

CAPITOLUL 13

TRADUCTOARE PENTRU AUTOMOBILE

13.1 Traductoare de temperatură, căldură și umiditate

13.1.1 Generalități

Măsurarea temperaturii și luarea în considerație a efectului său asupra performanțelor și fiabilității componentelor automobilului este unul din cele mai importante aspecte ale proiectării autovehiculului. Sursele de căldură din automobilele moderne sunt: motorul, convertoarele catalitice, pierderile în convertoarele de putere (de exemplu., alternatorul) și dispozitivele generatoare de căldură ca: parbrizele, scaunele și oglinzile încălzite. Umiditatea se adaugă la efectul temperaturii asupra fiabilității componentelor și influențează performanțele autovehiculului și confortul pasagerilor.

Temperatura unui corp sau a unei substanțe este potențialul său de debit de căldură, măsura energiei cinetice medii a moleculelor sale și starea sa termică, adică abilitatea sa de a transfera căldura la alte corpuri sau substanțe.

Temperatura afectează fiecare aspect al automobilului, de la performanțele motorului și a diverselor sisteme, la confortul șoferului și pasagerilor. Gama mare a temperaturilor de funcționare a autovehiculului (-60°C ... $+57^{\circ}\text{C}$) și cea a modulelor electronice de sub capotă (-40°C ... $+125^{\circ}\text{C}$) și din compartimentele pasagerilor (-40°C ... $+85^{\circ}\text{C}$), afectează performanțele și fiabilitatea componentelor electronice.

Vâscozitatea fluidelor de ungere și de răcire este, de asemenea, afectată de variațiile mari de temperatură ce trebuie tolerate.

Chiar vopseaua, țesăturile, materialele plastice, obiectele de cauciuc și alte materiale organice și anorganice trebuie proiectate pentru a supraviețui mediilor cu temperaturi și umiditate extreme. Măsurarea temperaturii acestor componente este esențială în timpul proiectării și dezvoltării autovehiculului. Energia termică se transferă cu variațiile corespunzătoare de temperatură prin conducție, convecție și/sau radiație. Conducția are loc prin difuzia în materiale solide, lichide sau gaze staționare; convecția implică mișcarea lichidului sau gazului între două puncte, iar radiația are loc prin unde electromagnetice.

Surse de căldură în autovehicule

Pe lângă creșterea temperaturii generată de razele soarelui asupra metalului sau sticlei din caroseria autovehiculului, există multe dispozitive generatoare de căldură într-un autovehicul, exemplificate în tabelul 13.1.

În automobilele echipate cu motor cu ardere internă, principala sursă de căldură este motorul. Din acest motiv compartimentul motor este clasificat ca un mediu cu +125°C pentru componentele electronice, cu toate că se ating temperaturi mult mai mari în camera de ardere (> 1000°C) sau pe blocul motor.

Tabel 13.1

Categoria	Exemplu	Temp. max. [°C]
Motor	Procesul de combustie/ aprindere	>1000
Convertor catalitic	Reacție chimică	>1000
Frecare pneuri – drum	Pneuri	<100
Frâne	Disc/ tambur	250
Mișcare mecanică	Transmisie/ax spate/pompa de aer	200
Schimbătoare de căldură	Radiator (răcitor), încălzitor	>175
Încălzitoare electrice	Parbriz, scaune, oglinzi	Ta +25
Înfășurări electrice	Motoare, alternatoare, solenoizi	<155
Rezistoare	Rezistorul de balast	150
Becuri	Faruri, lămpi	125
Tranzistoare de putere	Comandă aprindere, stabilizator	<200
Bateria de acumuloare	Sulfură de sodiu	300

Convertorul catalitic folosit pentru reducerea emisiilor de monoxid de carbon și hidrocarburi nearchive are o eficiență catalitică maximă la aproximativ +450°C, iar gama de temperaturi de lucru este +350°C ... +1000°C. Flexiunea pneurilor și frecarea dintre pneuri și suprafața drumului sunt surse majore de căldură. Căldura este generată, de asemenea, de frecarea dintre componentele în mișcare ale autovehiculului. Roțile dințate și rulmenții în transmisie, axul din spate și pompele determină creșterea temperaturii. Suprafețele frânelor creează temperaturi mari când sunt acționate.

Ștergătoarele de parbriz trebuie să fie menținute la 15°C cu încălzitoare, chiar dacă afară temperatura este sub -30°C. În semiconductoare, variația temperaturii depinde de puterea disipată prin rezistența termică:

$$\Delta T = R_{\theta} \cdot P$$

unde R_{θ} este rezistența termică în [°C/W], ΔT este diferența de temperatură în [°C] iar P , puterea în [w].

13.1.2 Măsurări de temperatură în automobile

Măsurarea temperaturii lichidelor

În timpul fazei de dezvoltare a automobilului se măsoară temperatura lichidului de răcire, a uleiului din motor, uleiului din transmisie, combustibilului, lichidului de frână, electrolitului bateriei, etc.

Locul de montare, fluidul de contact și capsularea sunt critice pentru senzorii de temperatură pentru lichide. Gama de temperatură de măsurat este tipic -40°C ... $+200^{\circ}\text{C}$. La măsurarea temperaturii electrolitului bateriei de acumulare se folosesc termometre sau termocupluri cu teacă de sticlă, pentru a proteja senzorul de electrolitul coroziv.

Măsurarea temperaturii bateriei de acumulare

Menținerea unei stări de încărcare corecte a bateriei automobilului este esențială pentru obținerea unei viteze adecvate de rotație la pornire și pentru o durată de viață optimă a bateriei. Curba de încărcare a bateriilor cu plumb necesită ca tensiunea de încărcare să fie modificată în funcție de temperatură. La temperaturi scăzute este nevoie de tensiuni mai mari. Temperaturile scăzute impun însă cele mai dificile cerințe bateriei, deoarece vâscozitatea uleiurilor este mare și astfel sarcina pentru sistemul de pornire este foarte mare. Se folosesc circuite de compensare în stabilizatorul de tensiune din sistemul de încărcare a bateriei, pentru a genera tensiune într-o gamă acceptabilă de funcționare a automobilului.

Bateriile pentru autovehicule electrice pot cere menținerea unei game mari de temperaturi de funcționare specificate. Pilele cu sulfură de sodiu pot stoca energie de patru ori mai mare decât cele cu plumb, dar temperatura de funcționare a bateriei trebuie menținută la 300°C ... 350°C .

Măsurarea temperaturii catalizatorului

Pentru a fi eficient, convertorul catalitic trebuie menținut la o temperatură minimă, uzual peste 350°C . Pentru a crește eficiența în controlul emisiilor de gaze toxice, se folosesc tehnici de scădere a timpului de încălzire a catalizatorului:

- încălzirea scurtă a catalizatorului prin aprinderea unui amestec măsurat de combustibil și aer într-un arzător plasat înaintea catalizatorului;
- încălzirea electrică a catalizatorului, aceasta implicând și creșterea puterii consumate de sistemul de pornire.

Pentru măsurarea temperaturii catalizatorului se introduce diagonal în el un termistor, constanta de timp de măsurare fiind de 2 s.

Temperatura gazelor arse crește rapid în condiții severe de funcționare, ca viteză mare sau cifră octanică insuficientă. Senzorul de temperatură trebuie plasat

în galeria de evacuare. Dacă senzorul detectează o creștere a temperaturii gazelor arse, se comandă mai mult combustibil injectat în camera de ardere, pentru a răci motorul.

Temperatura gazelor arse poate atinge 1000°C și se folosește ca senzor un termocuplu din oxid de magneziu cu teacă metalică.

Măsurarea temperaturii senzorului de oxigen

Senzorul de oxigen generează o tensiune în funcție de diferența concentrațiilor de oxigen din gazele arse și din mediul ambiant. Tensiunea generată este afectată de temperatură, iar senzorul de oxigen necesită o temperatură minimă de funcționare de 450°C.

Pentru a-i reduce timpul de încălzire se folosesc încălzitoare.

Măsurarea temperaturii pneurilor

Se face împreună cu măsurarea presiunii, de exemplu folosind câte un senzor de temperatură și presiune în fiecare roată. O antenă circulară și un transceiver transmit aceste semnale unui modul de procesare electronică, care comandă un compresor de aer, pentru a menține presiunea dorită a pneurilor. Dacă temperatura depășește o anumită valoare, de exemplu + 85°C, se comandă scăderea vitezei automobilului.

13.1.3 Măsurarea umidității în automobile

Creșterea umidității aerului absorbit reduce emisiile de oxizi de azot. Condensul din rezervor adăugă o cantitate mare de umezeală în combustibil.

Lichidele de frână sunt higroscopice și deci absorb umezeala. Nivele suficiente de umezeală scad punctul de fierbere al lichidului de frână și eventual vaporizează lichidul, determinând pierderea puterii de oprire. Pentru a măsura punctul de fierbere al lichidului de frână, se folosește un element de încălzire care fierbe un eșantion de lichid de frână, iar un microcontroler calculează punctul de fierbere efectiv, citind valoarea inițială a temperaturii, căderea de temperatură și timpul între răcire și fierbere. Acest concept poate fi aplicat și altor lichide ce pot fi verificate în timpul procedurilor de întreținere.

Sistemele tradiționale de control a temperaturii în compartimentul pasagerilor folosesc doar temperatura ca semnal de comandă pentru deschiderea ușilor de amestec din sistemele de încălzire, ventilare și condiționare a aerului. Se poate folosi însă și semnalul de umiditate pentru a comanda viteza de rotație a ventilatorului suflantei.

13.1.4 Senzori pentru măsurarea temperaturii în automobile

Pentru măsurarea temperaturilor, în producția de automobile și în timpul dezvoltării, se folosesc mai multe tehnici. O listă a senzorilor de temperatură este dată în tabelul 13.2.

Tabel 13.2

Senzori de temperatură	Gama de temp. [°C]	folosire
Termistor	0 ... +500	Producție
Termocuplu	-200 ... +3000	Dezvoltare
Comutator bimetalic	-50 ... +400 (+650)	Producție
Potențiomtru +bimetal	-40 ... +125	Producție
Termorezistență de Pt bobinată	-200 ... +850 (-40 .. +200)	Dezv. (prod.)
Joncțiune semiconductoare	-40 ... +200	Producție
Termostat (arc de presiune)	-50 ... +500	Producție
Fibre optice	+1800	Dezv. viitoare
Indicator cu schimbarea culorii	+40 ... +1350	Dezvoltare
Infraroșu	> temp. amb.	Dezv. viitoare
Termometru cu lichid	-200 ... +1000	dezvoltare

13.1.5 Senzor termic în infraroșu pentru evitarea coliziunilor

Sistemele de evitare a coliziunilor formează o parte din sistemele de transport inteligente. Un traductor cu senzor termic în infraroșu, conceput pentru evitarea coliziunilor autovehiculelor, folosește energia termică (în gama de lungimi de undă 7 ... 14 μm) emisă de un alt autovehicul. Pentru aceasta, senzorul folosit este detectorul piroelectric, care răspunde la variația energiei termice incidente.

Se folosesc două tipuri de câmpuri de vedere care se compară. Traductorul se poate monta, de exemplu, pe oglinzile laterale. Dacă un autovehicul este prezent într-un câmp de vedere și în celălalt nu, la ieșire se obține semnal mare.

Caroseria unui automobil în funcțiune are temperatura mai mare cu cel puțin 1 ... 2°C decât mediul ambiant, deci emite suficientă radiație infraroșie. Și pneurile se încălzesc cu aproximativ 2°C, după 1 km rulat în condiții de oraș.

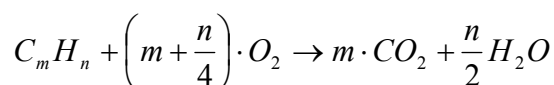
Pentru evitarea coliziunilor se folosesc și alte tehnici, dar toate active, cu emisia unui semnal și detectarea semnalului reflectat de vehiculul țintă: ultrasonice, în infraroșu, cu laser sau radar.

13.2 Traductoare pentru gaze de evacuare

13.2.1 Concepte de bază

Arderea

Singurele produse ale unei arderi complete a combustibilului sunt substanțe netoxice, și anume bioxid de carbon și apă:



Cerința teoretică de aer pentru acest proces este 14,7 kg de aer pentru fiecare kilogram de combustibil, aceasta corespunzând la aproximativ 10 m³ de aer la un litru de combustibil. Raportul aer / combustibil este definit ca stoichiometric atunci când motorul este alimentat cu cantitatea exactă de aer cerută pentru ardere completă.

Raport normalizat aer /combustibil

Raportul amestecului este definit de raportul normalizat aer / combustibil:

$$\lambda = (\text{raportul curent aer/combustibil}) / (\text{raportul stoichiometric})$$

Deoarece condițiile din motor nu corespund cu cele absolute ideale, cerute pentru o ardere perfectă, rezultă un număr de produse de ardere incompletă chiar dacă este menținut un raport stoichiometric ($\lambda = 1$). Astfel, CO₂ și H₂O sunt însoțite de CO, H₂ și HC (hidrocarburi C_xH_y) alături de anumite cantități de oxigen liber nereacționat.

Echilibrul apă - gaz definește raportul CO la H₂. La temperaturi mari de ardere, N₂ și O₂ din aerul de alimentare formează oxizi de azot ca: NO, NO₃, N₂O.

