{вг}$ відпрацьованих газів;
- тиск наддуву p_s;
- температура наддуву t_s та ін.

> В останніх розробках КБК надійністю двигунів означений набір команд керування реалізований практично повністю при комплексному підході до урахування факторів, що впливають на довговічність та безвідказність ДВЗ.

Подібна КСК показана на рис. 6.1. Там же наведено й детально пояснено алгоритм керування надійністю, аварійно-запобіжного захисту та діагностування за сигналами контрольних датчиків, які входять у КБК надійністю. Таке керування, природно, носить безперервний характер.

Викликає інтерес КБК фірми Bosch для дизеля з рядним ПНВТ, у якому забезпечено корегування керування паливоподачею залежно від зносу й неточних регулювань за рахунок датчика зворотного зв'язку за кутом випередження вприскування. Ефективність цього перспективного засобу керування залежить від вибору контрольованих параметрів і розробки відповідних чутливих датчиків. Принципових змін у КСК ДВЗ вносити не слід; мова йде в основному про забезпечення додаткової потужності електронних виконавчих пристроїв КСК для обслуговування КБК надійності.

Розглянемо контури блокування й обмежень такого блока.

Перший контур – реагування та застереження розносів колінчастого вала та ротора ТК, чим можливо застережити перевищення відповідних частот обертання.

Другий контур – попередження перегрівів деталей ДВЗ й ТК за рахунок обмеження $t_{ох}$, t_s, $t_{вг}$, $t_м$ та витікання охолоджувальної рідини.

Погіршення напруженого стану деталей ДВЗ пов'язано з можливим перевищенням p_s, t_s, що й потребує обмеження цих контрольних параметрів.

Падіння тиску $p_м$ може різко посилити зноси сполук двигуна та у ряді випадків призвести до втрати працездатності пар тертя (прихвачування,

заклинок і т.п.). Обмеження падіння $p_м$ блокує таку небезпеку.

Бачимо, що контури блокувань й обмежень параметрів двигуна різноманітні. Датчики тисків й температур також сумісні з тими, що використовуються для основних підсистем та інших функціональних засобів керування сучасних КСК. Витік охолоджувальної рідини або мастила нескладно реєструвати, наприклад, за допомогою рівнеміра.

Специфіка контурів блокувань й обмежень параметрів двигуна може проявлятися у конструкціях виконавчих пристроїв, що перетворюють командні імпульси у необхідні блокування та обмеження.

Наведемо приклади відзначених виконавчих пристроїв.

В КСК, розробленій фірмою Daimler-Benz спільно з фірмою Bosch, використовується ЕР блочного ПНВТ. Її особливістю є автономна підпитка паливом насоса високого тиску двома насосами з електроприводами. Це й надає можливість використання таких насосів для відключення дизеля при перевищенні допустимих значень n. Блокування при цьому здійснюється своєчасним відключенням одного з відзначених насосів та може виконуватися за допомогою спеціальної керованої заслінки у впускному трубопроводі. Її закриття за сигналом датчика n захищає двигун від перевищення n при порушенні, наприклад, роботи паливної апаратури дизеля.

Для блокувань t_s, і p_s не потребуються особливі виконавчі пристрої. Для блокування t_s, p_s, наприклад, використовують устрій перепуску випускних газів до турбіни. Блокування p_s можливе за допомогою пристроїв перепуску випускних газів до турбіни або повітря після компресора.

Велике значення для збереження двигуна має функція контролю тиску мастила у системі змащування. Виконавчий пристрій для блокування падіння $p_м$ відіграє роль граничного вимикача паливоподачі після подачі командного сигналу від датчика $p_м$ про недопустиме падіння останнього. Зазначений пристрій може бути включено в систему аварійної попереджувальної сигналізації.

Контрольні запитання та завдання

1. Які допоміжні функції покладаються на КСК ДВЗ?
2. Які вимоги ставляться до КБК рівнем токсичності двигунів?
3. Які особливості побудови КБК рівнем токсичності двигунів?
4. Які датчики та виконавчі пристрої обслуговують КБК екологічними характеристиками ДВЗ?
5. Що розуміється під кліматичною адаптацією ДВЗ?
6. Які вимоги ставляться до КБК кліматичним пристосуванням?
7. Які особливості КБК кліматичною адаптацією бензинових двигунів?
8. Які особливості кліматичною адаптацією дизелів?
9. Наведіть схеми вторинної утилізації скидної теплоти ДВЗ.
10. Як оцінюють ефективність утилізації скидної теплоти ДВЗ?
11. Які особливості побудови КБК утилізацією скидної теплоти у КДВЗ?
12. Яка ефективність вторинного тепловикористання у ДВЗ?
13. Як обґрунтувати необхідність відключення частини циліндрів на режимах долевих навантажень ДВЗ?
14. Які особливості побудови КБК відключенням циліндрів?
15. Які виконавчі пристрої обслуговують КБК відключенням циліндрів?
16. Яка ефективність відключення частини циліндрів на режимах долевих навантажень ДВЗ?
17. Які шляхи забезпечення експлуатаційної надійності ДВЗ?
18. Які функції покладаються на КБК тепловим станом ДВЗ?
19. Які контрольовані параметри закладаються у КБК ДВЗ?
20. Що розуміється під безперервним керуванням надійністю ДВЗ? Як реалізується таке керування у КСК ДВЗ?
21. Які контури блокування й обмежень включаються до складу КБК надійністю?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Канило П.М. и др. Автомобиль и окружающая среда. – Харьков.: Прапор, 2000. –304 с.
2. Николаенко А.В. и др. Моделирование и создание методов и средств нейтрализации отработавших газов автотракторных дизелей. – С.-П.: Двигателестроение, 2000. – № 2 – С. 39-41.
3. Шеховцов А.Ф. Комп'ютерні системи керування ДВЗ: Навч. посібник. –Харків: ХДПУ, 1995. –256 с.
4. Автомобильный справочник (Bosch): Перевод с англ. Первое русское издание. –М.: Издательство "За рулем", 2000. –896 с.
5. Современные подходы к созданию дизелей для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков/А.Д. Блинов, П.А. Голубев, Ю.Е. Драган и др. Под ред. В.С. Папонова и А.М. Минеева. –М.: НИЦ "Инженер", 2000. –332 с.
6. Конструктивные отличия и особенности технической эксплуатации ДВС в условиях стран Азии, Африки и Латинской Америки. Основы климатической приспособленности ДВС: Уч. пособие – Ч.2/ Колл. авторов. Под ред. А.Ф. Шеховцова. –К.: УМК ВО, 1988. –275 с.
7. Dilella F.A., Di Nanno L.R., Koplow M.D. Laboratory and Highway Testing of Diesel Organic Rankine Compound Long-Haul Venicle Engine. –SAE Technical Paper Series, 1983, № 830122, P. 23-38.
8. Марченко А.П. и др. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / Под ред. А.Ф.Шеховцова. – К.: Тэхника, 1992. –272 с.
9. Марченко А.П. и др. Процессы в перспективных дизелях / Под ред. А.Ф. Шеховцова. – Харьков.: Изд-во "Основа", 1992. –352 с.
10. Марченко А.П. Термодинамические основы повышения топливной экономичности транспортных дизелей за счет утилизации сбросной теплоты: Дис...докт. техн. наук. – Харьков, 1994. – 267 с.
11. Файн М.А., Морозов В.А. Средства утилизации теплоты в дизелях внутреннего сгорания. Обзор. –М.: ВНИТИ, 1995. – 52 с.

Глава 6. КОМПЛЕКСНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВЗ

Досвід кращих моторобудівних фірм США, Японії, Німеччини та інших провідних країн показує, що найвищі показники двигунів досягаються при впровадженні комплексних комп'ютерних систем керування.

Тому прагнення до створення багатофункціональних, комплексних КСК ДВЗ розглядається як стабільна тенденція найближчих десятиріч.

6.1. Проблеми подальшого розвитку комплексних КСК ДВЗ

В останні роки зусилля розробників зосередилися на трьох назрілих проблемах подальшого розвитку комплексних КСК ДВЗ.

Перший напрям – збільшення кількості контрольованих змінних й підвищення точності їх вимірювання. Це дозволить наблизити регулювання двигуна до оптимальних (що далеко не завжди досягається на більшості сучасних КСК ДВЗ) з урахуванням режиму роботи, індивідуального стану двигуна та зовнішніх умов. Однак слід мати на увазі, що збільшення кількості контрольованих параметрів пов'язане із збільшенням кількості датчиків (до 100 і більше). Це призводить до підвищення вартості комбінованої КСК ДВЗ, зниження її надійності, потребує підвищення швидкодії мікропроцесора й розширення його пам'яті.

Другий напрям – розробка нових адаптивних каналів чи блоків керування у складі комплексних КСК ДВЗ із зворотними зв'язками. Адаптивні канали керування токсичністю викидів або детонацією, наприклад, обмежені звуженими функціями.

Більш повну адаптацію двигуна з урахуванням його індивідуальних особливостей, технічного рівня та умов експлуатації можна отримати за допомогою систем керування, що забезпечують автоматичну оптимізацію за заданим комплексним параметром на кожному режимі роботи. Такі КСК

ДВЗ одержали назву адаптивно-екстремальних або систем, які самонастроюються. Функціями мети в оптимізаційних задачах таких систем є: ККД (ефективний або індикаторний), питома витрата палива, питомий викид токсидів з ВГ і т.д. Оскільки сьогодні відсутні методи вимірювань подібних комплексних параметрів, використовують побічні (непрямі) оцінки їх значень, що знижує точність регулювання. Складність створення систем, які самонастроюються, пов'язана і з високою швидкістю змін режимів роботи двигуна, що потребує підвищення швидкодії систем керування та їхньої значної чутливості, що, в свою чергу, зменшує сталість системи. Компромісним рішенням у такій ситуації є створення КСК ДВЗ зі змінною структурою, в якій логіка керування та чутливість змінюються залежно від умов роботи.

Третій напрям – розширення функцій керування двигуном. Такий напрям передбачує розробку додаткових КБУ, електронних каналів та контурів керування, які здатні забезпечувати подальше поліпшення паливної економічності. Мова йде про оптимізацію закону вприскування аж до реалізації багатофазної паливоподачі, керування розшаруванням заряду для подальшої його гомогенізації, керування фазами газорозподілу, ступенем тиску й розширення, регулювання турбулізацією паливоповітряного заряду.

Розширення функцій керування охоплює також поліпшення теплонапруженого стану деталей, перш за все, при перехідних процесах, більш різке зменшення токсичності викидів з ВГ двигунів і таке інш.

Багато з цих шляхів діяння на процеси двигунів добре відомі, але розробка нових електронних схем керування, особливо електронних виконавчих пристроїв, що базуються на принципово нових фізико-хімічних ефектах, відкривають великі можливості для реалізації означених шляхів у кожному з наведених напрямків розвитку комплексних КСК ДВЗ.

6.2. Системний аналіз комплексної КСК ДВЗ

Що розуміється під комплексною КСК ДВЗ?

У чому специфіка комплексного керування, його переваги?

Ці та інші принципові запитання можна задовольнити, зробивши системний аналіз таких КСК.

У попередніх розділах неодноразово наводились приклади сучасних

комплексних КСК ДВЗ. Однак, не проводячи їх системного аналізу, ми обмежувались тим, що розглядали побудову конкретних систем керування (структуру, специфіку датчиків та виконавчих пристроїв), виділяючи різні підсистеми, цільові блоки й канали керування.

Результати проведеного ознайомлення компонентів КСК дозволяють перейти до блок-схеми алгоритму функціонування, можливостей її реалізації, необхідності корегування вироблених команд в адаптивних каналах, тобто до системного аналізу комплексної КСК ДВЗ.

6.2.1. Функціональний аналіз комплексної КСК ДВЗ

Проведемо такий функціональний аналіз на прикладі комплексної КСК чотирициліндрового двигуна з вприскуванням бензину для перспективних автомобілів (розробка НАМІ, Росія) [2].

КСК пройшла випробування на мікроавтобусі “РАФ”, оснащеному двигуном “ЗМЗ” (літраж 2,3 л) й трикомпонентним нейтралізатором ВГ.

Вона реалізує комплекс функцій:

- автоматичний пуск і прогрів двигуна;
- фазове вприскування палива;
- електронне запалювання із вбудованим комутатором;
- підтримання частоти обертання колінчастого вала на режимі холостого ходу;
- керування економайзером примусового холостого ходу;
- керування кутом випередження запалювання θ за параметром детонації;
- керування паливоподачею з зворотним зв’язком по концентрації кисню у ВГ (λ-регулювання);
- корекція управляючих параметрів за температурами охолоджувальної рідини й повітря, а також за положенням дросельної заслінки;
- динамічна корекція (при перехідних процесах);
- діагностування й аварійне реагування та сигналізація тощо.

На рис. 6.1 показана структурна схема КСК, вишикуваної (при всій її складності) у простий функціональний ряд: датчики – блок комплексного керування – виконавчі пристрої.

Такі три функціональні групи включають:

датчики – масової витрати повітря ($G_{\text{п}}$); положення дроселя (φ); тем-

ператури охолоджувальної рідини (t_{ox}); температури повітря на впуску (t_s); концентрації кисню у ВГ (λ-зонд); детонації (ДЕТ); ВМТ; положення колінчастого вала – кутових міток (КМ); стану стартера (СТ); ідентифікації першого циліндра (1Ц);

блок комплексного керування (БК) – бортовий комп'ютер з ОЗП; АЦП; комутатор; канали адаптивного (локального) керування та інші електронні виконавчі пристрої;

основні виконавчі пристрої – електромагнітні форсунки (Ф); двовивідні котушки запалювання з електронним керуванням (КЗ); регулятори додаткового повітря для нейтралізатора (РДП); реле бензонасоса (РБН); сигналізатор аварійної ситуації (АС).

Обробку вхідної інформації, що надходить, організовано системно програмним способом, що дозволяє швидко адаптувати КСК до різних змін при ладнанні, а також до різних двигунів.

Розглянемо функціональні особливості структурних складових КСК.

Безпосередня реєстрація маси повітря, що витрачається, за допомогою термоанемометричного датчика, який має високу швидкодію, є основою для визначення параметрів керування в КСК. Сигнал датчика містить змінну, що відповідає пульсаціям повітряного потоку у впускній трубі, де він вимірюється.

Циклове наповнення при цьому для кожного циліндра розраховується за середнім значенням, яке формується методом інтегрування сигналу датчика за один оберт колінчастого вала. Це дозволяє звести до мінімуму вплив коливань частоти обертання вала й повітряного потоку у впускній системі під час циклу й підвищити якість керування двигуном.

Датчик φ потенціометричного типу визначає кутове положення дросельної заслінки й має лінійну характеристику за кутом обертання.

Для вимірювань T_{ox} та T_s використовуються однакові напівпроводникові датчики з лінійною характеристикою. Тарування каналів вимірювання температур проводять в діапазоні – 40 ... + 120 °С.

λ-зонд, який є гальванічним елементом, виступає джерелом напруги з нелінійною характеристикою. Діапазон зміни напруги складає від 50 мВ (бідна суміш) до 950 мВ (багата суміш) з різким перепадом напруги в зоні стехіометричного ($\alpha \approx 1$) складу горючої суміші.

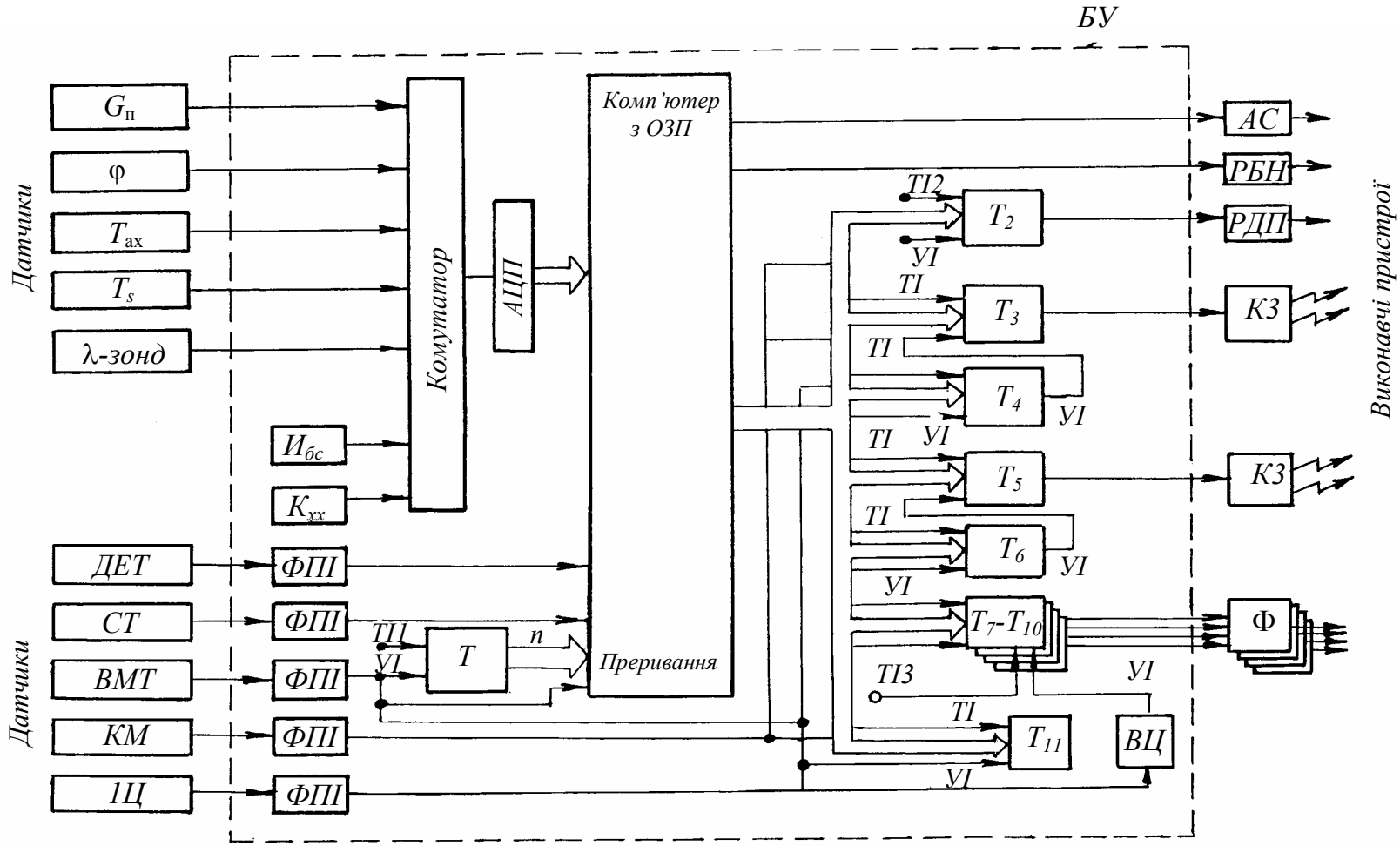


Рисунок 6.1 – Структурна схема комплексної КСК ДВЗ

Датчик детонації виконує функцію акселерометра для вимірювання вібрацій деталей двигуна. Реєстрація виникнення детонації у камері згоряння здійснюється шляхом порівняння рівнів шуму у двофазових вікнах за кутом повороту колінчастого вала. У першому фазовому вікні, обраному таким чином, що в ньому не може виникнути детонація у даному циліндрі (такт стиску), вимірюється фоновий шум двигуна. Шум, виміряний у другому фазовому вікні (період згоряння), в якому може виявитися детонація, порівнюється з фоновим шумом та залежно від їх співвідношення робиться висновок про наявність детонації. Розташування й тривалість відкриття (існування) фазових вікон повинні бути обрані із умови мінімізації вірогідності неправильної реєстрації детонації.

Датчики $G_{\text{п}}$, φ, $T_{\text{ох}}$, T_s і λ-зонд виробляють аналогові сигнали, які перетворюються у цифрові коди, придатні для обробки мікро-ЕОМ за допомогою АЦП.

Датчики ВМТ, КМ та 1Ц генерують імпульси напруги у моменти проходження в їхньому магнітному полі відповідно: маркерного штифта, запресованого в обід маховика; зубців ободу маховика; маркерного штифта, запресованого у торцевій частині розподільного вала двигуна. Вихідні сигнали цих датчиків за допомогою формувачів прямокутних імпульсів (ФПІ) перетворюються в імпульси прямокутної форми, придатні для роботи з цифровими мікросхемами. Імпульси від датчика ВМТ використовуються для синхронізації роботи БУ КСК з двигуном при створенні реального моменту часу, а також для вимірювання частоти (n). Вимірювання n здійснюється за кожний оберт за допомогою багаторозрядного (наприклад, 16-розрядного) програмно-керованого таймера (T_1). Імпульси, які отримані від датчика КМ, використовуються для формування кута випередження запалювання θ й тривалості протікання струму в первинному колі котушок запалювання ($\tau_{\text{кз}}$) за допомогою таймерів (Т). Датчик (1Ц) служить для ідентифікації ВМТ першого циліндра з метою прив’язки керуючих діянь відповідно до порядка роботи циліндрів.

За вхідний сигнал використовується інформація про роботу стартера (СТ).

Блок комплексного керування (БК) реалізується на основі бортової мікро-ЕОМ. В БК мається можливість регулювання паливоподачі на режимі холостого ходу за допомогою потенціометра $K_{\text{хх}}$, а також вимірюєть-

ся напруга бортового кола $U_{БЦ}$, за значенням якого корегується тривалість імпульсів, що керують форсунками (Ф). Формування часових та фазових тривалостей, необхідних для роботи виконавчих пристроїв, здійснюється за допомогою таймерів $T_1 – T_2$. Кожний таймер T_i має три входи : інформаційний, що забезпечує обмін інформацією з мікро-ЕОМ; керуючий, на який надходять керуючі (командні) імпульси (КІ); тактовий, на який подаються імпульси тактової частоти (ТІ), кожний з яких зменшує зміст Т на одиницю. Для зберігання даних, отриманих від датчиків, виконання необхідних проміжних обчислень, зберігання необхідних констант і т.д. використовується оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП), наприклад, самого комп'ютера. Для зберігання програмного забезпечення, що реалізує алгоритм керування (функціонування КСК), а також тарировочних характеристик використовується перепрограмований пристрійний запам'ятовуючий пристрій. На основі отриманої від датчиків комплексу інформації блок керування (БК) й здійснює керування виконавчими пристроями КСК двигуна.

Двовивідні котушки запалювання (КЗ) генерують високовольтні імпульси одночасно на свічці запалювання в двох циліндрах. Тому за час робочого циклу (два оберти колінчастого вала) у кожному циліндрі чиняться два іскрових розряди: один у кінці такту стиску (робочий), другий холостий – у кінці такту випуску. Кожний канал керування КЗ має два таймери T_i, перший з яких (T_4, T_6) забезпечує формування випередження запалювання $\varphi_{зап}$, а другий (T_3, T_5) задає тривалість замкнених контактів первинного цепу КЗ, причому T_4 і T_5 запускають відповідно T_3 і T_6.

Циклова подача палива забезпечується у задані моменти часу для кожного циліндра за допомогою Ф. При постійному перепаді тисків у паливній магістралі та у впускному трубопроводі кількість палива, яка надходить крізь форсунки Ф, обумовлюється тривалістю їх відкриття, яка формується БК за допомогою таймерів T_7, T_{10} (на кожну форсунку – за таймером). У КСК реалізоване фазове вприскування палива. Відсліджування моменту (фази) початку вприскування бензину здійснюється таймером T_{11}, який запускає в потрібний момент один з таймерів $T_7 – T_{10}$ за схемою вибору (порядку роботи)циліндрів (ВЦ).

