

HASZONJÁRMŰ DÍZELMOTOR SZÍVÓTARTÁLYI OXIGÉN KONCENTRÁCIÓJÁNAK SZABÁLYZÁSA MAGASNYOMÁSÚ EGR SZELEPPEL ÉS KIPUFOGÓ OLDALI FOJTÁSSAL

INTAKE MANIFOLD OXYGEN CONTROL OF A COMMERCIAL VEHICLE DIESEL ENGINE WITH HP-EGR AND EXHAUST THROTTLING

Bárdos Ádám, Németh Huba*

BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Gépjárműtechnológia Tanszék

ÖSSZEFOGLALÁS: Dízelmotorok nitrogén-oxid és részecske kibocsátásának kezelésére irányuló számos eljárás közül (pl.: DPF, SCR stb.) a hengertöltet összetételének precíz beállítása egy költséghatékony megoldás. A szívótartály oxigénkoncentráció jelentős befolyást gyakorol az égésre, ezzel együtt az emisszióra is, melynek csökkentése részben kipufogógáz visszavezetéssel lehetséges. Magas nyomású visszavezetési rendszer esetében a visszaáramló gázok mennyisége korlátozott a kialakuló nyomásviszony által. A cikkben a szerzők egy új megoldást javasolnak a probléma feloldására: haszonjárműveknél használatos kipufogó fojtás alkalmazásával tetszőleges visszavezetési mennyiség megvalósítását. Ennek demonstrálására egy LQ-servo szabályzó kerül megtervezésre és fékpadai mérésekkel ellenőrzésre, amely a magas nyomású EGR-szelep és a kipufogó fojtás alkalmazásával állít be precízen egy megkívánt szívótartályi oxigénkoncentráció célértékeket.

ABSTRACT: Among several methods to handle NO_x and PM emission in diesel engines (e.g DPF, SCR etc.) the precise control of cylinder charge composition seems to be an effective solution. The intake manifold oxygen concentration has a major effect on the combustion process therewith on the emission. Its manipulation is possible by EGR. In HP-EGR systems the amount of the back flowing exhaust gases is limited by the pressure difference on the EGR duct. In this paper the authors present a novel approach to solve this problem: arbitrary EGR mass flow by using the exhaust throttling which is widely applied at commercial vehicles. As demonstration an LQ-servo controller was designed and its performance was evaluated by dyno test bench measurements. The proposed control structure allows a precise intake manifold

oxygen concentration adjustment with EGR valve and exhaust flap actuators.

1. BEVEZETÉS

Napjaink emissziós normái (pl.: Euro 6 és US EPA 13) jelentős korlátozásokat vezettek be. A motorfejlesztők számára a legnagyobb kihívást a nitrogén-oxidok (NO_x) és a részecskék (PM) emissziójának csökkentése jelenti a CO₂ csökkentésével párhuzamosan. Alapvetően kétféle lehetőség kínálkozik az említett szennyező anyagok kibocsátásának befolyásolására: a motor nyers emissziójának mérséklése vagy kipufogógáz-utánkezelő rendszer alkalmazása. Dízel részecskeszűrő (DPF) alkalmazása a koromkibocsátás csökkentése érdekében a tüzelőanyag-fogyasztás megnövekedéséhez vezet a nagyobb kipufogó ellennyomás és a regeneráció igénye miatt. A szelektív redukciós katalizátorok (SCR) költségesek, nominális hatásfokukat csak korlátozott kipufogógáz hőmérsékleti tartományban érik el. Emellett a szükséges katalitikus anyag, tartály és befecskendező rendszer csak tovább növeli a költségeket és csökkenti az üzemanyag-tartály kialakítására rendelkezésre álló teret. A fent említett hátrányos tulajdonságoknak köszönhetően a mai motorfejlesztés a kipufogógáz-utánkezelő rendszerek súlyának, méretének csökkentésére törekszik [1].