Compoziția gazelor de evacuare netratate

Compoziția gazelor de evacuare care intră în convertorul catalitic variază în funcție de calitatea combustibilului și de raportul λ . Amestecurile bogate ($\lambda < 1$, combustibil în exces) produc concentrații mari de CO, H₂ și HC, iar amestecurile sărace ($\lambda > 1$, oxigen în exces) generează nivele mari de NO_x și oxigen liber. Temperaturile mai scăzute ale camerei de ardere, asociate cu raporturi de amestec cu $\lambda > 1,2$ au ca efect reducerea concentrațiilor de NO_x și creșterea concentrațiilor de HC. Emisiile maxime de CO₂ au loc la un amestec ușor sărac ($\lambda \approx 1,1$).

Concepte de proiectare ale buclei închise de control lambda

Elementele principale care definesc sistemele de control în buclă închisă lambda sunt: proiectarea motorului, limitele de emisie, consumul de combustibil și cerințele de performanță și funcționare silențioasă.

Tratarea catalitică a gazelor evacuate este esențială pentru respectarea standardelor de emisie curente. În procesul catalitic, CO, H₂ și HC sunt oxidate pentru a forma CO₂ și H₂O, iar constituenții NO_x sunt reduși la N₂ și O₂. Converterul catalitic cu trei căi (converter catalitic selectiv) și un sistem de control în buclă închisă care folosește un senzor lambda sunt elementele esențiale pentru obținerea reducerilor adecvate a celor trei poluanți. Motorul trebuie să funcționeze într-o gamă îngustă de variație $|\Delta\lambda| < 0,005$ la $\lambda = 1$.

Controlul lambda în buclă închisă este încorporat în sistemul de control electronic al motorului. Sistemul de control reglează parametrul λ în amonte de converterul catalitic, cu ajutorul unui senzor de O₂. Rezultă întârzieri mari ale sistemului de control, mai ales la viteze scăzute. Din acest motiv, sistemul trebuie să conțină o funcție pilot de control, capabilă de reglarea amestecului la valoarea λ dorită, cu un grad de precizie maxim posibil. Se evită astfel scăderea performanțelor automobilului și creșterea nivelului de gaze poluante evacuate.

Conceptul de control în buclă închisă folosit curent în motoarele cu aprindere prin scânteie se bazează pe control în două puncte cu $\lambda = 1$ (fig. 13.1), cu compoziția amestecului oscilând în jurul valorii optime pentru λ .

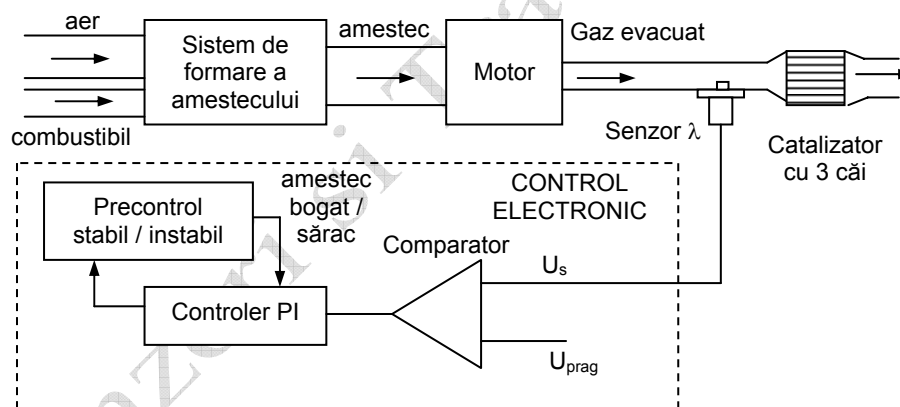


Fig. 13.1

Când amestecul trece de la bogat la sărac, tensiunea U_s de la sonda λ , scade de la aproximativ 0,8 V ($\lambda < 1$) la aproximativ 0,1 V ($\lambda > 1$), cu variație rapidă a semnalului la $\lambda = 1$. Când tensiunea U_s trece peste tensiunea de prag fixată, de exemplu $U_{\text{prag}} \approx 0,45\text{V}$, sistemul răspunde sărăcind progresiv amestecul până când tensiunea U_s cade din nou sub prag. Când acest proces este încheiat, sistemul își inversează ieșirea, îmbogățind gradat amestecul.

În funcție de întârzierea amestecului, oscilațiile sistemului de control sunt în gama 0,5 ... 5 Hz, cu o amplitudine $\Delta\lambda = \pm 0,01 \dots 0,05$ față de λ medie. În timpul perioadei de sărăcire, convertorul catalitic stochează oxigen pentru a-l elibera în timpul fazelor de îmbogățire a amestecului. Acest mod de lucru asigură viteze mari de conversie, în ciuda oscilațiilor de control.

Se folosește de preferință un algoritm proporțional - integrator (PI). Variațiile întârzierii sistemului și a pantei integratorului afectează amplitudinea și frecvența oscilațiilor. Deoarece sarcina și turația au efect major asupra întârzierii sistemului, parametrii de control sunt definiți și stocați într-o cartogramă de control sarcină / turație.

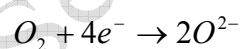
Se poate realiza un control continuu $\lambda = 1$, pentru a obține deviații de control mult mai mici și reduceri ale gazelor poluante, în special când se folosesc convertoare catalitice îmbătrânite. Pentru aceasta este nevoie de senzor de oxigen cu o caracteristică lambda aproximativ liniară sau liniarizată.

Deoarece nu există senzori de gaze poluante, CO, NO_x și HC, care să funcționeze în gazele de evacuare, s-au dezvoltat concepte care folosesc un al doilea senzor de oxigen după convertorul catalitic, pentru a detecta îmbătrânirea convertorului și / sau a senzorului lambda.

13.2.2 Principiile senzorilor de gaze de evacuare pentru control λ

13.2.2.1 Senzor $\lambda = 1$ tip Nernst (ZrO₂)

În principiu, senzorul lambda funcționează ca o pilă galvanică cu electrolit solid, cu concentrație de oxigen. Se folosește un element ceramic din bioxid de zirconiu și oxid de ytriu ca electrolit solid impermeabil pentru gaz. Acest amestec de oxizi este un conductor aproape perfect de ioni de oxigen, pe o gamă mare de temperaturi. Electrolitul solid este proiectat pentru a separa gazul evacuat de atmosfera de referință. Ambele fețe sunt electrozi de platină catalitic activi. La electrodul interior (aer; $pO_2 = 0,21$ bar), reacția:



încorporează ionii de oxigen în electrolit. Aceștia migrează spre electrodul exterior (gaz evacuat; pO_2 variabil $< pO_2$), unde contrareacția are loc la interfața cu trei faze (electrolit - platină - gaz). Se creează un câmp electric contraactiv și este generată o tensiune electrică U, corespunzătoare raportului presiunilor parțiale, conform ecuației Nernst:

$$U_s = \frac{RT}{4F} \ln \frac{pO_2''}{pO_2'}$$

unde R este constanta generală a gazelor, F este constanta Faraday, T este temperatura absolută, iar pO_2 este presiunea parțială a oxigenului.

Măsurarea conținutului de oxigen servește ca bază pentru concluzii referitoare la lambda gazului de evacuare, când o stare de echilibru termodinamic a gazului este stabilită la electrozii activi catalitic ai senzorului de oxigen (oxigen rezidual). Concentrațiile absolute ale componentelor individuale ale gazelor de evacuare din motor fluctuează pe o gamă mare, în conformitate cu condițiile de funcționare instantanee (încălzire, accelerare, funcționare stabilă, decelerare). Senzorul de oxigen trebuie să fie astfel încât să convertească amestecul de gaz primit într-o stare de echilibru termodinamic complet. Dacă nu se obține echilibru termodinamic la electrod, semnalul senzorului lambda va fi eronat.

Concentrația oxigenului rezidual fluctuează exponențial, cu multe ordine de mărime, în vecinătatea amestecului stoichiometric aer/combustibil, fig. 13.2.

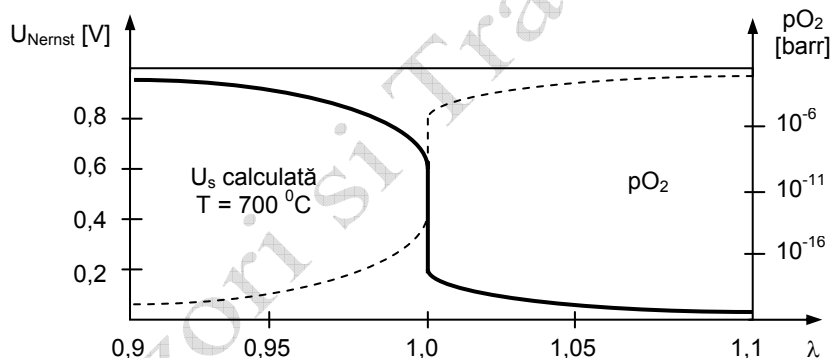


Fig. 13.2

13.2.2.2 Senzor $\lambda = 1$ semiconductor

Semiconductoarele oxizi ca TiO_2 și $SrTiO_3$ obțin rapid echilibrul cu presiunea parțială de oxigen în faza de gaz înconjurător la temperaturi scăzute. Variația presiunii parțiale a oxigenului învecinat produce variația concentrației locurilor libere de oxigen a materialului, modificând conductivitatea de volum.

Acest efect este afectat de dependența de temperatură a conductivității. Rezistența electrică și timpul de răspuns al senzorului sunt invers proporționale cu temperatura.

Posibilitatea de a nu mai folosi referință de O_2 permite o proiectare simplă folosind un încălzitor integrat. Stratul gros semiconductor poros este poziționat și sinterizat pe un substrat plan, între doi electrozi. Se folosesc și variante cu straturi subțiri.

Pentru $\lambda \approx 1$, stratul senzor are o variație rapidă a conductivității datorită variației mari a pO_2 . Când sunt noi, senzorii din TiO_2 au același răspuns ca sondele $\lambda = 1$ bazate pe ZrO_2 . Variațiile rezistențelor în starea de sărăcire sau îmbogățire și pentru timpul de răspuns au loc pe toată durata de viață, sistemul de control a emisiei suferind o deplasare semnificativă spre sărăcire.

Pentru funcționare, se aplică o tensiune rezistorului R_T din TiO_3 legat în serie cu un rezistor de referință. Căderea de tensiune pe rezistorul serie depinde de R_T , respectiv de λ . În versiunea cu trei poli, tensiunea aplicată este preluată de la tensiunea încălzitorului; pentru versiunea cu patru poli (cu masă izolată), se folosește o tensiune de alimentare separată. În funcție de aplicația specifică, poate necesară compensarea cu temperatura.

13.2.3 Senzori pentru alte componente din gazele de evacuare

13.2.3.1 Senzori cu potențial mixt

Dacă activitatea catalitică redusă previne ca să se atingă echilibrul gazului, la electrodul unei pile galvanice ZrO_2 au loc reacții concurente. Acestea previn o stare de reducere / oxidare de echilibru în oxigen și duc la formarea unui potențial mixt. Acest potențial depinde de activitatea electrodului, temperatură și compoziția gazului. Este dificil de proiectat electrozi capabili să mențină viteze specifice. Fiecare schimbare în activitatea electrodului (de exemplu, datorită îmbătrânirii) duce la o variație a potențialului mixt. Electrozii de Pt au o creștere a potențialului mixt la temperaturi foarte scăzute, cu întârzieri mari ale răspunsului față de senzorii λ . Alte materiale pentru electrozi, cu viteze mai mici ale activității catalitice, continuă să dea potențial mixt la temperaturi mari, obținându-se timpi de răspuns < 1 s.

Selectivitatea se poate îmbunătăți prin selectarea materialului electrodului, temperaturii de funcționare și a straturilor selective de precatalizare.

Deoarece efectul este sensibil cu temperatura, temperatura constantă a senzorului trebuie să fie reglată în gama $300^\circ C \dots 600^\circ C$, în funcție de aplicație.

13.2.3.2 Senzori de gaze din semiconductoare

Straturi groase și ceramice. Pe suprafața oxizilor de metale nestoichiometrice ca SnO_2 , TiO_2 , In_2O_3 și Fe_2O_3 (semiconductoare de tip n), oxigenul este absorbit și disociat în aer la temperaturi mari și este legat de rețeaua cristalină. Rezultă un strat subțire de sărăcire la suprafața cristalitelor, ce dă naștere la un arc în curba potențialului. Acest fenomen produce reduceri ale conductivității suprafeței și rezistență mai mare intercristalină la frontierele dintre două cristale; acesta este factorul major ce determină rezistența totală a oxidului metalic policristalin.

Gazele oxidante ca CO , H_2 și C_xH_y , care reacționează cu oxigenul de la suprafață, cresc densitatea purtătorilor de sarcină în stratul de frontieră și reduc bariera de potențial. Gazele reducătoare ca NO și SO_x cresc potențialul barierei și astfel, rezistența suprafață / intercristalină.

Straturi subțiri. În comparație cu materialele policristaline, straturile subțiri au un număr limitat de frontiere cristaline la suprafața stratului pentru reacție cu gazele evacuate. Bariera stratului de sărăcire are o proporție substanțială din grosimea stratului subțire și variația densității purtătorilor de sarcină în stratul barierei datorită gazelor adsorbite produce variații mari ale rezistenței totale.