Канал керування РДП має власний таймер T_2, в якому комп'ютер видає код, пропорційний куту відкриття РДП.

Крізь РБН здійснюється вмикання електробензонасоса.

Сигналізація аварійна (АС) спрацьовує у випадку виявлення діагностичними тестами несправності, потім сигнал надходить на приладову панель водія.

Функціонування КСК здійснюється таким чином (на рис.6.2 показана схема його алгоритму).

Загальний принцип побудови програмного забезпечення наведеного алгоритму керування – блочний; кожна підпрограма реалізована у вигляді самостійного модуля. Функціонування окремого програмного модуля починається з визначення необхідності його роботи у даному циклі керування, тобто перевіряється відповідність поточних параметрів ДВЗ робочої області програми, а також алгоритмічна допустимість її роботи. Якщо програма у даному циклі керування не працює, то виконується, у разі необхідності, її ініціалізація у вихідний (початковий) стан та керування передається наступному програмному модулю.

Після успішного завершення тестів керування передається програмі ініціалізації системи керування, яка здійснює настроювання каналів інтерфейсу, таймерів, готує ОЗП до роботи КСК, проводить ініціалізацію всіх програм. До початку режиму пуску за допомогою стартера на 2 с вмакається електробензонасос з метою створення необхідного тиску у паливній магістралі. Система керування підготовлена до роботи – програмне забезпечення “зависає”, чекаючи переривань, які чередуються упродовж робочого процесу ДВЗ кожні півоберти колінчастого вала двигуна.

З початком переривань здійснюється опитування датчиків та обробка отриманої інформації, яка записується й зберігається у ОЗП та використовується усіма програмами.

В режимі пуску, ознакою чого є працюючий стартер, вмикається електробензонасос та здійснюються керувальні діяння на виконавчі пристрої. Тривалість командного імпульсу на вприскування $\tau_{впр}$ є функцією n і $t_{ох}$; випередження запалювання є функцією n, регулятор РДП повністю відкритий.

При вимкненому стартері аналізується величина n. Якщо поточне значення n менше заданого n, то це ідентифікується як невдалий пуск, внаслідок чого $\tau_{впр}$ і $\tau_{кз}$ дорівнюють нулю й електробензонасос відключається.

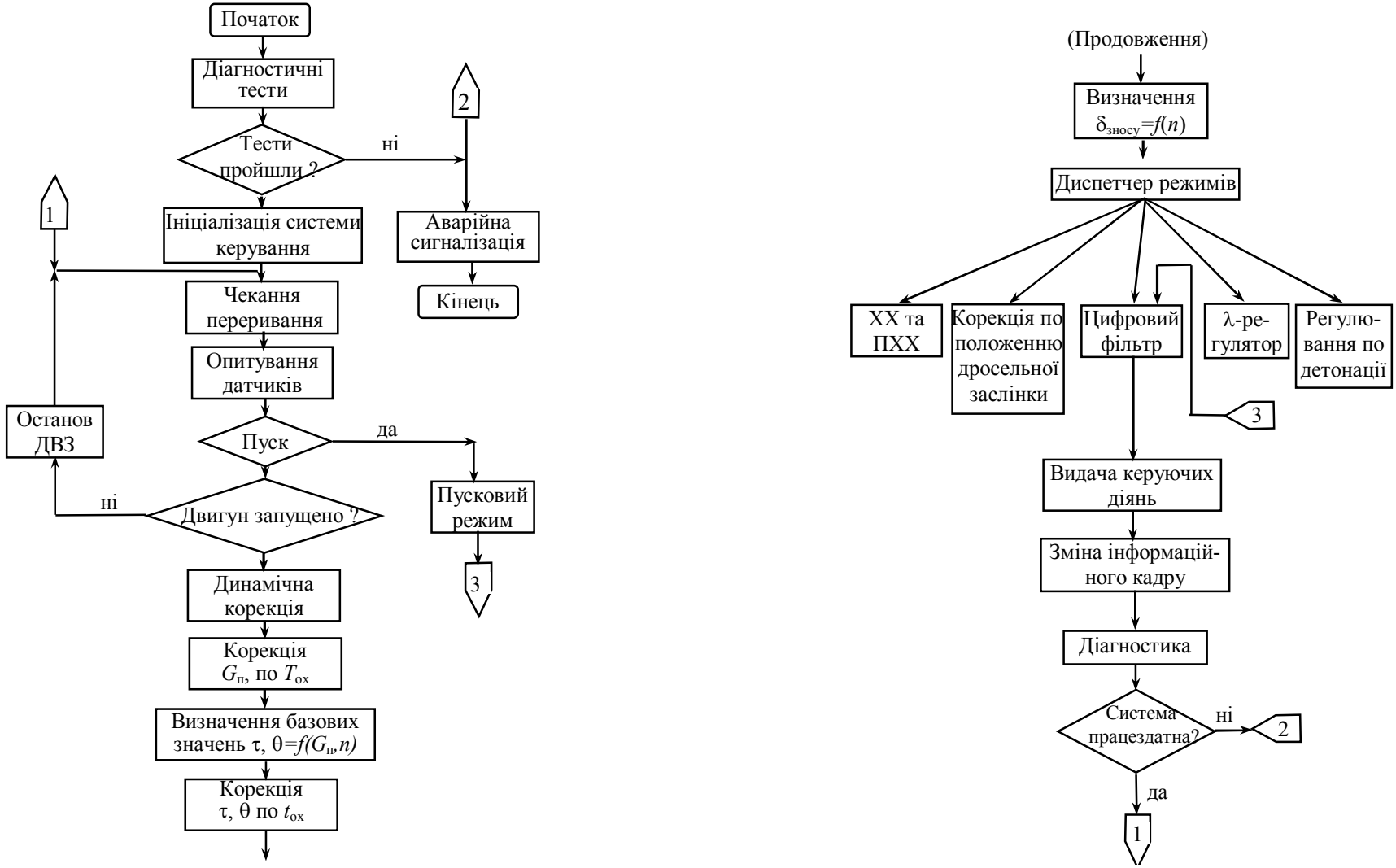


Рисунок 6.2 – Блок-схема алгоритму функціонування КСК ДВЗ:
1-3 – канали зв’язку, обірвані для економії місця

У випадку успішного пуску корекція виміряного значення напруги $U_{\text{п}}$ датчика масової витрати повітря $G_{\text{п}}$ за температурою T_s здійснюється на працюючому двигуні. По розрахованим значенням $U_{\text{п}}$ за допомогою характеристики датчика, що зберігається у пам'яті БК, визначається величина витрати повітря.

Динамічна корекція враховує темп діяння водія на педаль керування дросельною заслінкою.

Базові значення $\tau_{\text{впр}}$ та θ визначаються як функції $G_{\text{п}}$ та n за таблицею, яка зберігається у пам'яті БК, а потім корегуються за $T_{\text{ох}}$. Величина $\tau_{\text{кз}}$ визначається як функція n.

Режими роботи двигуна ідентифікуються відповідно до алгоритму керування і з використанням програмного диспетчера. Ознакою режиму холостого ходу (ХХ) або примусового холостого ходу (ПХХ) є закритий дросель. За величиною $T_{\text{ох}}$ визначається значення $n_{\text{т}}$, відносно якого формується гістерезис переходу з ХХ на ПХХ й назад, з плавною зміною коефіцієнта регулювання за визначений термін часу. Незалежно від зовнішнього навантаження забезпечується визначений, що залежить від $T_{\text{ох}}$, рівень n. Регулювання досягається за рахунок зміни наповнення циліндрів й $\varphi_{\text{зап}}$ двигуна. Зміна наповнення з використанням регулятора додаткового повітря РДП здійснюється методом пропорційно-інтегрального регулювання, а керування величиною $\varphi_{\text{зап}}$ – методом пропорційного регулювання. Сигналом неузгодженості служить відхилення виміряного значення n від заданого $n_{\text{т}}$ ($n_{\text{т}}$ – поточне значення).

Плавний вихід на зовнішню характеристику двигуна здійснюється за рахунок корекції базових значень $\tau_{\text{впр}}$ і $\varphi_{\text{зап}}$ по положенню дросельної заслінки з використанням коефіцієнтів, які зберігаються у пам'яті БК й залежних від n, $\varphi_{\text{зап}}$.

В алгоритмі керування передбачена ідентифікація режимної області роботи двигуна, де вступає в дію λ-регулювання. В цій зоні для керування цикловою подачею палива використовується інформація, яка надходить від λ-зонду, й здійснюється дворежимна корекція середньої циклової подачі палива для кожного циліндра. Дворежимний метод корекції дозволяє підтримувати стехіометричний склад суміші з достатньою точністю, що забезпечує ефективну роботу трикомпонентного нейтралізатора.

Алгоритм керування кутом φ із зворотним зв'язком по детонації дозволяє адекватно ідентифікувати у кожному циліндрі робочий цикл з детонацією та підготувати керуюче діяння з корекцією за φ до моменту наступного робочого циклу. За наявності детонації значення φ стрибкоподібно зменшується, але не більше ніж на 15 град. П.К.В. Це передбачено для аварійної ситуації, наприклад, у випадку обривання кабелю до датчика детонації. Після зникнення детонації значення φ плавно зростає до потрібного табличного значення.

Цифровий фільтр дозволяє регулювати темп зміни керуючих параметрів.

Після завершення коригувань здійснюється видача керуючих діянь шляхом занесення відповідних кодів у таймери. Параметри таких діянь запам'ятовуються в ОЗП БК та використовуються для реалізації цифрового фільтра й динамічної корекції.

У кожний циліндр паливо вприскується один раз за кожні два оберти колінчастого вала у задані моменти відносно робочого такту цього циліндра (застосовано так зване послідовне фазоване вприскування). У зв'язку з цим КСК ДВЗ має чотири незалежних окінцевих ступеня для керування форсунками Ф. Момент вприскування обраний за умовою зменшення токсичності викидів з ВГ та покращення плавності ходу на режимах часткових навантажень двигуна.

Алгоритм керування, окрім функціональних вимог щодо реалізації з необхідною точністю й швидкодією командних (керуючих) діянь, залежно від основних режимів роботи двигуна з урахуванням корегуючих факторів, реалізує групу не менш важливих вимог, що забезпечують їздові якості, діагностичні й аварійно-попереджувальні функції.

Діагностування, аварійно-попереджувальний захист та сигналізація націлені на зниження максимальних циклових подач палива, в тому числі й зупинку двигуна при перевищенні визначених як порогові сигнали датчиків у місцях контролю.

З виходом комп'ютера з ладу БК залишається життєздатним, не втрачає гнучкості керування. У випадку, що розглядається, аварійний режим функціонування БК дозволяє автобусу доїхати до станції технічного обслуговування.

Закінчуючи розгляд та системний аналіз сучасної комплексної КСК ДВЗ, зазначимо, що схема, наведена на рис. 6.1, не містить та й не може містити весь набір датчиків й виконавчих пристроїв, які розглядалися у главах 3–6.

Наддув, АРТСД та інші засоби поліпшення експлуатаційної характеристики двигуна, безумовно, ускладнили б КСК, не вносячи між тим принципових змін у її структурну схему.

Однак вже з розгляду конкретної комплексної КСК ДВЗ можна зрозуміти структурні, функціональні особливості і можливості саме таких систем керування.

Принципово, що у схемі цієї, як й інших, комплексної КСК чітко вирисовуються її функціональні компоненти: дві підсистеми керування паливо- та повітропостачанням, а також набір блоків (каналів, контурів) локального керування за обраними критеріями. Структура КСК, таким чином, складається з функціональних рядів: датчики КПСК (КБК та ін.) – засоби автоматичного керування виконавчі пристрої, що відповідає структурній побудові КСК ДВЗ в цілому.

Розглянутий системний підхід до побудови і аналізу КСК може використовуватися для комплексних систем керування двигунами внутрішнього згоряння будь-яких типів та призначень.

Ще раз підкреслимо, що принцип комплексної побудови сучасних КСК ДВЗ єдино сприяє досягненню найвищого ефекту від їх використання у складі силових установок.

Це підтвердив і досвід експлуатації розглянутої комп'ютерної системи керування у складі мікроавтобуса "РАФ", що виявив такі її переваги:

- поліпшення паливної економічності за рахунок більш точної реалізації законів керування у всьому діапазоні швидкісних та навантажувальних режимів двигуна;
- зниження токсичності ВГ та задовольняння перспективних жорстких норм по токсичності в результаті більш точного дозування палива, оптимізації випередження запалювання, використання λ- регулювання й трикомпонентного нейтралізатора;
- зниження мінімальної частоти обертання колінчастого вала на режимі холостого ходу за рахунок більш високої якості регулювання, поліпшення пристосованості двигуна;

- поліпшення запуску в умовах низьких температур шляхом оптимального вибору циклової подачі палива й випередження запалювання;
- забезпечення на експлуатаційних режимах потрібного складу горючої суміші (α) за рахунок узгодження паливоподачі й повітропостачання, що є інструментом успішного вирішення всіх наведених вище задач комплексного керування;
- покращення діагностування КСК й двигуна в цілому за результатами вимірювань параметрів робочого процесу та контрольних параметрів у визначених зонах.

6.2.2. Функціональний аналіз та вибір електронного забезпечення КСК ДВЗ

Таке забезпечення здійснює БСІ (блок синтезу інформації), який входить до будь-якої КПСК, КБУ, як це показано на їхніх схемах, наведених вище, в главах 3, 4.

Принципова схема БСІ наведена на рис. 6.3.

Сигнали датчиків на вході в БСІ піддаються вхідний обробці у відповідному функціональному перетворювачі (для цифрових сигналів, наприклад, φ, n, кисню, параметрів запалювання) або в АЦП (для аналогових сигналів, що потрібно для узгодження з вхідними параметрами мікро-ЕОМ. Сигнал датчика детонації обробляється в спеціальній мікро-ЕОМ і потім подається у головну мікро-ЕОМ. На основі вхідних сигналів головний мікрокомп'ютер розраховує за програмою, що зберігається в її пам'яті, для даного теплового стану двигуна й експлуатаційного режиму оптимальну кількість вприскуваного палива, КВЗ, фази паливоподачі, параметри повітропостачання тощо. Потім керуючі сигнали проходять обробку вихідних сигналів, діють на виконавчі пристрої – форсунки, комутатор підсистеми запалювання тощо.

Проаналізуємо роботу елементів БСІ.

АЦП – аналого-цифровий перетворювач. Існує декілька способів аналого-цифрового перетворення, але поширеніші з них два: метод з інтегруванням та метод послідовних порівнянь. Тривалість перетворення аналогового сигналу у восьмирозрядний код методом інтегрування звичайно складає 1-20 мс, а методом послідовних порівнянь – 10-30 мс.

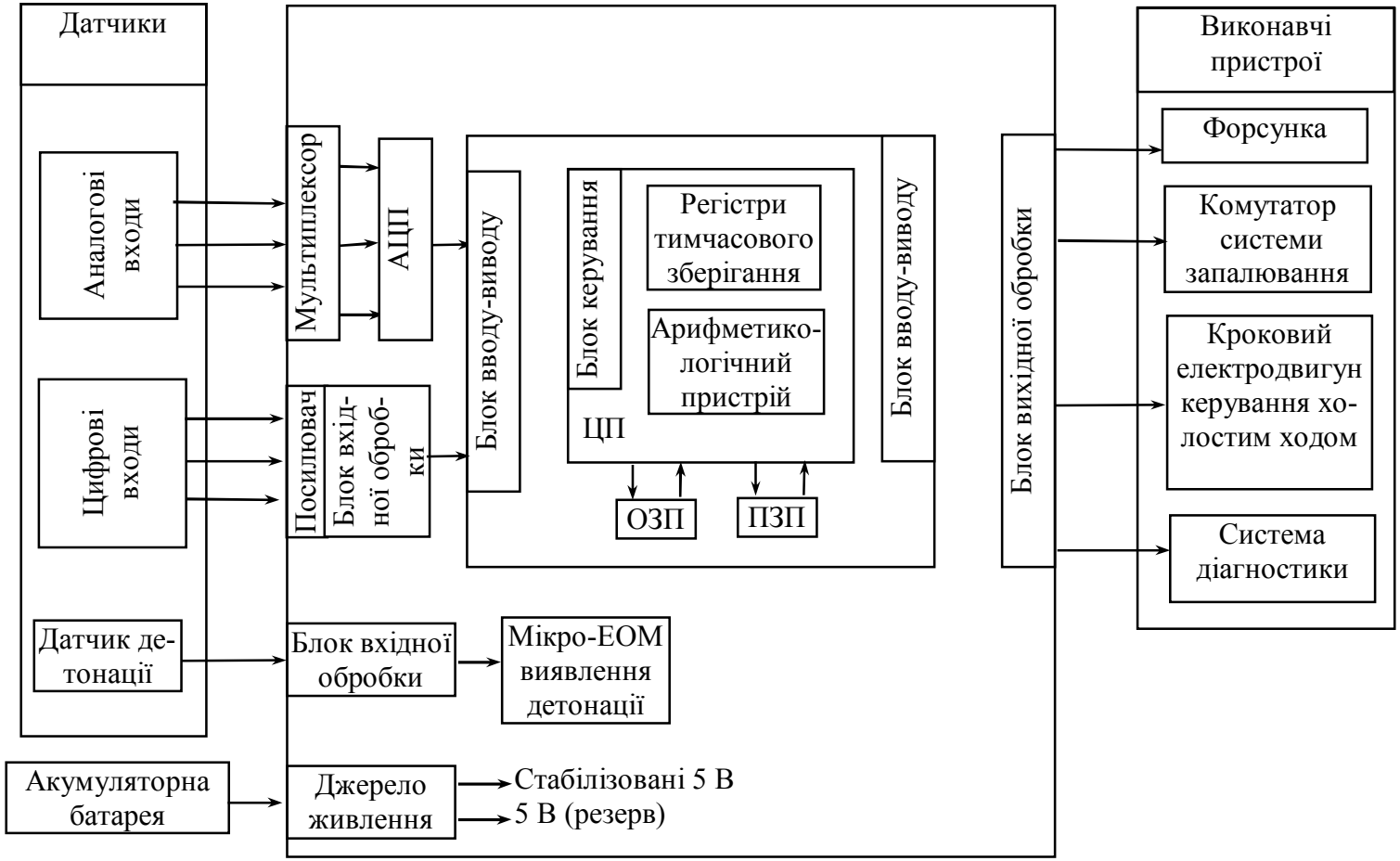


Рисунок 6.3 – Принципова структурна схема БСІ КСК ДВЗ [3]

Основні критерії для вибору необхідного АЦП – час перетворення (швидкохідність АЦП), точність та вартість перетворювача. Перетворювачі, що працюють за методом з інтегруванням, мають малу вартість й чудову точність, але й відносно велику тривалість перетворення. Метод послідовних порівнянь відрізняється високою швидкістю перетворення, але вартість АЦП, що працює за цим принципом, різко зростає по мірі збільшення необхідної точності перетворення [3].

При аналого-цифровому перетворенні з інтегруванням (рис. 6.4) можуть використовуватися декілька варіантів: з одним, двома й більше нахилами інтегрування, але в основі всі вони однакові. Найбільш поширений метод з двома нахилами інтегрування (з подвійним інтегруванням). Такий перетворювач має добру лінійність характеристики, малі шуми й низьку вартість. Його робочий цикл має три періоди (рис. 6.4): корекція нуля ($Ф_1$), інтегрування вхідного сигналу ($Ф_2$) та інтегрування опорної напруги ($Ф_3$). Спочатку впродовж періоду $Ф_1$ виконується автоматична корекція сигналу похибки шляхом регулювання напруги зміщення. При цьому вхід перетворювача замикається на корпус, організується петля зворотного зв'язку, а інформація про похибку запам'ятовується на конденсаторі C_2. У наступному періоді $Ф_2$ виконується інтегрування вхідного сигналу й одночасно відлік деякої постійної кількості тактових імпульсів. В кінці цього періоду на виході інтегратора отри-

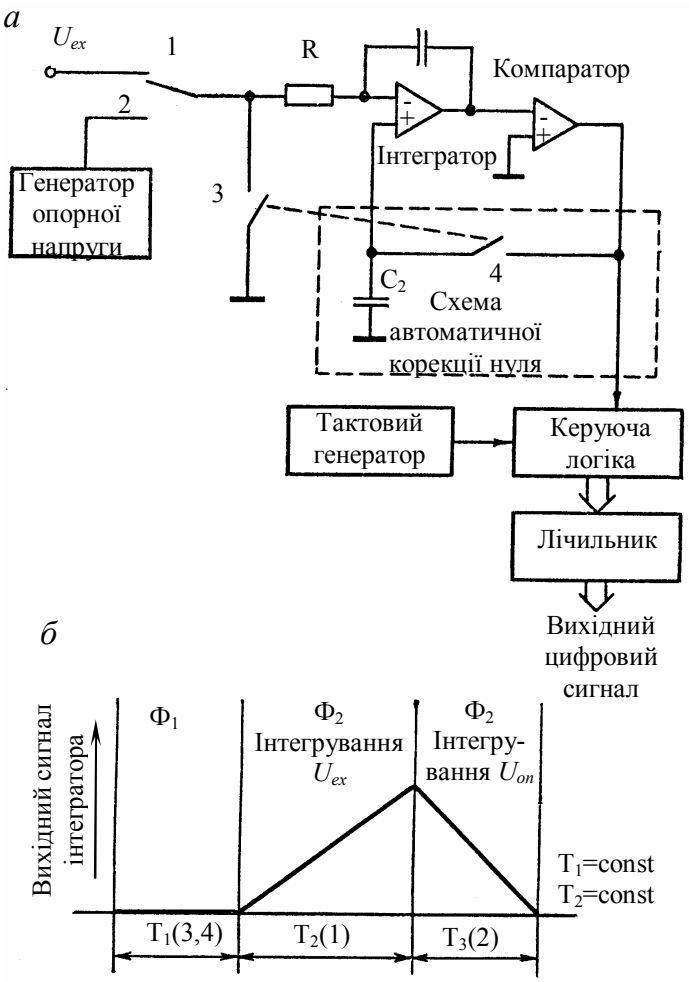


Рисунок 6.4 – АЦП з подвійним інтегруванням:
а – схема; *б* – часова діаграма

мується напруга, пропорційна значенню вхідного сигналу. В останньому періоді $Ф_3$ на вхід інтегратора замість початкового сигналу подається опорна напруга протилежної полярності. При цьому вихідна напруга інтегратора починає спадати. Одночасно виконується підрахунок тактових імпульсів і так далі – аж до вирівнювання напруги з рівнем порівняння компаратора. Цифровий еквівалент вхідного сигналу визначається таким чином. Якщо T_2 – тривалість першого інтервалу інтегрування (період $Ф_2$), а T_3 – тривалість другого інтервалу інтегрування (період $Ф_3$), які вимірюються шляхом підрахунків тактових імпульсів, то цифрове значення вхідного сигналу:

$$U_{вх}=\left(\frac{T_3}{T_2}\right)U_{оп}.$$

При способі перетворення з подвійним інтегруванням точність перетворення не залежить від ємності конденсатора, інтегратора та частоти тактового генератора за умови їх стабільності протягом короткого терміну періоду інтегрування, а залежить лише від стабільності опорної напруги. Ще однією перевагою цього способу є край низький рівень шумів. Недолік цього методу – порівняльно велика тривалість перетворення.

