

Négyütemű belsőégésű motorok töltetcserejét befolyásoló tényezők vizsgálata

Investigation of Charge Exchange in Four-stroke Inner Combustion Engines

Studiul factorilor de schimbare a gazelor la motoarele în patru timpi

TOLLÁR Sándor
tudományos segédmunkatárs

Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke
3515 Miskolc-Egyetemváros, Magyarország
Tel.: +36 46 565111/1236; Fax: +36 46 565471;
aramts@uni-miskolc.hu; www.aht.uni-miskolc.hu

ABSTRACT

In this paper I would like to present the charge exchange of the internal combustion engines. This process is partly reason of the motor losses, so impact to the efficiency of the engines. Charge exchange in the course of the intake and exhaust sides processes taking, the pressure oscillations. I review techniques used in current practice which is to tune the system on the intake and exhaust sides. So here's the test options to help you get a better picture than the current processes occurring in the system, thus providing a further tool for design. A brief outline of the test program and its available tools.

ÖSSZEFOGLALÓ

Ebben a cikkben a belsőégésű motorok motorikus veszteségeit és így a hatásfokát is befolyásoló töltetcserejét, annak lefolyását, a szívó és kipufogó oldalon lejátszódó folyamatokat, nyomáslengéseket, azok hatásait ismertetem. Áttekintem a jelenlegi gyakorlatban is alkalmazott technikákat a rendszerek hangolására mind a szívó, mind a kipufogó oldalon. Ismertetem azokat a vizsgálati lehetőségeket, melyek segítségével a jelenleginél pontosabb képet kaphatunk a rendszerben lejátszódó folyamatokról, ezáltal eszközt biztosítva a további tervezési feladatokhoz. Röviden vázoló a vizsgálati programot és az ahhoz rendelkezésre álló eszközöket.

Kulcsszavak: töltetcsere, nyomáslengés, lengőcső, rezonátorcső

1. BEVEZETÉS

A belsőégésű motorok periodikusan működő hőtechnikai gépek, melyek hengerébe rendszeresen friss levegőt és üzemanyagot kell juttatni, a bejuttatott keveréket elégetni, majd az égéstermék el kell távolítani a hengerből. Ezt a folyamatot négyütemű motorok esetében két főtengely-fordulatonként folyamatosan ismételni kell. Ez két ütemet, sorrendben a kipufogási és a szívási ütemet foglalja magába. Ezt hívjuk töltetcsereinek. Természetesen az ideális az lenne, ha egy-egy töltetcsere alkalmával az égéstermék maradéktalanul kiürülne a hengerből, a helyére pedig az elméletileg elérhető maximális mennyiségű friss levegő, vagy levegő üzemanyag keverék kerülne. Egy 3000 1/n fordulatszámú járó motor esetében másodpercenként 25 alkalommal kell a töltetnek kicserélődnie hengerenként.

A motor hatásfokát működése során a legnagyobb mértékben a motorikus veszteségek befolyásolják:

- az üzemanyag hengerben történő elégetése és kémiai energiájának felszabadítása nem tökéletes
- az égés alatt jelentkező úgynevezett falveszteségek
- a körfolyamat szakaszai nem ideálisak – az égés nem izochor, a kompresszió és az expanzió nem izentropikus
- a töltetcsere veszteség, ami a annak tökéletlenségéből, illetve a tömítetlenségekből adódik

Kijelenthetjük, hogy a motor hatásfoka és teljesítménye nem elhanyagolható mértékben függ ennek a töltetcserenek a jóságától.

A négyütemű motorok töltetcserejét szelepek vezérlik. Ezen szelepek működtetését a motor üzemállapotához célszerű hangolni. Ennek érdekében több jó megoldás is született a változtatható szelepvezérlések terén az elmúlt évtizedekben. A fejlesztések ezen a téren továbbra is zajlanak. Mi azonban egy másik területet szeretnénk megvizsgálni, nevezetesen a motorok szívó és kipufogórendszerében keletkező nyomáshullámok töltetcsereére gyakorolt hatását, azok analízisét, és a későbbiekben az üzemállapothoz való hangolásának lehetőségeit. Ezen a téren is vannak jelentős fejlesztések, különösen a változtatható geometriájú szívórendszerek tekintetében. Azonban megítélésünk szerint ez a terület még koránt sincs teljes mértékben feltérképezve.