Pentru selectarea CO , HC și NO_x se folosesc materiale cu dopări și temperaturi adecvate. Rezistența semiconductoarelor cu oxid de metal este întotdeauna o funcție de presiunea parțială a O_2 .

Gazele evacuate de motoare, cu presiuni parțiale de O_2 minime au o mare sensibilitate O_2 . Pentru $\lambda \leq 1$, este posibilă și o variație ireversibilă pe termen lung a rezistenței sensorului, ceea ce duce la dezintegrarea oxidului de metal. Temperaturile mari de funcționare favorizează difuzia golurilor de oxigen și a materialelor dopante. Când sunt amplificate de efectele de sinterizare, acestea duc la derivate ale rezistenței și răspuns atenuat al sensorului.

Temperaturile de funcționare standard ale senzorilor de gaze din metal - oxid sunt $100^\circ\text{C} \dots 600^\circ\text{C}$.

13.2.3.3 Senzori catalitici de gaze

Senzorul catalitic de gaze este un senzor de temperatură care folosește o suprafață catalitic activă. O reacție exotermă la suprafața catalitic activă (reacție de oxidare în aer), determină creșterea temperaturii sensorului, proporțional cu concentrația de oxidant în atmosferă cu oxigen în exces. Pentru a mări sensibilitatea și pentru a realiza compensarea cu temperatura, se folosește un senzor asemănător, dar fără răspuns catalitic. Senzorul de temperatură este din fire de Pt bobinate, straturi subțiri și groase din Pt, tranzistoare sau termistoare.

Senzorii catalitici de gaze sunt insensibili și se folosesc într-o gamă > 1000 ppm. Pentru monitorizarea concentrațiilor este nevoie de oxigen în exces. Datorită sensibilității la viteza debitului de gaz, acești senzori sunt folosiți în sonde de debit cu limitatoare de difuzie. Senzorii activi și cei de referință trebuie expuși la aceleași condiții de debit, fără influențe termice reciproce.

Temperaturile de lucru sunt $500^{\circ}\text{C} \dots 600^{\circ}\text{C}$, dar pot fi și mai mari. Factorul de limitare pentru gama temperaturilor este stabilitatea pe termen lung în convertorul catalitic. Senzorii catalitici de gaze nu sunt selectivi, ei dau un semnal sumă pentru toate gazele de combustie. De aceea, sunt folosiți numai pentru monitorizarea stării convertorului catalitic.

13.3 Traductoare de poziție liniară și unghiulară

Traductoarele de poziție liniară sau unghiulară sunt folosite în automobilele moderne, de la microcomutatoarele acționate de deschiderea ușii, până la transformatoarele diferențiale liniar variabile din sistemele de suspensie active, pentru indicarea poziției sau în sisteme de siguranță.

Fiecare tip de traductor are propriile modalități de exprimare și, când se fac comparații, este important să se înțeleagă cum o caracteristică a unui traductor se raportează la altă caracteristică a altui traductor și cum afectează forma semnalului de ieșire, analogică sau numerică, rezoluția de măsurare și, corespunzător, performanțele sau stabilitatea unui sistem din traductor.

13.3.1 Clasificarea traductoarelor de poziție

Din perspectiva unui proiectant de sistem, problema de bază legată de traductoare este: ce fel de informație dă la ieșire și cum este folosit traductorul.

Un traductor de poziție este un dispozitiv electromecanic care transformă informația de poziție în semnale electrice. Traductoarele de poziție pot fi grupate în două categorii de bază:

- traductoare incrementale sau absolute și
- traductoare de poziție în contact sau de proximitate.

Traductoare incrementale sau absolute

Traductoarele incrementale de poziție măsoară poziția ca distanța de la un marcaj arbitrar sau zero. Se bazează pe metoda de numărare a impulsurilor. Un impuls din secvența de impulsuri este proiectat mai lat sau de polaritate opusă decât altele, încât poate fi folosit ca zero. Avantajul traductoarelor incrementale este faptul că folosesc puține fire de legătură, tipic patru sau cinci. Dezavantajele

sunt: la punerea sub tensiune traductorul nu are nici o informație de poziție și necesită un ciclu de indexare mecanic pentru a găsi impulsul marker; al doilea dezavantaj, sensibilitatea la zgomote.

Traductoarele de poziție absolută dau informație de ieșire neambiguă la punerea sub tensiune. Fiecare poziție liniară sau unghiulară are o valoare unică. Ieșirea poate fi: tensiune, frecvență, cod numeric, etc, asociate poziției de intrare. Exemple de traductoare absolute de poziție sunt: potențioetrele, traductoarele numerice absolute, resolvele, etc.

Traductoare de poziție în contact sau de proximitate

Traductoarele de poziție sunt proiectate să detecteze poziția componentelor sistemelor mecanice, fiind fie direct cuplate prin arbore sau legătură, ca în cazul potențioetrelor sau traductoarelor optice numerice, fie prin mijloace fără contact sau proximitate.

Condițiile de mediu au influență mare în alegerea traductorului. Nivelele mari de vibrații, mai ales în aplicațiile cu motoare mici, pot duce la defecte permanente, de exemplu a stratului conductor de la potențioetrul de măsurare a poziției clapetei de accelerație. Murdăria și praful exclud traductoarele optoelectronice din aplicațiile de sub capotă, datorită degradării rapide a căii optice.

Traductoarele de proximitate cele mai folosite sunt cele bazate pe detectarea câmpului magnetic, deoarece pot fi mai ușor izolate de efectele distructive ale mediului dur din cele mai multe aplicații din automobile.

13.3.2 Tehnologiile traductoarelor de poziție

13.3.2.1 Microîntrerupătoare

Cel mai simplu senzor în contact este un întrerupător. Multe aplicații ale microîntrerupătoarelor pentru detecția poziției sunt ca întrerupătoare de capăt sau ca avertizare a capătului de cursă a unei componente mecanice, prin deconectarea tensiunii de alimentare de la un motor electric sau prin alimentarea cu tensiune a unei lămpi indicatoare.

În anumite situații, din motive de siguranță, trebuie determinată condiția de defect semnalizată de microîntrerupător. O caracteristică nedorită a comutatoarelor sunt oscilațiile contactelor la închidere, problema fiind rezolvată, de exemplu cu circuite sensibile la primul front al impulsurilor și rejectarea celorlalte fronturi. Dacă se folosește un microcontroler pentru monitorizarea ieșirii senzorului, atunci fronturile parazite pot fi eliminate software. Această problemă este valabilă și pentru aplicațiile cu vibrații puternice sau șocuri.

13.3.2.2 Traductoare de poziție optoelectronice

Codoarele optice unghiulare pentru măsurarea incrementală a poziției unghiulare a arborilor sunt realizate dintr-un disc cu sectoare transparente și opace, egal spațiate. Discul este din sticlă pentru aplicații de precizie. Discurile din mylar sau metal oferă, respectiv, rezoluție mare și medie la preț scăzut. Discurile sunt iluminate pe ambele părți iar fotodectoarele detectează trecerea sectoarelor iluminate și întunecate, când discul este rotit. Discurile din metal, de rezoluție scăzută, lucrează prin reflexie.

Cele mai multe codoare au două perechi de surse optice și fotodectoare, poziționate cu distanța egală cu jumătate din lățimea unui sector. Impulsurile de la ieșirile celor două canale de măsurare sunt decalate cu 90° electrice (semnale în cuadratură). Trecerea unei perechi de sectoare luminoase și întunecate prin fața unui fotodetector este denumită o perioadă, un impuls, o linie sau 360° electrice.

Rezoluția codoarelor este în gama 16 linii/rot, pentru aplicații de preț scăzut, până la peste 6000 linii/rot pentru sistemele de control a poziției de precizie. Cele mai multe codoare folosesc și al treilea semnal ca index sau impuls de referință (marker nord). Acesta are 1 linie/rotație și lățime tipică de 90° . Din cele două ieșiri de pe cele două canale defazate la 90° , pot fi separate patru stări distincte folosind circuite integrate speciale (semnalele au factor de umplere 1/2). Se obțin astfel rezoluții de patru ori mai mari decât numărul liniilor de pe disc. Aceste circuite integrate determină și sensul rotației, din defazajul dintre cele două semnale.

Specificațiile de acuratețe ale codoarelor unghiulare incrementale se încadrează în două categorii. Acuratețea poziției unghiulare este diferența între unghiul real al arborelui și unghiul indicat de codor. Această eroare este exprimată normal în grade sau minute de arc. A doua categorie include specificațiile pentru simetria și repetabilitatea perioadelor, acestea fiind exprimate în grade electrice.

Codoarele optoelectronice incrementale liniare permit măsurarea directă a mișcării liniare. Tehnologia și terminologia sunt aproximativ aceleași ca la codoarele unghiulare.

Codoarele liniare sunt descrise de densitatea liniilor sau rezoluție în linii pe mm sau mm pe linie, rezoluția ajungând la ≈ 8 linii/mm, adică $\approx 30 \mu\text{m}$.

Dacă este necesară informația de poziție neambiguă la punerea sub tensiune, se folosesc codoare absolute, cu rezoluție $1/2^6 \dots 1/2^{16}$ și date de ieșire în cod binar, BCD sau cod Gray.

13.3.2.3 Traductoare de poziție potențiometrice

Potențiometrele sunt mult folosite ca traductoare de poziție în automobile, pentru măsurarea poziției pedalei de accelerație și a clapetei de accelerație. Sunt traductoare ieftine, cu timpi de viață peste cei ai unei mașini medii și viteze de rotație continue > 1000 rot/min, timp de peste 1000 ore.

Sunt construite folosind un traseu cu fir bobinat. Rezoluția potențiometrelor depinde de numărul de spire bobinate pe pistă. Rezoluția potențiometrelor bobinate rotative este specificată ca număr de spire pe grad și poate fi între 1 (1°/spira) și 7 (8,5 arcmin/spira). Rezistența traseului, proporțională cu numărul de spire, este în gama 10 Ω ... 100 kΩ. Potențiometrele bobinate uzuale sunt cele cu valori scăzute ale rezistenței, dar cu liniaritate slabă.

Potențiometrele pentru detecția poziției sunt realizate dintr-un traseu rezistiv din material conductor, uzual grafit și plastic dopat cu negru de fum și un cursor fixat într-un suport. Cursorul este realizat din lamele, pentru a obține contact bun, insensibil la vibrații. Potențiometrele de acest tip au gamă de rezistență 500 Ω ... 20 kΩ, liniaritate excelentă și rezoluție foarte mare.

13.3.2.4 Traductoare de poziție magnetice

Traductoare cu reluctanță variabilă

Reluctanța unui circuit magnetic determină forța magnetomotoare necesară pentru a produce un flux de o anumită valoare. În cele mai multe cazuri, variația reluctanței este determinată de variația lungimii unui întrefier. Variația reluctanței produce o variație a fluxului magnetic, ce induce o tensiune într-o bobină de semnal de ieșire. Tensiunea indusă este un impuls bipolar, a cărui amplitudine este proporțională cu viteza variației a fluxului (legea lui Faraday):

$$U = \frac{d\Phi}{dt}$$

În automobile, senzorii cu reluctanță variabilă sunt folosiți pentru detecția poziției și a vitezei de rotație a roților dințate sau profilate, în aplicații de monitorizare a axei cu came, arborelui cotit și a roților.

Senzorii cu reluctanță variabilă sunt sensibili la erori. Vibrațiile, rezonanțele, forțele de atracție dintre senzor și țintă pot degrada serios raportul semnal / zgomot al dispozitivului. Ținta acestor senzori este de obicei o roată dințată feromagnetică. Prin mișcarea roții în câmpul magnetic al senzorului, rezultă curenți turbionari ce determină erori. Din acest motiv, în aplicațiile de precizie, găurile și deschizăturile

din roțile feromagnetice sunt umplute cu materiale conductoare nemagnetice, pentru omogenizarea curenților turbionari.

Avantajele senzorilor cu reluctanță variabilă sunt: simplitatea, construcția compactă, nu lucrează prin frecare, prețul scăzut, gamă mare de temperatură de funcționare și necesită doar două fire de legătură.

Senzorii cu reluctanță pot fi folosiți și ca senzori cu inductanță variabilă dacă se excită bobina de detecție în curent alternativ și se măsoară inductanța.

Traductoare cu efect Hall

Dacă un conductor este antrenat cu viteza v într-un câmp magnetic, sarcinile din conductor vor fi supuse unei forțe (Lorentz) perpendiculară pe direcția mișcării și a câmpului magnetic. Rezultă un câmp electric:

$$E = vB$$

Rezultă astfel o tensiune proporțională cu inducția magnetică B , viteza și lungimea conductorului. Se pot realiza dispozitive din materiale semiconductoare, care folosesc acest efect la măsurarea câmpurilor magnetice.

Circuitele integrate cu efect Hall de performanță folosesc diverse tehnici de îmbunătățire a sensibilității. Traductoarele Hall diferențiale, proiectate ca traductoare de poziție pentru roți dințate, folosesc doi senzori Hall distanțați cu jumătate din distanța dintre doi dinți. Aceste traductoare, pot detecta variații mici ale câmpurilor magnetice unipolare.