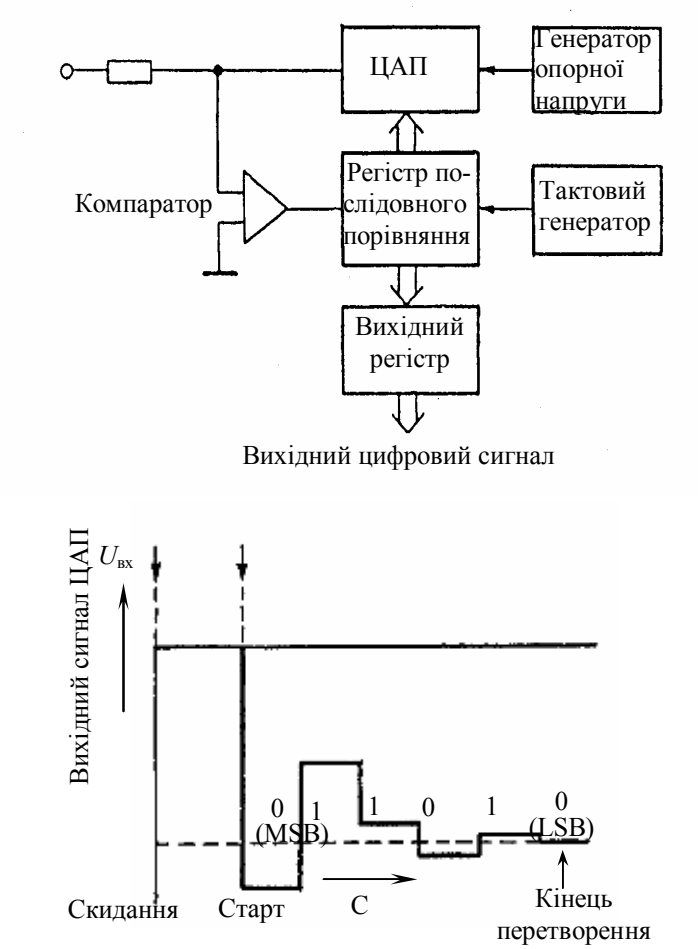


Рисунок 6.5 – АЦП з послідовним порівнянням:
а – схема; *б* – часова діаграма;
MSB – найстарший розряд;
LSB – наймолодший розряд;
С – вміст регістру порівняння

Схема АЦП, що функціонує за способом перетворення з послідовним порівнянням, або – за принципом порозрядного врівноваження, показана на рис. 6.5. Перетворювач цього типу містить регістр послідовного порівняння, цифроаналого-

вий перетворювач (ЦАП) й компаратор, що порівнює вхідну напругу з аналоговою напругою на виході ЦАП. Порівняння виконується послідовно, починаючи з самого старшого розряду регістра порівняння, код якого й перетворюється в аналогову напругу за допомогою ЦАП. На кожному кроці порівняння визначається значення чергового розряду. Початкове значення кожного оброблюваного розряду встановлюється рівним логічній 1. Якщо вхідна напруга від датчика менша вихідної напруги ЦАП, логічна 1 оброблюваного розряду регістра зберігається. Якщо ж вхідна напруга більше напруги на виході ЦАП, то в поточному розряді регістра встановлюється значення логічного 0. Далі виконується аналогічна обробка кожного подальшого розряду у регістрі. Вихідний цифровий код після обробки всіх розрядів регістра знімається безпосередньо з цього ж регістру. Перевагою АЦП з послідовним порівнянням є сталість інтервалу перетворення й незалежність його від вхідної аналогової напруги. Однак перетворювач такого типу має й недоліки. По-перше, мається цілий ряд факторів, що впливають на похибки перетворення, в тому числі похибки ЦАП, компаратора й нестабільність опірної напруги. По-друге, досягнення високої точності пов’язане з подорожчанням перетворювача. Звичайно, АЦП з послідовним порівнянням використовується там, де вимагаються відносно високі швидкості перетворювання.

Аналоговий мультиплексор. Для перетворення у цифрові коди одразу кількох аналогових сигналів можна використовувати один перетворювач, але у сукупності з аналоговим мультиплексором (рис. 6.6). Завдяки застосуванню мультиплексора, також можна обмежитися й меншою кількістю портів вводу мікро-ЕОМ. Мультиплексор складається із аналогових перемикачів, кожний з яких може приєднувати свій вхід до загального для всіх перемикачів виходу.

Вибір того чи іншого каналу для приєднання до виходу здійснюється ввімкненням відповідного аналогового перемикача шляхом видачі бінарного коду з його адресою. За аналогові перемикачі найчастіше використовують МОП – транзистори, причому коли подальші каскади схеми перемикача мають високий вхідний опір, то ці транзистори можуть приєднуватися до них безпосередньо.

Спільна робота АЦП та мікро-ЕОМ. Обмін інформацією поміж АЦП та ЕОМ здійснюється на основі загального методу – на відповідному

кроці програми керування комп'ютер розшифровує код аналогової шини й обирає АЦП, потім дає стартову команду для початку перетворення сигналів датчиків, а після її закінчення отримані дані переводяться до пам'яті ЕОМ.

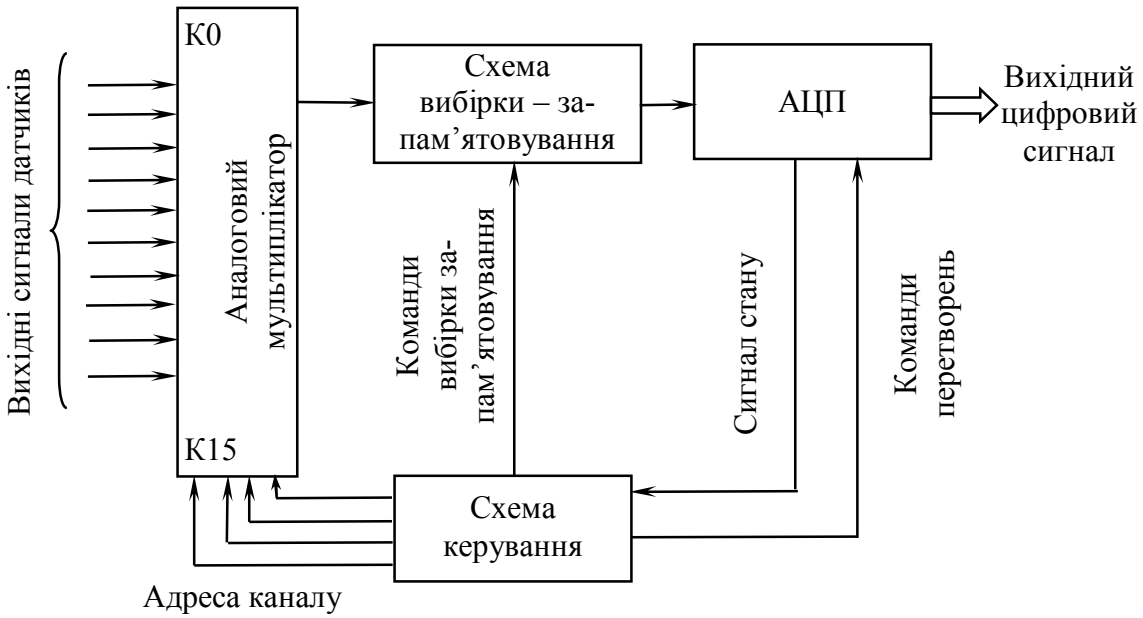


Рисунок 6.6 – Приклад використання аналогового мультиплексора

Конкретне здійснення цього методу залежить як від типу АЦП, так і від архітектури самої мікро-ЕОМ.

Мікро-ЕОМ є досить складний пристрій, який забезпечує виконання розрахункових та логічних операцій за закладеною в ній програмою керування, зберігання й використання бази даних (у табличній та матричній формах) для контролю й вибору оптимального режиму роботи двигуна, параметри якого відповідають обраним критеріям оптимальності щодо паливної економічності, токсичності викидів, динаміки під час перехідних процесів тощо. Для виконання цих функцій до складу мікро-ЕОМ входять (рис.6.7) [6]:

❖ центральний процесор (ЦП), який здійснює вибір команд керування й обробку даних;

❖ пам'ять, у якій зберігаються програми і дані;

❖ блок вводу-виводу, що керує прийманням даних від датчиків та передаванням даних на виконавчі механізми.

Ці складові мікро-ЕОМ поєднані між собою набором ліній передавання інформацій, які називаються шинами. Шини за своїм призначенням поділяються на:

- шини даних, за якими здійснюється обмін даними;
- шини адреси, за якими передаються адреси чарунок пам'яті;
- шини керування, за якими передаються сигнали керування роботою системи.

Загальна шина, що об'єднує ці три типи шин, називається *системою*. Припустимо в ЦП треба отримати дані з пам'яті або блоку вводу-виводу. Тоді в один з цих пристроїв по шині керування передається відповідний керуючий сигнал. Далі по адресній шині передається адреса місцерозташування потрібної інформації. Ця інформація по шині даних передається в ЦП. Саме така послідовність діянь реалізується мікро-ЕОМ за програмою керування.

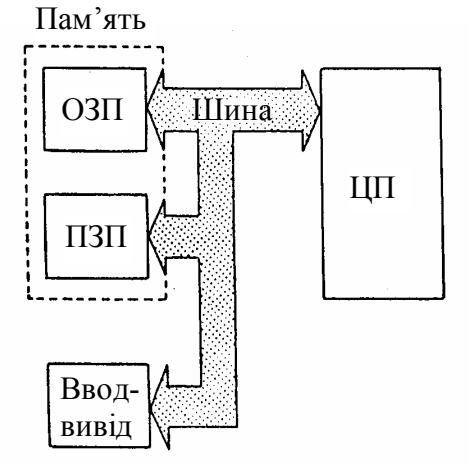


Рисунок 6.7 – Структурна мікро-ЕОМ

ЦП – одна з основних структурних складових мікро-ЕОМ. ЦП (рис. 6.8) містить арифметико-логічний пристрій (АЛП), що використовується для виконання арифметичних і логічних операцій з даними, отриманими із регістру тимчасового зберігання (в основному – поточні значення показань датчиків) та блока керування різними діями (наприклад, зчитування й виконання команд програми керування). Такі складові ЦП – регістри тимчасового зберігання, блок керування й АЛП звичайно виконуються у вигляді однієї великої інтегральної схеми (ВІС), що й зветься мікропроцесором.

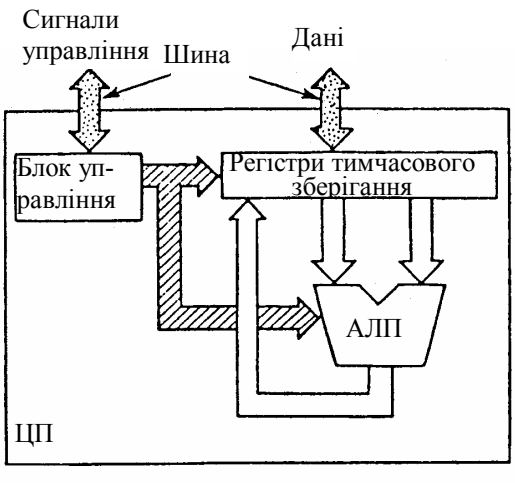


Рисунок 6.8 – Структура центрального процесора (ЦП)

Робота ЦП здійснюється при подаванні на нього тактових імпульсів від генератора імпульсів, що також входить до складу мікро-ЕОМ. Період повторення імпульсів рівномірний й визначається як Т-цикл. Для виконання ЦП окремих операцій звичайно потребується три – шість Т-циклів. Цей інтервал часу зветься машинним або М-циклом. Існує цикл інструкцій – термін виконання команд. Він може містити декілька М-циклів.

У перелік основних машинних циклів входять такі:

- витягання коду операції;
- зчитування або записування даних у пам'яті;
- зчитування або записування даних вводу-виводу;
- запрос або підтвердження доступу до шини;
- запрос переривання із маскіруванням, підтвердження дозволу на переривання;
- запрос або підтвердження переривання без маскірування;
- відміна зупинки.

Команди, що формуються ЦП, можна, укрупнюючи, поділити на вісім функціональних груп:

- переніс і обмін;
- блочний переніс, пошук;
- арифметичні розрахунки й логічні операції;
- цикл, зсув;
- бітові операції;
- розгалуження, викликання, повернення;
- ввід – вивід;
- керування робочою власне ЦП.

Пам'ять ЦП служить для записування програм й необхідних даних і функціонально поділяється на оперативну (оперативний запам'ятовуючий пристрій – ОЗП) та постійну (постійний запам'ятовуючий пристрій – ПЗП). Перший дозволяє здійснювати як записування, так і зчитування, а ПЗП має тільки зчитувати.

Роль пам'яті у мікро-ЕОМ виконують напівпровідникові запам'ятовуючі пристрої ЗП, серед яких добре відомі біполярні запам'ятовуючі пристрої (БЗП). Однак досягнення високого ступеня інтеграції в ЗП цього типу пов'язане з великими труднощами. Тому як пам'ять мі-

кро-ЕОМ, за виключенням випадків, коли необхідна дуже висока швидкодія, використовуються ЗП, виконані за МОП-технологією.

Напівпровідникові пристрої пам'яті можна класифікувати за схемою рис. 6.9. Як вже відмічалося вище, постійні ЗП призначені тільки для зчитування інформації. Це – енергонезалежні (автономні) ЗП, тобто при відключенні джерела електричного живлення зміст пам'яті не руйнується. Звичайно ПЗП використовується для запам'ятовування програм, зберігання фіксованих даних, таких, як коди зразків букв, цифр та інших символів, таблиць для прямих чисельних перетворювань, таблиць і матриць базових значень режимних параметрів двигуна. Широко застосовуються так звані масочні ПЗП (від слова маска – стандартний набір команд, програм, чисельних значень), найбільш зручні в умовах масового виробництва. При збільшенні обсягу випуску вартість одного кристалу ПЗП швидко знижується, компенсуючи тим самим достатньо великі затрати на розробку маски. Для заміни інформаційного змісту такого ПЗП необхідна розробка нової маски. Однак при невеликих об'ємах випуску зручніші та дешевіші ПЗП, які стираються та програмуються (СППЗП), оскільки їх можна перепрограмувати без заміни маски. Багаторазове стирання й перезаписування в СППЗП виконується при ультрафіолетовому опроміненні ВІС. Частіше СППЗП використовуються на етапі розробки мікро-ЕОМ у пробних її зразках. Корпуси СППЗП і масочних ПЗП відрізняються розташуванням виводів. В останні роки інтенсивно розробляється ще один вид ПЗП, так звані електрично стираємі й програмовані ПЗП – ЕСППЗП.

Інший вид пам'яті – ОЗП або ЗП з довільною вибіркою (ЗППВ). На відміну від ПЗП цей вид пам'яті дозволяє не тільки зчитувати, але й записувати. Це енергозалежний тип ЗП, тому що при відключенні джерела живлення зміст ЗП остаточно втрачається. ОЗП можуть бути статичними і динамічними. Динамічні ОЗП мають більш просту, ніж статичні, структуру чарунок пам'яті й допускають більш високий ступінь інтеграції їх реалізації у вигляді ВІС. Для пам'яті великої ємності вигідніше використовувати динамічні ОЗП. Однак відповідно до їх принципів роботи для збереження цілісності вмісту необхідна його періодична регенерація й, як правило, потрібні складні керувальні схеми.

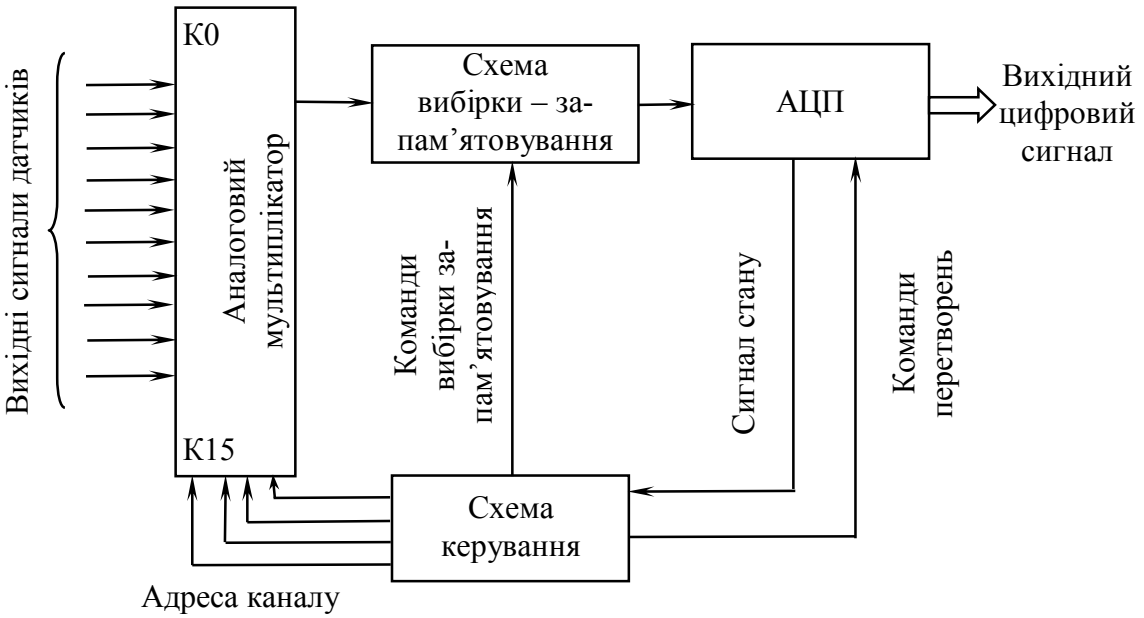


Рисунок 6.9 – Класифікація пам'яті

У ОЗП в кожний момент часу здійснюється вибірка та запис показань датчиків, які порівнюються з базовими, що зберігаються у ПЗП. Мікро-ЕОМ на основі порівняння обирає оптимальний режим роботи двигуна. При незмінних за величиною сигналах датчиків, що відповідає усталеному режиму роботи двигуна, ОЗП самостійно керує ДВЗ без звертання до ПЗП. Важливою функцією ОЗП є виявлення й запис збоїв та порушень роботи як мікро-ЕОМ, так і двигуна в цілому, які при необхідності можуть бути зчитані стаціонарною ЕОМ при підключенні її до діагностичного розйому КСК автомобіля.

ОЗП з комплементарною МОП-структурою відрізняються дуже невисоким живленням електроенергії, тому за наявності резервного джерела живлення невеликої потужності цей тип ЗП стає також енергонезалежним.

Ввід-вивід (або порт вводу-виводу) в структурі мікро-ЕОМ – це схеми керування, які забезпечують її з'єднання із периферійними пристроями – датчиками й виконавчими механізмами. Також пристрій вводу-виводу мікро-ЕОМ у сучасних автомобілях дозволяє підключити й забезпечити спільну роботу бортової мікро-ЕОМ з навігаційними системами пересування, персональним комп'ютером й друкувальним пристроєм.

В структурі сучасних ЕР, КСК ДВЗ, як правило, передбачені дві мікро-ЕОМ. Одна з них є головною й визначає режим роботи двигуна, видаючи результуючі сигнали на виконавчі механізми. Вона отримує й обробляє інформацію усіх датчиків за винятком сигналу датчика детонації. У каналі обробки даного сигналу доцільно застосувати іншу (індивідуальну) мікро-ЕОМ. Це пов'язано із складністю виділення сигналу та його обробки з залученням достатньо великої кількості даних із пам'яті мікро-ЕОМ. У випадку застосування ускладнених схем з кількома смуговими фільтрами для підвищення якості сигналу датчика детонації, а тим більше у випадку застосування схем з декількома датчиками детонації (по одному на два циліндри) для селективного вибору й зменшення $\varphi_{зап}$ (КВЗ) в окремо взятому циліндрі, де раніше інших з'явилися детонаційні стуки, окрема (індивідуальна) мікро-ЕОМ для виявлення детонації розвантажує головну мікро-ЕОМ й видає їй на вхід необхідний рівень корекції базового $\varphi_{зап}$, який є у її пам'яті. Друга мікро-ЕОМ, нарешті, бере на себе функції контролю роботи головного комп'ютера при організації самодіагностування всієї електроніки, що обслуговує КПСК, КБК та КСК ДВЗ в цілому.

Вибір мікро-ЕОМ для двигуна та автомобіля, методика розробки програм керування. Важливим моментом розробки та оцінки можливостей електронної системи керування двигуна силової установки (автомобіля, тепловоза, тощо) є вибір мікро-ЕОМ КСК ДВЗ. Для цього необхідно мати коротку специфікацію системи, де описані функції, які вона повинна виконувати, її структура, типи вхідних й вихідних пристроїв (датчиків та виконуючих пристроїв), функції схем керування процесами двигуна, послідовність діянь. На основі цієї специфікації виконується вивчення проекту, оцінюються габарити (відведені на ЕОМ), його вартість та терміни розробки. Після цього відбираються декілька типів мікроЕОМ, придатних для даної системи, та на них виконується попереднє проектування схеми керування. На даному етапі аналізуються способи керування вводом-виводом, потрібний об'єм ПЗП і ОЗП та складається блок-схема, що дає уяву про функції керування двигуном в цілому. Крім того, при виборі мікро-ЕОМ слід звернути увагу на такий момент, як сумісність програмного забезпечення у випадку переходу від застарілої на нову модель мікро-ЕОМ і потрібну для цього доробку системи комп'ютерного керування ДВЗ.

Мікро-ЕОМ можна класифікувати за розрядністю, кількістю задіяних кристалів, технологією виготовлення.

За кількістю розрядів чарунок ОЗП мікро-ЕОМ поділяються на 1- , 4- , 8- та 16-розрядні моделі. Найдорожчими й найскладнішими є 16-розрядні мікро-ЕОМ, вони не часто використовуються для керування ДВЗ, де вартість КСК є чи не головним обмеженням. Зараз такі найскладніші моделі можна й треба замінити на високорозвинуті 8-розрядні. Однорозрядні мікро ЕОМ – вельми специфічні електронні пристрої, які зовсім не придатні для чисельних операцій та використовуються лише для логічної обробки й виконання функцій таймерів. Однак для вирішення саме означених функцій їх з значною ефективністю можна застосувати в апаратурі керування ДВЗ.

Найбільш поширеними є в електроніці ДВЗ 4- та 8- розрядні мікро-ЕОМ. Якщо порівняти ці два класи, то слід відмітити, що 4- розрядні мікро ЕОМ мають явну перевагу при виконанні логічних операцій, для чого вони оснащені більшим набором команд. Восьмирозрядні мікроЕОМ поступаються їм по кількості команд логічної обробки й ефективність їхня в цьому плані менша. Однак, що стосується арифметичних операцій, то набір команд в ;- розрядних мікроЕОМ для цієї мети недостатній. Крім того, за точністю обчислень вони у 16 разів поступаються 8-розрядним мікро-ЕОМ. Тому в системах, що повинні виконувати з високою швидкістю високоточні обчислювання, слід застосувати 8-розрядні мікро-ЕОМ.

Щодо технології виготовлення всі сучасні мікро-ЕОМ можна поділити на n-МОП і КМОП. В останні роки значний прогрес у КМОП-технології дозволив розробити моделі, які за швидкістю обчислень перевищують n-МОП мікро-ЕОМ, причому споживають суттєво менше електроенергії. Так, наприклад, n-МОП мікро-ЕОМ споживає струм більше 1000 мА, тоді як КМОП мікро-ЕОМ – тільки 10 мА. Це відбивається на стані акумуляторної батареї при працюючому двигуні й наявності діючої системи керування, наприклад програмного таймера для самостійного запуску й прогріву двигуна.

