

Oxigén koncentráció mérési és becslési lehetőségei kettős kipufogógáz visszavezetésű haszonjármű dízelmotoron

Oxygen concentration measurement and estimation opportunities on a medium duty diesel engine mounted with dual loop exhaust gas recirculation system

NYERGES Ádám¹, Dr. ZÖLDY Máté²

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék
Magyarország, 1111 Budapest, Stoczek utca 6, www.gjt.bme.hu

¹+3614632380, adam.nyerges@gjt.bme.hu

²+3614632607, mate.zoldy@gjt.bme.hu

Kivonat

A dízelmotorokban a kipufogógáz visszavezető rendszerek (EGR rendszerek) elsődleges célja a NO_x emisszió csökkentése. Egy turbófeltöltésű motorban kétféle úton lehet a kipufogógázt visszavezetni: a feltöltő alacsony és magas nyomású oldalain. Szabályozási szempontból egy kettős visszavezető rendszerrel rendelkező dízelmotor nagy szabadságfokkal rendelkezik. Jelen cikkben egy ilyen összetett töltetcsere rendszerben alkalmazható oxigén koncentráció mérési és becslési lehetőségei kerülnek bemutatásra.

Kulcsszavak: dízelmotorok, alacsony- és magas nyomású kipufogógáz visszavezetés, oxigén koncentráció mérés és becslés

Abstract

In Diesel engines the main aim of exhaust gas recirculation (EGR) systems is the reduction of NO_x emissions. In turbocharged engines there are two ways to feed back the exhaust gas to the intake side of the engine. These are the low pressure and the high pressure loop EGR systems. From controlling aspect a dual loop EGR system has a big degree of freedom. In this paper the oxygen concentration measurement and estimation opportunities will be presented in the different part of the air path system.

1. BEVEZETÉS

A klímaváltozás elleni küzdelem miatt a közlekedésben az egyik feladat a belső égésű motorok CO_2 és károsanyag kibocsátásának csökkentése. Az emissziós korlátozások egyre szigorodnak, ezeknek a teljesítésért pedig egyre komplexebb felépítésű belső égésű motorokat kell kifejleszteni [1]. Korszerű dízelmotorok kipufogógáza két nehezen kezelhető károsanyagot tartalmaz: szilárd részecskéket és NO_x -ot. A két károsanyag együttes csökkentése nehéz feladat, mivel keletkezésük egymással kontraproduktív [2].

A motorikus károsanyagkibocsátás csökkentésének egyik fajtája a kipufogógáz-visszavezetés (EGR). Kipufogógáz-visszavezetéssel nagymértékben csökkenthető a motorikus NO_x emisszió. Az égéstérben az inert kipufogógáz megnöveli a töltet hőkapacitását, ezáltal lokálisan lecsökkenti az égési hőmérsékletet. Ez pedig csökkenti a termikus úton való NO keletkezését. Emellett a kipufogógáz visszavezetés bizonyos munkapontokban a tüzelőanyag fogyasztást és ezáltal a CO_2 kibocsátást is csökkentheti [3].

Két alapelve van a kipufogógáz visszajuttatásának a hengerbe: belső és külső visszavezetéssel. Belső EGR esetén a szelepvezérlés megfelelő időzítésével lehet benn tartani, vagy visszaengedni a kipufogógázt a hengerbe. A külső EGR rendszer a motor kipufogócsatornáiból egy csővel vezeti vissza a kipufogógázt a szívócsatornába.

Egy turbófeltöltésű motoron kétféle külső EGR rendszer alkalmazható. A turbófeltöltő magas nyomású oldalán lévő EGR-t magas nyomású kipufogógáz visszavezetésnek (HP EGR), az alacsony

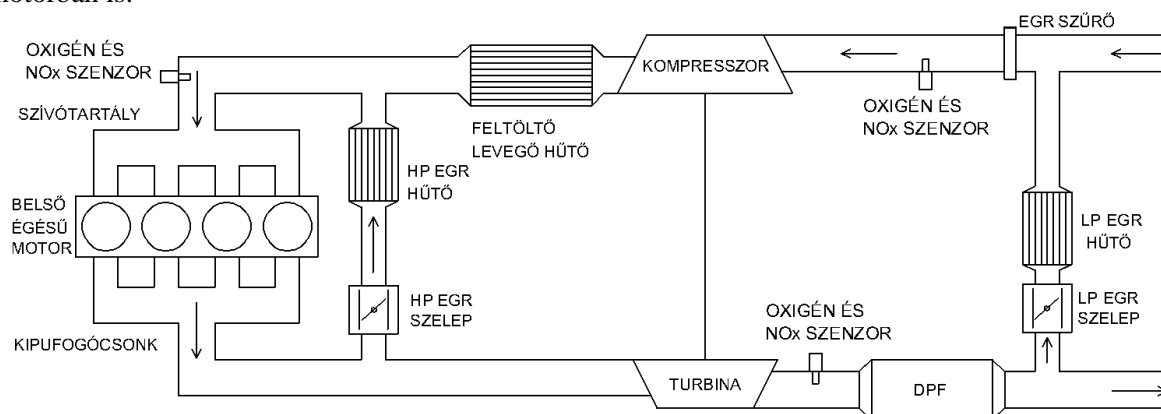
nyomású oldalán lévő pedig alacsony nyomású kipufogógáz visszavezetésnek (LP EGR) nevezzük. Az EGR rendszerekben megvalósítható kipufogógáz tömegáram tovább növelhető rásegítő kipufogószelepek segítségével [4].