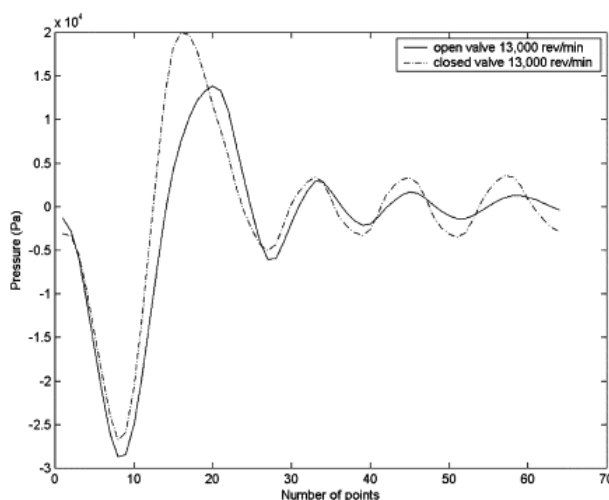
Mivel a minket érdeklő szívó és kipufogó oldali nyomáslengések nem tárgyalhatók a szívóoldali, illetve a kipufogó oldali rendszer ismertetése nélkül, ismerkedjünk meg ezekkel a rendszerekkel.

2. A SZÍVÓOLDAL BEMUTATÁSA

Négyütemű motorok esetében a töltetcsere szelepeken keresztül zajlik. A szívószelep által vezérelt részen keresztül jut a hengerbe a friss levegő. Jelen cikkünkben csak a korszerű injektoros motorokkal foglalkozunk, de természetesen a levegő helyett levegő-üzemanyag keverék is lehetne a töltetcsere szívó oldali közege. Azonban ez nem változtatna lényegében az általunk tárgyalni kívánt töltetcsere jóságán. Az üzemanyag keveredése a beszívott levegőben egy másik területet ölel fel. Azonban a szívórendszer így is elég feladatot ad a mérnököknek, akik a motort optimális üzemállapotra, vagy üzemállapotokra szeretnék hangolni. A szívóoldal ugyanis több, mint egy egyszerű cső egy légszűrővel az elején. Az áramló gáz szempontjából mindenképpen. Ezért kell alapos vizsgálatnak alávetni, hogy megállapíthassuk, milyen módon befolyásolja a motor működését.

A motorok hengerébe a szívócsöveken keresztül jut a friss levegő. Megoldandó feladat a beszívott levegő mechanikai szűrése, esetenként temperálása, nyomásának megnövelése. Ezen kívül egyenlő feltételeket kell biztosítani a motor minden hengerének. Ennek érdekében azonos szívócső hosszakat és átmérőket alkalmaznak. A szívócsőnek természetesen minél kisebb áramlási ellenállással kell rendelkeznie. A hengerenkénti benzinbefecskendezés és a több szívószelepes megoldás elterjedésének köszönhetően gyakori az úgynevezett osztóház alkalmazása. Ezt rezonancia-szívócsőrendszer egészítheti ki. Ennek jelentőségét úgy érthetjük meg, hogy megvizsgáljuk mi zajlik le egy henger szívócsövében.

A szívószelep nyitásakor a dugattyú még nem érte el a felső holtpontot, épp felfelé halad, még tart a kipufogási ütem. Azonban az égéstermék kiáramlása következtében a hengerben lévő gáz lendületben van, emiatt a hengerben enyhe depresszió uralkodik, ami megindítja a szívócsőben lévő levegőt a henger felé. Közben a dugattyú, elérve felső holtponthelyzetét, elindul az alsó holtpont felé, és fenntartja a szívó hatást a kipufogószelep zárása után is. A levegő a hengerbe áramlik, azonban a közeg összenyomhatósága miatt lokális nyomáseséssel indul a folyamat, majd miután a közeg felgyorsult, a lezáródó szívónyílásnak ütközve feltorlódik, és helyi nyomásnövekedés alakul ki. Az így létrejövő nyomáshullámok pedig hangsebességgel végighaladnak a szívócsőben, az abban lévő reflektáló felületekről visszaverődve pedig egy időben lecsengő nyomáslengés alakul ki. Egy ilyen tisztán egy hengerre vonatkozó nyomáslengést mutat az 1. ábra.