Після вибору мікро-ЕОМ, базуючись на попередньому проектуванні схеми КСК ДВЗ, складається детальна специфікація (технічне завдання). Така специфікація є базою для розробки програми (програм) керування ДВЗ.

Розробка програм керування ДВЗ.

Існують різні методики таких програм. На рис.6.10 наведена блок-схема одного з варіантів процесу розробки програм керування автомобільним двигуном для цільової мікро-ЕОМ.

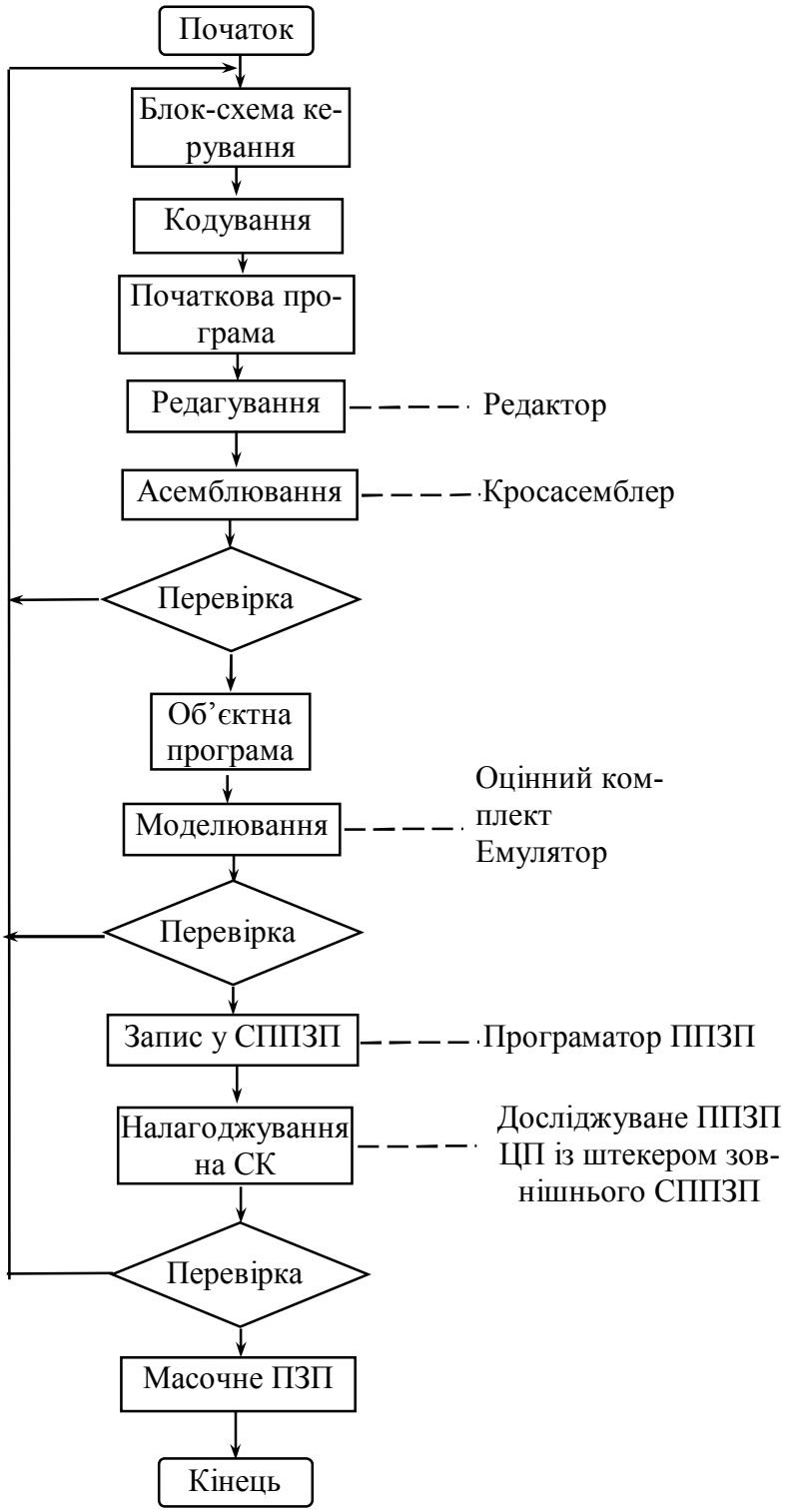


Рисунок 6.10 – Блок-схема процесу розробки програми керування

Слід нагадати, що мікро-ЕОМ складається із логічних елементів, які оперують двійкоувими числами, тому програма, що визначає порядок дій-янь мікроЕОМ, також повинна являти собою набір двійкових чисел. Мова двійкових чисел, зрозуміла ЕОМ, називається *машинною мовою*. Однак керування такою мовою вкрай незручно. Наприклад, команда складення у 8-розрядних машинних словах має вигляд “10001011”. Тоді при створенні програми керування ДВЗ кожний раз, коли зустрічається ця команда, треба буде користуватися подібним уявленням. Однак, якщо цю ж команду записати як АДД (абревіатура від англійського слова addition – складення), процес складання програми суттєво спрощується й вона буде більш зручна для сприйняття. Такий спосіб подання команд зветься *мнемонічним*. Для вводу у мікро-ЕОМ програми керування, записаної у мнемонічному вигляді (або, що те ж саме, на мові асемблера), її необхідно перетворити у машинну мову. Програма, що здійснює таке перетворення, зветься кросасемблером. Подібний переклад програми на машинну мову здійснюється високопродуктивною ЕОМ, наприклад, великою ЕОМ, або персональним комп’ютером, яка у даному випадку зветься головним комп’ютером, а та, для якої здійснюється трансляція програми, – цільовим комп’ютером.

Звичайно скласти програму, що цілком відповідає специфікації, з першого разу не вдається. Це пов’язано з наявністю синтаксичних та логічних помилок, допущених як при складанні самої програми, так і при перекладі з мови високого рівня на машинну мову, тому в блок-схемі повинні бути передбачені операції перевірки й контролю поточної послідовності набору команд й вмісту регістрів.

Синтаксичні помилки, які стосуються мови, знаходяться асемблером та кросасемблером; їх можна вивести на вихід головного комп’ютера. Логічні помилки виявляються при моделюванні виконання програми, а також її налаштовування на реальному автомобілі, наприклад. При виявленні помилки здійснюється корекція програми за допомогою головного комп’ютера. На етапі моделювання програма фактично виконується розроблювальними апаратними засобами (ЦП, ПЗП, ОЗП) з метою підтвердження нормальної працездатності системи керування. У процесі моделювання програми її можна зупинити на довільному кроці, вивести на екран поточний вміст регістрів ЦП та ОЗП й внести відповідні зміни. Крім того, може застосовуватися функція трасировки, яка дозволяє відціджувати виконання

програми керування ДВЗ.



Рисунок 6.11 – Укрупнена блок-схема програми управління паливоподачею ДВЗ: ISCV – клапан керування частотою холостого ходу

До перспективних засобів забезпечення розробки програм слід віднести автономний оцінювальний комплект та емулятори – віртуальні обчислювальні машині, які на відміну від реальних реалізують створену програму за допомогою мікропрограм.

На рис. 6.11 показана укрупнена блок-схема комплексної програми керування роботою ДВЗ, у відповідності з якою почергово виконуються операції обробки сигналів датчиків корекції вприскування палива й кута випередження запалювання, керування роботою клапана холостого ходу. У визначені терміни часу в оптимальній послідовності все це видається на виконавчі механізми. Звичайно така програма являє не дуже велику комплектність, оскільки вона відповідає рівню ЕР. Однак загальні принципи розробки комплексних програм керування ДВЗ на рис. 6.11 чітко простежуються.

Необхідно відмітити, що в роботі автотранспортної мікро-ЕОМ передбачена змішана обробка сигналів керування вприскуванням палива й КВЗ. Змішана обробка являє собою паралельний розрахунок цих двох параметрів, але у випадку зміни сигналу датчика витрати повітря пріоритет на закінчення розрахунку віддається програмі корекції паливоподачі як більш суттєвого сигналу для забезпечення роботи бензинового двигуна [4, 7].

Контрольні запитання та завдання

1. Які вирішуються проблеми розвитку комплексних КСК ДВЗ?
2. Які функції забезпечує сучасна комплексна КСК ДВЗ?
3. З яких функціональних груп складається структура комплексної КСК ДВЗ?
4. Зробіть укрупнений системний аналіз структурної комплексної КСК ДВЗ.
5. Які особливості аналізу блок-схеми алгоритму функціонування комплексної КСК ДВЗ?
6. Які переваги має сучасна комплексна КСК ДВЗ?
7. Які особливості має БСІ КСК ДВЗ?
8. Які функціональні особливості має АЦП?
9. Що розуміється під аналоговим мультиплексором?
10. Які особливості спільної роботи АЦП та мікроЕОМ?
11. Як працює пам'ять ЦП?
12. Як вибрати мікро-ЕОМ для керування двигуном?
13. Які основні етапи розробки програм керування?
14. Які особливості комплексної програми керування ДВЗ?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ф.И. Пинский. Перспективы комплексного совершенствования дизелей информационными связями и компьютерными технологиями в адаптивном управлении. – М.: Двигателестроение, 2002. №1. – С. 14–16.

2. Шеховцов А.Ф. Компьютерные системы управления ДВС: Навч. посібник. –Харків: ХДПУ, 1995. – 256 с.

3. Акимов С.В. Электрическое и электронное оборудование автомобилей. –М.: Машиностроение, 1988. – 172 с.

4. Синельников А.Х. Электронные приборы для автомобилей. –М.: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.

5. Автомобильный справочник (Bosch): Перевод с англ. Первое русское издание. –М.: Издательство «За рулем», 2000. – 896 с.

6. Мороз С.Э. Электроника в управлении автомобилем. М.: Знание, 1985. – 64 с.

7. Брюханов А.Б. Электронные устройства автомобиля. – М.: Транспорт, 1988. – 109 с.

Глава 7. ЕКСПЛУАТАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВЗ

Експлуатаційне обслуговування сучасних КСК ДВЗ націлено на забезпечення стабільності й надійності їх функціонування при можливо меншому втручанні людини у процеси обслуговування й контролю.

В принципі – це загальна стратегія створення та застосування самих ДВЗ на силових установках. Але прикладена до комп'ютерних систем керування двигунами, які відзначаються багатофункціональністю й особливою складністю, означена проблема набуває великої актуальності.

Іншою глобальною проблемою використання й подальшого розвитку КСК ДВЗ, є техніко-економічна ефективність їх застосування, при недостатньому рівні якої розробка таких перспективних систем керування двигунами може стати недоцільною.

Вирішення цих проблем обумовлює особливі підходи до експлуатації КСК ДВЗ.

Зупинимося на шляхах вирішення означених проблем, що мають загальний характер для будь-якої КСК ДВЗ. Конкретні експлуатаційні аспекти використання цих КСК, наприклад, профілактичні огляди (регламенти, послідовність, об'єми), планові ремонти, монтаж на силових установках, захист від агресивних середовищ і вібрацій при роботі на двигунах та ін., вирішуються індивідуально, виходячи з специфіки як ДВЗ, так і його КСК. Рекомендації щодо такого обслуговування детально розроблені кожною фірмою-розробником; вони, повинні використовуватися власниками та ремонтними або обслуговуючими підприємствами.

Крім багатофункціональності й складності КСК ДВЗ, їхня можлива надійність, нестабільність залежать від вельми несприятливих умов роботи електронних пристроїв на силовому агрегаті. Наведемо найбільш важливі з них:

- зміни температури у широких межах (від –40°С до +150°С) часто при високій відносній вологості;
- при роботі на двигуні виникають значні вібраційні навантаження з максимальним прискоренням до 50g у широкому спектрі збурювальних частот;
- можливе виникнення короткочасних (перехідних) імпульсів напруги у декілька сотень вольт;
- напруга живлення при експлуатації значно коливається (наприклад, від 9,5 до 15,5 В при 12-вольтовому акумуляторі;
- при виникненні напруг самоіндукції виникають сильні електромагнітні поля;
- мається серйозна небезпека забруднень;
- не виключається можливість некваліфікованого або безвідповідального обслуговування КСК ДВЗ (наприклад, допускається зміна полярності напруги живлення тощо).

Ведеться розробка даних питань в таких напрямках:

- створення та використання методик оцінок параметричної й фізичної надійності КСК ДВЗ у заданих умовах експлуатації;
- широке використання засобів діагностування й блокувань (аварійного захисту) КСК ДВЗ;
- корегування умов використання й обслуговування КСК ДВЗ за результатами їхніх стендових й експлуатаційних випробувань.

Розглянемо ці напрями підвищення ефективності КСК ДВЗ при тривалій експлуатації в реальних умовах.

7.1. Стабільність та надійність КСК ДВЗ

7.1.1. Стабільність (параметрична надійність) КСК ДВЗ

Параметрична надійність є найважливішою характеристикою якості й конкурентоспроможності комп’ютерних систем керування ДВЗ.

При розробці методики оцінки стабільності роботи КСК виходимо з того, що параметричний відказ по суті означає вихід за поле допустимих значень (із відзначених вище) основного режимного параметра системи керування.

В такому випадку стабільність роботи КСК можна оцінити показником

$$p(t)=\frac{\Pi(t)}{\Gamma_{\text{доп}}} \tag{7.1}$$

де $\Gamma_{\text{доп}}$ – гранично допустиме значення основного режимного параметра КСК, яке обумовлене паспортним полем допуску його зміни; $\Pi(t)$ – реальне значення цього параметра в експлуатації, усереднене для партії двигунів, оснащених КСК ДВЗ; t – напрацювання двигуна при його експлуатації.

Можна цей відносний показник стабільності трактувати як вірогідність $p(t)$ стабільного функціонування КСК до моменту часу t.

При оцінках $p(t)$ врахуємо, що КСК ДВЗ включає ряд електронних і механічних елементів, кожний з яких конкретно впливає на стабільність системи в цілому.

Забезпечення високого рівня стабільності роботи сучасних КСК ДВЗ є актуальною задачею, від вирішення якої залежать і перспективи розширення використання таких систем керування в моторобудуванні.

Практика свідчить, що основними шляхами підвищення стабільності КСК ДВЗ є:

- організація ретельного первинного контролю характеристик елементів КСК за допомогою спеціальних приладів і випробовувань;
- вбудування в КСК каналів самодіагностування й використання його результатів для експрес-оцінок рівня стабільності систем керування й прийняття відповідних профілактичних заходів;
- корегування режимів експлуатації КСК ДВЗ при її модернізації та ін.

Ці питання розглядатимуться нижче.

7.1.2. Надійність (фізична) КСК ДВЗ

Вона також потребує всілякої уваги. При розробці методик оцінок надійності слід обрати відповідні показники, що адекватно відображають діяння на КСК, які знижують рівень надійності цих складних систем.

Як основні показники, приймають імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ під час наробітки t при заданих умовах експлуатації, а також інтенсивність відказів $\lambda(t)$, причому

$$P(t) \approx \frac{N(t)}{N(0)}; \tag{7.2}$$

$$\lambda(t) \approx \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}, \tag{7.3}$$

де $N(t)$ – кількість справних (непошкоджених) КСК на момент часу t; $N(0)$ – те ж на початок експлуатації (об'єм партії КСК); $N(t) - N(t + \Delta t)$ – кількість КСК, які вийшли з ладу у термін часу від t до $t+\Delta t$; Δt – інтервал часу.

При кількісних оцінках цих показників виходять із допущень:

- ❖ відмови КСК носять раптовий характер (катастрофічні відмови);
- ❖ вони підкорені експоненціальному закону розподілення;
- ❖ відмови елементів схеми КСК – незалежні один від одного.

Подібні допущення не є достатньо суворими, тому у результати оцінок показників надійності на їх основі треба вносити корегування, про що мова піде нижче.

При оцінках $P(t)$ виходять з того, що КСК ДВЗ складається з елементів електронно-електричної схеми, а також з механічних елементів (до останніх також приєднані пневмо- та гідравлічні виконуючі пристрої).

Необхідно мати й кількісні оцінки (вхідні дані при розрахунках) для елементів КСК, виходячи у першому наближенні з того, що $\lambda(t) \approx \lambda = \text{const}$ для періоду нормальної експлуатації, коли й інтенсивність відмов двигуна звичайно приймається незалежною від часу. За даними статистичної обробки визначають для нормальних умов експлуатації значення λ_0 кожного елемента КСК ДВЗ (табл.7.1).

Аби отримати значення λ у конкретних умовах експлуатації, які відрізняються від нормальних, слід помножувати значення λ_0 на поправковий коефіцієнт K_λ. Для КСК, встановленої на автомобілі, наприклад, цей коефіцієнт $K_\lambda \approx 25$[1].

Тепер, з урахуванням вище зроблених припущень,

$$P(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{m} K_\lambda \lambda_{0_i} t \right), \tag{7.4}$$

де m – кількість елементів у складі КСК ДВЗ; i – номер елемента.

Таблиця 7.1 – Інтенсивність відмов елементів КСК ДВЗ [1]

Елемент	$\lambda_0 x10^5$, 1/год	$\lambda_{min} x10^5$, 1/год	$\lambda_{max} x10^5$, 1/год
Пружина	0,012	0,001	0,022
Мембрана	0,6	0,01	0,9
Підшипник	0,5	0,02	1,06
Пнемомагістраль	0,04	0,021	1,15
Клапан	0,112	0,1	1,12
Дросельна заслінка	1,45	0,0056	1,75
Електричний провідник	0,019	0,003	0,47
Роз'єднувач одногніздовий	0,2	0,03	0,47
Блок мікромодулів	1,01	0,83	1,18
Термістор	0,6	0,2	1,40
Електромагніт	0,3	0,11	0,50
Індукційний датчик повороту	0,02	0,01	0,04

Як свідчать статистичні дані про безвідмовність окремих елементів автоматичних систем , інтенсивність їх відмов змінюється у визначених межах. Тому доцільно оцінювати інтервал зміни $P(t)$, використовуючи середнє, максимальне й мінімальне значення λ_i елементів (див. табл.7.1):

$$P_{\max}\pi(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{m} K_\lambda \lambda_{0\min_i} t \right), \tag{7.5}$$

$$P_{\min}\pi(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{m} K_\lambda \lambda_{0\max_i} t \right), \tag{7.6}$$

$$P_{\text{сер}}\pi(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^{m} K_\lambda \lambda_{\text{сер}_i} t_0 \right). \tag{7.7}$$

Результати таких оцінок наведені у табл.7.2 й на рис.7.1.

Ці дані свідчать, що надійність найбільш типових сучасних КСК ДВЗ знаходяться на рівні складних механічних систем керування, наприклад, блока багатокамерних карбюраторів [1].

Слід мати на увазі, однак, що останні системи, безперервно ускладнюючись, втрачають свою перевагу по надійності. Крім того, надійність КСК ДВЗ слід розглядати з урахуванням швидкого розвитку (й підвищення структурної надійності) засобів електроніки для керування двигунами.

Таблиця 7.2 – Характеристики систем керування ДВЗ

Системи дозування бензину	$P_{\max}$	$P_{\min}$	$P_{\text{сер}}$
Карбюраторні з однокамерним карбюратором	$\exp\left(-2,04\cdot10^{-4}t\right)$,	$\exp\left(-8,57\cdot10^{-4}t\right)$,	$\exp\left(-4,61\cdot10^{-4}t\right)$,
З механічним регулюванням паливоподачі	$\exp\left(-3,02\cdot10^{-4}t\right)$,	$\exp\left(-14,7\cdot10^{-4}t\right)$,	$\exp\left(-6,17\cdot10^{-4}t\right)$,
З електронним керуванням	$\exp\left(-5,52\cdot10^{-4}t\right)$,	$\exp\left(-27,3\cdot10^{-4}t\right)$,	$\exp\left(-11,1\cdot10^{-4}t\right)$,

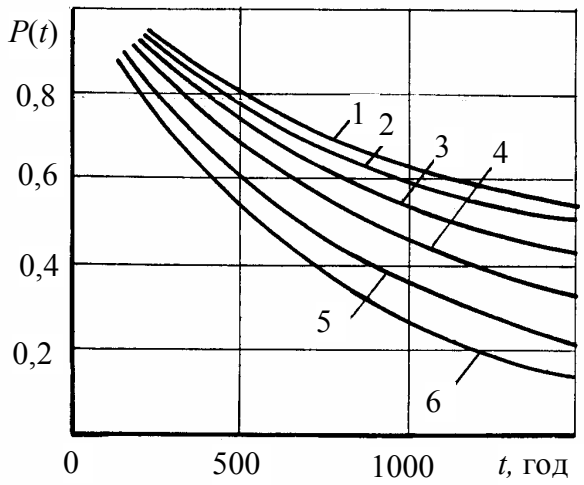


Рисунок 7.1 – Імовірністьь безвідмовної роботи різних систем керування паливоподачею двигуна з іскровим запалюванням:

1 – однокамерний карбюратор;
2 – двокамерний карбюратор;
3 – система вприскування з механічним регулюванням;
4,6 – відповідно, чотирикамерного й двокамерних карбюраторів;
5 – те ж з електронним керуванням

Головні резерви підвищення надійності КСК ДВЗ полягають, по-перше, у підвищенні надійності датчиків й виконавчих механізмів, а по-друге, в поліпшенні надійності контурів автоматики. Обидва резерви лежать у полі зору фірм, що розробляють КСК ДВЗ масового виробництва, тобто питання їх реалізації виходять за площину експлуатаційних факторів, яким присвячено главу 7. Однак треба підкреслити, що провідні фірми розуміють виключну важливість рішення проблеми надійності комп'ютерних систем керування перспективних ДВЗ й підкоряють її вирішенню свою увагу.

В результаті рівень надійності модифікацій КСК ДВЗ фірм Bosch та інших збільшився в декілька разів у порівнянні з даними рис. 7.1. Таке ціл-

ком задовольняє потреби користувачів електронної техніки для керування двигунами.

Тепер зусилля фірм-розробників двигунів з електронним керуванням перенесені на підняття рівня надійності систем перспективних форсованих двигунів, що забезпечуватимуть їх ефективне й стабільне функціонування в будь-яких, в тому числі в екстремальних умовах експлуатації. Ця важлива проблема вивчається окремо, в спеціальній дисципліні "Надійність ДВЗ".

7.2. Основи діагностування КСК ДВЗ

Діагностування, що відомо, розглядається як суттєвий резерв підвищення надійності будь-якого технічного об'єкту.

При діагностуванні з'являється можливість попередження й реалізації можливих відмов КСК ДВЗ, профілактичне корегування їхніх режимних параметрів за сигналами датчиків щодо технічного стану як КСК в цілому, так і її окремих компонентів (КПСК, КБК, каналів й контурів електронного керування) або елементів (датчиків, електромагнітних форсунок та інших виконавчих пристроїв тощо).

З урахуванням сказаного на діагностування покладаються такі функції:

а) пошук елементів, які відмовили, без чого неможливе відновлення їхньої працездатності;

б) профілактичне обстеження КСК ДВЗ, що має велике значення, оскільки сприяє зменшенню вірогідності відмов системи в експлуатації;

в) визначення крайніх, взаємовиключних станів (працездатне й непрацездатне) невідновлюваних елементів КСК ДВЗ.

Діагностування розподіляється на автономне та вмонтоване, причому перше ще ділять на портативне й стаціонарне.