Az égési folyamat közbeni NO_x és PM keletkezésének kézbentartására a hengerekbe áramló töltet oxigén koncentrációjának precíz beállítása egy hatásos módszer [2], ami kipufogógáz visszavezetés (EGR) útján valósítható meg. A jelenlegi EGR szabályzási rendszerek általában csupán a visszavezetett EGR arányra

* felelős szerző, e-mail: adam.bardos@gjt.bme.hu

fókuszálnak, így figyelmen kívül hagyják a visszavezetett kipufogógáz minőségét (oxigén tartalmát). A szívótartályi oxigénkoncentráció szabályzásának előnyei a [3] cikkben kerültek kifejtésre. Az EGR összetett hatásmechanizmusának részletes elemzése megtalálható [4]-ben. Továbbá igen magas kipufogógáz visszavezetési arány alacsony hőmérsékletű égés (LTC) különböző formáinak megvalósításában játszhat jelentős szerepet. Erről a témáról az olvasó részletesen tájékozódhat az következő irodalmakban: [5] és [6]. Továbbfejlesztett égési eljárások NO_x emisszió csökkentésében elért eredményeire a [7] irodalom ad betekintést. A fentiek alapján a cikkben ismertetésre kerülő szabályzási metódus a szívótartályi oxigén koncentrációt használja a szabályzó célértékeként, hogy a jelenleg használt EGR-arányra való szabályzás problémán felülkerekedjen.

A beszívott töltetet hígító visszavezetett kipufogógáz tömegárama az EGR ág két vége (1. ábra) között kialakult nyomásviszony függvénye. Magas nyomású visszavezetési rendszer (HP-EGR) esetén ez a turbófeltöltő és a motor közös munkapontjától függ, így nem választható meg tetszőlegesen, így az adott munkapontban visszavezethető kipufogógáz mennyisége korlátos. A szerzők által javasolt kipufogó oldali fojtás alkalmazásával azonban az EGR vezetéken előálló nyomásviszony szabadon manipulálhatóvá válik, így lehetővé téve a hengertöltet összetételének tág határok között való precíz beállíthatóságát.

Változó turbinageometriájú turbótöltő (VGT) lapátjai ugyancsak használhatóak kipufogó oldali ellennyomás generálására, ezzel HP-EGR tömegáramának emelésére [8]. Másrésztől kipufogóági fojtószelepeket széles körben alkalmaznak haszonjármű dízelmotorokon tartós fékként. Ezek a kipufogófékeket azonban általában csak két állásban tudnak működni annak érdekében, hogy ellássák tartós fékként feladatukat: teljesen nyitva vagy teljesen zárva. Jelen cikkben a szerzők a kipufogó oldali fojtások kiterjesztett használatát javasolják a szívótartályi oxigén koncentráció szabályzására. Ennek megvalósításához természetesen pontos pozíciószabályzásra képes kipufogószelepekre van szükség (lásd [9]). Ilyen kipufogó oldali fojtószelepekkel a fenti mellett számos egyéb funkció is megvalósításra kerülhet: üzemi fékműködésbe integrált üzemi kipufogógáz hőmérséklet szabályzás, stb. Részletes leírás a lehetséges alkalmazásokról [10]-ben található.

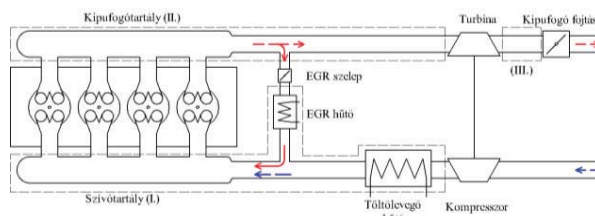
Ezekon felül a kipufogó fojtószelep alkalmazása egy olcsóbb és megbízhatóbb alternatívát kínál a VGT turbófeltöltőkhöz képest.

Az EGR szelep és VGT turbófeltöltő hasonló célú összehangolt szabályzásának megvalósítása a [11] és [12] irodalmakban található.

A cikk 2. fejezetében a javasolt szabályzó teszteléséhez használt motorfékpad kerül bemutatásra. A 3. fejezetben a szabályzási célok kerülnek összefoglalásra. Az 5. fejezetben kerül ismertetésre a kitűzött célokat kielégítő szabályzó, amely a 4. fejezetben vázolt nemlineáris motormodell alapján kerül megtervezésre. A 6. fejezetben motorfékpad mérés alapján kerül sor a szabályzó jellemzőinek bemutatására.