A motor megfelelő működéséhez és a károsanyag kibocsátás alacsonyan tartásához egy precíz irányítási rendszerre van szükség. Az EGR rendszerekkel 4 szelep nyitásával és zárásával lehet befolyásolni a motor működését. Ezek az EGR szelepek és az ehhez tartozó kipufogószelepek. A visszavezetett kipufogógáz hatására a töltetcsere rendszerben megváltoznak a tömegáramok, a gázösszetételek, a nyomások és a hőmérsékletek. Az utóbbi kettőnek a hatása jelen cikkben nem kerül bemutatásra.

Egy kettős EGR rendszerrel felszerelt dízelmotor töltetcsere rendszere kellően bonyolult hozzá, hogy alapos vizsgálatnak kelljen alávetni a mérési és becslési lehetőségeket. Jelen cikkben ez a kihívás kerül tárgyalásra.

2. A MÉRÉSI LEHETŐSÉGEK

A kutatásaink során vizsgált haszonjármű dízelmotor töltetcsere rendszerének a sematikus rajza az 1. ábrán látható. A motor fel van szerelve a bevezetésben bemutatott kettős EGR rendszerrel. Egy fékpadra szerelt motor sokkal jobban felszerelhető szenzorokkal, mint egy járműbe szerelt változat. A fejezet célja megvizsgálni, hogy mely motorjellemzők mérése valósítható meg egy járműbe szerelt motorban is.



1. ábra A kutatómotor töltetcsere rendszerének jelenlegi elemei

Tüzelőanyag fogyasztás mérése: a fékpadon a pontos fogyasztásmérés a gravimetrikus fogyasztásmérő. A motorvezérlő számítógépéből kinyerhető dózis értékek általában pontatlanabbak, mivel ezek az előírányzott dózisértéket adják meg és nem a megvalósultat mérik.

Beszívott levegő mennyiség mérése: manapság már dízelmotoroknál is elterjedt a légmennyiségmérők alkalmazása. A mérőrendszer is fel van szerelve légmennyiségmérővel a beszívott friss levegő mérésére. A légmennyiségmérő nem alkalmazható a forró kipufogógázok tömegáramának mérésére.

Oxigénkoncentrációk mérése: dízelmotorok kipufogógázában az oxigénkoncentráció mérése (szélessávú lambda szondával) információt ad a megvalósult keverékképzés és égésfolyamat jellemzőiről. További oxigénszondák elhelyezésével a szívóoldalon nyomon lehet követni a visszavezetett kipufogógáz hatását a gázösszetételekre. Fontos megjegyezni, hogy a szondák pontosságát nagy mértékben befolyásolja a mért közeg nyomása. Ilyen esetekben általában nyomáskompenzációra van szükség [5]. Az 1. ábrán láthatóak a mérőrendszerben alkalmazott szondák.

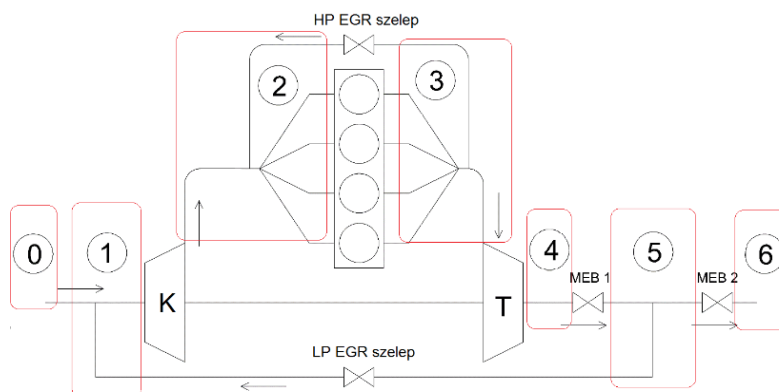
Nitrogén-oxid koncentráció mérése: az EGR rendszerek fő célja NO_x emisszió csökkentése, ezért mindenképp előnyös, ha mért jel van a pontos NO_x koncentrációról a kipufogógázban. A szívóoldali NO_x koncentráció mérése szintén lehetővé teszi az EGR rendszerek hatásának nyomon követését.