Автономні засоби відповідають трьом задачам оперативної діагностики та являють собою:

- складний прилад із вмонтованим осцилографом, який дозволяє провести повне діагностування й перевірку наладки системи аж до перевірки програми дозування, форми імпульсів та ін.;
- стрілковий прилад або прилад із цифровою індикацією, за якими визначають відмову будь-якого із елементів системи з метою його своєчасної заміни;

- простий прилад із світловою трикольоровою індикацією; якщо в такому приладі засвічується зелена лампочка – система працездатна; жовта – в системі знайдено відмову, але вона зберігає працездатний стан; червона – система непрацездатна.

У свою чергу можуть бути різними і принципи побудови діагностичної апаратури.

Наприклад, вимірювальний комплекс перемикальним пристроєм послідовно з'єднується з окремими елементами системи; виконується послідовний дослід кожного елемента та через перетворювач вся інформація щодо несправностей надходить до вимірювального комплексу. Недолік такого пристрою – складність перемикачів й власне вимірювального комплексу, який повинен мати значний набір ефективних первинних перетворювачів, необхідний для перевірок різноманітних елементів КСК. Позитивним треба вважати те, що визначаються абсолютні величини контрольованих параметрів, наприклад, омічного або індуктивного опорів, напруги тиску; частоти обертання.

Другий принцип діагностичного обстеження базується на порівнянні контрольованого параметра з еталонним його значенням. Звичайно мають справу із занесеними до пам'яті пристрою параметрами.

Може, нарешті, застосовуватися метод послідовних дослідів окремих елементів КСК ДВЗ. Діагностичний прилад являє собою блок порівняння, звичайно із стрілковою індикацією (нульгальванометр, наприклад, з відповідними схемами перетворення контрольованого параметра в напругу). Шкала приладу градуюється на три сектори: "Норма", "Граничне допустиме відхилення", "Відмова". При гранично допустимому відхиленні контрольований елемент при першій можливості повинен бути зміненим. Після відмови заміна повинна виконуватися негайно, бо подальша експлуатація КСК ДВЗ – неможлива.

Для всебічного обстеження КСК ДВЗ, наприклад, КПСК паливоподачею, розроблені й використовуються стандартні контрольно-вимірювальні комплекси.

У разі відмови КСК ДВЗ перевірку її елементів можна проводити й при непрацюючому двигуні; в таких випадках стартові імпульси з потрібною частотою повинні подаватися спеціальним генератором, що мається в приладі.

Останні роки характеризуються переходом на комплексне вмонтоване діагностування з накопичувачем даних й можливістю його поєднання з стаціонарними діагностичними комплексами.

Вбудовані засоби діагностування дозволяють реалізувати безперервне спостереження за технічним станом не тільки КСК, а й всієї силової установки, наприклад, автомобіля. Діагностичний комплекс охоплює не тільки силовий агрегат, прилади, що до нього входять, та окремі елементи автоматики, але й трансмісію, підвіску, рульове керування та гальмівну систему.

Серйозною проблемою є безперервно зростаюча кількість роз'єднувачів, які самі стають джерелом потенційних відмов. Її розв'язання – у використанні мультиплексних схем передачі інформації. Такі схеми дозволяють різко скоротити кількість та протяжність провідних сполучень й кількість роз'єднувачів. При зростаючій кількості датчиків, мікропроцесорів, мікро-ЕОМ й виконавчих пристроїв це найбільш доречне вирішення проблеми бортової комунікації.

Переходимо до розгляду шляхів реалізації викладених принципів діагностування КСК ДВЗ.

7.3. Ідентифікація та усунення експлуатаційних несправностей в електронних системах керування ДВЗ

Сучасні КСК ДВЗ можуть ідентифікувати й запам'ятовувати неполадки, що виникають в них при експлуатації. Це в подальшому значно полегшує технічне обслуговування та, головне, дозволяє запобігати відмовам, гарантувати стабільну роботу з високими паспортними показниками.

Нелади зберігаються у модулі електронного контролю силової установки або самої КСК ДВЗ у формі так званих кодів несправностей (Fault Codes – FC).

Однак для того щоб прочитати такі коди, користувачеві необхідно мати спеціальне оснащення – зчитувач кодів несправностей (Fault Code Reader – FCR). Зчитувач подає команду БСІ силової установки або КСК ДВЗ вивести коди, що зберігаються, та/або подати їх користувачеві на екрані. Така процедура зветься тестуванням КСК.

Можливі різні ступені визначення й діагностування неладів КСК. Звичайно БСІ ідентифікує нелади, які мають місце під час тестування. Він

також володіє пам’яттю, у якій ведеться запис неладів, що трапилися у недалекому минулому, і вони також можуть зчитуватися за допомогою FCR. В ряді силових установок всі коди зчитуються одночасно без різниці поміж тими, що відбулися раніше, й поточними неладами. В більшості випадків тестування може проводитися з виключеним двигуном (але включеним запалюванням) чи з включеним двигуном.

Визначивши коди неладів та усунувши останні, користувач, можливо, побажає витерти їх з пам’яті БСІ. Це здійснюють за допомогою зчитувача FCR; в інших силових установках – роз’єднуванням негативної клеми акумулятора (при включеному двигуні).

7.3.1. Самодіагностика (бортова діагностика) КСК ДВЗ

В ідентифікації та усуненні експлуатаційних несправностей в електронних системах керування ДВЗ важливу роль відіграє самодіагностування КСК двигунами [4].

Та домінуюча роль, яку відіграють електронні системи в автомобілях й інших силових установках, вимушує приділяти підвищену увагу проблемам їхнього обслуговування. Крім того, враховують, що основні функції сучасної силової установки стають все більше залежними від електронних засобів керування; тому останні й повинні задовольняти вельми жорсткі вимоги щодо їхньої надійності.

Вирішення цих проблем знаходиться у включенні функцій самодіагностування у саму електронну систему керування. Реалізація цих функцій основана на можливостях таких систем, які вже використовуються на силовій установці для безперервного контролю й визначення неладів з метою зберігання цієї інформації та саме діагностики.

Наприклад, БСІ виконує самоперевірку свого функціонування таким чином: чипи пам’яті, що програмуються, оснащені тестовими комбінаціями, які можуть відновлюватися та використовуватися з метою порівнянь. Для запам’ятовуючих пристроїв використовуються порівняння з підсумковими даними випробувань для гарантії того, що всі дані й програми зберігаються в цих пристроях правильно.

Датчики випробуються на точність отримуваних з них даних, також перевіряються розімкнені та замкнені ланцюги. Кінцеві елементи керування (виконавчі пристрої, наприклад) можуть випробуватися підчас їхньої

роботи з використанням граничних значень струму.

Можливості самодіагностики включають:

- ідентифікацію КСК ДВЗ;
- розпізнання, зберігання й зчитування інформації про статичні та одиничні порушення роботи;
- зчитування поточних реальних даних, що включають умови навколишнього середовища й специфікації;
- моделювання функцій системи;
- програмування параметрів системи.

Окремі програми для блока випробувань зберігаються у модулях, що підключаються тоді як корегування й передача даних в системі здійснюються за допомогою інтерфейсу даних.

На рис. 7.2 показана логіка самодіагностування сучасної КСК ДВЗ.

Розглянемо функціональні особливості самодіагностики КСК ДВЗ [3].

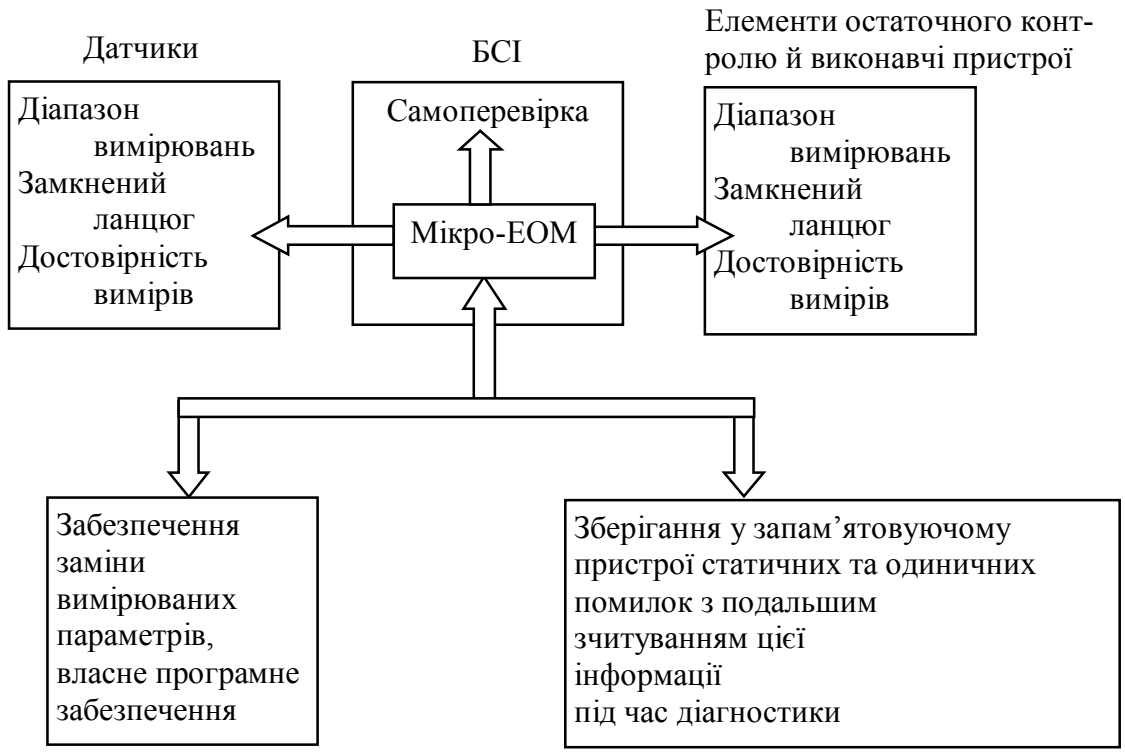


Рисунок 7.2 – Самодіагностика електронних систем

Принцип роботи. Самодігностика або бортова діагностика, порівнює сигнали, що надходять по електроколам електронного модуля керування (БСІ), з набором контрольних значень тих же параметрів, що зберігаються у пам'яті центрального мікропроцесора (ЦП). Якщо сигнал не вміщується у діапазон допустимих значень даного показника, до пам'яті ЦП вноситься інформація про виникнення внутрішнього збою (відмови). Відомості щодо подібних неладів, як сказано вище, подані головним чином у виді кодів, які звуться *кодами несправностей*. Зчитані з БСІ коди є неоціненною допомогою при діагностуванні.

Стандартизація бортової діагностики. Існують три головних критерії самодіагностування щодо уніфікації її на автомобілях. По-перше, електронною самодіагностикою повинні бути обладнані всі автомобілі. По-друге, виникнення всіх несправностей, збоїв, які ведуть до збільшення токсичних викидів з ВГ двигуна, мають показуватися контрольною лампою самодіагностики на панелі приладів. По-третє, несправність повинна бути занесена до пам'яті БСІ (ЦП), звідки її можна б було відтворити за допомогою зчитувача кодів несправностей (FCR) або за рахунок сигнального мигання відповідної контрольної лампи.

З 1998 по 1991 рік Міжнародна організація з стандартизації затвердила для бензинових ДВЗ документ ОВД-І, що стандартизує:

- форму діагностичного роз'єднувача (з цим пов'язані можливі нелади схеми самодіагностування);
- діагностичне обладнання й діапазони його можливостей;
- вміст діагностичних протоколів;
- характер даних, що підлягають замінам.

Цей стандарт був орієнтований на умови США. Однак сьогодні ці вимоги як єдині визначені європейськими урядами, як і урядами всіх інших країн п'яти континентів за узгодженням з фірмами-замовниками.

Додаткові вимоги були обумовлені й другим стандартом ОВД-ІІ, що застосовується до моделей, випущених з 1994 року. Для дизелів також затверджений подібний стандарт, що застосовується виробниками з 1996 року. Такий стандарт стосується:

- додаткової функції висвітлення контрольної лампи засобів самодіагностики;

◈ відслідження процесів й роботи компонентів не тільки для виявлення дефектів та збоїв, але й для забезпечення якості вихлопу;

◈ доповнення до зберігання інформації щодо несправностей у вигляді цифрових кодів, для чого повинні запитуватися й експлуатаційні режими. ОВД-II наполягає на безперервному моніторингу параметрів:

- згоряння;
- каталітичного конвертора;
- датчика кисню;
- вторинної подачі палива до нейтралізатора;
- системи відтягування парів палива;
- системи повторного допалювання відпрацьованих газів.

Інші функції діагностування. Крім зчитування та вилучення кодів, з допомогою самодіагностування можуть виконуватися додаткові функції:

- перевірки несправностей виконавчих механізмів;
- регулювання у процесі обслуговування;
- кодування електронного модуля керування;
- отримання поточних даних;
- функція “чорного ящика”.

Зчитуючий пристрій кодів FCR можна використовувати для перевірки справності електропроводки й компонентів деяких виконавчих механізмів. Наприклад, можна подати напругу до ланцюга клапана регулювання частоти обертів холостого ходу: якщо клапан прийде до руху, значить, даний ланцюг не пошкоджений. Можна перевірити ланцюги паливних форсунок, реле, клапана регулювання $n_{x.x}$, приводи компонентів випускної системи двигуна та ін. Мається можливість перевірки деяких датчиків. Звичайним тестом є перевірка сигналу, який подається датчиком положення дроселя під час того, як дросельна заслінка пересувається із закритого положення у повністю відкрите й назад.

У найновіших двигунах неможливе ніяке регулювання суміші для режимів холостого ходу або кута випередження запалювання. Однак більш ранні моделі мають можливість, коли це необхідно, виконати деякі зміни означених параметрів, для чого використовують пристрій FCR (автомобілі Ford, Rover та ін.).

Кодування БСІ на конкретні режими роботи дозволяє адаптувати його до даного автомобіля. Це пов’язане з тим, що існує практика розширен-

ня діапазону моделей БСІ, на які можна встановлювати даний блок керування для зменшення загальної кількості різновидів вироблюваних модулів.

Мова йде про те, що можна виконати динамічні випробування й зареєструвати сигнали, що видаються будь-яким датчиком. Поточні дані вивчають на екранах FCR персонального комп'ютера. Можна графічно відобразити динаміку кожного сигналу й зберегти їх у пам'яті мікро-ЕОМ або ПЕОМ. Тому вивчення поточних даних можна виконати у будь-який зручний час.

Деякі пристрої зчитування кодів несправностей або самої апаратури самодіагностики здатні працювати в режимі "чорного ящика". Коли це можливо, необхідно приєднати пристрій зчитування кодів FCR до діагностичного роз'єднувача БСІ й здійснити випробувальну їзду, активізувавши перед початком шляхового тесту функцію зйомки. Дані випробування будуть реєструватися. Далі дані "чорного ящика" можуть оцінюватися для вирішення проблем, що виникають.

Адаптивна функція самодіагностування. У багатьох сучасних КСК ДВЗ блок БСІ адаптивний до змін експлуатаційних показників роботи двигуна. В таких КСК параметри роботи різних вузлів двигуна постійно вимірюються, а отримані дані заносяться до пам'яті ЦП. З'являється можливість обчислювати середні значення параметрів за досить тривалий період такого моніторингу. Приймаючи отримані адаптивні середні значення як поправки до основної програми керування ДВЗ, БСІ здатний швидше пристосовуватися до майже будь-яких змін режимів експлуатації двигуна.

Адаптація та корегування різних схем керування ДВЗ звичайно виконується під час роботи двигуна (напівнавантажені режими або холості ходи) за такими параметрами й функціями:

- ✓ частота обертання колінчастого вала на холостому ході;
- ✓ регулювання паливної суміші;
- ✓ керування детонацією;
- ✓ робота електромагнітного клапана вугільного фільтра;
- ✓ повторне спалювання відпрацьованих газів.

КСК, що мають адаптивну здатність, втрачають всі дані із адаптивної пам'яті при роз'єднанні акумулятора. Коли акумулятор знов підключено й запущено двигун, система знов виконує всі корегувальні діяння. Не на всі

КСК впливає роз'єднання акумулятора. КСК ДВЗ типу Rover MEMS – приклад системи керування, яка використовує енергозалежну пам'ять, щоб зберігати адаптивні значення параметрів й після відключення акумулятора.

7.3.2. Діагностичне обладнання для перевірки несправностей КСК ДВЗ

Ефективність виявлення несправностей й вибір методу діагностики у значній мірі залежить від обладнання для тестування КСК ДВЗ.

Пристрій зчитування кодів несправностей (FCR). Цей пристрій може використовуватися не тільки власне для отримання кодів несправностей та усунення їх із пам'яті ЦП БСІ. FCR може застосовуватися й для відображення поточних даних щодо стану датчиків й виконавчих механізмів, подачі напруги на окремі приводи КСК, перекодування БСІ, коректировки моменту випередження запалювання та/або складу суміші холостого ходу, крім того, він може здійснювати функцію "чорного ящика".

FCR бувають різних класів. Найнижчого класу базовий FCR може здійснювати трохи більше, ніж просто інтерфейс з діагностичним роз'єднувачем, й зчитувати коди у вигляді сигнального мигання. До приладу повинен додаватися набір проводів, з'єднувачів разом з інструкціями щодо того, як що з'єднувати, аби відтворити коди. У цих інструкціях повинні бути наведені таблиці світових кодів для дешифрування закодованої інформації. Базовий FCR не може задіяти складні функції типу регулювання або перевірки справності виконавчого механізму.

FCR другого класу значно складніший й здатний виконувати всі функції базового FCR і також цілий ряд інших, в тому числі найскладніших сучасних функцій.

Аналізатор відпрацьованих газів. Газовий аналізатор є визнаним діагностичним пристроєм. Він може вимірювати кількість чотирьох компонентів ВГ: O_2, CO, CO_2, C_nH_m. За співвідношенням цих газів у вихлопі можуть бути діагностовані несправності в підсистемі запалювання, паливоподачі тощо.

Набір для перевірки тиску палива. Тиск палива життєво важливий для нормальної роботи двигуна з вприскуванням бензину, тому для виконання діагностики необхідний відповідний тестувальний манометр, з вимірювальною шкалою до 7,0 бар.

Манометр звичайно оснащується комплектом перехідників, що дозволяють з'єднати його з різними типами паливної апаратури. За тиском палива судять про якість КПСК паливоподачею.

До діагностичного обладнання відносяться також:

- тестер із світодіодом;
- мультиметр;
- осцилограф;
- потенціометр, тощо.

7.3.3.Тестування надійності та ефективності КСК ДВЗ

Тестування є найважливішим інструментом виявлення можливостей відмов (збоїв) при роботі основних елементів КСК ДВЗ після отримання й декодування інформації, що надійшла від зчитувача кодів несправностей.

Процедури тестування охоплюють саме основні елементи КСК. Вони розподіляються таким чином:

- загальні процедури тестування;
- тестування датчика пускового сигналу;
- тестування датчиків;
- тестування виконавчих механізмів;
- процедури тестування БСІ та паливної системи та ін.

Всього таких укрупнених процедур – більше 40.

Назвемо основні з них.

Загальні процедури тестування. Такі процедури, по-перше, передбачають початковий огляд КСК ДВЗ. Це важливий етап, оскільки ще до початку даігностування з'являються можливості виявлення несправностей у роботі КСК при значній економії часу.

Треба передбачити такі операції початкового огляду:

- перевірка рівня моторного масла;
- перевірка стану сапуна картера;
- перевірка стану системи охолодження й рівня охолоджуючої рідини;
- перевірка стану акумулятора та рівня електроліту в ньому;
- огляд проводів і клем акумулятора;
- перевірка функціонування схеми акумулятора;

- зняття свічок запалювання й перевірка їх стану;
- перевірка міжелектродного зазору свічок запалювання;
- перевірка проводів високої напруги;
- перевірка герметичності газоповітряних трактів;
- перевірка стану повітряного фільтра;
- перевірка корпуса дроселя тощо.

Після цього проводять декілька загальних тестів, в тому числі перевірки:

- напруги як акумулятора, так і у колах КСК ДВЗ (SB);
- опору у колах, які починаються й закінчуються в БСІ;
- робочого циклу двигуна;
- потенціометра (діапазон функціонування: 1 – 100 000 Ом).

Процедура перевірки справності компонентів КСК ДВЗ. Ці процедури є головними тестами перевірки КСК. Коротко розглянемо принципові тести. Конструкції датчиків, виконавчих пристроїв, інших елементів КСК розглянуто вище, у гл. 3, 4.

1) *Тестування датчика пускового сигналу*. Датчик пускового сигналу– найбільш важливий датчик у КСК ДВЗ. Поки БСІ не отримає сигнал від цього датчика, реле паливного насоса, а також підсистема запалювання й вприскування задіяні не будуть. У цьому розділі описано процедури перевірки основних типів датчиків пускового сигналу.

За пусковий імпульсатор найчастіше використовується звичайний індуктивний датчик кута обертання колінвала двигуна. Його тестування виконується у два етапи. Спочатку вимірюється опір датчика (звичайно він існує в діапазоні 200 – 1500 Ом). Але відповідність опору цього датчика паспортній специфікації ще не свідчить про його справність. Тому перевіряють й сигнал, що генерується датчиком кута повороту колінвала. Максимальна подвійна напруга змінного струму в колі датчика повинна складати 4,0 – 5,0 В. При цьому треба переконатися, що сигнальні імпульси датчика мають однакову пікову напругу. Один або декілька піків, напруга яких набагато менша, ніж інших, вказують на відсутність або пошкодження контактного випуску цього датчика. Перевірка сигналу датчика, природно, виконується після запуску двигуна в режим холостого ходу.

Як пусковий імпульсатор застосовують й датчик Холла, який встановлюють на маховику або на розподільнику. Перевірку його справності виконують після запуску двигуна в режим холостого ходу. В результаті приєднання вимірювача до вивідної клеми датчика Холла повинна бути отримана середня напруга 7–8 В. Далі двигун зупиняється, включається запалювання й вольтметр приєднується до вивідної клеми датчика. При повільному обертанні колінвала, у момент, коли проріз феромагнітного екрана ротора датчика проходить зазор поміж імпульсостворюючими компонентами датчика, повинен з'являтися сплеск напруги від 0 до 10 12 В й назад до 0 В, що свідчить про справність датчика Холла.

Фірма Nissan та інші виробники із країн Азії, як правило, використовують оптичний розподільник як пусковий імпульсатор. Рекомендується для вимірювання сигналу оптичного датчика кута обертання колінвалу як діагностичного приладу використовувати осцилограф. Однак й цифровий мультиметр, здатний вимірювати напругу, частоту й швидкість обертання, робочий цикл, також годиться для означеної мети.

2) *Тестування первинної обмотки котушки запалювання*. Хоча описані нижче тести виконуються звичайно за допомогою вимірювача тривалості замкнутого стану контактів, все ж осцилограф – більш придатний прилад для аналізу сигналів, що генеруються первинною обмоткою котушки запалювання. Означений тест проводять як на непрацюючому двигуні, так і під час його роботи.

При непрацюючому ДВЗ треба з'єднати вимірювач з заземленням на двигуні. Далі він провертається стартером. Величина робочого циклу повинна бути приблизно 5–20 %, що свідчить про нормальну роботу котушки запалювання. Якщо результати вимірювання не відповідають паспортним або зовсім відсутній первинний сигнал котушки, треба перевірити електропроводку, контакти БСІ, напругу акумулятора. Можливо вийшла з ладу котушка запалювання, а то й самий БСІ. Перш ніж замінити БСІ, треба спочатку встановити замість старої справну котушку запалювання та повторити тест.

3) *Тестування інших датчиків КСК ДВЗ*.