Traductoare inductive de unghi

Resolverele, denumite și *sincro resolvere*, sunt traductoare absolute de unghi. Datorită construcției lor, resolverele moderne fără perii oferă soluția cea mai robustă, fiabilă și au rezoluția cea mai mare pentru măsurarea unghiurilor. Resolverele sunt considerate adesea traductoare de preț mare pentru automobile, datorită manoperei mari. Resolverele pot fi complet capsulate sau plate, cu statorul și rotorul realizate separat, pentru facilitarea montării pe arbori. Resolverele se caracterizează prin diametrul carcsei. Acuratețea lor se specifică în minute de arc, valoarea tipică fiind 7 arcmin.

Resolverele sunt, în esență, traductoare rotative. O tensiune alternativă conectată la intrarea de referință furnizează excitația primară. Gama de frecvență folosită este 400 Hz ... 20 kHz, în funcție de tipul constructiv; cele mai multe fiind optimizate pentru gama de frecvență 2 ... 5 kHz. Semnalul de referință este cuplat la rotor prin intermediul unui transformator montat la un capăt al arborelui rotorului. O a doua bobină rotor se cuplează cu două bobine stator orientate perpendicular. Bobinele stator sunt bobinate astfel încât, la rotirea arborelui rotor,

amplitudinile ieșirilor bobinelor stator variază cu sinusul și cosinusul unghiului arborelui față de o referință zero.

Cel mai simplu mod de a decoda ieșirea resolverului este folosirea unui convertor integrat resolver – numeric, fig. 13.3.

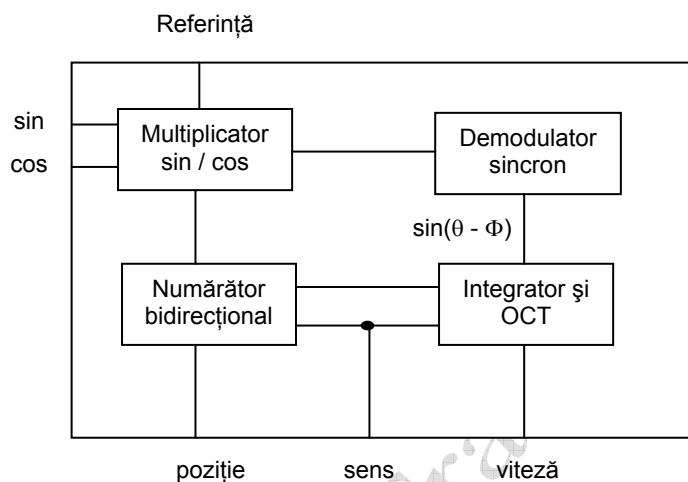


Fig. 13.3

Semnalele de intrare de la resolver modulate în amplitudine sinus și cosinus, reprezentând un unghi θ al arborelui, sunt multiplicare, respectiv, cu cosinusul și sinusul valorii curente Φ a numărătorului bidirecțional. Semnalele obținute sunt scăzute, rezultând:

$$VE = A \sin \omega t \sin(\theta - \Phi)$$

unde $A \sin \omega t$ reprezintă purtătoarea de referință. Acest semnal este demodulat sincron, iar un integrator și un oscilator controlat în tensiune formează o buclă închisă cu numărătorul /multiplicatorul, care caută să anuleze $\sin(\theta - \Phi)$. Când se obține zero, valoarea numărătorului reprezintă unghiul arborelui resolverului, acuratețea fiind dictată de convertor.

Există circuite integrate convertoare resolver - numeric cu ieșiri paralele sau serie, cu rezoluții de 10 ... 16 biți. Aceste convertoare resolver – numeric mai dau la ieșire un semnal dependent de sensul de rotație și un alt semnal proporțional cu viteza de rotație a resolverului, care are valori tipice între 0 și mii rot/min.

Transformatorul rotativ variabil conține o singură înfășurare bobinată pe un stator feromagnetic circular, cu un număr de dinți ca poli de polaritate alternată. Statorul este excitat cu un semnal în curent alternativ cu frecvența de 20 kHz și este încercuit de un rotor cu un ecran conductiv semicircular pe suprafața interioară. Ecranul reduce fluxul de legătură dintre rotor și stator, reduce inductanța porțiunii ecranate a statorului, micșorând astfel căderea de tensiune pe această porțiune a statorului. Tensiunea măsurată la o ieșire centrală din stator este liniar proporțională cu unghiul rotorului. Alte ieșiri la 90° și 270° față de zero nominal permit măsurarea unei forme de undă cu amplitudine în cuadratură față de semnalul de la ieșirea centrală. Acest lucru permite obținerea unui traductor absolut de unghi de 360° , prin tehnici de decodare folosite la TLDV.

Traductoare inductive pentru deplasări liniare

Transformatoarele cu spiră în scurtcircuit sunt senzori de deplasare absolută ce constau dintr-un miez în formă de E cu o bobină pe piciorul central, care este excitată cu tensiune alternativă de înaltă frecvență. În jurul piciorului central poate aluneca, pe o porțiune, un inel conductor din Al sau Cu, atașat la componenta mecanică a cărei poziție se măsoară. Inelul este echivalent cu secundarul în scurtcircuit al unui transformator. La deplasarea inelului, variază inductanța bobinei.

Acești senzori sunt folosiți într-o configurație de divizor de tensiune, cu o inductanță de referință similară, conectată în serie. Semnalul de ieșire nu depinde de temperatură și se pot ajusta ușor decalajele.

Transformatoarele liniare diferențiale variabile (TLDV) sunt construite dintr-o înfășurare primară de excitație, plasată central pe o carcasă cilindrică iar două înfășurări secundare identice sunt poziționate de o parte și de cealaltă a înfășurării primare. Secundarele sunt legate în serie, cu faze opuse, astfel încât, cu miezul poziționat central, tensiunea pe fiecare din cele două bobine secundare este zero. La mișcarea miezului de la un capăt la altul, semnalul de ieșire variază de la o valoare maximă în fază cu tensiunea de excitație, prin zero la o valoare maximă în antifază cu excitația.

TLDV sunt proiectate pentru a da ieșire liniară cu o toleranță tipică de $\pm 0,25\%$, pe o lungime specificată.

TLDV funcționează cu rapoarte de transformare de 10:1 ... 2:1, frecvența tipică de excitație fiind 2 ... 5 kHz. Semnalul de ieșire poate fi decodat în diverse moduri, existând circuite integrate specifice, analogice și numerice.

Un exemplu de schemă tipică de convertor TLDV - numeric este prezentată în fig. 13.4.

În automobile, TLDV se folosesc în sistemele de control a suspensiei, montați în interiorul cilindrilor hidraulici.

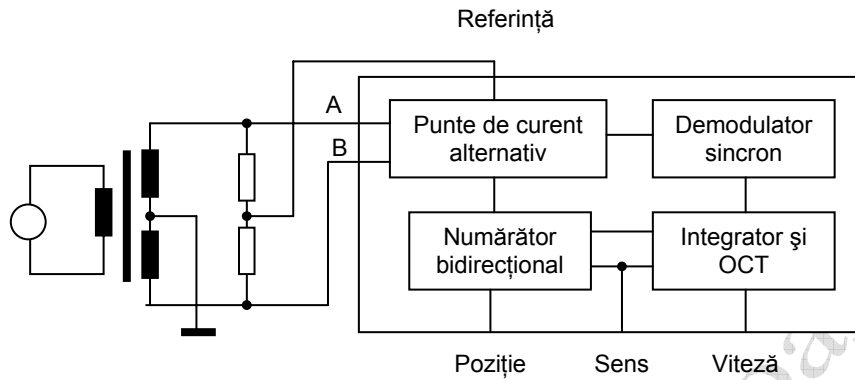


Fig. 13.4

Traductoare magnetostrictive

Magnetostricțiunea este o proprietate a materialelor care răspund la o variație de flux magnetic prin deformarea elastică a structurii lor cristaline.

Senzorii magnetostrictivi pentru deplasări liniare folosesc acest fenomen lansând o undă de compresie printr-un ghid de undă cilindric, cu un impuls de curent. Ghidul de undă trece printr-un inel deplasabil din magnetul permanent, la o anumită distanță de receptor. Unda de compresie generată se propagă spre receptor cu viteza de aproximativ 2800 m/s și determină o variație a fluxului, generând un impuls de tensiune într-o bobină de detecție. Distanța între inelul magnetic deplasabil și bobina detectoare se măsoară determinând timpul de zbor al impulsului.

Există disponibile traductoare magnetostrictive cu o cursă de peste 7,5 m.

13.4 Traductoare de viteze și accelerații

13.4.1 Introducere

Măsurarea vitezei de rotație în automobile are două game de aplicații principale:

- monitorizarea turației motorului, pentru a îmbunătăți controlul motorului și sistemele de control a tracțiunii;
- de control a regimului de croazieră și de evitare a blocării roților (ABS), pentru siguranță și manevrabilitate îmbunătățită la drum.

Măsurarea vitezei liniare este utilă în monitorizarea vitezei automobilului, pentru controlul autovehiculului, detecția obstacolelor și evitarea accidentelor.

În aplicațiile pentru automobile, trebuie luat în considerație mediul în care va funcționa traductorul. Măsurarea trebuie făcută cu acuratețe, traductoarele trebuie să fie robuste, fiabile și să funcționeze în prezența benzinei, lubrifianților, murdăriei și în condiții atmosferice aspre. Aceste cerințe au limitat folosirea unor alternative practice, cum sunt senzorii optici și cei în contact.

Pentru monitorizarea vitezei de rotație, cele mai practice dispozitive folosesc detecția câmpului magnetic. Acestea se bazează pe efectul Hall, reluctanță variabilă sau magnetorezistență.

Pentru monitorizarea vitezei de deplasare a automobilului și detecția obiectelor se folosesc traductoare optice, cu laser, cu microunde (radar) și cu ultrasunete. Pentru măsurarea vitezei liniare se folosește, tipic, efectul Doppler.

Senzorii de accelerație sunt folosiți în sistemele de comandă a pernei de aer, de control a cursei suspensiei, de evitare a blocării frânelor, tracțiune și navigație inerțială. Pentru astfel de aplicații sunt în exploatare curentă dispozitivele mecanice simple (comutatoare) și accelerometrele analogice microprelucrate din Si, plasate central pe caroseria automobilului.

13.4.2 Aplicații de măsurare a vitezelor în automobile

Măsurarea vitezei de rotație în automobile

Cei mai importanți factori în controlul motorului sunt viteza de rotație a motorului și unghiul axului cotit. Aceste semnale sunt folosite de unitatea de control a motorului pentru determinarea injecției de combustibil și a controlului aprinderii. Viteza de rotație a motorului este în gama 50 ... 8000 rpm. Rezoluția de măsurare necesară este de ≈ 10 rpm pentru a obține acuratețe de 0,2 %.

Viteza automobilului este în gama tipică 0 ... 180 km/h, cu o rezoluție de măsurare de 1 km/h.

Pentru măsurarea vitezei automobilului se măsoară viteza de rotație a arborelui de transmisie, folosind senzori optici sau senzori magnetici. O metodă bazată pe senzori magnetici folosește un magnet inel cu 4 ... 20 poli, în funcție de rezoluție. Variațiile fluxului magnetic determinate de rotația acestui magnet inel fixat pe arbore sunt detectate cu senzori magnetorezistivi legați în punte. Se folosesc, de asemenea, roți din material feromagnetic, cu dinți cu magneți și concentratoare de flux magnetic, iar viteza de rotație se detectează cu senzori Hall, cu magnetorezistoare sau cu reluctanță variabilă. Se numără impulsurile pe secundă, I , date de acești senzori:

$$I = N \cdot v \cdot k$$

unde N este numărul de poli magnetici de pe magnetul în inel sau numărul de dinți ai roții; k , o constantă determinată de raportul axului și mărimea roții iar v , viteza automobilului. Temperatura de funcționare este de $-40 \dots +120^{\circ}\text{C}$.

În aplicații ca ABS, ASR și transmisie pe patru roți, se folosesc senzori de viteză de rotație pe fiecare roată, pentru a determina alunecarea diferențială între roți.

În aplicațiile de transmisie electronică, informațiile de la senzorii de viteză de deplasare și de turație a motorului, ca și datele referitoare la cuplul de torsiune și poziția clapetei de accelerație sunt necesare pentru microcontroler pentru a selecta raportul de transmisie optim al cutiei de viteze. Transmișiile controlate electronic asigură o tranziție lină între diverse rapoarte de transmisie și sunt mai mici decât transmisiile automate convenționale, permițând astfel mai multe rapoarte de transmisie, performanțe mai bune, cuplu, eficiență și accelerații mai mari.

O altă aplicație pentru măsurarea vitezei de rotație este controlul vitezei de rotație a ventilatorului radiatorului. Viteza de rotație a ventilatorului depinde de temperatura lichidului de răcire. Se folosesc senzori cu efect Hall sau cu magnetorezistențe pentru a determina poziția armăturii și viteza de rotație a motorului ventilatorului.

Măsurarea vitezei liniare în automobile

Aplicațiile de măsurare a vitezei liniare în automobile sunt:

- detecția obstacolelor apropiate de automobile;
- evitarea coliziunilor;
- măsurarea distanței caroseriei față de drum pentru controlul cursei suspensiei;
- măsurarea vitezei automobilului pentru ABS (*Antilock Brake System*), ASR (de prevenire a rotirii rapide a roților pe drum lunecos) și navigație inerțială.