2. A SZABÁLYOZANDÓ RENDSZER ÉS A MÉRÉSEKHEZ HASZNÁLT ESZKÖZÖK BEMUTATÁSA

A cikkben ismertetésre kerülő szívótartályi oxigén koncentráció szabályzó jellemzői egy közepes nagyságú, turbófeltöltött és töltőlevegő hűtővel rendelkező, common rail dízelmotoron került ellenőrzésre. A motor hűtővel ellátott magasnyomású kipufogógáz visszavezető rendszerrel van felszerelve. A kipufogó oldali fojtás közvetlenül a turbina után került a kipufogócsőbe beépítésre, ezzel biztosítva a minimális motor utáni térfogatot a nyomásfelfutási idők minimalizálása végett. A szívó- és kipufogó csőhálózat sematikus ábrája az 1. ábrán látható.



1. ábra. A szabályozandó dízelmotor töltetcsere rendszere a beavatkozókkal

A motor dinamikus motorfékpadra lett telepítve, amelyen minden fontos jellemző mérhetőségét biztosította a szabályzó megtervezéséhez és teszteléséhez. A szívótartályi oxigén koncentráció egy szélessávú lambda-szondával került mérésre, melynek jele kompenzálásra került a nyomásingadozás miatt. A szabályzó MATLAB/Simulink környezetben került megtervezésre, az implementáció pedig dSpace Autobox gyors prototípus hardveren készült el.

3. JAVASOLT SZABÁLYZÁSI STRUKTÚRA ÉS CÉLKITŰZÉSEK

A bevezetésben részletezett előnyök miatt a jelen cikkben javasolt EGR-szabályzó a szívótartályi oxigén koncentráció (x_{im}) beállítását tűzi ki szabályzási célként az emisszió minimalizálása végett. Ezt egyrészt az EGR-szeleppel, másrészt a kipufogó fojtással való beavatkozással éri el. A kipufogócsőbéli nyomás emelése a motor pumpálási veszteségének növekedésével jár, ami fogyasztásnövekedéshez vezet. Természetesen a motor minimális CO₂ kibocsátását is biztosítani kell a beavatkozások során. Így a következő szabályzási célokat írhatjuk fel:

- 1) a szívótartályi oxigén koncentrációnak (x_{im}) követnie kell az alapjelet ($x_{im,dem}$). Túl magas oxigén koncentrációnál megnőhet a NO_x kibocsátás, túl alacsonynál pedig a koromképződés.
- 2) A motor pumpálási veszteségeit ($p_{em} - p_{im}$, a kipufogó- és szívótartályi nyomások különbsége) minimalizálni kell, törekedve a minél alacsonyabb tüzelőanyag-fogyasztásra.

4. A SZABÁLYZÓTERVEZÉSHEZ HASZNÁLT DÍZELMOTOR MODELL

A szabályzótervezés alapjául egy termodinamikai és kémiai törvényszerűségeken nyugvó modell került felírásra, amelyben az egyes paraméterek értékei fizikai, kémiai jelentéssel bírnak. Ez nagyban elősegíti a különféle motorokra való egyszerű applikációt és az egyes részfolyamatok lezajlása is vizsgálhatóvá válik általa. A modell részletesen ismertetésre és validálásra került [13]-ban, így jelen cikkben csak az átfogó ismertetésre kerül. A töltetcsere-rendszerben három mérlegelési térfogat került kiválasztásra: szívótartály (I.), kipufogótartály (II.) és a turbina és a kipufogó fojtószelep közötti térfogat (III.). A fenti mérlegelési térfogatok az 1. ábrán szaggatott vonallal és római számmal kerültek megjelölésre. A mérlegelési térfogatok nyomására az izotermikus kvázistatikus hőmérséklet feltételezése mellett került felírásra az energia- és tömegmegmaradás. Ezen felül, mint szabályozni kívánt jellemző, a szívótartályi oxigén koncentráció változása is definiálásra került. Hasonlóképpen a nyomás és oxigén koncentráció, mint állapotváltozó a kipufogótartályra is kiszámításra került. A turbina és a kipufogó fojtószelep közötti mérlegelési térfogat nyomása is modellezésre került a kipufogó oldali fojtás