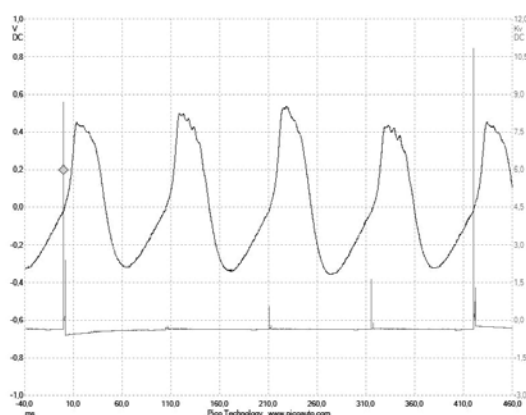


1. ábra

Számított nyomásváltozás a szívócsőben, egy henger esetén[1]

Könnyen belátható, hogy ezen lengések segíthetik a töltetcserét, ha megfelelő ütemben érkeznek a következő szívási ütem idején a hengerhez, illetve ronthatják annak hatását, ha rosszul vannak időzítve. Ezt az időzítést legegyszerűbben a szívócső hosszával tudjuk megoldani, azonban ez csak egy adott fordulatszámhoz lesz jó, hiszen a lengési frekvencia a fordulatszám függvényében változik. Ennek áthidalása érdekében született olyan megoldás hengerenként két szívószelepes motoroknál, hogy a henger egyik szívószelepéhez csatlakozó szívócső eltérő hosszúságú, mint a másik szelephez csatlakozó szívócső. Ez azonban még mindig nem tudja kellő módon segíteni a töltetcserét a teljes üzemi tartományban. Ennél sokkal kiforrottabb megoldás a változtatható szívócsőhossz. Ez esetben széles üzemi tartományban optimális értékűre állíthatjuk a szívócső hosszát.

A töltetcserét elősegíthetjük rezonancia alkalmazásával is. Mivel mint minden tömeggel és belső rugalmassággal rendelkező közegnek, így a gázoszlopnak is van sajátfrekvenciája, ezért ha a szívószelep által előidézett gerjesztés frekvenciája ezzel a sajátfrekvenciával megegyezik, a gázoszlopban is előállhat a rezonancia jelensége. A rezonancia gázoszlopokban tulajdonképpen egy állóhullám kialakulása, amely állóhullám meghatározott pontjaiban, jelen esetben a szívócső végén, azaz a hengerben és meghatározott időpillanatokban a nyomásváltozás amplitúdója a szívószelep által előidézettnek többszöröse. A szívórendszer megfelelő kialakításával elérhető, hogy az önlengésbe hozott gázoszlop a hengertérben a szívási periódus utolsó szakaszában hozza létre ezt a környezeti nyomásnál is nagyobb nyomást, ezzel mintegy feltöltve, utántöltve a hengert. Egy összetett lengési képet mutat a 2. ábra többhengeres motor szívócsővében.



2. ábra

Nyomásváltozás a szívócső szelep közeli helyén az idő függvényében[2]

A kialakuló rezonancia frekvenciája azonban nemcsak a gerjesztéstől – fordulatszámától – függ, hanem a gerjesztett gázoszlop méreteitől, tömegétől is. Alapesetben ez a szívócső hosszát és keresztmetszetét jelenti. A rendszer azonban kiegészíthető egy jól meghatározott méretű térfogattal – zsebbel –, melynek nincs más szerepe, csak a rendszer frekvenciájának hangolása. Az ilyen rendszereket az akusztikából ismert Helmholtz rezonátorként azonosíthatjuk. A számítások alapját az alábbi összefüggés adja [3]:

$$n = \frac{\alpha_{Es} - \alpha_{An}}{360^0} \cdot K \cdot \frac{a}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{A}{L \cdot V}} + n_{korr} \quad (1)$$

ahol:

- n : a fordulatszám, ahol a légnyelési görbének maximuma van, [1/s]
- α_{Es} : az a forgattyúsög, amelynél a maximális nyomás lép fel a szívószelep előtt, [ft°]
- α_{An} : az a forgattyúsög, amelynél a legnagyobb a dugattyú által gerjesztett depresszió, [ft°]
- K : korrekciós tényező, amit a lengőcső feltöltés modellezése miatt vezettek be, [-]
- a : a hangsebesség, [m/s]
- A : a lengőcső keresztmetszete, [m²]
- L : a lengőcső hossza, [m]
- V : a tartály (henger) térfogata, [m³]
- n_{korr} : korrekciós tényező

A K korrekciós tényező nagysága a motor és a szívócső konstrukciójától függ. Közelítő számításokhoz, hasonló konkrét motorok geometriai méreteinek és szeleplevezérlési paramétereinek felhasználásával meghatározható a korrekciós tényező értéke [3]:

$$K = (n - n_{\text{kor}}) \cdot \frac{360^0}{\alpha_{\text{Es}} - \alpha_{\text{An}}} \cdot \frac{\pi}{a} \cdot \sqrt{\frac{L \cdot V}{A}} \quad (2)$$

A K korrekciós tényező ismeretében a (2) egyenletből számítható – rögzített egyéb paraméterek mellett –, a szükséges szívócsőhossz (vagy keresztmetszet) a motor fordulatszámának függvényében. A gyakorlatban a szívórendszerek lehetnek az imént tárgyalt megoldások kombinációi is. Például lengőcső – rezonátorcső kapcsolt használata, vagy akár turbófeltöltő és rezonátorcső kombinált használata is egy létező megoldás.

3. A KIPUFOGÓOLDAL BEMUTATÁSA

A kipufogószelep által nyitott keresztmetszeten történik az elégett üzemanyag-keverék kiáramlása a motor hengeréből. A kiáramlás nem a szabadba történik, hanem a kipufogó rendszerbe, ami sokszor összetett, bonyolult gáztechnikai rendszert alkot, melyet vizsgálatunk egyik tárgyának kell tekintenünk. Hogy miért van szükség ennek a rendszernek a részletes elemzésére, az rövidesen kiderül. De előbb vizsgáljuk meg, miből is áll össze ez a rendszer.

Ehhez vegyük sorra a kipufogórendszer feladatait:

- a kipufogógáz elvezetése a motortól arra a helyre, ahol a szabadba kívánjuk engedni.
- a kipufogógáz hőmérsékletének csökkentése, hogy a rendszerből kilépő gáz már elfogadható hőmérsékleten jusson a környezetbe
- a kipufogógáz káros anyag tartalmának előírt értékekre történő csökkentése, közkeletű kifejezéssel élve emisszió csökkentés
- zajcsillapítás, mivel a belsőégésű motorok üzeme jellegüknél fogva jelentős zajjal jár, amelynek nagy része a hengerekből kiáramló gázzal együtt, az abban terjedő hanghullámok révén „szennyezi” a környezetet
- a töltetcsere elősegítése

Ez utóbbi feladat nehezen hangolható össze az előzőekkel. Fontossága azonban jelentős, így mindenképpen figyelmet kell rá fordítanunk. Maga a rendszer egy korszerű szívómotor esetében a következő elemekből áll:

- leömlőcső
- gyújtócső
- oxidatív katalizátor(ok)
- részecskeszűrő
- reduktív katalizátor
- hangtompító

Turbófeltöltővel szerelt motorok esetében általában a leömlők közvetlenül a feltöltő gázturbinájába vezetik a kipufogógázt, ebben az esetben nincs gyújtócső. A nyomási viszonyokat máshogy kell kezelnünk, mint szívómotorok esetében.