Витратомір повітря (AFS). Такі датчики бувають лопатними, термоанероідними тощо.

При тестуванні лопатних витратомірів треба (при знятому повітроводі) спочатку пересвідчитись при відкритті (закритті) заслінки-лопасті, що вона пересувається плавно, без заклинювання. Далі треба включити запалювання, не запускаючи двигуна; напруга у колі витратоміра повинна складати приблизно 0,2–0,3 В. Якщо відкривати й закривати заслінку декілька разів, напруга плавно зростає до 4,0–4,5 В (максимум). Потім встановлюють знову повітропровід, запускають двигун й дають йому попрацювати на холостому ході; напруга повинна складати приблизно 0,5–1,5 В. Після цього відкривають дросель так, аби довести n до 3000 хв$^{-1}$. Вольтметр повинен показати 2–2,5 В. При відкритті дроселя до упору напруга повинна складати більше 3,0 В. Такі результати тесту свідчать про справність AFS. Тестування може дати й негативні результати. Якщо з'явиться неусталений сигнал (змінюється ступінчасто, не змінюється зовсім або знижується до нуля), треба перевірити рух контактної лопасті чи можливість її заклинювання при повороті. В такому разі єдиним засобом ліквідації несправності є заміна AFS новим або відремонтованим екземпляром. Ковзний контакт (важіль) можна відрихтувати або зачистити від бруду. Треба, нарешті, перевірити й налагодити заземлення, кола живлення AFS, БСІ.

Тестування AFS-термоанероїда має свої особливості. Спочатку здійснюється ознайомлювальне тестування. Включають запалювання, напруга повинна дорівнювати приблизно 1,4 В. Потім запускають двигун й дають йому працювати на холостому ході; напруга складатиме біля 2,0 В. Далі відкривають дросель декілька разів до упору; напруга не повинна збільшуватися суттєво у порівнянні з величиною, отриманою на холостому ході. Важливо відтестувати AFS у режимі повного навантаження двигуна. Такий режим моделюється без шляхових випробувань; відключають повітропровід, включають запалювання й за допомогою пластмасової трубки подають на нагріту нитку металу анероїду потік повітря. Повинна бути можливою побудова графіка напруги, який буде набагато більш крутим, ніж той, що відповідає тестуванню з працюючим двигуном. За результатами такого тестування (модельного) може бути виявленим неусталений сигнал або його відсутність. Якщо опір AFS нормальний (2,5–3,1 Ом), живильні й заземлюючі кола – в нормальному стані, AFS, скоріш всього, є несправним й потребується його заміна новим або відремонтованим екземпляром. Треба,

нарешті, перевіряти справність і самого БСІ (тестування електронного модулю описується нижче).

Датчик температури повітря (ATS) з негативним температурним коефіцієнтом. Більшість КСК ДВЗ використовують ATS такого типу. Це – терморезистор, опір якого зменшується при підвищенні температури, на відміну від ATS з позитивним температурним коефіцієнтом. Обидва типи ATS є двоконтактними датчиками й процедури їхніх тестувань аналогічні. При включеному запалюванні треба підключити вольтметр до вивідної клеми ATS (двигун не запускається). Напруга повинна складати приблизно 2–3 В залежно від температури повітря (табл. 7.2). Остання моделюється підігрівом або охолодженням. На другому етапі тестування запускають двигун. По мірі його прогріву напруга в колі з ATS повинна зменшитися відповідно до табл. 7.2. При тестуванні може бути відсутня напруга на виході ATS або складатиме 5,0 ± 0,1 В (буває при незамкненому колі). Треба в обох випадках перевірити цільність проводки між БСІ та ATS, всі контакти БСІ. Якщо контакти в нормі, БСІ, можливо, несправний. Нарешті, треба перевірити на наявність короткого замикання (напруга складає нуль).

Таблиця 7.2 – Напруга сигналу ATS з негативним температурним коефіцієнтом

Температура, °С	Опір, Ом	Напруга, В
0	4800 – 6600	4,0 – 4,5
10	4000	3,75 – 4,0
20	2200 – 2800	3,00 – 3,50
30	1300	3,25
40	1000 – 1200	2,50 – 3,00
50	1000	2,50
60	800	2,00 – 2,50
80	270 – 380	1,00 – 1,30

Датчики ATS з позитивним температурним коефіцієнтом використовуються зовсім мало (головним чином фірмою Renault). Тестування таке ж, як датчиків з негативним температурним коефіцієнтом, але таблиця контрольних величин – інша (табл. 7.3).

Таблиця 7.3 – Напруга сигналу ATS з позитивним температурним коефіцієнтом

Температура, °С	Опір, Ом	Напруга, В
0	254 – 266	0,15
20	283 – 297	0,5 – 1,5
40	315 – 329	1,5

Датчик температури охолоджувальної рідини з негативним температурним коефіцієнтом. Такі датчики використовуються майже усіма фірмами – розробниками, крім Renault. Тестування цього датчика аналогічне попередньому датчику температури повітря. Цілком збігаються й таблиці напруг сигналів датчиків обох призначень.

Датчик рециркуляції ВГ. Тестування починається з прогріву двигуна до робочої температури (запуск двигуна й робота на холостому ході). Напруга сигналу датчика повинна на холостому ході складати 1,2 В. Далі треба змоделювати відкриття клапана рециркуляції (EGR). Для цього відключають багатоконтактний з'єднувач від керувального електромагнітного блока EGR; поєднують акумулятор з клемою клапана EGR та поєднують клему клапана з заземленням двигуна. Блок EGR повинен активізувати клапан, а напруга сигналу датчика повинна зрости до 4,0 В й більше. Якщо це не так, сам клапан або блок EGR несправні. Несправність датчика виявляється у тому, що сигнал його стає неусталеним, коли напруга на виході датчика змінюється ступінчасто, не змінюється взагалі або падає до нуля. Можливе й коротке замкнення проводу, пов'язаного з позитивною клемою акумулятора.

Датчик температури палива з негативним температурним коефіцієнтом. Загальний метод тестування опору та напруги в колі датчика аналогічний процедурам тестування вище наведених датчиків $t_{\text{повітря}}$ й $t_{\text{ох}}$.

Датчик детонації. При його тестуванні імітують вібрацію блока циліндрів у зоні циліндра № 1. Інструмент тестування – індуктивний стробоскоп, який потрібно підключити до проводу високої напруги котушки запалювання першого циліндра. Далі підключають вольтметр змінного струму або осцилограф до клем датчика детонації. Двигун запускається в режим холостого ходу. Потрібно м'яко пристукнути по блоку двигуна в зоні першого циліндра. Момент запалювання повинен помірно затриматися; вольтметр або осцилограф повинні показати напругу (приблизно 1,0 В).

Датчик абсолютного тиску у впускному колекторі (MAP). Тестування цього датчика має не меті перевірити протікання діафрагми MAP. Для цього за допомогою вакуумного насоса (треба змінити їм вакуумметр) створюється біля MAP розрідження приблизно 560 мм рт. ст. Після закінчення підкачування діафрагма повинна тримати цей тиск не менш 30 секунд. Вольтметр, підключений до клем датчика, повинен реєструвати напругу на виході датчика згідно з табл. 7.4. При тестуванні тиску турбіни при $p_т$ = 0,9 бар повинна бути напруга 4,75 В.

Таблиця 7.4 – Зміни напруги вихідного сигналу MAP

Вакуум, мбар	Напруга, В	Абсолютний тиск, бар
0	4,3 – 4,9	1,0 ± 0,1
200	3,2	0,8
400	2,2	0,6
500	1,2 – 2,0	0,5
600	1,0	0,4

Умови	Напруга, В	Тиск, бар	Вакуум, бар
Дросель повністю відкритий	4,35	1,0 ± 0,1	0
Запалювання включено	4,35	1,0 ± 0,1	0
Холостий хід	1,5	0,28 – 0,55	0,72 – 0,45
Уповільнення	1,0	0,20 – 0,2	0,80 – 0,75

Двигун з турбонаддувом

Умови	Напруга, В	Тиск, бар	Вакуум, бар
Дросель повністю відкритий	2,2	1,0 ± 0,1	0
Запалювання включено	2,2	1,0 ± 0,1	0
Холостий хід	0,2 – 0,6	0,28 – 0,55	0,72 – 0,45

Неусталений сигнал має місце тоді, коли напруга на виході датчика змінюється ступінчасто, не змінюється взагалі або знижується до нуля. Все це звичайно вказує на несправність MAP. В цьому випадку єдиним засобом є заміна датчика. Перевірку електропроводки, клем, короткого замикання проводять так, як і для попередніх датчиків. Якщо всі ці елементи схеми датчика перебувають у нормі, вважається несправним БСІ.

Датчик абсолютного тиску (MAP) повітря цифрового типу у впускному колекторі. Для цифрового тестування цього датчика треба спочатку переключити мультиметр на функцію вольтметра, включити запалювання. Якщо вольтметр підключити до клем MAP, повинні отримати середню на-

пругу біля 2,5 В. Упродовж наступних тестів вакуум повинен залишатися усталеним при всіх значеннях тиску:

- ◑ 200 мбар – 525 ± 120 хв$^{-1}$;
- ◑ 400 мбар – 1008 ± 120 хв$^{-1}$;
- ◑ 600 мбар – 1460 ± 120 хв$^{-1}$;
- ◑ 800 мбар – 1880 ± 120 хв$^{-1}$.

Якщо скинути тиск, *n* повинні повернутися до 4500 – 4900 хв$^{-1}$. Треба замінити МАР, якщо *n* змінювалися не так, як вище наведено. Якщо сигнал датчика зовсім відсутній, треба перевірити:

- подачу напруги живлення (5,0 В);
- напругу заземлення;
- цілісність проводки, що виводить сигнал поміж МАР та БСІ;
- контакти БСІ (якщо вони справні, то несправним є БСІ).

Датчик температури мастила з негативним температурним коефіцієнтом. Такий датчик являється терморезистором, опір якого зменшується при підвищенні температури. Загальний метод перевірки несправностей, а також вимірювання опору й напруги подібні описаним вище для датчика $t_{ох}$.

Датчик положення дроселя (потенціометр дроселя). При тестуванні цього датчика при включенні запалювання (двигун не працює) напруга сигналу його повинна плавно збільшитися до максимуму 4,0–4,5 В. Подальші засоби адекватні датчику AFS (витратоміра повітря).

4) *Тестування виконавчих механізмів*

Паливна форсунка розподіленого вприскування бензину (MPI). Спочатку треба здійснити огляд на наявність ознаки корозії на контактах. Це – звичайна причина поганої роботи форсунок. Потім перевіряють (тестують) на непрацюючому двигуні, при прокручуванні двигуна стартером, величину робочого циклу форсунок, яка повинна скласти приблизно 10 %. Далі тестування проводять на працюючому двигуні: спочатку двигун повинен працювати на різних обертах колінвал; при цьому робочий цикл в % повинен зростати у 3 – 5 разів від х.х. до номіналу при збільшенні *n*. Якщо робочий цикл виявився дуже довгим або коротким, треба перевірити справність датчика $t_{ох}$, повітроміра та $p_{впуск}$. Нарешті, перевіряють опір форсунок між двома її клемами. Враховуючи, що опір однієї форсунки звичайно дорівнює 160 Ом, величина цього показника при різних конфігураціях ла-

нцюга форсунок складає відповідно з табл. 7.5. Несправні форсунки треба замінити.

Таблиця 7.5 – Перевірка параметричної надійності форсунок

Чотири форсунки у групі		Три форсунки у групі		Дві форсунки у групі	
Опір, Ом	Справність форсунок	Опір, Ом	Справність форсунок	Опір, Ом	Справність форсунок
4-5	Всі форсунки справні	5-6	Всі форсунки справні	8-9	Всі форсунки справні
5-6	Пошкоджена 1	8-9	Пошкоджена 1	16-17	Пошкоджена 1
8-9	Несправні 2	16-17	Несправні 2		
16-17	Несправні 3				

Форсунка підсистеми центрального вприскування бензину (SPI). При цьому тестуванні рекомендують використовувати осцилограф. Спочатку тестування виконується на непрацюючому двигуні (двигун прокручується стартером). Вимірювач повинен показати наявність деякого робочого циклу форсунки. Якщо імпульс у ланцюзі форсунки слабкий або зовсім відсутній, треба перевірити перш за все тиск і подачу палива. Перевіряють також роботу датчика *n* та напругу на клемі з'єднувача форсунки (повинна дорівнювати напрузі акумулятора). Якщо напруга відсутня, треба перевірити електропроводку поміж форсункою та БСІ, а також подачу напруги до форсунки. Тестування на працюючому двигуні має процедури, аналогічні описаним вище для розподіленого вприскування палива.

Крім висвітлених тестів можуть проводитися й спеціальні тести перевірки БСІ для виявлення живлення цього блока, різних реле БСІ, паливного насоса й датчика кисню тощо. Тестуються також самі датчик кисню, паливний насос; перевіряються, нарешті, збої у регулюванні складу суміші або адаптивні несправності, пов'язані з цим регулюванням.

7.3.4. Приклад діагностики КПСК вприскуванням та запалюванням

Викликає значний інтерес приклад тестового обслуговування однієї з найкращих сучасних електронних підсистем керування паливоподачею й запалюванням швидкохідного бензинового двигуна легкового автомобіля фірми Peugeot – 405 (Motronic MP 5.1 фірми Bosch) [2].

Підготовка. Дякуючи відносній простоті пристрою підсистеми запалювання з комп'ютерним керуванням, підготовчі операції зводяться тільки

до перевірки справності електричної проводки; перевіряється стан проводів, свічок, які можуть бути перетерті або мати порізки; це маловірогідно, оскільки всі проводи вкладено у кабелепровід.

Наголошується, що, проводячи перевірку системи запалювання, треба дотримуватися заходів безпеки. Треба пам'ятати, що при запущеному двигуні напруга у високовольтній частині КПСК сягає кількох десятків тисяч вольт. Необережність може призвести до травмування або до виходу з ладу електрообладнання.

Треба обов'язково перевірити, чи підходять свічки запалювання за типом й характеристикою, та відрегулювати величину іскрового проміжку. У випадках затруднень треба користуватися інструкцією по ремонту.

Стосовно підсистеми повітропостачання, рекомендується зняти регулятор холостого ходу, промити його речовиною для прочищення карбюраторів й змастити. Потрібно перевірити датчик положення дросельної заслінки й переконатися в тому, що диск потенціометра (ковзні контакти) чистий, а також перевірити обмежувач ходу (повороту) дроселя. Можливо, його положення було порушене, в результаті чого вихідна напруга датчика положення дроселя вийшла за межі норми.

Треба перевірити, чи не проникає повітря у вакуумний шланг, що з'єднує впускний колектор з датчиком тиску, встановленим у перехідній частині моторного відсіку. Шланг не повинен мати петель, перегинів, порізів й повинен бути щільно приєднаний. Якщо у місці приєднання шланга маються пошкодження, його довжина дозволяє вилучити пошкоджену частку й щільно насадити шланг наново. Одночасно треба переконатися у тому, що усередині шланга немає залишків мастила або бензину, оскільки їх наявність сповільнює реакцію датчика, що впливає на його вихідний сигнал.

Пошук й усунення несправностей. КПСК паливозапалюванням Motronic MP 5.1 дуже надійна. Серйозні несправності виникають рідко, однак пошкодження все ж можливі. Однією з таких неполадок можуть бути знижені оберти колінвала двигуна на холостому ході, які супроводжуються пульсацією контрольної лампи на панелі самодіагностики й висвітлення коду 21 (вказує на несправність потенціометра, який звичайно рекомендується замінити).

Однак перед тим як купувати дорогу запасну частину, якою є найчутливіший потенціометр, слід уточнити діагноз. Потенціометр є пристроєм, напруга якого знаходиться у прямій залежності від кута відкриття дросельної заслінки й змінюється від 0,5 до 4,5 В. При пересуванні дросельної заслінки напруга повинна зростати плавно. Важливо також пересвідчитись, що вихідна напруга перебуває у потрібних межах. Потенціометр перевіряють при включеному запалюванні за допомогою дуже чутливого вольтметра, оскільки досить найменшого відхилення вихідної напруги потенціометра від норми, аби виникли порушення у роботі системи вприскування бензину. Тому звичайні тестери у даному випадку не годяться. Краще всього використовувати для цього осцилограф, тому що він впевнено сприймає будь-які електричні сигнали, включаючи наведені. Наведені електричні сигнали можуть імітувати несправності навіть у тому випадку, коли вихідна напруга відповідає потрібному значенню. Шумовий сигнал сприймається БСІ як сигнал потенціометра, що може призвести до порушення роботи регулятора холостого ходу. Побічним ефектом цього може стати збільшення витрати палива. У більшості сучасних КПСК вихідна напруга потенціометра дроселя використовується як сигнал про наступне прискорення автомобіля. Тому ще однією ознакою несправності потенціометра є надлишкова подача бензину.

Задача ускладнюється тим, що в системі використовуються два типи потенціометрів; заміна першого з них пояснюється погіршенням тягової характеристики двигуна. На жаль, потенціометр не можна виправити шляхом очищення чи ремонту: це герметичний нерозбірний пристрій, тому, якщо він дійсно несправний, його можна тільки замінити.

Другою несправністю, що властива підсистемі керування, яка розглядається, є неусталена робота двигуна при холостому пуску, іноді з зворотними хлопками у впускний колектор. Частіш всього це є наслідком збіднення горючої суміші, яке обумовлене помилкою у програмному забезпеченні БСІ. Однак перш ніж купувати новий БСІ, слід перевірити роботу форсунок. Для цього форсунки треба зняти, очистити й переконатися у їхній справності. Якщо спеціальна (згідно з інструкцією) перевірка свідчить, що форсунки справні, слід перевірити програму БСІ. Ремонт БСІ коштує дешевше, ніж купівля нового. Далі слід перевірити відсутність підсо-

су повітря у підсистему вприскування, що може спричинити збіднення горючої суміші.

Звичайно, подібні несправності виявляються при значному сумарному пробігу автомобіля, коли двигун починає “старіти”. Цьому сприяє створення нагару на клапанах й загальний знос двигуна.

Автомобілі оснащені каталітичними нейтралізаторами і мають комплекс обмежень шкідливих викидів із зворотним зв’язком від λ-зонду. Якщо склад відпрацьованих газів не відповідає нормі (паливна суміш дуже збіднена або збагачена), то перш ніж запідозрювати λ-зонд у несправності, треба перевірити вихідну напругу датчика абсолютного тиску. Можливо, причиною несправності є саме останній. Перевірку можна провести, не запускаючи двигун, за допомогою вакуумного насоса. Дуже важливо, аби цей насос був правильно відрегульовано, оскільки його показники повинні бути гранично точними. Вихідну напругу датчика необхідно перевіряти у всьому робочому діапазоні тисків. Встановивши, що напруга знаходиться у межах допуску, необхідно засвідчитися, що воно достатньо стабільне. Рівень вихідного сигналу датчика абсолютного тиску має дуже велике значення, оскільки навіть найменші його відхилення від передбаченого технічними вимогами показника суттєво впливають на роботу двигуна. Похибка в бік збільшення або зменшення всього на 0,25 В вже істотно позначається на сумішоутворенні в циліндрах двигуна й тому на його ефективних показниках. Несправний датчик ремонту не підлягає й повинен бути замінений.

Якщо перевірка датчика абсолютного тиску показує, що він у нормі, тоді треба перевірити λ-зонд та тиск палива.

В КПСК Motronic MP 5.1 використовується цирконієвий λ-зонд. Він видає напругу амплітудою від 0,2 до 0,8 В при частоті 1–2 Гц із плавним переходом від нижнього до верхнього рівня сигналу, які відповідають бідній та багатій сумішам. Важливе значення має також рівність тривалості сигналів, що керують збідненням та збагаченням паливної суміші.

Кисневі датчики (λ-зонди), старіючи, стають більш “повільними” й швидкість їх комунікації зменшується. Це негативно позначається на тяговій характеристиці гарячого двигуна й виявляється у вигляді коливань тяги при їзді автомобіля з малим відкриттям дроселя. Для перевірки роботи датчика потрібен осцилограф.

В усякому разі, не треба поспішати замінювати БСІ. Треба пам'ятати, підкреслимо ще раз, що він має високу надійність, тому рідко виходить із ладу. Необхідно відпрацювати всі можливі методи усунення несправностей. Наприклад, якщо доводиться мати справу із незадовільним вприскуванням бензину, то розумніше перевірити форсунки й очистити двигун (його елементи) від нагару, перш ніж купувати новий БСІ.

7.4. Контрольно-діагностичні випробування КСК ДВЗ

Такі випробування поділяються на стендові безмоторні, стендові моторні й дорожні (або такі, що відображають іншу специфіку силової установки).

7.4.1. Безмоторні стендові випробування

Загальною для будь-яких таких випробувань є імітація експлуатаційних умов з метою перевірки відповідності таких умов характеристикам КСК ДВЗ. Після аналізу результатів перевірки можуть обґрунтовуватися рекомендації щодо корегування настроювання КСК або можливостей (неможливостей) нормального функціонування системи керування у конкретних умовах використання.

Виділимо, як важливі, випробування електрокерованих форсунок. З урахуванням величезної швидкодії форсунок їх випробування дуже складні. Використовуються стенди фізичного моделювання, стадійне фотографування, швидкісна кінозйомка переміщень клапанів форсунок, які обумовлюють показники й характеристики дозування подачі палива.

Дуже важливо точно знати тривалість командного імпульсу τ_e (див. главу 3), для чого використовують осцилограф, який має калібровані мітки, або, що значно зручніше, спеціальний вимірювач часових інтервалів з цифровою індукцією.

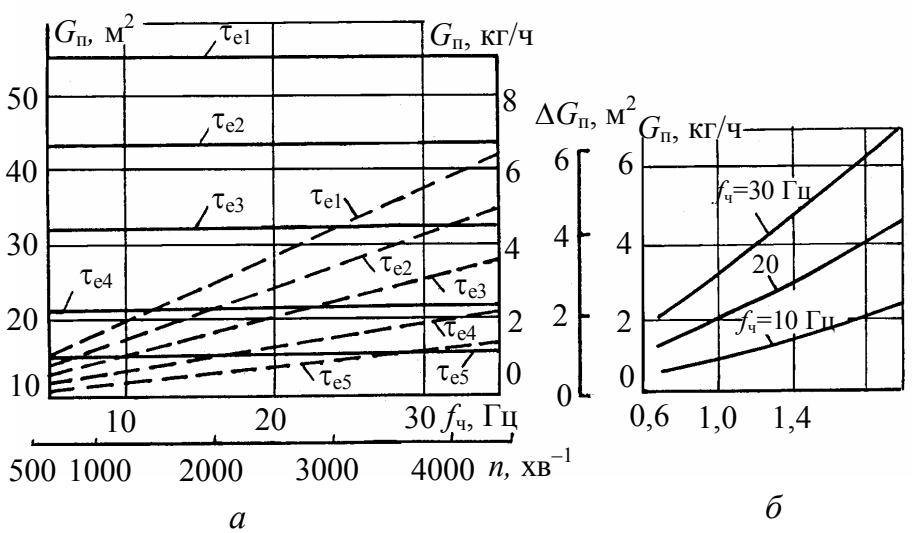
Випробування на стенді форсунок виконують у такій послідовності:

- оцінка електромагнітної системи (вимірювання активного та індуктивного опорів котушки, перевірка її замкнення на корпус, визначення мінімальної тривалості командного імпульсу τ_e);
- перевірка герметичності форсунки при посадці голки на запірний конус розпилювача;

◈ зняття швидкісних й навантажувальних характеристик, що відповідають умовам експлуатації форсунок на силовій установці з двигуном (рис. 7.3);

◈ перевірка стабільності роботи форсунок (ресурс їх повинен відповідати 200 – 250 тис. км пробігу автомобіля, наприклад); розходження у швидкісних та навантажувальних характеристиках (за максимумами та мінімумами величин) відповідно до та після тривалих випробувань не повинно перевищувати 3 %.