hatásának figyelembe vétele végett. Az elektromechanikusan működtetett EGR- és kipufogó fojtószelep dinamikája összemérhető a töltetcsere rendszer dinamikával, ezért a két beavatkozó-dinamika egytárolós arányos tagok segítségével került figyelembe vételre. Mindkét beavatkozó egy pozíció-szabályozott pillangószelep. A dízelmotor működésére releváns hatásukat a megnyitott aktuális átáramlási keresztmetszetükön keresztül fejtik ki (A_{EGR}, A_{et}). A szabályzó azonban egy relatív nyitási szöveget (φ_{egr} vagy φ_{et}) kérhet 0-100%-ig. A két jellemző közötti nemlineáris kapcsolat leírására vonatkozó összefüggések a [14] és [15] irodalmakban találhatóak. A rendszer nemlineáris viselkedéséből fakadóan a beavatkozók pozíciója a záráshoz közeli tartományban lesz releváns, így a [16]-ban ismertetettekhez hasonlóan történő lineáris felírás is jó közelítést ad.

Az irányításelméletben széles körben az állapotterem alapuló szabályzótervezési módszerek a legelterjedtebbek. Jelen cikk által ismertetett megközelítés is egy ilyen modellen alapszik, így a dízelmotor töltetcsere rendszerét leíró nemlineáris modell végső formájában állapotteres reprezentációban került felírásra. Az állapotvektor a szívótartály-, kipufogótartály-, turbina és kipufogó fojtás közti térfész nyomását és a szívó- és kipufogótartály oxigén koncentrációját tartalmazza az alábbi formában:

$$\mathbf{x} = [p_{im} \quad p_{em} \quad p_{to} \quad x_{O_2,im} \quad x_{O_2,em} \quad \varphi_{egr} \quad \varphi_{et}]^T. \quad (1)$$

A beavatkozó jelek: az EGR-szelep és a kipufogó fojtás megkívánt pozíciói:

$$\mathbf{u} = [\varphi_{egr,dem} \quad \varphi_{et,dem}]^T. \quad (2)$$

A mérhető zavarás a motorfordulatszám és a befecskendezett tüzelőanyag tömegárama:

$$\mathbf{d} = [n_e \quad \sigma_f]^T. \quad (3)$$

Az EGR szelep és a kipufogó fojtás hangsebességhez viszonyított áramlási állapotai és az EGR visszacsapó-szelep a modell un. hibrid, diszkrét-folytonos módjaihoz vezetnek. A szabályzótervezéshez a beavatkozó szelepek hangsebesség alatti, un. szubszónikus állapotai és pozitív kipufogó/szívó oldali nyomásviszony által

meghatározott nominális hibridmódú modell kerül felhasználásra, amely az alábbi formát ölti.

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_{im} \\ \dot{p}_{em} \\ \dot{p}_{to} \\ \dot{x}_{O_2,im} \\ \dot{x}_{O_2,em} \\ \varphi_{egr} \\ \varphi_{et} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r) \\ f_2(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r) \\ f_3(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r) \\ f_4(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r) \\ f_5(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r) \\ f_6(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r) \\ f_7(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ g_{51}(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r) & 0 \\ 0 & g_{61}(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r) \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (4)$$

A rendszer mérhető kimenete az alábbi alakú:

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}_{11}\mathbf{d} + \mathbf{D}_{12}\mathbf{u}. \quad (5)$$

A tesztpadon mind a hat állapotváltozó mérhető volt így a \mathbf{C} mátrix egységmátrix. Későbbi járműves installációk esetére néhány szenzor állapotbecslő segítségével helyettesítésre kerülhet költséghatékonysági szempontok miatt.

A teljesítmény-kimenet a szívótartály oxigén koncentrációja, összhangban a szabályzási céllal, a mért kimenetből származtatható az alábbi egyenlettel:

$$\mathbf{z} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]\mathbf{y} \quad (7)$$