În aceste aplicații se folosesc traductoare cu ultrasunete pentru distanțe scurte, < 10 m și RF pentru distanțe mai lungi. Pentru măsurarea cu ultrasunete a obiectelor aflate la distanțe de $0,5 \dots 2$ m, frecvența impulsurilor este de aproximativ 15Hz . Impulsurile reflectate se întorc în $3 \dots 12$ ms. Viteza unui obiect (țintă) este dată de relația:

$$v = \frac{2L}{t}$$

unde L este distanța față de țintă iar t , timpul (viteza ultrasunetelor = 340 m/s).

În cazul măsurării cu ultrasunete a distanței între caroserie și drum, de 15...50 cm, pentru controlul cursei suspensiei, se folosește viteza de repetiție a impulsurilor de până la 50 Hz iar impulsul reflectat se întoarce în 0,9 ... 3 ms.

13.4.3 Aplicații de măsurare a accelerațiilor în automobile

13.4.3.1 Umflarea pernei de aer de protecție

Traductoarele de ciocniri și de comandă a umflării pernei de aer de protecție folosesc comutatoare mecanice localizate la 40 cm de punctele de impact și mai mulți senzori, uzual 3 ... 5 senzori, pentru detecție multipunct. Aceste dispozitive sunt senzori cu variația vitezei și sunt calibrați să realizeze contact atunci când variația vitezei din compartimentul pasagerilor depășește 20 km/h, aceasta fiind variația de viteză la care ocupanții locurilor din față se pot lovi de parbriz.

În cazul folosirii unui singur accelerometru analogic central, nivelul accelerației detectate este mai mic decât în cazul dispozitivelor multipunct. Pentru monitorizarea semnării ciocnirii, este suficient un singur accelerometru. Semnătura variază pentru diferite tipuri de caroserii și ciocniri. Ieșirea accelerometrului este monitorizată cu un microcontroler, care determină dacă a avut loc o ciocnire. La o viteză de 48 km/h, traductorul trebuie ca în 20 ms să detecteze ciocnirea și să comande umflarea pernei de aer de protecție care durează 50 ms. În acest timp, pasagerii s-au deplasat 18 cm spre parbriz. În timpul primelor 20 ms, decelerațiile pot atinge 20g, dar media pentru comanda umflării pernei este aproximativ 5g. Accelerometrul central poate fi piezoelectric, piezorezistiv sau capacitiv.

Accelerometrul localizat central este mai performant decât comutatoarele mecanice. Astfel, se reduce numărul de senzori și de fire de legătură, varianta cu un accelerometru central fiind mai ieftină. De asemenea, crește acuratețea de detecție și prelucrare a semnalului, crescând acuratețea de definire a nivelului la care este comandată perna. Cele mai avantajoase accelerometre folosite în acest scop sunt cele cu senzori capacitivi integrați, pentru că sunt ieftine și au posibilități de autotestare și diagnosticare.

Una din aplicațiile de viitor este folosirea sistemului de pernă de protecție împotriva ciocnirilor laterale. Sensorul folosit este unidirecțional, de aceea trebuie folosiți senzori suplimentari, montați perpendicular față de cei pentru detecția ciocnirilor frontale. Accelerometrul pentru această aplicație trebuie să aibă accelerația maximă 250g.

O altă aplicație pentru accelerometre este detectarea derapării în viraje, în sistemele de transmisie avansate; în acest caz gama de accelerații maxime de măsurat este de aproximativ 1 ... 2 g.

13.4.3.2 Controlul suspensiei

În aplicațiile de control a cursei suspensiei, arcurile foi sau cele fixate pe axe sunt înlocuite de stații la cele patru roți care formează suspensia activă. Fiecare stație de la o roată conține un cilindru umplut cu ulei, cu un piston pentru a fixa distanța caroseriei față de axe și pentru a izola caroseria de vibrațiile axelor, folosind un sistem de servoreacție.

Când autovehiculul cu suspensie convențională întâlnește un obiect pe drum, crește încărcarea pe roată, atunci când ea se ridică pe obstacol. Ca rezultat, se ridică și autovehiculul. Cu o suspensie complet activă, se detectează creșterea încărcării și se deschide o servosupapă pentru a transfera cantitatea necesară de ulei de la cilindru corespunzător, spre un rezervor. În consecință, încărcarea exercitată asupra caroseriei de fiecare roată este menținută la nivelul ei specific: caroseria rămâne la nivelul ei static. După ce obiectul a fost traversat, uleiul este pompat înapoi în cilindru, pentru a restabili condițiile de încărcare statice.

În sistemele de suspensie adaptivă, este colectată informația de la roțile din față și folosită pentru a prezice condițiile de drum pentru controlul roților din spate. Avantajul este scăderea prețului, deoarece numărul accelerometrelor scade la jumătate. În timpul virajelor, uleiul este de asemenea pompat în cilindrii roților exterioare, pentru a minimiza unghiul de ruliu.

Pentru suspensie activă, se folosește o combinație de traductoare ca: traductoare de turație a roților, accelerometre, de distanță între caroserie și drum și traductoare de nivel a pistoanelor din sistemul de suspensie. Informațiile de la traductoare sunt folosite de microcontroler pentru a comanda servosupapele.

13.4.3.3 Măsurarea vibrațiilor

Pentru motoarele cu ardere internă cu amestecuri sărace (pentru economie de combustibil și nivele scăzute ale gazelor poluante), arderea devine instabilă și apar fluctuații mari ale cuplului. În consecință, sunt necesare traductoare antidetonație și de vibrații pentru a da informațiile necesare microcontrolerului, încât acesta să regleze cantitatea de combustibil injectat și secvența de aprindere, pentru a obține stabilitate în condiții variabile în limite largi.

În aceste aplicații se folosesc trei tipuri de accelerometre:

- piezoelectrice;
- capacitive integrate;
- optoelectronice, pentru monitorizarea spectrului aprinderii în vederea detecției lipsei aprinderii sau detonației.

13.4.3.4 Sisteme de evitare a blocării frânelor

În sistemele ABS, de evitare a blocării frânelor, se folosește un accelerometru care dă informații despre variația vitezei automobilului. Această informație, împreună cu toate informațiile de la celelalte traductoare din sistem referitoare la viteza fiecărei roți, presiunea fluidului de frână și poziția pedalei de frână, sunt transmise către microcontroler, care procesează datele și ajustează presiunea fluidului de frână la fiecare roată, pentru frânare optimă.

Multe din elementele sistemului ABS pot fi folosite pentru detecția alunecării laterale, la preluarea virajelor cu viteze mari și a puterii de tracțiune a roților.

O soluție mai economică decât ABS dar cu acuratețe mai mică, este sistemul de control adaptiv, în care accelerometrele sunt folosite pentru măsurarea decelerației de frânare și a accelerației când se deschide clapeta de accelerație. Dacă are loc deraparea în timpul frânării, se reduce presiunea de frânare și se reglează pentru decelerație maximă sau clapeta de accelerație se reglează pentru tracțiune maximă.

13.4.3.5 Navigație inerțială

Au fost dezvoltate sisteme de navigație inerțiale pentru călătorii scurte și lungi. Sistemele de navigație inerțiale pentru distanțe mari obțin poziția printr-o metodă cu triangulație, ce folosește trei sateliți de navigație de referință, cu poziții cunoscute, pe orbite fixe. Există anumite situații, de exemplu când autovehiculul este în umbra clădirilor sau dealurilor înalte, când se pierde legătura cu toți cei trei sateliți. În asemenea situații, sistemele de ghidare se bazează pe giroscopae, ce detectează unghiul de rotație sau schimbarea direcției și /sau monitorizează mișcarea vehiculului față de drum.

Sistemele de navigație inerțiale pentru distanțe scurte, denumite și unități de măsurare inerțiale, se bazează pe folosirea accelerometrelor și giroscopelor de mare acuratețe. Datele tehnice ale accelerometrelor pentru aceste aplicații sunt: accelerația maximă ± 2 g, acuratețea $\pm 0,5$ % pe întreaga gamă de temperatură, banda de frecvență 0 ... 20 Hz și sensibilitatea axei transversale 0,5 %.

O unitate de măsurare inerțială centrală poate fi extinsă pentru a acoperi alte aplicații ca: suspensia, ABS, ASR și lucrul cu traductoare pentru evitarea ciocnirilor. Unitatea de măsurare inerțială poate fi proiectată și pentru a furniza datele de poziție pentru sistemele de autostrăzi pentru vehicule inteligente, care îmbunătățesc eficiența călătoriei și reduc consumul de combustibil și poluarea prin selectarea căii optime spre o anumită destinație. Călea se alege și pentru a evita blocările de trafic, zonele de drum în reparații și accidentele.

Există giroscopae integrate realizate prin microprelucrarea siliciului. În acest caz, se folosesc trei straturi de polisiliciu, cu primul și al treilea fixe, și al doilea strat liber să vibreze în jurul centrului său. Centrul este menținut în poziție de patru brațe cu arc, atașate la patru monturi. Acest dispozitiv poate detecta rotații în planul x - y și accelerații pe direcția axei z.

13.5 Traductoare de detonație a motorului

Detonația este un fenomen de vibrație nedorită a structurii care generează zgomot și este proprie motoarelor cu aprindere prin scânteie.

Descoperirea aditivilor pentru benzine (tetraetil de Pb), care îmbunătățesc stabilitatea procesului de ardere prin scăderea vitezei de ardere, oferă proprietăți de detonație a combustibilului care se potrivesc cu gama de cerințe a motoarelor. După 1970 însă, folosirea aditivilor în combustibili a căzut în dizgrație din două motive: mulți aditivi dau produse de ardere nedorite în aer (amestecurile de Pb sunt toxice la nivele scăzute) și otrăvesc catalizatoarele convertoarelor catalitice și ale senzorilor de oxigen, făcându-le ineficiente.

Legislația în domeniu s-a înăspriț treptat, astfel încât, după 1990, în SUA s-a interzis folosirea aditivilor în combustibili. Odată cu dispariția benzinei cu plumb, a reapărut fenomenul de detonație a motorului. Pentru evitarea detonațiilor, se scad rapoartele de compresie, dar crește consumul de combustibil.

13.5.1 Fenomenul de detonație a motorului

13.5.1.1 Definiția fenomenului de detonație

Detonația motorului cu aprindere prin scânteie este un mod de ardere nedorit, care ia naștere spontan și sporadic în motor, producând impulsuri mari de presiune asociate cu o mișcare vibratorie a încărcăturii și un zgomot caracteristic. Încercarea de a măsura cauzele fenomenului a dus la dificila problemă a observării undelor de presiune în cilindru.

De-a lungul anilor, aceste dificultăți au dus la inventarea unor tehnici de măsurare experimentale comparative ale cifrei octanice a benzinei.

Metoda de comparație de bază pentru evaluarea calităților de detonație a combustibililor implică folosirea unui motor simplu, cu aprindere prin scânteie, cu un cilindru, denumit motor standard, și un combustibil hidrocarbură pură – 100% izooctan. S-a descoperit că se poate reproduce fenomenul de detonație în laborator, folosind acest motor și acest combustibil.

Cifra octanică a benzinei este o modalitate de evaluare a caracteristicilor de detonație ale combustibililor, bazat pe o comparație a performanțelor motorului standard cu combustibilul de test și cu izooctanul pur. Astfel, izooctanul are cifra octanică 100, cifra octanică a combustibilului pentru motoare de autoturisme este 70 ... 90. Combustibilii cu cifre octanice peste 100 se folosesc pentru motoarele aparatelor de zbor.

S-au dezvoltat metode de măsurare a fenomenelor ce rezultă în urma detonației pentru motorul standard și motoare comerciale. S-a standardizat și un parametru de măsurare, denumit șoc (jerk), care este derivata a treia a deplasării blocului motor. Există scări pentru compararea performanțelor relative de detonație ale combustibililor și motoarelor bazate pe semnalul de ieșire de la senzorul de șoc. Informațiile de la senzorul de șoc trebuie corelate cu fenomenele de presiune din cilindru.

Frecvența de rezonanță fundamentală a semnalului de presiune generat de detonație depinde de geometria cilindrului motorului și de viteza sunetului în gazul de lucru (încărcătură). Caracteristicile de vibrație a structurii blocului motor care este excitat de detonația fundamentală, sunt determinate de funcția de transfer a blocului motor. Testele realizate pe un cilindru al unui motor cu aprindere prin scânteie cu șase cilindri, arată că, înalta frecvență a vibrației structurii este un indicator bun de detonație, în ciuda excitației de înaltă presiune și frecvență relativ joasă. Vibrația structurii indusă de evenimente mecanice, cum este deschiderea și închiderea supapelor, introduce zgomot care poate fi confundat cu vibrațiile induse de detonație.

Rezonanța de reverberație a cilindrului este în gama 2 ... 12kHz. O estimare grosieră a frecvenței de detonație pentru o anumită geometrie de cilindru de motor este dată de ecuația Draper:

$$f_r = C_{mn} \cdot \frac{v_s}{\pi R}$$

unde f_r este frecvența de rezonanță de detonație, C_{mn} este o constantă de vibrație, v_s este viteza sunetului în gazul din cilindru iar R este raza cilindrului. Cu această ecuație, presupunând că temperatura medie a gazului este 2000K, încât v_s este 900 m/s, frecvența primului mod rezonant circumferențial este 5,75 kHz. pentru un cilindru cu diametrul de 10 cm.