Miről is van szó? Vegyünk példaként egy négyhengeres motort, amelynek gyújtási sorrendjétől függetlenül 180°-onként van egy-egy munkaüteme valamelyik hengerében. Ez azt jelenti, hogy amikor az egyik henger kipufogószelepe kinyit, annak a hengernek a leömlőjébe forró kipufogógáz áramlik olyan sebességgel, ami függ a hengerben lévő nyomástól, a henger térfogat-változási sebességétől, a szeleplevezérlés karakterisztikája miatt változó kiáramlási keresztmetszettől, a leömlőben lévő nyomástól, az áramlási ellenállástól. Mivel azonban a leömlőben az előző kipufogási ütemben is volt áramlás, nem elözménymentes körülmények vannak benne. Klasszikus esetben a leömlők össze vannak vezetve az úgynevezett közösítő, vagy gyújtócsőbe, emiatt a többi henger eltérő ütemű kipufogásának is hatása van a mi hengerünk leömlőjében kialakuló viszonyokra. Ugyanis a kipufogás kezdetekor elindul egy depresszióhullám a hengertől, amely végighalad a leömlőn, amíg nem találkozik reflektáló felülettel. Ez az előbb említett esetben a gyújtócső fala, melyről visszaverődik és a hengerhez jutva egy kompresszió hullámként jelenik meg. Azt is figyelembe kell venni azonban, hogy a visszaverődő hullám nem csak a mi hengerünk gyújtócsőjében halad visszafelé, hanem a többiben is. Ugyanakkor a többi henger által keltett nyomáshullám is bejut a mi hengerünk leömlőjébe és ott erősítheti, vagy gyen-

gítheti a nyomáshullámokat attól függően, hogy milyen ütemben találkoznak. A hullámok haladási sebessége a rendszerben lévő gázra és az ott mérhető hőmérsékletre jellemző hangsebesség. Tovább árnyalja a képet, hogy a rendszerben a hőmérséklet a hengerből távolodva csökken, ez az egyik feladata is a kipufogórendszernek. Emiatt azonban a hangsebesség is csökken a leömlőben haladva. Belátható, hogy összetett problémával állunk szemben, ha pontosan meg szeretnénk határozni a nyomás alakulását a leömlőkben.

De miért fontos ez számunkra? Amiatt, mert ha a hengerből kiürítendő kipufogógáz a leömlőben egy depresszió hullámmal találkozik, akkor az nagymértékben segíti a töltet kiürítését a hengerből. Úgy is mondhatjuk, hogy megszívja a teret. Ha azonban egy kompresszió hullám érkezik a hengerhez a kipufogási ütemben, akkor az ellene dolgozik a töltetcsereinek. Ez a hatás akár 50%-al is befolyásolhatja a töltetcsere jóságát.

Azonban a kipufogóütem végén már a szívószelep(ek) is nyitva vannak, ezzel is segítve a henger öblítését. Hiszen a hengereknek van egy úgynevezett káros tere, a kompresszió térfogat, amelyből a dugattyú nem tudja kitolni a kipufogógázt. Ebben a térrészben csak úgy cserélhető ki a gáz, ha a beáramló friss töltet kitolja maga előtt. Ugyanakkor azt sem szeretnénk, ha a hengerbe már bejuttatott friss levegő a kipufogószelepen keresztül távozna, hiszen fontos szempont, hogy a henger a lehető legnagyobb mértékben fel legyen töltve friss levegővel. Ezért szükségünk van a kipufogóütem végén egy jól időzített kompresszió hullámra, amely visszatartja a lendületben lévő levegőt, amíg a kipufogószelep bezár.

Hogy hogyan alakulnak ezek a lökeshullámok, és mekkora a szerepük egy feltöltővel szerelt motor esetében, az további vizsgálatokat igényel. Ezt a vizsgálati célt tűztük ki mi is magunk elé.

4. A VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A témához kapcsolódó jelentős mennyiségű szakirodalom áttekintése alapján azt kell mondanunk, hogy nincs olyan átfogó vizsgálati módszer, ami az általunk kitűzött feladatok megoldásához lenne kifejlesztve. Emiatt saját módszer kialakítását látjuk célszerűnek, amely természetesen a már ismert elemekből épül fel, ideértve a motordiagnosztikai méréseket, a fékpadi vizsgálatokat, a CFD analízist és az elméleti számításokat is.