5. SZABÁLYZÓTERVEZÉS

A tervezett szabályzónak maradéktalanul ki kell elégítenie a 3. bekezdésben összefoglalt célokat. Ha a töltetcsere rendszert megvizsgáljuk, akkor világossá válik, hogy a kipufogófojtás alkalmazása minden esetben emeli a motor pumpálási veszteségeit, azaz ellentétes 2)-vel. Éppen ezért addig, ameddig a beszívott töltet megfelelő hígítása elérhető pusztán az EGR szelep nyitásával, a kipufogó fojtást teljesen nyitott állapotban célszerű tartani. Zárását kizárólag abban az esetben célszerű megkezdni, ha az EGR-szelep pozíciója már teljesen nyitott állapotban. Ennek kielégítése legegyszerűbben akkor lehetséges, ha az előző szakaszban ismertetésre került MIMO modellből a szabályozási struktúrát két darab SISO szabályzóra csatoljuk szét: az egyik szabályzó egyedül az EGR-szelep nyitásának változtatása segítségével törekszik a szívótartály oxigén koncentráció alapjelének beállítására teljesen nyitott kipufogó fojtás mellett. A másik szabályzó pedig teljesen nyitott EGR-szelep állás mellett a kipufogó fojtás nagyságának állításával avatkozik be. A két szabályzó között, pedig a következő átváltási logika került implementálásra: alap esetben a csak az EGR-szeleppel működő szabályzó aktíválódik. Ha ennek a kért pozíciója eléri a 100%-ot, akkor

átkapcsolás történik a kipufogófojtással beavatkozó SISO szabályzóra. A visszaváltásra abban az esetben kerül sor, ha a kipufogófojtás kért pozíciója eléri a 70%-ot. A rendszer nemlineáris viselkedéséből fakadóan ugyanis effektív hatást csak az ennél zártabb pozíciók esetén fejt ki.

Az LQ-servo szabályozók számos nemlineáris szabályozási probléma esetében sikerrel kerültek alkalmazásra (lásd [17] és [18]). Emellett csekély számítási igényüknél fogva beágyazott környezetben való implementációjuk is megoldható. Az LQ-servo szabályzó a teljes állapot-visszacsatolást alkalmazó lineáris kvadratikus szabályzó integrátorral kiegészített változata, amely így képessé válik referencijel követésére, így a szabályzási célként kitűzött 1) követelmény kielégítésére. A bevezetendő integráló mesterséges állapot az $x_{im,dem} - x_{im}$ hibajel. Az LQ-sabályozás egy optimális állapot-visszacsatolást alkalmaz, amely minimalizálja az állapotok és a bemenetek energiájának alábbi költségfüggvényét.

$$J(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\bar{\mathbf{x}}^T \mathbf{Q} \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (8)$$

A súlyzómatrixok a szabályzó hangolható paraméterei, amelyek egy megfelelő kiindulási értékről tovább finomíthatók a tesztpadi mérések folyamán. [19] alapján a következőképpen kerültek felvételre:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & & & \\ & q_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & q_n \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{R} = \rho \begin{bmatrix} r_1 & & & \\ & r_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & r_n \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$q_i = \frac{1}{t_{si}(x_{imax})^2}, r_i = \frac{1}{(u_{imax})^2}, \rho > 0, \quad (11)$$

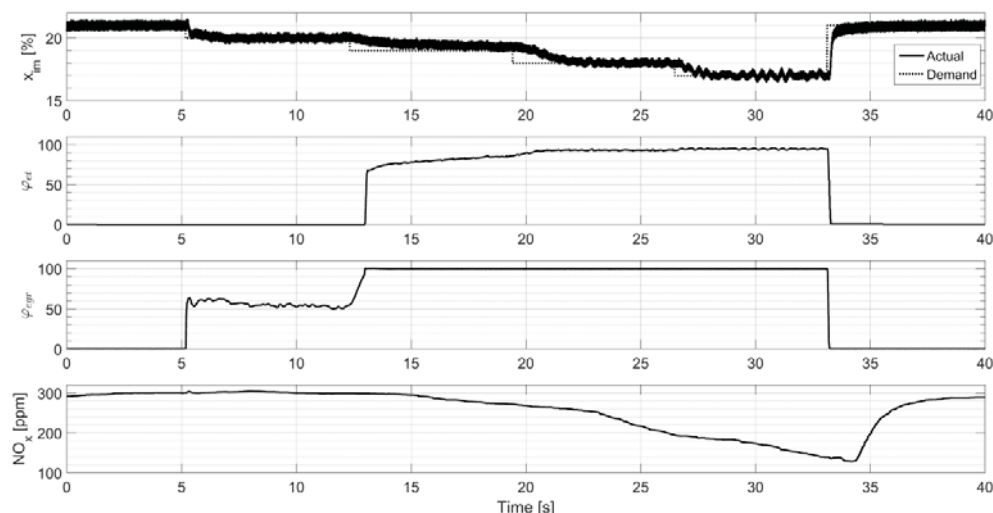
ahol t_{si} az x_i tervezett beállási ideje, x_{imax} az $|x_i|$, u_{imax} az $|u_i|$ maximális értéke, ρ pedig a választott súlyozás a szabályzás és a beavatkozási energia között.