La măsurătorile de șoc din laborator s-au adăugat măsurarea undelor de presiune din cilindri și analiza semnalului. Cea mai folosită analiză de semnal este să se exprime amplitudinea maximă sau valoarea vârf la vârf a datelor de presiune filtrate trece bandă, ca un număr de evaluare a detonației, denumit *intensitatea detonației*.

Alte modalități de a descrie nivelul de detonație sunt valoarea efectivă, valoarea medie sau integrala valorii absolute a oscilațiilor de presiune filtrate trece bandă.

Pentru măsurători s-a folosit spectrul de putere al presiunii. S-au stabilit și metode bazate pe derivate, în funcție de variațiile rapide ale presiunii cilindrului în timpul fenomenului de detonație, folosind prima, a doua și a treia derivată a presiunii cilindrului.

13.5.1.3 Sistemul de măsurare și control al detonației

Pe lângă problema dezvoltării unui traductor adecvat de detonație, odată ce parametrul ce va fi folosit este selectat, trebuie fixate și alte considerații pentru efectuarea unui control adecvat.

Detonația motorului poate fi redusă în două moduri:

- prin reducerea avansului la aprindere sau
- prin deschiderea unei supape de descărcare a turbocompresorului din admisie.

Motoarele moderne au deja control electronic de declanșare a aprinderii, astfel că, tot ce mai este necesar pentru controlul detonației este o modificare simplă a secvenței de comandă a microcontrolerului. Strategiile de control pentru procesarea semnalului de detonație trebuie să aibă în vedere următoarele:

- frecvența de vibrație a detonației este specifică modelului de motor, dar este 2 .. 12kHz pentru motoare de autoturisme; ieșirea senzorului este astfel filtrată trece bandă cu un factor de calitate de ≈ 2 ;

- reverberațiile majore ale detonației pentru un anumit cilindru au loc într-o fereastră de timp care începe puțin după ce cilindrul atinge punctul mort superior și se încheie după 60 ... 90° unghi de rotație a arborelui cotit; secvența de control permite semnalului de detonație să treacă și să fie mediat, când motorul este în aceste ferestre de timp;

- pentru a evita defectarea motorului, când semnătura detonației depășește o valoare limită, sistemul de control întârzie aprinderea cu maxim 10° unghi de rotație arbore cotit, astfel motorul nu va fi în detonație nici în următoarele câteva perioade de ciclu; apoi controlerul avansează secvența până când procesul se repetă; acest lucru determină performanțe slabe pentru motor dar îi asigură o siguranță confortabilă;

- limita pragului de detonație este modulată în sistemul de control, pentru a crește cu viteza de rotație a motorului astfel încât să compenseze zgomotul de fond la viteze mari.

13.5.2 Senzori de șoc

Folosesc bastonașe magnetostrictive din aliaj de Ni, comprimate pe lungime și magnetizate la saturație de la un magnet permanent, acestea fiind elementele cu reluctanța magnetică cea mai mare din circuitul magnetic.

Vibrațiile motorului sunt transmise prin elementele de montare la bastonașele din aliaj de Ni. Aceste bastonașe au lungimea astfel încât se comportă ca elemente rezonante mecanic cu bandă mare de trecere. Comprimarea mecanică inițială a bastonașelor este suficient de puternică astfel încât oscilațiile mecanice care apar să le scoată din compresie. Undele prezente modulează liniar reluctanța magnetică a circuitului magnetic.

În bobina dispusă în jurul bastonașelor magnetostrictive se generează o tensiune proporțională cu viteza de variație a fluxului magnetic, care este invers proporțional cu reluctanța magnetică a bastonașelor. Deoarece vibrațiile se datorează accelerațiilor reverberațiilor detonației transmise prin blocul motor, tensiunea generată în bobină reprezintă derivata a treia a deplasării, deci șocul.

Semnalul de vibrație de la un motor în detonație este prezent aproape peste tot în blocul motor, cu semnalele suprapuse de la toți cilindrii. Pentru motoare de autobuze, care rar au mai mult de opt cilindri, partea principală a semnăturii detonației de la cilindri succesivi nu este suprapusă în timp ci succesivă, fără suprapunere. Timpul de întârziere determinat de distanța de la cilindru la senzor este mult mai mic de 1 ms, în timp ce timpii între cilindri sunt 2,5 ms.

Amplitudinea semnalului de detonație variază în diverse puncte de pe blocul motor. Nu există cel mai bun loc pentru senzor; însă, pentru un anumit model de motor există un punct de amplitudine maximă în care trebuie să se monteze senzorul. Pragul de detonație se determină experimental pentru un model de motor, cu senzorul montat în punctul de amplitudine maximă a semnalului.

13.6 Traductoare de cuplu motor

13.6.1 Introducere

Cuplul este unul din principalii parametri de stare ai unui motor; împreună cu viteza, este o mărime fundamentală legată de puterea de ieșire. Cuplul se poate defini ca momentul produs de arborele cotit al motorului ce tinde să rotească arborele de antrenare de ieșire și să furnizeze putere în sarcină. Cuplul înmulțit cu viteza de rotație reprezintă puterea furnizată de un arbore. Conform legii lui Newton, cuplul C este egal cu momentul de inerție de rotație, I înmulțit cu accelerația unghiulară a . Astfel, la viteză de rotație constantă, puterea instantanee este proporțională cu cuplul instantaneu.

Când un motor este folosit pentru acționarea unui autovehicul, operatorul poate comanda accelerație incrementală pozitivă sau negativă, cerând motorului cuplu mai mare sau mai mic. Dacă motorul este cu aprindere prin scânteie, acest lucru se realizează prin modularea debitului de aer din calea de admisie. Într-un motor diesel, operatorul controlează debitul de combustibil, care depinde liniar de putere. Pentru motoare cu variație lentă a vitezei și sarcinii, o variație incrementală a puterii are ca efect o variație a cuplului și deci o variație a accelerației.

Cuplul cvasistabil. Este definit ca valoarea medie continuă a cuplului ce variază lent comparativ cu perioada dintre cilindri, dar rapid în raport cu variațiile de mișcare și sarcina autovehiculului. Pentru a cuantiza această stare, un motor neîncărcat cuplat la o roată volantă inertială, poate accelera de la ralanti la viteză maximă în 1 ... 5 s când clapeta de accelerație este complet deschisă și această performanță este reprodusă dacă variația poziției clapetei de accelerație are loc în 20 ms sau 1 ms. Cuplul cvasistabil este parametrul de interes într-un sistem de control a motorului cu reacție comandată de cuplu.

Cuplul instantaneu. Sistemele actuale de control electronice ale motorului răspund mult mai rapid pentru acei parametri de stare asociați procesului de dozare pentru fiecare cilindru. Pregătirea combustibilului și a aerului din încărcătură și reglarea avansului la aprindere au loc într-o scară de timp măsurată în fracțiuni ale perioadei cilindrului, adică 30 μ s ... 20 ms, corespunzătoare stării instantanee a motorului. Este scara de timp a impulsurilor de cuplu, denumite cuplu instantaneu.

Pentru a folosi măsurătorile de cuplu instantaneu, trebuie să se evidențieze faptul că motorul cu piston este o mașină ciclică în care funcțiile principale și parametrii care le caracterizează sunt legate în secvențe mecanice de arborele cotit și axa cu came. Reglarea corectă a acelor parametri care pot fi variați independent de trenul de evenimente instantanee ale cilindrului, permite generarea globală a impulsurilor de cuplu în timp real.

13.6.2 Aplicații de măsurare a cuplului în automobile

Măsurători tradiționale de cuplu

Principala folosire în automobile a măsurătorilor de cuplu este la testarea și evaluarea motoarelor folosind frâna dinamometrică.

Traductorul de cuplu este introdus ca un ax de antrenare între motor și dinamometru; axul traductorului este supus legii de torsiune a lui Hooke și se măsoară răsucirea sa. Cuplul se măsoară cu o punte cu mărci tensometrice pe axul de antrenare. Răsucirea maximă este aproximativ 1° pe 0,3 m de arbore, pentru motoare cu puteri de 50 ... 500 CP.

Într-un traductor de cuplu de curent continuu cu mărci tensometrice, puntea tensometrică este alimentată de la o sursă exterioară prin inele alunecătoare și

tensiunea de dezechilibru este preluată de la punte la fel. Traductorul este voluminos, fragil și scump. Un traductor mai robust cu mărci tensometrice în curent alternativ se obține cu transformatoare rotative.

Importantă este punerea la punct de finețe a motorului pentru a furniza puterea maximă și consum minim de combustibil în diverse condiții. Deoarece puterea este cuplul înmulțit cu turația, dacă testele sunt realizate la turație constantă, putere maximă înseamnă cuplu maxim. Traductorul de cuplu este un indicator direct al modului în care sistemul de control îmbunătățește puterea.

La motoarele diesel de putere, prețul motorului depinde de puterea sa. Motorul este testat la ieșirea de pe linia de fabricație pentru putere specificată la turație nominală, măsurând cuplul și turația.

Ocazional, traductoarele de cuplu sunt folosite la un motor care se testează în condiții de exploatare. Acest lucru se realizează direct în aplicații staționare, dar nu instalat pe vehicul.

Măsurători de cuplu cu traductoare electronice

Pentru aplicații de control, un traductor de cuplu trebuie să aibă acuratețe mare și viteză mare de răspuns. Cele mai multe traductoare disponibile nu au viteză mare, fiind proiectate pentru teste dinamometrice. Alte cerințe:

- să fie robust, adică fără contact cu partea de acționare;
- să suporte impulsuri de cuplu de 10 .. 20 ori mai mari față de valoarea maximă măsurată, fără să-și degradeze acuratețea: pentru traductoare cu mărci tensometrice, asta înseamnă că traductorul trebuie să fie mereu în zona 5 ... 10% din gama de măsurare, unde nu are acuratețea maximă;
- instalarea traductorului să nu schimbe sensul sistemului de acționare, pentru evitarea deteriorării echilibrării, ce provoacă vibrații de torsiune;
- axul traductorului să fie foarte scurt; din nefericire, pentru un dispozitiv bazat de legea de torsiune a lui Hooke, aceasta înseamnă că unghiul de răsucire este foarte mic.

În ciuda acestor bariere pentru o proiectare satisfăcătoare, unele aplicații folosesc traductoare electronice de cuplu instantaneu.

Există metode de măsurare pe teren a puterii motoarelor cu valori de 400 ... 500 CP. Pentru motoare montate pe autovehicule cu puteri mai mari, acest lucru este dificil pentru că nu sunt disponibile traductoare electronice robuste, iar motoarele sunt adesea montate pe mașini foarte mari, funcționând pe teren. Nu există dinamometre atât de mari pentru a încărca motorul la putere maximă.

Autovehiculele de transport pasageri trebuie să echipate cu sisteme de diagnosticare a motorului, care să includă un detector de rateu de aprindere.

Motorul cu piston poate fi configurat în modul cu buclă de control, dacă este echipat cu traductor electronic cu bandă de frecvență foarte joasă, capabil să răspundă la fel de rapid ca motorul sau transmisia.

13.6.3 Traductoare directe de cuplu

a) Traductoare de cuplu de reacție

Cuplul poate fi măsurat și cu celule de cuplu de reacție. Acest lucru este util pentru a măsura cuplul cvasi-static, dar nu este un sistem bun de măsurare pentru cuplul instantaneu, deoarece și motorul și sarcina au inerție și amortizare considerabile, care atenuază impulsul de cuplu și introduc întârzieri de fază. Aceasta nu este o măsurătoare bună pentru sisteme de control electronice, deoarece elementele de montare ale motorului în autovehicul sunt proiectate să atenueze și să amortizeze instabilitatea verticală dată de iregularitățile drumului sau sarcinii. De asemenea, în funcție de timp, temperatură, concentrația de ozon și alte variabile, acest sistem de măsurare tinde să se rigidizeze și să schimbe îndoirea arcurilor motorului pe montură, în funcție de cuplu.

b) Traductoare de efort de torsiune

Traductoare cu vector magnetic. Aceste traductoare funcționează fără contact, pe principiul că domeniile magnetice dintr-un ax feromagnetic ce furnizează cuplu sunt distribuite aleator în lipsa cuplului, dar fiecare domeniu este ușor rotit în direcție tangențială, când axul este răsucit în prezența cuplului. Dacă se plasează în jurul axului o înfășurare alimentată cu tensiune alternativă, înconjurată de patru înfășurări de detecție legate în punte, amplitudinea tensiunii la ieșirea punții este proporțională cu componenta tangențială a vectorului magnetic și astfel cu răsucirea și cuplul.

Domeniile magnetice nu sunt distribuite perfect statistic pe o gamă mică de unghi a axului și nu pot fi folosite pentru măsurarea cuplului instantaneu. Pe un unghi mic al arborelui, vectorul de cuplu mediu nu este zero când cuplul este zero și ieșirea are un zgomot cu o formă care se repetă la 360° .

Traductoarele cu vector magnetic au acuratețe rezonabilă pentru măsurarea cuplurilor cvasi-statice, dar au raport semnal / zgomot mic la măsurarea cuplurilor instantanee.

S-a realizat și o variantă simplificată și miniaturizată a acestui traductor, în care puntea a fost înlocuită cu o singură bobină tangențială, dar aceasta tot nu poate măsura cuplul instantaneu.

Măsurarea optoelectronică a răsucirii. Se bazează pe modificarea factorului de umplere a unor impulsuri optice la trecerea prin două discuri cu fante, fixate la capetele unui ax. Un asemenea traductor este fără contact și robust, dar necesită lungime mare a axului și adaugă rezistență la arcuirea transmisiei.