Egy járműbe szerelt motoron ezeken kívül még a nyomásokat és a hőmérsékleteket is mérni lehet, viszont az oxigén és a nitrogén-oxid szondák alkalmazása elterjedtebb és olcsóbb.

A motor irányítási rendszerének mindezek mellett még szüksége van a motor fordulatszámára is, ami viszont minden motornál mért jel.

3. BECSLÉSI LEHETŐSÉGEK

A motor töltetcsere rendszerének modellezése és irányítása szempontjából elengedhetetlen az összefüggések ismerete az egyes mért vagy becsült mennyiségek között. A fejezetben bemutatott összefüggések megértésében segít a 2. ábra, melyen megtekinthető a töltetcsere rendszer egyes részeinek indexelése. A fejezet fő célja a töltetcsere rendszerben megvalósuló tömegáramok és oxigénkoncentrációk közötti kapcsolat bemutatása úgy, hogy közben az egyes helyeken létrejövő nyomások és hőmérsékletek ismeretlenek.



2. ábra A kutatómotor töltetcsere rendszerében alkalmazott indexelések

Az EGR rendszerek működésének megértése szempontjából célszerű bevezetni a visszavezetett kipufogógáz tömeghányadának fogalmát, mely a töltetcsere rendszerben lévő tömegáramoktól a következőképpen függ [4]:

$$x_{EGR_arány} = \frac{\sigma_{EGR}}{\sigma_{EGR} + \sigma_{lev0} + \sigma_t} \approx \frac{\sigma_{EGR}}{\sigma_{EGR} + \sigma_{lev0}} = \frac{\sigma_{HPEGR} + \sigma_{LPEGR}}{\sigma_{HPEGR} + \sigma_{LPEGR} + \sigma_{lev0}} \quad (1)$$

A visszavezetett kipufogógáz tömeghányada a töltetcsere rendszerben megvalósuló levegő, vagy más gázösszetevő tömeghányadából is megbecsülhető. (2) a friss levegő tömeghányadát, az oxigén tömeghányadát és a nitrogén-oxidok tömeghányadát figyelembe véve becsüli meg az EGR tömegarányát:

$$x_{EGR_arány} = \frac{x_{lev0} - x_{lev2}}{x_{lev0} - x_{lev3}} = \frac{x_{O_2lev0} - x_{O_22}}{x_{O_2lev0} - x_{O_23}} = \frac{x_{NOlev0} - x_{NO2}}{x_{NOlev0} - x_{NO3}} \approx \frac{x_{NO2}}{x_{NO3}} \quad (2)$$

(1) és (2) egyesítésével levezethető, hogy az EGR rendszerek tömegárama megbecsülhető a beszívott friss levegő tömegáramából és a motor előtti és utáni friss levegő tömeghányadából:

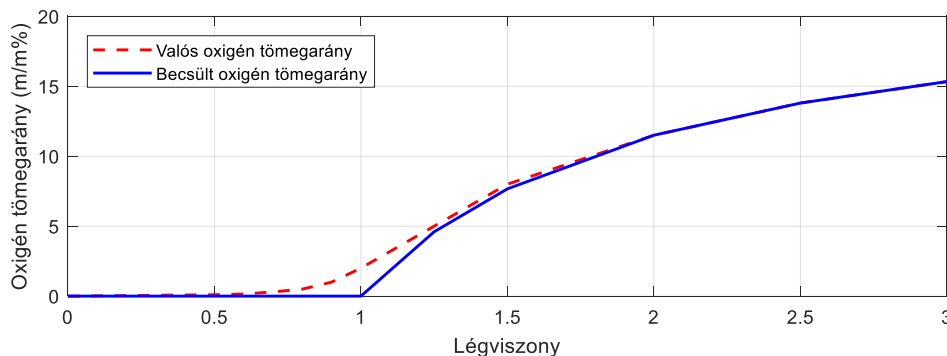
$$\sigma_{EGR} = \sigma_{HPEGR} + \sigma_{LPEGR} = \frac{x_{lev0} - x_{lev2}}{x_{lev2} - x_{lev3}} \sigma_{lev0} \quad (3)$$