A szabályozótervezéséhez a (4) nemlineáris egyenletrendszer Jacobi-linearizációjára került sor egy jellemző munkapontban: 1200 1/min-es fordulatszámon, alacsony terhelés mellett. Mivel két SISO szabályozó kerül megtervezésre, ezért a (4) rendszer éppen nem használt beavatkozó-állapota elhagyásra került a linearizáció során. A CARE (Control Algebraic Ricatti Equation) fenti peremfeltételekkel való megoldásával a szabályzó megtervezésre került.

6. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

Az előző fejezetben ismertetésre került szabályozási struktúra MATLAB/Simulink környezetben került implementálásra. Lefordítás után gyors prototípus hardver végezte a futtatást, és a beavatkozókval a CAN-buszon való kommunikációt, illetve a mérés rögzítését is. A 2. ábrán egy egységugrásokból álló tesztesetben követhető nyomon a szabályozó működése. A mérés 1200 1/min fordulatszámon és alacsony terhelés mellett került rögzítésre, ami a motor közötti üzeme során egy gyakori üzemállapot. A szívótartályi oxigénkoncentráció 1%-os

lépcsőkben került csökkentésre egészen 17%-ig, majd visszalép a frisslevegő töltetre. A 20%-os oxigén koncentráció még pusztán az EGR szelep nyitásával pontosan beállítható. A 19%-os koncentráció beállításához azonban már nem lenne elég a teljesen nyitott EGR szelepnél a turbófeltöltő és a motor együttműködéséből kialakuló nyomásviszony. Ezért itt megtörténik az átkapcsolás a kipufogófojtással beavatkozó SISO szabályzóra. Eközben az EGR-szelep egy állandó teljesen nyitott parancsot kap. Látható, hogy minden munkapont stabilan, néhány tizedszázalék pontossággal beállításra kerül. A rendszer nemlineáris viselkedéséből fakadóan az egyre kisebb koncentrációk eléréséhez a kipufogófék pozíciójának egyre kisebb mértékű változása tartozik (pl. a 20-35s időszakban). Az ábra utolsó sorában a kipufogógáz nyers NO_x emisszió értékei kerültek ábrázolásra. A javasolt szabályzás a várakozásoknak megfelelően, korrelálva a hengertöltet oxigén koncentrációjával, 300 ppm-es értékről majdnem egyharmadára csökkenti a nyers NO_x kibocsátást.



2. ábra. A javasolt szabályzó teljesítménye a fékpadi mérés során

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Napjaink dízelmotor-fejlesztésében különösen nagy kihívást jelent a nitrogén-oxidok és részecskék kibocsátásának csökkentése amellet, hogy ezzel egy időben a CO_2 kibocsátás is csökkenjen, vagy legalább ne növekedjen. Ennek elérésére a kipufogógáz utánkezeléssel szemben, költség- és tüzelőanyag-fogyasztási szempontok alapján, a nyers emisszió csökkentése kedvezőnek mutatkozik. Ennek egy jól ismert eljárása a

kipufogógáz visszavezetése, ami alternatív égésfolyamatok megvalósítása során is kiemelt szerepet kaphat. A széles körben alkalmazott EGR-arány nem ad pontos képet a beszívott töltet összetételéről. Ennek megoldására a szívótartály oxigén koncentrációjának szabályzási célként való alkalmazása javasolt. Ezen felül, magas nyomású EGR-rendszerek esetében a szívóoldalra visszaáramló kipufogógáz mennyisége korlátos a szívó- és kipufogó tartályok között kialakult nyomásviszony által. Ezen probléma megoldására

a kipufogófojtás alkalmazása javasolt, amellyel tetszőleges nyomáskülönbség, így tetszőleges EGR-tömegáram valósítható meg. Ez tekinthető egyben, a köztes pozíciók pontos megvalósítására képes, új típusú kipufogófékek kiterjesztett alkalmazásának. A fenti célok elérésére egy szabályzási struktúra kerül kidolgozásra, mely a szívótartályi oxigén koncentrációjának jelkövető szabályozását valósítja meg a motor pumpálási munkájának minimalizálása mellett. A szabályzó alapjául a töltetcsere-rendszer fizikai, kémiai törvényekre épülő nemlineáris modell szolgált. A javasolt szabályzási struktúra működése motorfékpadai méréssel kerül bemutatásra.