Traductoarele capacitive de răsucire folosesc electrozi cu segmente intercalate, decalajați cu $1 \dots 2^\circ$, fixați pe două discuri plate. Un disc este fix iar

celălalt se rotește cu arborele cotit. Se folosesc două perechi de astfel de electrozi bazate pe măsurarea fazei, pentru a obține semnal instantaneu, proporțional cu torsiunea arborelui. Traductorul are nevoie de o anumită lungime a axului, dar este mai practic decât cel optoelectronic. De asemenea, poate indica și poziția unghiulară a arborelui cotit.

13.6.4 Traductoare indirecte de cuplu

Măsurarea indirectă a cuplului necesită calcule în timp real în microcontroler împreună cu măsurarea cu precizie a poziției unghiulare instantanee a arborelui cotit.

Traductoarele de presiune instantanee a cilindrilor folosesc traductoare de presiune piezoelectrice, bazate pe monocristale dopate, din cuarț sau piezoceramice.

Semnalele de la traductoarele de presiune a cilindrilor necesită procesări în timp real folosind circuite integrate de procesare numerică (DSP), pentru a produce semnalele de cuplu. Într-una din metode, se filtrează zgomotul, iar semnalul de presiune este multiplicat cu unghiul instantaneu al arborelui și integrat pe gama reprezentativă de unghi a mișcării în forță a cilindrului.

Analiza numerică a perioadei

Când un motor funcționează la viteză mică și sarcină mare, viteza unghiulară instantanee a arborelui de ieșire variază cu frecvența fundamentală a cilindrilor, deoarece mișcarea de compresie a fiecărui cilindru absoarbe cuplu. Raportul semnal / zgomot a măsurătorii vitezei unghiulare instantanee (sau perioada instantanee) scade la creșterea vitezei motorului și scăderea sarcinii, dar este o cale utilă pentru deducerea cuplului motorului.

Perioada instantanee a formei de undă este o variație în jurul valorii medii a perioadei și se măsoară cu un traductor de poziție a arborelui cotit, de precizie, cu mulți dinți.

Când o bujie produce scânteia sau este injectat combustibilul într-un cilindru diesel, presiunea din cilindru crește datorită întârzierii aprinderii, timpului de propagare a flăcării finit și constant și datorită creșterii temperaturii ce face să crească presiunea. După ardere presiunea scade pe măsură ce pistonul se deplasează sub presiunea gazelor. Cuplul mediu cel mai bun este atins la cilindrul unde impulsul de presiune înmulțit cu $\sin\theta$ (θ fiind unghiul arborelui cotit) atinge un maxim prin integrare. Datorită întârzierilor, aprinderea trebuie să aibă loc mai înainte, pentru a poziționa vârful de presiune lângă această valoare. Unghiul de avans al aprinderii trebuie să fie mai mare la turații mai mari deoarece timpul de întârziere în propagarea flăcării acoperă un unghi mai mare al arborelui cotit la turații mai mari.

13.7 Traductoare de presiune pentru automobile

13.7.1 Măsurarea presiunii în automobile

În faza de dezvoltare și de utilizare a automobilelor sunt necesare diverse măsurători de presiune pentru optimizarea performanțelor, determinarea funcționării în siguranță, asigurarea conformității cu legislația și informarea șoferilor. Traductoarele monitorizează funcțiile autovehiculului, dau informații sistemelor de control, măsoară parametrii și oferă date pentru diagnosticare.

Traductoarele de presiune folosite în automobile sunt de la dispozitive mecanice, cu deplasarea poziției la aplicarea presiunii, la diafragme din cauciuc sau elastomer și traductoare semiconductoare bazate pe Si.

Tipurile de măsurători de presiune sunt divizate în cinci categorii de bază, independente de tehnologia de măsurare folosită: presiune relativă sau efectivă, absolută, diferențială, nivel de lichid și comutator de presiune (manocontact).

13.7.2 Aplicații ale traductoarelor de presiune în automobile

Cerințele de măsurători de presiune în automobile sunt de la cele de bază, de exemplu măsurarea presiunii uleiului, la cele complicate, de exemplu presiunea diferențială a aerului între o parte și cealaltă a autovehiculului.

Specificațiile automobilelor și ghidurile de testare au fost dezvoltate și publicate de SAE (*Society of Automotive Engineers*), în special pentru traductoare de presiune absolută din galeria de admisie.

Traductoarele de presiune dintr-un automobil se folosesc, uzual, pentru măsurarea presiunii din galeria de admisie și a presiunii uleiului din motor și au potențialul multor alte măsurători de presiune.

Presiunea din galeria de admisie, barometrică și presiunea amplificată turbo.

Presiunea absolută din galeria de admisie este folosită ca intrare pentru controlul combustibilului și aprinderii în sistemele de control a motoarelor cu ardere internă. Sistemul de viteză - densitate ce folosește traductorul de presiune absolută din galeria de admisie este preferat în locul controlului debitului masic de aer pentru că este mai ieftin, dar standardele de poluare determină mulți producători să folosească debitul masic de aer la modelele viitoare.

Rezoluțiile mari de 32 de biți ale controlerelor de motoare superioare și frecvențele de lucru mari dau acuratețe mare traductoarelor de presiune absolută din galeria de admisie. Schimbările anterioare de la controlere de 8 biți la 16 biți au

duș la o îmbunătățire de două ori a rezoluției conversiei numerice pentru presiunea de admisie din galerie. Unitatea de control pe 8 biți realizează conversia analog - numerică într-o întrerupere de 4 ms a timer-ului, pentru a menține un echilibru cu alte controale, rezultând un timp de întârziere de 1,1 ms, în perioadele de întreruperi suprapuse. Microcontrolerul de 16 biți realizează conversia analog - numerică la fiecare 2 ms, reducându-se timpul de întârziere la 0.3 ms.

Banda de eroare a traductorului de presiune absolută din galerie de admisie a fost restrânsă, iar acuratețea este 1% pe întreaga gamă de temperatură a automobilului.

Adeșea sunt necesare traductoare barometrice în sistemele cu debit masic de aer, pentru a da informații de altitudine pentru calculatorul de control al motorului. Traductoarele de presiune absolută a rezervorului și de presiune barometrică sunt montate în module de control.

Turbocompresoarele tipice pot crește presiunea cu 80 kPa peste presiunea naturală aspirată de motorul cu ardere internă. Crește astfel presiunea absolută maximă a senzorului la 200 kPa, iar celelalte cerințe sunt scalate corespunzător.

Presiunea uleiului

În automobile a fost inițial măsurată cu o diafragmă de cauciuc care închide un set de contacte ce dă un semnal luminos de presiune joasă a uleiului sau mișcă un potențiomtru pentru a da un semnal analogic pentru un instrument indicator.

Sistemele electronice de măsurare a presiunii uleiului folosesc senzori de presiune piezorezistivi din Si, circuite de protecție împotriva vârfurilor de tensiune, circuite de amplificare a semnalului de la ieșirea senzorului și circuite de comandă de ieșire atât pentru o pompă de combustibil cât și pentru un aparat de măsură electromagnetic. Circuitele de comandă de ieșire cu TEC dau curenți de 10 A, datorită radiatorului realizat din carcasa traductorului.

Unitatea electronică folosește tensiune de alimentare de 9 ... 16V și funcționează într-o gamă de temperaturi de -40 ... +150°C, cu acuratețe $\pm 3,25\%$ și neliniaritate $< \pm 0,25\%$.

Carcasa traductorului se assemblează ușor, iar traductorul se interfațează printr-un inel cu închidere ermetică. Materialele pentru carcasă și gelul protector care acoperă traductorul sunt speciale, traductorul fiind garantat minim 10 ani.

Compatibilitatea de mediu

Traductoarele de presiune trebuie interfațate frecvent cu medii cu cerințe mai mari decât cele ale componentelor electronice. De exemplu, măsurarea presiunii uleiului de motor sau de transmisie, a presiunii combustibilului sau a nivelelor de fluide (ulei, benzină, fluid de răcire, etc.) necesită expunerea carcasei traductorului la fluide, ceea ce ar determina nefuncționarea circuitelor semiconductoare.

Problemele de interfațare la mediu sunt tratate în funcție de aplicație. Cerințele de preț limitează folosirea oțelului inoxidabil pentru carcase, dar se folosesc polimeri protectivi, materiale plastice și cauciuc stabile chimic și ieftine.

Presiunea uleiului de transmisie și presiunea de frânare

Presiunea din transmisie este mărime de intrare pentru schimbarea treptei de viteză la transmisia controlată de calculator și se măsoară cu traductoare similare celor realizate pentru presiunea uleiului de motor.

Presiunea dintr-un sistem hidraulic, de exemplu din pompa centrală la un sistem ABS, este mult mai mare decât presiunea uleiului de transmisie care necesită un traductor cu presiunea relativă minim 500 psi. Presiunile dinamice relative din conductele de frână pentru autovehicule grele, pot fi sub 150 psi.

Optimizările pentru dezvoltarea sistemelor ABS includ controlul decelerației pentru a obține distanța cea mai scurtă de oprire posibilă cu un control cât mai bun al direcției. Stabilitatea crescută a direcției se obține prin reducerea vitezei de decelerare a roților din spate. Controlul tracțiunii îmbunătățește stabilitatea în timpul accelerării și realizează control independent pentru fiecare roată.

Autovehiculele pot avea un singur traductor de presiune pentru monitorizarea presiunii din sistemul hidraulic. Există sisteme care dau informația de presiune a frânelor prin detectarea debitului în motoarele din sistem. Pentru sistemul ABS-V1, nu este necesar un traductor de presiune pentru a obține presiune de frânare optimă la fiecare roată. Alte sisteme însă se bazează pe viteza de apăsare și eliberare a frânei pentru a controla blocarea. Autovehiculele comerciale au mai multe traductoare pentru a detecta presiunile de frânare. Traductoarele cuplate la cilindrii de frână dau informații despre presiunea reală, care este comparată cu valoarea de referință, memorată în unitatea de control.

Presiunea pneurilor

Monitorizarea continuă a presiunii pneurilor crește economia de combustibil și siguranța autovehiculelor. Pneurile cu presiune prea mică au frecare de rulare mare și cresc consumul de combustibil.

Pneurile cu presiune prea mare sunt suprasolicitate și se pot sparge în mers. Umflate necorespunzător, pneurile au forme neregulate care scad durata de viață. Sistemele disponibile de măsurare a presiunii pneurilor constau din câte un traductor de presiune (sau comutator) la fiecare roată, indicator de turație a roții, traductor de temperatură, un transmițător de radiofrecvență, receptor / controler electronic și display. Presiunea pneurilor crește cu temperatura aproximativ cu 1,5 psi la fiecare creștere cu 10°C a temperaturii aerului din pneuri, astfel că sistemul trebuie să aibă prevăzute corecții. Creșterea bruscă a temperaturii și presiunii este detectată de aceste sisteme care dau un avertisment privind o posibilă explozie a pneului.

Presiunea gazelor de evacuare recirculate

Presiunea de întoarcere a gazelor de evacuare recirculate (EGR - *exhaust gas recirculation*) și o presiune diferențială se manifestă pe supapa EGR, folosită pentru controlul emisiilor de NOx. Supapa este modulată de un vacuum ce ridică un cep și permite recircularea gazelor de evacuare. O variație a presiunii

vacuumului de la 50 la 90 mmHg este suficientă pentru a deschide complet supapa, iar presiunea diferențială tipică pe supapă este 200 mmHg. Măsurătorile de presiune sunt realizate în timpul fazei de dezvoltare pentru a stabili caracteristici de funcționare a sistemului. Tipic, se folosește un traductor de poziție pentru a măsura poziția supapei EGR.

Pompa de carburant și presiunea vaporilor

Evaporările care au loc atunci când motorul este oprit, sunt stocate curent într-o canistră cu carbon de aproximativ 850 ... 1500 cm³, până când motorul este în funcțiune. Vaporii sunt apoi consumați de camera de ardere și convertorul catalitic. Implementarea vaselor de siguranță pentru depozitarea vaporilor de hidrocarburi necesită canistre de depozitare în automobil cu volum de 3 ... 4 ori mai mare decât volumul canistrelor existente. Dacă în sistem trebuie detectate scurgerile, se folosește un traductor de presiune de diagnosticare.

Filtrul de combustibil și regulatorul de presiune în rezervorul de benzină stabilesc traseul combustibilului. Pompa de benzină este în rezervor, eliminându-se conducta de retur a combustibilului. Sistemul menține temperaturi scăzute ale combustibilului din rezervor, scăzând evaporările.

Prezența suprapresiunii

Presiunile combustibilului de alimentare, pentru automobile cu sisteme de injecție, sunt < 75 psi, dar pompele de combustibil dezvoltă până la 3200 psi pentru a deschide injectoarele. Vârfulurile de presiune sunt reflectate înapoi prin sistemul de alimentare, care are sub 300 psi în timpul fiecărui impuls de injecție a combustibilului.

Suprapresiunile create de rateuri dau o presiune > 75 psi la traductorul de presiune absolută din instalația de alimentare cu combustibil din rezervor. Tehnicile folosite pentru prevenirea defecțiunilor datorate suprapresiunilor sunt: stopuri mecanice în traductor, filtrarea mecanică a impulsului și un traductor proiectat să funcționeze la gama de suprapresiune.