До більш поглиблених випробувань форсунок відносяться дослідження елементів клапанів з електромагнітним приводом. Це питання заслуговує особливого вивчення.



а *б*

Рисунок 7.3 – Характеристики форсунки КПСК паливоподачею з електромагнітним керуванням:

а – швидкісна ($p_п$ = const; T_{ox} = const); - - - - – $G_п(f_r)$; ——— – $\Delta G_п(f_r)$; *б* – навантажувальна ($p_п$ = const; f_r = const); f_r – частота командного імпульсу

Безмоторні дослідження датчиків передбачають визначення:

- ❖ можливих амплітудних й частотних діапазонів;
- ❖ абсолютної й відносної чутливості, а також похибок;
- ❖ перешкодостійкості;
- ❖ ресурсу роботи та стабільності початкових настройок.

За амплітудний та частотний діапазони приймають такі, в яких зберігається відповідна запрограмована функціональна характеристика датчика у вигляді функції $R = f(T_{ox})$; $R = \varphi(\Delta p_{труб})$ та ін.

Абсолютну та відносну чутливість датчика визначають у різних амплітудних діапазонах.

При експлуатації велике значення має усталеність датчика по відношенню до механічних (вібрації), електричних (коливання напруги джерел живлення, електромагнітні поля), температурних діянь на КСК ДВЗ. На стендах ці перешкоди моделюються за допомогою вібропристроїв, термостатів, кліматичних камер.

Для датчиків із механічними елементами важливо врахувати можливі резонанси, обумовлені збігом частот власних коливань зони установки датчика, а також характеристик вібрацій датчика.

Особливе значення мають випробування для визначення довговічності датчиків (іноді – й безвідмовності датчика) за заданою програмою циклів навантажень, наближених до експлуатаційних змін режимів їхньої роботи.

Випробування електронних пристроїв КСК ДВЗ (БСІ, посилювачі потужності, апаратура синхронізації, безконтактні комутуючі пристрої, реле та ін.) здійснюються з метою перевірки якості їх монтажу й рівня основних вихідних показників.

Методи перевірки БСІ застосовуються на підприємствах – виробниках.

Контроль монтажу направлений на виявлення зовнішніх дефектів (відпайка, замкнення сусідніх контактів та ін.) або на перевірку напруг у вузлових точках схем, обумовлених режимною картою.

Весь електронний комплекс перевіряють на спеціальному безмоторному стенді. Контролюють окремі блоки, підсистеми, елементи. Обов’язково перевіряють форму і параметри стартових і командних імпульсів (по осцилографу, наприклад), оцінюють скважність командного імпульсу та температури транзисторів посилювачів потужностей.

Особливе місце займають випробування КСК ДВЗ при різних температурах; нормально вони повинні працювати у діапазоні – 50 ÷ +60 °С.

На закінчення, визначають швидкісну й навантажувальну характеристики БСІ. Швидкісною характеристикою БСІ називають залежність три-

валості вихідного імпульсу від частоти стартових імпульсів при постійних значеннях сумарної інформації датчиків. Вона визначається при постійних температурі навколишнього середовища, напрузі електроживлення й навантаженні на виході БСІ.

Навантажувальною називають залежність тривалості вихідного сигналу (імпульсу) від сумарної інформації датчиків при постійній частоті стартових імпульсів. Умови визначення цієї характеристики такі ж, як і для швидкісної.

7.4.2. Моторні випробування на стендах

Вони дозволяють більш реально оцінювати можливості таких КСК.

Крім звичайних для стендових випробуваннях вимірів, при випробуваннях КСК ДВЗ повинні обов'язково фіксуватися тиск палива перед форсункою $p_{\text{п}}$, тривалість командних імпульсів й частота їх чергування.

Звичайно стендові моторні випробування КСК ДВЗ проводяться у чотири етапи:

- порівняльне дослідження потужності й економічності двигуна при його роботі із звичайним карбюратором та КСК; знімають регулювальні характеристики за складом суміші; випередження запалювання – оптимальне; $t_{\text{ох}}$ і $t_{\text{м}}$ постійні; важливо осцилографувати робочі цикли й електричні імпульси, які подаються на керовану форсунку (рис. 7.4);

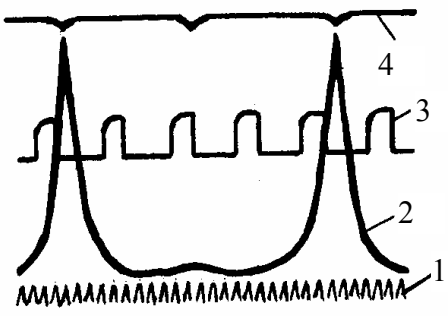


Рисунок 7.4 – Осцилограма, отримана у процесі моторно-стендових випробувань КПСК вприскування бензину:

1 – позначення часу; 2 – робочий цикл двигуна; 3 – командні імпульси сили току; 4 – відмітка ВМТ

- випробування на прийомістість; знімають тахограми порівнювальних підсистем паливоподачі з пневматичним й електронним керуванням; при цьому спочатку виходять на режим $M_{e\max}$, а потім, прикриваючи дросель, зменшують n до мінімально усталеного значення; далі вмикають тахограф і різко повністю відкривають дросель;
- визначення впливу температурного режиму двигуна $t_{\text{ох}}$ на потужнісні та економічні показники

двигуна; це являє інтерес, оскільки t_{ox} суттєво впливає на склади економічної й потужнісної сумішей, на режими пуску та прогріву двигуна;

- визначення впливу складу горючої суміші на зношування сполучень двигуна, перш за все, пар "циліндри – поршневі кільця"; використовуються методи мікрометрирування, лунок, мічених атомів, оцінок зносу за змістом заліза у картерному мастилі та ін.

7.4.3. Дорожні випробування

Вони завершують цикл експериментальних перевірок працездатності й ефективності використання КСК ДВЗ на конкретному силовому агрегаті. Дуже важливо підкреслити, що дорожні випробування єдині, які дозволяють отримати інформацію щодо стабільності КСК в реальних умовах тривалої експлуатації.

Підкреслимо ряд характерних особливостей етапів дорожніх випробувань КСК ДВЗ:

◑ перш за все перевіряють режими пуску й прогріву двигуна; правильно відрегульована КСК забезпечує пуск холодного двигуна при температурі повітря до –20 °С з першої спроби без натискування на педаль дроселя;

◑ потім перевіряються режими зрушення автомобіля з місця; вони не повинні супроводжуватися ривками та ін.; перевірки проводяться при різних швидкостях відкриття дроселя аж до різкого натискування на педаль газу;

◑ далі знімають економічну характеристику силового агрегата (рис. 7.5); звичайно знімають дві економічні характеристики при роботі двигуна з різними системами керування;

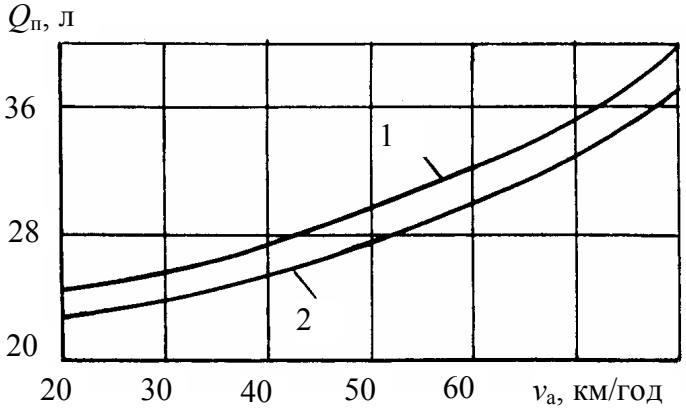


Рисунок 7.5 – Залежність об'ємної витрати повітря $Q_п$ на 100 км від швидкості автомобіля ЗІЛ-431410:
1 – з карбюратором; 2 – з КСК центральним вприскуванням

◑ після цього переходять до визначення динаміки розгінної характеристики автомобіля; важливо при цьому переконатися, що КСК ДВЗ дозволяє значно поліпшити динамічні якості автомобіля; перевіряють роботу підсистеми керування на неусталених режимах (при перехідних процесах), для чого імітують рух автомобіля у міських умовах;

◑ визначення токсичності ВГ частіше проводять на шляху за спеціальним їздовим циклом;

◑ знімають контрольно-економічні характеристики двигуна з КСК (через кожні 1000 км пробігу автомобіля, наприклад), тому що дуже важливим етапом дорожніх випробувань є оцінка експлуатаційної стабільності КСК ДВЗ.

Дорожні випробування можуть розглядатися як етап експлуатаційних випробувань КСК на стабільність й надійність.

7.5. Техніко-економічна ефективність електронного керування двигунами

Задача практичного здійснення оптимізації експлуатаційних характеристик двигунів з використанням КСК ДВЗ потребує комплексної оцінки техніко-економічної ефективності таких систем керування.

При цьому слід, по-перше, виходити з позитивних сторін комп'ютеризації та електронізації двигунів внутрішнього згоряння, до яких, як відзначено вище, відносять: покращення експлуатаційної паливної економічності; поліпшення динамічних якостей силових агрегатів (перш за все, за рахунок скорочення тривалості перехідних процесів); зниження рівня токсичності ВГ. До цього у ряді випадків (наприклад, при переході з карбюрування до вприскування бензину у циліндри ДВЗ з іскровим запалюванням) необхідно віднести також збільшення потужності двигунів у середньому на 10–15 %, а також поліпшення пускових якостей та ін.

По-друге, застосування комп'ютерних систем керування зменшує надійність та стабільність силового агрегату внаслідок введення додаткових елементів (датчиків, механічних та електронних виконавчих пристроїв, перш за все) у функціональну схему керованого об'єкта. Природно, дещо збільшиться й собівартість агрегату без комп'ютерної системи керування.

Відзначені протиріччя треба пояснити шляхом техніко-економічної

оцінки доцільності використання КСК у силовому агрегаті на основі комплексного всебічного урахування всіх складових експлуатаційного ефекту, в тому числі витрат на технічне обслуговування системи.

У цьому зв'язку підкреслимо, що запропоновані, в тому числі й наведені вище, оцінки ефективності двигунів з КСК на основі даних про поліпшення окремих, хоча й важливих показників (паливна економічність, токсичність ВГ, прийомістість і т.д.), не можуть розглядатися як остаточні рішення щодо доцільності й перспектив використання комп'ютерних систем керування у моторобудуванні.

Оцінку техніко-економічної доцільності КСК ДВЗ необхідно здійснювати, виходячи із повної вартості системи

$$C = C_{\text{р}} + C_{\text{в}} + \text{к}_{\text{пн}} C_{\text{е}}, \qquad (7.8)$$

де C – повна вартість використання КСК (поточна – за конкретне напрацювання двигуна у годинах (км)); $C_{\text{р}}$ – вартість розробки КСК; $C_{\text{в}}$ – вартість виробництва КСК; $C_{\text{е}}$ – витрати на експлуатацію КСК за термін ресурсу двигуна; $\text{к}_{\text{пн}}$ – коефіцієнт потенційної надійності, пропорційний напрацюванню двигуна; при використанні КСК впродовж ресурсу $\text{к}_{\text{пн}} = 1$; якщо напрацювання менше ресурсу, $\text{к}_{\text{пн}} < 1$.

Витрати, які обумовлені технічним обслуговуванням КСК ДВЗ при експлуатації, залежать від надійності і стабільності роботи системи, від рівня діагностування, профілактичного й ремонтного обслуговування, вартості запчастин й зарплатні персоналу.

На стадії вибору або розробки КСК ДВЗ практично неможливо достовірно оцінити їхню потенційну стабільність під час тривалої експлуатації. Це можливо здійснити лише за результатами напрацювань у реальних умовах використання, що дозволяє враховувати параметричну надійність КСК ДВЗ за значенням вірогідності стабільної роботи $p(t) < 1$ (формула 7.1).

Вище показано, що для кількісної оцінки фізичної надійності зручно прийняти вірогідність $P(t)$ безвідмовності КСК ДВЗ в умовах експлуатації за вказане напрацювання t. Ще раз відзначило, що надійність таких систем розглядають з урахуванням швидкого розвитку засобів електроніки та підвищення їхньої безвідмовності та довговічності.

На практиці оцінки за $P(t)$ виражають введенням у формулу 7.8 спеціально коефіцієнта потенційної надійності, який числово дорівнює сумарному шляху (у мм) усіх рухомих елементів КСК ДВЗ за один оберт колінчастого вала двигуна за умови усталеного режиму його роботи. Елементи, які спрацьовують при перехідних процесах (на неусталених режимах), наприклад, такі, як датчики режиму прискорення, відключення паливоподачі і т.п., враховуються однократним спрацьовуванням за кожен перехідний процес (те ж – у мм пересування). Природно, що $к_{пн}$ пропорційний відносному напрацюванню двигуна (у долях його ресурсу).

При оцінках техніко-економічної ефективності використання КСК ДВЗ в експлуатації виходять з такого критерію, як оптимальна надійність.

Під оптимальною надійністю КСК розуміють таке значення $P(t)$, при якому витрати, пов'язані з розробкою системи керування, її виготовленням й комплексом витрат на експлуатацію (наприклад, упродовж ресурсу двигуна), будуть найменшими (рис. 7.6). На цьому графіку, як зрозуміло, $к_{пн} = 1$.

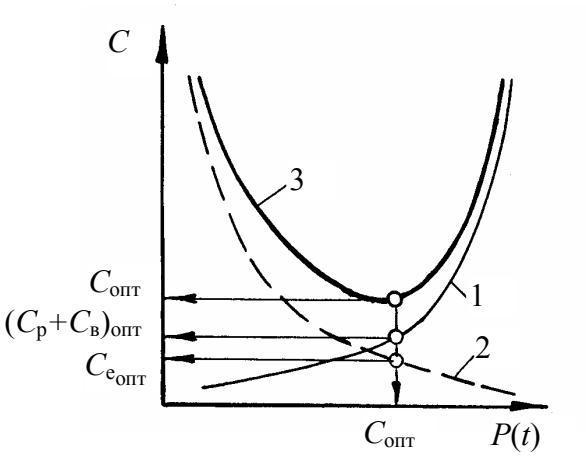


Рисунок 7.6 – Визначення оптимальної надійності КСК ДВЗ:
1 – $C_р + C_в$; 2 – $C_е$; 3 – C

При побудові таких графіків враховано, що вартість розробок та вартість виробництва системи керування обумовлені рівнем надійності функціонування КСК, тобто сумарні витрати $C_р + C_в$ зростають з підвищенням безвідмовності роботи системи на двигуні (крива 1), коли P(t) збільшується. Враховано також, що з поліпшенням якості КСК, тобто при зростанні $P(t)$, експлуатаційні витрати зменшуються (крива 2).

Виникають умови оптимуму на графіку повної вартості С (крива 3). Значення $P(t)$, що відповідає такому оптимуму $P_{опт}$ повної вартості системи $C_{опт}$, й являє собою числові значення оптимальної надійності КСК ДВЗ за ресурс двигуна.

Слід мати на увазі, що при оцінці витрат, пов'язаних з експлуатацією системи, повинні враховуватися не тільки витрати на технічне обслугову-

вання КСК, а й суттєва економія коштів, отримана шляхом зниження витрат палива, викидів токсидів з ВГ тощо, що пов'язано з підвищенням якості керування при застосуванні на двигуні КСК. В таких випадках витрати C_e можуть мати складові, які заносяться із знаком мінус до формули 7.8.

7.6. Приклади системних тестів сучасних КСК ДВЗ

Компактні системні тести KTS 300 й KTS 500 (рис.7.7, 7.8) широко застосовуються для перевірок електронних систем керування ДВЗ.

Тестери KTS фірми Bosch самостійно ідентифікують системи з функцією самодіагностики, тестують БСІ й виконавчі механізми, видають інформацію у таких системних групах:

- КПСК паливоподачею та запалюванням у бензинових двигунах;
- КПСК паливоподачею у дизелях;
- прилади безпеки;
- прилади керування трансмісією; прилади комфорту;
- форсунки вприскування;
- реле тощо.

Компактний системний тестер KTS 300 використовується для зчитування кодів помилок з пам'яті КСК ДВЗ з самодіагностикою.

Тестер KTS 500 – новий прилад на базі ПК – має додаткові можливості:

◑ графічне подання сигналів на екрані;

◑ мультиметр для вимірювання й подальшої обробки різних параметрів;

◑ схеми, інформація;

◑ діагностика вузлів на 14 мовах для 27 марок автомобілів;

◑ живлення від бортового акумулятора або від вбудованого акумулятора.

Мультиметр має осцилограф; його шпаруватість 2 %– 98 %; тривалість імпульсу 250 мкс – 5 мс; температура вприскування –50 °С, + 200 °С.

Робочі можливості мультиметра:



Рисунок 7.7 – Компактний системний тестер KTS 300

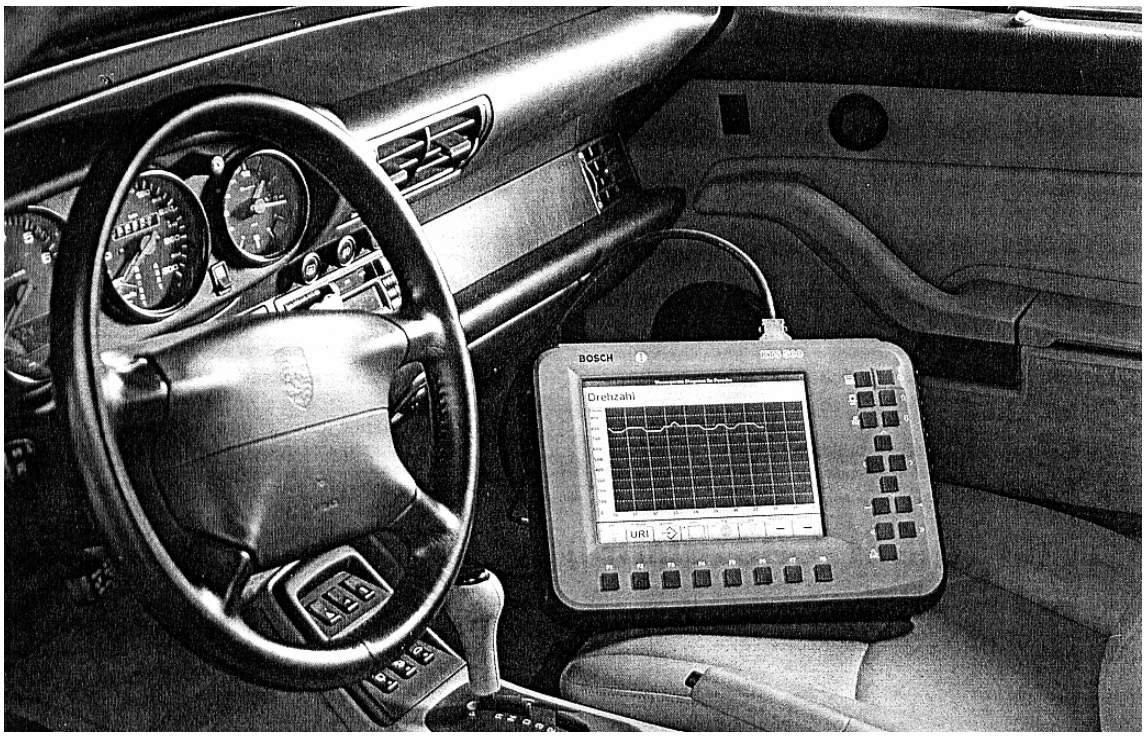


Рисунок 7.8 – Переносний системний тестер KTS 500

Дизельний двигун:

- кількість обертів 600 – 0000 $хв^{-1}$;
- тривалість вприскування 0,6 мс – 30 мс.

Бензиновий двигун:

- кількість обертів 600 – 15000 $хв^{-1}$;
- напруга запалювання 0 – 8 кВ;
- напруга акумулятора 2 – 35 В;
- струм акумулятора до 600 А;
- момент вприскування 0 – 17 мс.

Контрольні запитання й завдання

1. У яких умовах працюють КСК ДВЗ на силових установках?
2. Що таке стабільність (параметрична надійність) КСК ДВЗ, як її оцінювати?
3. Що таке фізична надійність КСК ДВЗ?
4. Які функції покладаються на діагностування КСК ДВЗ?
5. Які особливості побудови й принцип діагностування таких систем керування?
6. Сформулюйте особливості, можливості й логіку самодіагностування КСК ДВЗ.
7. Які функції бортової діагностики передбачено міжнародними стандартами?
8. Що таке адаптивна функція самодіагностування?
9. Охарактеризуйте діагностичне обладнання для перевірки несправностей КСК ДВЗ.
10. Що таке тестування надійності елементів КСК ДВЗ?
11. Охарактеризуйте загальні процедури тестування КСК ДВЗ.
12. Охарактеризуйте процедури тестування компонентів КСК ДВЗ.
13. Що таке контрольно-діагностичні випробування КСК ДВЗ?
14. Як зробити техніко-економічну оцінку доцільності використання КСК ДВЗ?
15. Що таке оптимальна надійність КСК ДВЗ?

Список літератури

1. Шеховцов А.Ф. Компьютерные системы управления ДВС: Уч. пособие. – Харьков: ХГПУ, 1995. –256 с.

2. Диагностика систем впрыскивания. – М.: Автомеханик, 1997. – №6. – С.60–63.

3. Коды неисправностей систем управления двигателем и топливных систем. Техн. рук. по диагностике. – М.: Петит, 2000. – 236 с.

4. Автомобильный справочник (Bosch): Перевод с англ. Первое русское издание. – М.: Издательство “За рулем”, 2000. – 896 с.

Глава 8. МАЙБУТНЄ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ ДВЗ

Поряд із вдосконаленням робочих процесів, конструкцій, матеріалів і технології виготовлення ДВЗ відносно швидко дає суттєвий ефект розвиток комп'ютерного керування двигунами.

Очікуваний у найближчі 5-10 років перехід на більш досконалі, ніж електронні, оптоелектронні, волоконні та інші засоби передачі й обробки інформації, безумовно, ще розширять ефективність керування двигунами.

Але й сучасні інформативні і комп'ютерні технології, що враховують унікальні специфічні особливості ДВЗ як об'єкта комп'ютерного керування, дозволяють поліпшити всі показники його технічного рівня та, в кінцевому рахунку, конкурентоспроможність.

Головна мета застосування КСК ДВЗ – поліпшення еколого-економічних характеристик за рахунок індивідуально-комплексної оптимізації робочого процесу у кожному циклі кожного циліндра. Вона досягається оптимізацією на основі сучасних алгоритмів керування щодо витрати палива і якості перехідних процесів при виконанні обмежень за екологією й іншими параметрами.