Elképzeléseink szerint első lépésben ki szeretnénk alakítani egy mérési rendszert, mely a következő paraméterek folyamatos regisztrációját teszi lehetővé:

- a motor főtengelyének szögállása
- a szívószelepek nyitási állapota
- a kipufogószelepek nyitási állapota
- a szívócsőben mérhető nyomás alakulása a szívószelep közelében
- a leömlőben mérhető nyomás alakulása a kipufogószelep közelében
- a hengerben mérhető nyomás alakulása
- a beszívott levegő hőmérséklete a szívócsőben
- a beszívott levegő térfogatárama
- a kipufogógáz hőmérséklete a leömlőben
- a kipufogógáz összetétele (mintavételezés a leömlőből)
- a motor fordulatszáma
- a motor nyomatéka

Amennyiben a motor szögelfordulásának függvényében megjelenítjük a szívócsőbeli és a leömlőbeli nyomáslengések alakulását egy konkrét henger esetében, ezeket pedig összevetjük a hengerben mérhető nyomás alakulásával, a szelepek állapotát is figyelembe véve, akkor kapunk egy jól feltérképezett alapállapotot a konkrét motorunkról. Természetesen ezeket a méréseket széles fordulatszám tartományban kell rögzíteni. Ezen kívül a motor nyomaték, teljesítmény adatait is tárolnunk kell.

Ezen értékek meghatározását párhuzamosan CFD szimuláció segítségével is elvégezzük. Reményeink szerint a mért értékek és a számított eredmények jó közelítéssel megfeleltethetők lesznek egymással.

Már ez az eredmény is jelentős előrelépést jelentene vizsgálatunkban, hiszen rendelkezésünkre állna egy validált szimulációs módszer, melynek segítségével nyomon követhetővé válik a szívó, illetve a kipufogó rendszerben eszközölt változtatások hatása a töltetcsere, és így a motor jellemző paramétereire is.

Erre az alapra építve elkezdhetjük a program második részét, mely egy kísérleti változtatható geometriájú szívó, illetve kipufogó-rendszer beépítését követően az előzőleg számított változtatások, hangolások hatását hivatott dokumentálni. A cél az, hogy pontos képet kapjunk a geometria változtatása által bekövetkező tényleges töltetcsere-veszteség csökkenéséről, annak jelentőségéről turbófeltöltős motorok esetében.

Mindezen feladatok megoldásához elengedhetetlen egy korszerű motorvizsgáló laboratórium, valamint a CFD szimuláció elvégzésére alkalmas szoftver megléte.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen pillanatban abban a szerencsés helyzetben vagyunk, hogy tanszékünkön, az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszékén 2012 októberében átadták a Lancsarics Motorvizsgáló Labort, mely lehetővé teszi a cikkben felsorolt mérések elvégzését. Tanszékünk rendelkezik szimulációs szoftverrel is, így a projekt megvalósítása kezdetét veheti. A projekthez doktori téma is kapcsolódik, az elért eredményekről a jövőben folyamatosan be fogunk számolni.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a tanulmány és kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALOM

- [1] M.F. Harrison, A. Dunkley: The acoustics of racing engine intake systems, *Journal of Sound and Vibration* 271 (2004) 959–984 oldal
- [2] <http://www.garasanin-auto.hu/oszcilloszkoposmeresek> (2013.03.21)
- [3] Kalmár István, Stukovszky Zsolt: Belsőégésű motorok folyamatai, *BME Gépjárművek Tanszéke*, 205-208 oldal
- [4] Philip Hubert Smith, John Cruickshank Morrison: *The Scientific Design of Exhaust and Intake Systems*
- [5] C. D. Rakopoulos, E. C. Andritsakis, D. T. Hountalas: The Influence of the Exhaust System Unsteady Gas Flow and Insulation on the Performance of a Turbocharged Diesel Engine
- [6] O. Chiavola: Multi-dimensional CFD-transmission Matrix Modelling of IC Engine Intake and Exhaust Systems
- [7] F. Piscaglia, G. Ferrari: A novel 1D approach for the simulation of unsteady reacting flows in diesel exhaust after-treatment systems
- [8] Sang-Jin Lee, Soo-Jeong Jeong, Woo-Seung Kim: Numerical design of the diesel particulate filter for optimum thermal performances during regeneration