Implicațiile asupra presiunii a altor tipuri de motoare și combustibil.

Legislația cere vehicule cu emisie scăzută de noxe sau chiar emisie zero. Gazul natural comprimat și pilele cu hidrogen necesită traductoare de presiune.

Gazul natural comprimat este presurizat la 3000 psi și sistemul de distribuție include reglatoare de presiune, traductor, supape și solenoizi de aer pentru mers în gol. Înainte ca gazul natural să intre în motor, un regulator reduce presiunea gazului până aproape de presiunea atmosferică. În ambele porțiuni ale sistemului, de presiune mare și mică, sunt necesare traductoare de presiune.

Pilele de hidrogen sunt o altă sursă potențială de energie pentru folosire în vehicule electrice. Într-o variantă denumită cu membrană cu schimb de protoni, se folosește un turbocompresor pentru presurizarea sistemului și a menținerea hidratarea membranei. Este nevoie de o presiune de minim trei atmosfere (0,3 MPa) pentru a

înlătura apa. Această presiune sau căderea de presiune pe membrană necesită monitorizare în timpul funcționării.

Presiunea de ardere

Se măsoară direct pentru detecția rateurilor. Presiunea mare (≥ 16 MPa) și gamele de temperaturi combinate cu alți factori de mediu ridică prețul de proiectare al unui astfel de senzor. De aceea, în locul măsurării directe a presiunii se folosesc alte tehnici (măsurarea cu fibre optice a emisiei luminoase a arderii și traductoare de cuplu fără contact).

La motorul cu ardere internă cu aprindere prin scânteie, arderea este un proces la volum constant și ciclul de putere este analizat folosind diagrame presiune - volum sau presiune - unghi arbore cotit. Există mai multe tehnici pentru aceste măsurători în mediu de laborator.

Măsurarea directă a presiunii (în cilindru) se face cu senzori piezorezistivi de diametru mic, plasați în (sau aproape) de bujii și elemente piezoelectrice sub formă de rondele, plasate sub bujii. Pentru acești senzori este necesară o frecvență naturală mare datorită măsurătorilor dinamice implicate în procesul de ardere.

Măsurarea indirectă înregistrează cuplul arborelui și deplasarea de fază optică.

Alte măsurători de presiune

Un sistem cu suspensie adaptivă poate fi realizat cu un amortizor cu absorbant de șoc, controlat de presiunea aerului. Sistemul are două pompe de aer și două solenoizi de reglare a presiunii aerului, bazați pe semnale de la traductoare, printre care un traductor de presiune a aerului în partea din spate a autovehiculului care măsoară încărcarea. Circuitul de comandă selectează suspensie ușoară (soft), medie sau grea (hard). Un alt sistem utilizează un rezervor de aer încărcat la o presiune de 1 MPa de un compresor. Un comutator de presiune monitoarează scăderea presiunii sub 760 kPa pentru a reîncărca rezervorul. Amortizoarele cu aer funcționează la 300 kPa, neîncărcate și la 600 kPa, la încărcare maximă pe spate.

Sistemele de încălzire, ventilare și aer condiționat cu agent de răcire CFC-12. încep să fie înlocuite cu cele cu agent de răcire HFC-134a. În al doilea caz eficiența scade cu 6 %, presiunea de descărcare a compresorului este mai mare cu 175 kPa și temperatura de descărcare mai mică cu 8°C.

Măsurarea presiunii dezvoltate la umflarea pernei de aer de protecție este o parte a criteriilor de evaluare, calificare și acceptanță de lot pentru tehnicile de umflare a pernei de aer de protecție. Măsurătorile de presiune de vârf necesită răspuns în gama zeci ms. Presiunile pernei umflate sunt sub 100 kPa. Dispozitivele de umflare hibride folosesc gaz inert stocat (de exemplu argon) și traductor de presiune pentru monitorizarea stării gazului stocat.

Sistemele de injecție a combustibilului tip acumulator, din camioanele speciale grele, pentru motoare diesel cu injecție directă, au combustibilul presurizat la 20 ... 100 MPa în acumulator, cu o pompă de mare presiune. Presiunea acumulatorului este monitorizată pentru a reduce particulele de impurități în suspensie în aer (fum,

funingine). O altă metodă de reducere a particulelor este folosirea fibrei ceramice drept filtru într-o canistră. Un traductor de presiune monitorizează presiunea inversă și permite regenerarea filtrului prin arderea particulelor acumulate. Se folosește un element de încălzire în capcană, care permite atingerea unei temperaturi de 700°C în filtru.

13.7.3 Tipuri de traductoare de presiune

Pentru măsurarea presiunilor dinamice și statice în automobile se folosesc traductoare bazate pe: diafragmă - potențiomtru, transformator liniar diferențial variabil (TLDV), cameră aneroidă, senzori capacitivi din Si sau ceramici, mărci tensometrice piezorezistive, senzori piezoelectrice ceramici sau cu strat subțire și deplasarea de fază optică. Traductoarele recente dau un semnal electric ușor interfașabil la microcontrolere.

Frecvent folosite sunt dispozitivele mecanice, în laborator pentru calibrarea și dezvoltarea componentelor, sau în autovehicule în timpul fazelor de dezvoltare ale sistemelor. Dispozitivele mecanice folosite sunt: tubul Bourdon, diafragmele, tuburile ondulate, manometrele și aparatele de măsurare cu contragreutate.

Manometrul este folosit ca instrument de măsurare a presiunii și ca standard de calibrare a altor instrumente. Este simplu, cu acuratețe mare și se bazează pe măsurarea înălțimii unei coloane de lichid. Tipuri de manometre: cu tub U, cu rezervor și cu tub înclinat.

Alte traductoare de presiune folosite: McLeod, Pirani, Alpatron, cu senzori cu termocuplu, etc.

13.8 Traductoare de debit pentru automobile

Măsurarea debitului este importantă pentru optimizarea performanțelor mai multor subsisteme cheie de control al motorului. Traductoarele de debit masic de aer înlocuiesc calculul indirect al debitului masic de aer din admisie pentru creșterea performanțelor și economicitate.

Dacă parametrul de măsurat este debitul masic de gaz și nu debitul de volum, se folosesc mai multe traductoare. Pentru debite de lichide, se poate măsura fie debitul de masă sau cel de volum, deoarece densitatea unui lichid variază foarte puțin cu presiunea atmosferică sau cu temperatura.

Debitul masic de aer de admisie

Injectia electronică a combustibilului a înlocuit carburatorul din motorul automobilului datorită performanțelor și fiind singura modalitate de a îndeplini

standardele de emisii poluante. Pentru a realiza injecția de combustibil, trebuie determinat debitul masic de aer care intră în motor. Pentru determinarea vitezei debitului masic de aer se folosesc două metode. Prima calculează viteza de variație a debitului masic prin măsurarea vitezei de rotație a motorului (v_m), temperatura aerului de admisie (T_a) și presiunea din galeria de admisie (p). Se cunosc volumul nominal al cilindrului (V) și constanta gazelor pentru aer (R_a). Eficiența volumetrică a motorului (η) poate fi modelată ca o funcție de viteză.

Mărimea debitului masic de aer se calculează cu relația:

$$m_a = (v_m \cdot V \cdot \eta \cdot p) / (R_a \cdot T_a)$$

Folosind un traductor de debit masic, se elimină aceste calcule și se măsoară direct debitul masic. Crește astfel acuratețea în condiții dinamice, deoarece presiunea din galeria de admisie variază mai lent decât debitul masic.

Eficiența volumetrică afectează calculul vitezei densității deoarece variază când sistemul de admisie devine contaminat. Dezavantajul cel mai mare al folosirii unui traductor de debit masic este gama dinamică mare. Alți factori importanți în selecția traductorului sunt: rezistența la contaminanți și defectarea cu particule, acuratețea, posibilitatea de a măsura debitul invers și sensibilitatea la cursul din aval și din amonte din conductă.

Pentru performanțe optime, combustibilul este injectat în fiecare cilindru în mod secvențial. Acest lucru necesită folosirea semnalelor de la traductoarele de pe arborele cotit și de pe arborele cu came pentru a secvenția injecția combustibilului în galeria de admisie, în punctul corect, în timpul de admisie. Injectorul de combustibil este alimentat cu presiune constantă și este modulată în durată, pentru a controla cantitatea de combustibil injectat.

Viteza de variație a masei de combustibil injectat este:

$$m_c = m_a \cdot \lambda$$

unde λ este raportul stoichiometric aer/combustibil.

Debitul de combustibil pentru măsurarea combustibilului consumat pe distanța parcursă

Sistemele de informare a pilotului ce prezic distanța până la alimentare și combustibilul consumat necesită cunoașterea debitului de combustibil. Acesta se află prin sumarea timpilor activi ai injectorului la una sau mai multe turații. Debitul de combustibil se măsoară prin diferența între combustibilul ce intră în rampa de carburant și cel returnat. Metoda are erori deoarece debitul de combustibil pe tur și cel pe retur sunt mult mai mari decât debitul net de combustibil consumat. Pentru

scăderea erorilor se elimină conducta de retur și se modulează pompa de combustibil pentru a menține presiune constantă.

Debitul de recirculare a gazelor de evacuare

Recircularea gazelor de evacuare se realizează pentru reducerea emisiilor de oxizi de azot, prin răcirea procesului de ardere. Dacă supapa de recirculare a gazelor de evacuare începe să se colmateze sau doar să se deschidă parțial, debitul ei se va reduce și cresc emisiile de oxizi de azot.

Se impune diagnosticarea defectelor care duc la creșterea emisiilor nocive. Măsurarea debitului este o modalitate de diagnosticare a supapei de recirculare a gazelor de evacuare defectă. O altă modalitate este folosirea unui traductor de oxizi de azot pentru a măsura emisiile.

Debitul pompei secundare de aer

Pompa secundară de aer se folosește pentru a reduce emisiile de CO și de hidrocarburi (HC). Verificarea funcționării ei corecte se face prin măsurarea valorii debitului ei. O altă modalitate, însă scumpă, este să se măsoare direct emisiile de CO și HC din gazele evacuate.

Debitul de combustibil pentru controlul cu reacție a raportului combustibil / aer

Sistemul de control al motorului tratează debitul de combustibil ca o variabilă dependentă, măsurând debitul de aer din admisie și apoi comandând injectoarele pentru a injecta cantitatea corectă de combustibil în motor. Se presupune că fiecare injector este precis calibrat. Injectoarele folosesc o supapă cu un ac într-un orificiu a cărui suprafață este proporțională cu pătratul diametrului, astfel încât eroarea debitului de combustibil este proporțională cu dublul toleranței diametrului.

Tehnologii de măsurare a debitelor

a) Tehnologii de măsurare a debitelor de gaze

Conceptul termic este întâlnit în toate motoarele care folosesc măsurarea directă a masei aerului din admisie. În funcție de varianta de proiectare, se obține o măsurătoare aproape directă a debitului masic și simplifică strategia de control a motorului.

Ideea de bază este să se încălzească un fir subțire și, la trecerea debitului de gaz peste el, firul se răcește prin convecție. Cantitatea de căldură înlăturată se măsoară cu un circuit electronic și este proporțională cu viteza de variație a debitului masic de aer conform relației:

$$\Delta P = \Delta T \left[C_t + (2\pi d \cdot C_a \cdot m_a)^{1/2} \right]$$

unde ΔP este variația puterii electrice, ΔT diferența de temperatură între aer și senzor, C_t conductivitatea termică a aerului, d diametrul firului cald, iar C_a este capacitatea termică a aerului.

Primul termen al ecuației nu este proporțional cu viteza de variație a debitului. De aceea, el trebuie modelat și înlăturat sau variația la temperatură ambiantă trebuie să fie minimizată. Adaptorul electronic pentru firul cald folosește o punte Wheatstone, cu firul cald și trei rezistențe fixe, alimentată de la ieșirea unui amplificator diferențial, care are intrările la ieșirea punții. Ieșirea acestei scheme de măsurare este preluată de pe rezistența legată în serie cu firul cald și legată la masă. Circuitele de control dau fie putere constantă firului cald sau acesta este folosit la diferență de temperatură constantă, deasupra temperaturii ambiante; a doua variantă este preferată pentru că ușurează compensarea cu temperatura.

Una din problemele firului cald este că particulele fine de praf pot trece prin filtrul de aer și pot lovi firul cald cu suficientă forță pentru a-l rupe.

Traductoarele integrate microprelucrate de debit de aer înlocuiesc senzorii cu fir cald din automobile. Se pot realiza astfel traductoare calorimetrice, prin separarea elementului de încălzire de senzor. Avantajul este că, în relația de calcul nu mai apare un termen constant (ca primul termen al relației). Problema traductoarelor microprelucrate este prevenirea contaminării.

Presiune diferențială. Un mod simplu de măsurare a debitului de volum este plasarea unei obstrucții în canalul debitului și măsurarea presiunii diferențiale. Debitul este proporțional cu rădăcina pătrată din presiunea diferențială. Metoda este folosită pentru debite mici.

b) Tehnologii de măsurare a debitelor de lichide

Tehnologiile uzuale de măsurare a debitelor de lichide sunt: cu presiune diferențială (tub Venturi, Pitot, etc), cu turbine, cu stingerea vârtejurilor, etc.

Alte tehnologii folosite sunt: cu ultrasunete, cu efecte giroscopice, cu ionizarea gazelor.