Az LP EGR és a HP EGR bekötése utáni friss levegő tömeghányadok (4) és (5) összefüggésekkel határozhatók meg. (3)-t felhasználva a LP EGR és a HP EGR tömegáram is meghatározható:

$$x_{lev1} = \frac{x_{lev0} \sigma_{lev0} + x_{lev3} \sigma_{LPEGR}}{\sigma_{lev0} + \sigma_{LPEGR}} \Rightarrow \sigma_{LPEGR} = \frac{x_{lev0} - x_{lev1}}{x_{lev1} - x_{lev3}} \sigma_{lev0} \quad (4)$$

$$x_{lev2} = \frac{x_{lev1} (\sigma_{lev0} + \sigma_{LPEGR}) + x_{lev3} \sigma_{HPEGR}}{\sigma_{lev0} + \sigma_{LPEGR} + \sigma_{HPEGR}} \Rightarrow \sigma_{HPEGR} = \frac{x_{lev1} - x_{lev2}}{x_{lev2} - x_{lev3}} (\sigma_{lev0} + \sigma_{LPEGR}) \quad (5)$$

Tökéletes égésfolyamat esetén a kipufogógázok dús és sztöchiometrikus keverési arány mellett nem tartalmaznak oxigént. A valós égésfolyamat mindig tökéletlen, ilyenkor mindig van oxigéntartalma a kipufogógáznak. A 3. ábrán látható a kipufogógáz oxigéntartalma tökéletes és valós égésfolyamat esetén. Mivel a dízelmotorok mindig szegény keverési aránnyal működnek, ezért a kipufogógáz oxigéntartalmának a becslése tökéletes égésfolyamattal nem eredményez nagy hibát.



3. ábra A légviszony hatása a kipufogóoldali oxigén tömegarányra valós és tökéletes égésfolyamat esetén

Ha úgy tekintünk a szegény keverékes égésfolyamatra, hogy a hengerbe juttatott levegőmennyiségből a befecskendezett tüzelőanyag dózis égése során elhasználja a sztöchiometrikus keverési arányhoz tartozó mennyiséget, akkor a kipufogógázok friss levegő tömeghányada (6) összefüggéssel becsülhető.

$$x_{lev3} = \frac{\sigma_{lev3}}{\sigma_{mot}} = \frac{\sigma_{lev2} - \sigma_{lev_elég}}{\sigma_{lev0} + \sigma_{EGR}} = x_{lev2} - \frac{K_{L0}\sigma_t}{\sigma_{lev0} + \sigma_{EGR}} \quad (6)$$

(3) és (6) összefüggések egyesítésével a kipufogógáz friss levegő tömeghányada egy másodfokú egyenlettel becsülhető. A (7) másodfokú egyenlet (8) megoldása megadja a kipufogógáz friss levegő tömeghányadát úgy, hogy a becsléshez csak mérhető jeleket használ fel.

$$\sigma_{lev0}x_{lev3}^2 - (2\sigma_{lev0} - K_{L0}\sigma_t)x_{lev3} - (K_{L0}\sigma_t - \sigma_{lev0})x_{lev2} = 0 \quad (7)$$

$$x_{lev3} = \frac{2\sigma_{lev0} - K_{L0}\sigma_t - \sqrt{(2\sigma_{lev0} - K_{L0}\sigma_t)^2 + 4\sigma_{lev0}(K_{L0}\sigma_t - \sigma_{lev0})x_{lev2}}}{2\sigma_{lev0}} \quad (8)$$

Végül a töltetcsere rendszerben az oxigén tömeghányada (9) összefüggéssel számítható ki a friss levegő tömeghányadokból.

$$\begin{bmatrix} x_{O_2,1} \\ x_{O_2,2} \\ x_{O_2,3} \end{bmatrix} = x_{O_2,0} \begin{bmatrix} x_{lev1} \\ x_{lev2} \\ x_{lev3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás célja a kettős kipufogógáz visszavezetés által megvalósult oxigén tömeghányadok és tömegáramok közötti összefüggések megtalálása volt. Az összefüggések felírása mellett fontos volt, hogy azok minél kevesebb nehezen vagy drágán mérhető bemenő adatot igényeljenek, hogy az egyes mennyiségek becslése járműbe szerelt motor esetén is könnyen megvalósítható legyen. A kapott eredményeket alapul véve szabályozási célú, állapotterben felírt modell készíthető.

IRODALOMI HIVATKOZÁSOK

- [1] United Nations Global technical regulation No. 4; 25 January 2007
- [2] Lakatos, István, Nagyszokolyai Iván (1998) Gépjármű-környezetvédelmi technika és diagnosztika II. Győr, Magyarország: Minerva-Sop Bt., 127 p. ISBN: 9639056162
- [3] Zöldy Máté (2019) "Improving heavy duty vehicles fuel consumption with density and friction modifier" International Journal of Automotive Technology, Vol. 20, No. 0, pp. 1–8
- [4] Nyerges Ádám, Zöldy Máté (2018) Combined low and high pressure exhaust gas recirculation impact assessment on a medium duty Diesel engine. Műszaki szemle 71. szám
- [5] Bárdos Ádám, Németh Huba (2013) Control oriented air path model for compressed air boosted Diesel engines, Periodica Polytechnica doi: 10.3311/PPtr.7093, 2013