Обов'язковою умовою реалізації ефективного комп'ютерного керування ДВЗ є наявність у ньому КПСК паливо – повітропостачанням. Найбільш ефективні із серійних акумуляторні підсистеми з електрокерованими форсунками (ЕГФ). Електрогідравлічні форсунки містять електромагнітні керовані клапани й гідравлічний підсилювальний (мультиплікаторний) привід голок форсунок. Але ряд фірм (Simens, Bosch) вже налагодили виробництво й більш досконалих ЕГФ з п'єзоелектричними клапанами. В акумуляторних КПСК паливоподачі гарантується індивідуальне керування вприскуванням по комплексу критеріїв: тривалість, фаза, тиск й форма ха-

рактеристики, що необхідно для оптимізації робочого процесу у кожному циклі кожного циліндра в будь-який момент часу будь-якого експлуатаційного режиму роботи двигуна аж до відключення подачі палива в окремі циліндри (цикли) на часткових режимах й холостих ходах.

Саме акумуляторні електронні паливні системи забезпечують виконання автомобільними дизелями вимог не тільки EURO-3, а й наступних нормативів, ще більш жорстких.

Комп'ютерне керування параметрами повітряного заряду створює додаткові суттєві можливості оптимізації робочих циклів ДВЗ.

Заслуговує уваги патент ХКБД (м.Харків) по створенню диференційного зв'язку компресора і турбіни з колінчастим валом транспортного двотактного швидкохідного дизеля типу 6ДН.

Запропоновані схеми регульованого приводу нагнітача, передатне відношення якого змінюється за командою бортового комп'ютера залежно від трьох параметрів: частоти обертання колінчастого вала, навантаження двигуна та температури навколишнього середовища. Для поліпшення тягових характеристик, середньоексплуатаційної витрати палива запропоновано введення в схему повітропостачання дизеля механізму безступінчастої зміни передатного співвідношення привода наддувного компресора. При зменшенні *n* механізм збільшує передатне відношення, що дозволяє суттєво поліпшити характер протікання зовнішньої характеристики транспортного дизеля. При цьому коефіцієнт пристосованості збільшився з 1,20 до 1,36 (на 13 %) при різкому розширенні діапазону робочих частот обертів колінчастого вала з 1,37 до 1,75 (тобто на 28 %).

Із кількості відомих електронних (електронно-керованих) підсистем наддуву найбільш перспективні системи, які використовують безпосередньо у ТК вбудовану зворотну електричну машину, частіш всього – змінного струму. Зручно називати такий агрегат електротурбокомпресором [3].

У процесах пуску, розгону, на холостих ходах та малих навантаженнях електрична машина у режимі електромотора, який живиться від інвертора, що генерує змінний електричний струм регульованих частоти й напруги, створює додатковий крутний момент на валу турбокомпресора. Інвертор живиться від генератора, пов'язаного безпосередньо з колінчастим валом двигуна та/або від акумуляторної батареї. Електромотор розганяє турбокомпресор до досягнення оптимального за витратою палива тиску

наддуву. На режимах максимальної потужності додатковий крутний момент не потрібен і він може відключатися.

Очевидно, що максимальна потужність від електромотора потрібна короткочасно при перехідних процесах. Вона може бути отримана від генератора й акумулятора, що вмикатимуться паралельно. Крім того, у результаті додаткового електропривода підвищуються тиск наддуву й витрата повітря дизеля, а відповідно, й потужність, яку розвиває турбіна. Тому необхідна добавка електричної потужності складає тільки біля половини від потрібної для бажаної розкрутки ротора турбокомпресора. Тривалу необхідну потужність мотора треба мати до 1,5 % від потужності дизеля.

Більш раціональним є варіант, у якому на всіх режимах роботи дизеля максимально використовується енергія ВГ. Надлишкова потужність турбіни, що перевищує необхідну для оптимального тиску наддуву, може безпосередньо додаватися мікроконтролером БСІ до потужності головного генератора, що розкручується двигуном.

Ефективність наддуву з електротурбокомпресором визначається перевищенням потужності дизеля (в результаті збільшення η_i при оптимізації тиску наддуву) над затратами енергії на додатковий електропривід компресора.

Для дизелів вантажних автомобілів при використанні тільки режиму мотор-генератора зниження g_e у порівнянні з нерегульованим вільним ТК складає до 6 г/кВт·год, а зниження середньоексплуатаційної витрати палива досягло 5 г/кВт·год. Час виводу дизеля з холостого ходу на номінальну частоту обертання й повну потужність при використанні моторгенератора в турбокомпресорі скорочується на 30-35 %.

Радикальне поліпшення показників ДВЗ на часткових режимах й при перехідних процесах пов’язують з електронним гнучким керуванням геометрією впускних та випускних каналів й рециркуляцією ВГ, що забезпечує додаткове поліпшення робочих циклів двигунів й доцільно вводити одночасне з керуванням ТК. Вже почалося застосування газорозподілу з електропневматичними клапанами на двигунах легкових автомобілів, легких та важких вантажних автомобілів.

Більш швидкодіючі, але менш потужні електромагнітні клапани знаходять застосування для керування газорозподілом поки що у двигунах легкових автомобілів. Вони дозволяють, як і електромагнітні форсунки,

забезпечити індивідуальну оптимізацію тривалості, фази й переміщення кожного клапана в будь-який момент часу на будь-якому експлуатаційному режимі роботи двигуна, аж до повного відключення повітроподачі в окремі циліндри (цикли) й швидкий перехід двигуна у стан гальмування. Фірма Aura Systems стверджує, що з електромагнітним клапаном EVA при використанні будь-яких палив (бензину, дизельного, природного газу, етанолу, метанолу) паливна економічність двигуна за рахунок оптимізації згоряння й втрат на тертя, зниження насосних втрат у експлуатаційному діапазоні частот обертання колінчастого вала поліпшується на 15 %. За рахунок відключення окремих циліндрів паливна економічність додатково поліпшується на 16 %. Тобто загальна витрата палива зменшилась більше ніж на 30 %. Стверджується також, що з клапанами EVA підвищуються потужність, крутний момент, надійність, знижуються рівень токсичності викидів, габарити й вартість двигуна [1].

Іншим найважливішим фактором, що визначає ефективність комп'ютерного керування двигунами, є алгоритми керування, в першу чергу, регулювання частоти обертання й потужності та структури БСІ, які їх реалізують.

Запровадження раціональних (оптимальних) алгоритмів у поєднанні подачі палива та повітропостачання забезпечує досягнення гранично можливих найкращих значень показників якості й конкурентоспроможності. Це відноситься, перш за все, до точності підтримання n в усталених режимах, до величини максимального відхилення й тривалості перехідних процесів пуску, розгону, навантаження й відпрацювання зміни навантажувальних режимів. Оптимізація системи електронного керування (по n та N_e) мінімізує заброси частоти обертання у перехідних процесах, дозволяє знизити мінімально усталену n на холостому ході.

У комплекс алгоритмів керування тепер повинні входити в загальному випадку алгоритми оптимального адаптивного керування випередженням, тиском, кількістю й послідовністю фаз, формою характеристики вприскування, обмеженням паливоподачі, виключенням подачі палива (за умов, що не забезпечують його ефективне вигоряння), фазами газорозподілу, тиском наддуву тощо [2].

Інформаційні зв'язки, що реалізуються БСІ, крім відзначених ефектів, дозволяють раціонально спростити конструкцію й зменшити масу дви-

гуна за рахунок відмови від деяких механічних зв'язків [1].

Паливний насос високого тиску, його привід й виконавчі пристрої суттєво спрощуються в акумуляторних системах. Для нагнітальних плунжерів паливних насосів можливий, наприклад, пневматичний привід безпосередньо від тиску газів у циліндрі.

Заміна механічних приводів й пристроїв керування клапанами газорозподілу електромагнітними ще більш радикально спрощує дизель. Такий принципово новий привід клапанів вилучає розподільний кулачковий вал та привід до нього, спрощує конструкції головки циліндрів й впускного колектора. Скорочуються габарити і маса дизеля, поліпшується його компоновка, знижуються втрати на тертя й витрата мастила.

Граничне спрощення й зменшення маси і габаритів дизель-генераторів досягається повним вилученням всіх валів та всіх механічних приводів, передач (зубчастих та ін.), а також реалізацією лінійних дизель-генераторів (ЛДГ), аналогічних вже відомим вільнопоршневим дизель-компресору та дизель-генератору газів [1]. Комп'ютерне керування на основі інформації про положення поршнів дозволяє вирішити завдання створення багатоциліндрових ЛДГ.

Вище вказані тільки глобальні визначальні ефекти від комплексного застосування адаптивного керування дизелями.

Більшість таких же проблем цілком відносяться й до бензинових двигунів.

Найбільшу увагу привертатимуть у майбутньому питання ідеальної гомогенізації паливо-повітряної суміші за рахунок створення розшарування цієї суміші й локальних α у об'ємі циліндра бензинового двигуна при безпосередньому вприскуванні легкого палива у КЗ. Саме такий робочий процес стане альтернативою існуючим методам сумішоутворення й згоряння. Його ефективність по паливній економічності, токсичності викидів на десятки відсотків перевищує існуючі сьогодні моделі робочих процесів з комп'ютерним керуванням.

На закінчення, підкреслимо, що майбутнє ДВЗ з комп'ютерним керуванням перевищує найсильніші сподівання та прогнози.

Слід чекати і далі нових принципових розробок, які закріплюватимуть позиції ДВЗ як поки що безальтернативних теплових двигунів на ав-

тономних силових установках майже всіх основних галузей світової промислової економіки.

Контрольні запитання та завдання

1. Як можна оцінювати майбутнє КСК дизелями?
2. Чому акумуляторні КПСК паливоподачі можна розглядати як перспективні?
3. Чого можна чекати від розробки комп'ютерних підсистем керування наддувом?
4. Які перспективи має електротурбокомпресор?
5. Охарактеризуйте можливість електронізації керування газорозподілом у ДВЗ
6. Яку роль відводять алгоритмам оптимального адаптивного керування ДВЗ?
7. Які перспективи розвитку КСК бензиновими двигунами?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пинский Ф.И.. Перспективы комплексного совершенствования дизелей информационными связями и компьютерными технологиями в адаптивном управлении. –М.: Двигателестроение, 2002. – №1. – С. 14–16.

2. Пинский Ф.И, Пинский Т.Ф. Адаптивные системы управления дизелей. –М.: Изд-во МГОУ, 1995. –120 с.

3. Дехович Д.А., Пинский Ф.И. и др. Микропроцессорная система управления высокофорсированых двигателей с дополнительным электрическим приводом турбокомпрессора // Тезисы докладов Междунар. научн. симп. FISITA. –М: МГТУ "МАМИ", – 2000.– С. 54.

З М І С Т

ОСНОВНІ ТЕРМІНИ. 3
ПЕРЕДМОВА. 8
ГЛАВА 1. КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ – ГЛОБАЛЬНИЙ ШЛЯХ ЗАПРОВАДЖЕННЯ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ДВИГУНОБУДУВАННІ. 10
1.1. Суттєві переваги електронного керування двигунами. 11
1.2. Напрямки розвитку електронного керування двигунами. 13
1.3. Перспективи розширення використання КСК ДВЗ. 31
Контрольні запитання та завдання 35
Список літератури 36
ГЛАВА 2. ВИМОГИ ДО МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ ТА ПРИНЦИПИ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ. . 38
2.1. Загальні вимоги до КСК ДВЗ. 38
2.2. Забезпечення ефективності керування процесами у двигунах. 39
2.2.1. Раціональний вибір командного параметра. 39
2.2.2. Складання програми реалізації керування діяння. 42
2.2.3. Реалізація принципу оптимальності. 50
2.2.4. Реалізація принципу дискретно-індивідуального керування циклом ДВЗ. 55
2.2.5. Забезпечення принципу програмного керування. 58
2.2.6. Реалізація принципу адаптивності. 62
2.3. Забезпечення надійності КСК ДВЗ. 69
2.3.1. Забезпечення фізичної та параметричної надійності роботи КСК ДВЗ за результатами їх структурного аналізу й самодіагностування. 69
2.3.2. Забезпечення принципу модульності, уніфікації та стандартизації. 75
2.3.3. Забезпечення аварійного захисту КСК ДВЗ. 75
2.4. Інші принципи побудови КСК ДВЗ. 76
2.5. Класифікація та загальна структура сучасних КСК ДВЗ. 80
Контрольні запитання та завдання. 82
Список літератури 82
ГЛАВА 3. ЕЛЕКТРОННЕ КЕРУВАННЯ ПАЛИВОПОДАЧЕЮ У ДВИГУНАХ. 84
3.1. КПСК паливоподачею у бензинових двигунах. 84
3.1.1. Вимоги до КПСК паливоподачею в бензинових двигунах. 86
3.1.2. Схемні та конструктивні особливості підсистем керування паливоподачею у двигунах з іскровим запалюванням. . 88
Центральне вприскування. 90

Багатоточкове вприскування 96
Безперервне вприскування 98
Безпосередній (прямий) вприскування 105
3.1.3. Комбіновані підсистеми керування запалюванням та вприскуванням. 108
3.1.4. Огляд сучасних розробок та патентів щодо КПСК паливоподачею бензинових двигунів провідних фірм світу. 120
3.1.5. Датчики та виконавчі пристрої КПСК паливоподачею та запалюванням у двигунах з іскровим запалюванням. . . 139
3.2. КПСК паливоподачею у дизелях. 194
3.2.1. Можливості поліпшення паливоподачі й сумішоутворення у сучасних двигунах. 194
3.2.2. Вимоги до КПСК паливоподачею у дизелях. 195
3.2.3. Схемні та конструктивні особливості підсистем керування паливоподачею у дизелях. 196
Електронні регулятори швидкості та потужності. 197
Електронне керування характеристиками паливоподачі. . 211
КПСК з гідропосиленням вприскування. 220
Гібридні КПСК паливоподачі. 224
3.2.4. Огляд сучасних розробок щодо КПСК паливоподачею у дизелях провідних фірм світу. 227
3.2.5. Датчики та виконавчі пристрої КПСК паливоподачею у дизелях. 234
Контрольні запитання та завдання. 258
Список літератури 259
ГЛАВА 4. ЕЛЕКТРОННЕ КЕРУВАННЯ ПОВІТРОПОСТАЧАННЯМ У ДВИГУНАХ. 262
4.1. Шляхи поліпшення повітропостачання у ДВЗ та вимоги до КПСК. 262
4.1.1. Проблеми повітроподачі у дизелях. 262
4.1.2. Особливості повітропостачання у бензинових двигунах. 268
4.2. Основи побудови КПСК повітроподачею у ДВЗ. 270
4.3. Датчики та виконавчі пристрої комп’ютерних підсистем керування повітроподачею. 276
Контрольні запитання та завдання 290
Список літератури. 291
ГЛАВА 5. ЕЛЕКТРОННІ БЛОКИ І КАНАЛИ АДАПТАЦІЇ ДВЗ ЗА ОБРАНИМИ КРИТЕРІЯМИ. 292
5.1. Електронне керування рівнем токсичності викидів двигунів. 292

5.1.1. Проблема нейтралізації ВГ та вимоги до КПСК паливо-повітропостачанням та КБК рівнем токсичності двигунів.. 293
5.1.2. Особливості побудови КБК рівнем токсичності ДВЗ. . 300
5.1.3. Датчики та виконавчі пристрої КБК екологічними характеристиками ДВЗ. 302
5.2. Електронне керування кліматичною адаптацією ДВЗ. 311
5.2.1. Шляхи забезпечення кліматичної адаптації ДВЗ та вимоги до КБК з таким пристосуванням 311
5.2.2. Особливості КБК кліматичною адаптацією ДВЗ. 313
5.3. КБК вторинним використанням теплоти в ДВЗ. 317
5.3.1. Наукові основи керування утилізацією теплоти у турбокомпаундних дизелях. 318
5.3.2.Оцінки ефективності утилізації теплоти в КДВЗ. . 320
5.3.3. Побудова КБК утилізацією скинутої теплоти у КДВЗ. 322
5.4. КБК розподілом навантаження поміж циліндрами ДВЗ. 325
5.5. КБК тепловим станом та надійністю ДВЗ. 335
5.5.1. Шляхи забезпечення експлуатаційної надійності ДВЗ й вимоги до КБК. 335
5.5.2. Електронне авторегулювання теплового стану ДВЗ. 336
5.5.3. Особливості КБК надійністю ДВЗ. 343
Контрольні запитання та завдання 346
Список літератури. 346

ГЛАВА 6. КОМПЛЕКСНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВЗ. 348
6.1. Проблеми розвитку комплексних КСК ДВЗ. 348
6.2. Системний аналіз комплексної КСК ДВЗ. 349
6.2.1. Функціональний аналіз комплексної КСК ДВЗ. 350
6.2.2. Функціональний аналіз та вибір електронного забезпечення комплексної КСК ДВЗ. 360
Аналого-цифровий перетворювач. 360
Аналоговий мультиплексор. 364
Спільна робота АЦП та мікроЕОМ. 364
Пам'ять ЦП. 367
Вибір мікроЕОМ для двигуна. 370
Розробка програм керування ДВЗ. 372
Контрольні запитання та завдання. 375
Список літератури 376
ГЛАВА 7. ЕКСПЛУАТАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДВЗ. 377
7.1. Стабільність та надійність КСК ДВЗ. 378
7.1.1. Стабільність (параметрична надійність) КСК ДВЗ. 378
7.1.2. Надійність (фізична) КСК ДВЗ. 379

7.2. Основи діагностування КСК ДВЗ. 383
7.3. Ідентифікація та усунення експлуатаційних несправностей в електронних системах керування ДВЗ. 385
7.3.1. Самодіагностика (бортова діагностика) КСК ДВЗ. 386
7.3.2. Діагностичне обладнання для перевірки несправностей КСК ДВЗ. 391
7.3.3. Тестування надійності та ефективності КСК ДВЗ. 392
7.3.4. Приклад діагностики КПСК вприскуванням та запалюванням. 400
7.4. Контрольно-діагностичні випробування КСК ДВЗ. 401
7.5. Техніко-економічна ефективність електронного керування двигунами. 409
7.6. Приклади системних тестерів сучасних КСК ДВЗ. 412
Контрольні запитання та завдання. 414
Список літератури. 415
ГЛАВА 8. МАЙБУТНЄ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ ДВЗ. 416
Контрольні запитання та завдання 421
Список літератури 421

ВІДОМОСТІ ЩОДО АВТОРІВ

МАРЧЕНКО Андрій Петрович

Проректор з наукової роботи, завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" та академік Академії Наук Вищої Школи України, професор, доктор технічних наук, керівник наукового напряму з екології, вторинного тепловикористання та оптимізації робочого процесу перспективних ДВЗ, Лауреат нагороди Ярослава Мудрого АН ВШ України.

РЯЗАНЦЕВ Микола Карпович

Генеральний конструктор з танкових двигунів, заслужений діяч науки і техніки та академік Інженерної академії наук України, професор, доктор технічних наук, керівник наукового напряму з конструювання, доводки та оптимізації технічного рівня перспективних танкових дизелів, Лауреат Державних премій України.

ШЕХОВЦОВ Анатолій Федорович

Виконуючий обов'язки завідувача кафедри двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", заслужений діяч науки та академік Академії Наук Вищої Школи України, професор, доктор технічних наук, керівник наукового напряму з надійності та тривалої міцності деталей перспективних ДВЗ, Лауреат нагороди Ярослава Мудрого АН ВШ України.

Навчальне видання

МАРЧЕНКО Андрій Петрович
РЯЗАНЦЕВ Микола Карпович
ШЕХОВЦОВ Анатолій Федорович

ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Серія підручників у 6 томах

Том 3

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВЗ

За редакцією А.П. Марченка
А.Ф. Шеховцова

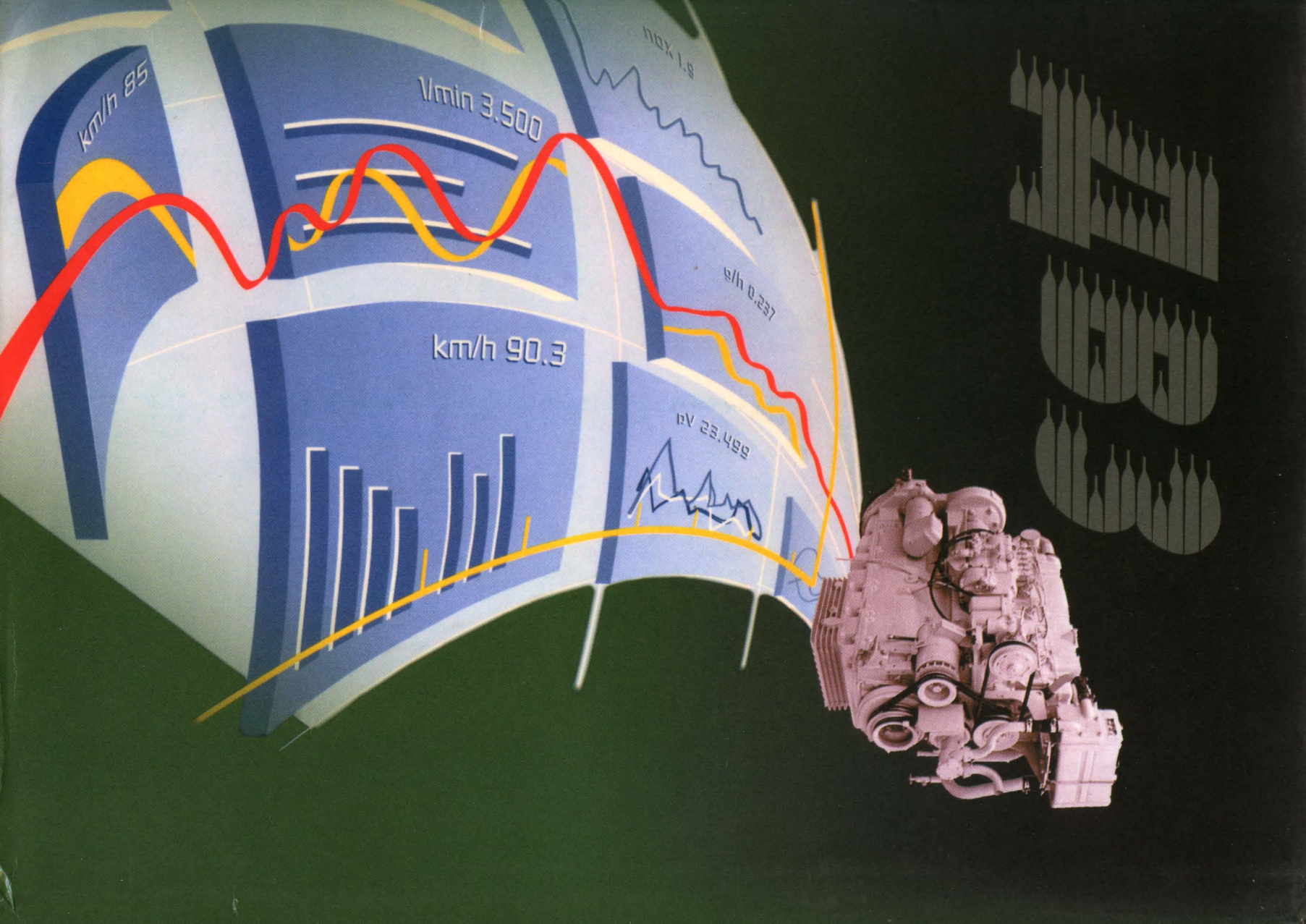
Редактори О.С. Самініна
Л.А. Копієвська

План 2004 р., п.11/

Підписано для друку Формат Папір
Друк – ризографія. Гарнітура. Times. Ум. друк. арк.
Обл. – вид. арк. 24,5. Тираж 500 прим.
Зам. № Ціна договірна

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000.
Видавничий центр НТУ "ХПІ". 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ "ХПІ"
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21


km/h 85
1/min 3.500
nox 1.8
g/h 0.237
km/h 90.3
pV 23.499