8. IRODALOM

- [1] Körfer T, Ruhkamp L, Herrmann O, Linssen R, Adolph D.: Verschärfte Anforderungen an die Luftpfadregelung bei Nutzfahrzeugmotoren. MTZ - Motortechnische Zeitschrift 2008; 69(11):958–65. doi: 10.1007/BF03227504.
- [2] Herrmann O. E.: Emissionsregelung bei Nutzfahrzeugmotoren über den Luft- und Abgaspfad, Aachen: Technische Hochschule; 2005. Ph.D. thesis. <http://publications.rwth-aachen.de/record/52065>.
- [3] Bessai C, Stölting E, Gratzke R. Virtueller Sauerstoff-sensor im Einlasskrümmer eines Dieselmotors. MTZ - Motortechnische Zeitschrift 2011; 72(11):874–81.
- [4] Ladommatos N, Abdelhalim S, Zhao H, Hu Z. The dilution, chemical, and thermal effects of exhaust gas recirculation on diesel engine emissions - part 4: effects of carbon dioxide and water vapour. SAE Technical Paper 971660. 1997. doi: 10.4271/971660.
- [5] Akihama K, Takatori Y, Inagaki K, Sasaki S. Mechanism of the smokeless rich diesel combustion by reducing temperature. SAE Technical Paper 2001-01-0655. SAE; 2001. doi: 10.4271/2001-01-0655.
- [6] Rebecchi P. Fundamentals of thermodynamic for pressure-based low-temperature premixed diesel combustion control, Holzgarten Str. 16, 70174 Stuttgart: Universität Stuttgart; 2013. Ph.D. thesis. <http://elib.unistuttgart.de/opus/volltexte/2013/8276>
- [7] Johnson TV. Review of diesel emissions and control. Int. J. Engine Res. 2009;10(5):275–85. doi: 10.1243/14680874JER04009.
- [8] Ammann M, Fekete N, Guzzella L, Glatfelder A. Model-based control of the VGT and EGR in a turbocharged common-rail diesel engine: theory and passenger car implementation. SAE Technical Paper 2003-01-0357. SAE; 2003. doi: 10.4271/2003-01-0357.
- [9] Ahmed FS, Laghrouche S, Bagdouri ME. Analysis, modeling, identification and control of pancake DC torque motors: application to automobile air path actuators. Mechatronics 2012; 22(2):195–212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.01.004>.
- [10] Bárdos Á, Szimandl B, Németh H.: Feedforward LQ servo backpressure controller for engine exhaust throttle. 14th mini conference on vehicle system dynamics, identification and anomalies (VSDIA 2014); 2014.
- [11] J. Wahlstrom, L. Eriksson and L. Nielsen, "EGR-VGT Control and Tuning for Pumping Work Minimization and Emission Control," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 18, no. 4, pp. 993-1003, July 2010. doi: 10.1109/TCST.2009.2031473
- [12] J. Wahlström and L. Eriksson, "Output Selection and Its Implications for MPC of EGR and VGT in Diesel Engines," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 21, no. 3, pp. 932-940, May 2013. doi: 10.1109/TCST.2012.2191289
- [13] Ádám Bárdos, Huba Németh: Model development for intake gas composition controller design for commercial vehicle diesel engines with HP-EGR and exhaust throttling, In Mechatronics, Volume 44, 2017, Pages 6-13, ISSN 0957-4158, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.04.002>
- [14] B. J. Heywood: Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, Inc., 1988.
- [15] P. Carlsson. Flow through a throttle body: A comparative study of heat transfer, wall surface roughness and discharge coefficient. Technical Report ISRN: LIU-IEI-TEK-A-07/0071-SE, Linköping University, 2007.
- [16] BÁRDOS, Ádám; SZIMANDL, Barna; NÉMETH, Huba. H-infinity Backpressure Controller for High Response Engine Exhaust Throttles. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, [S.l.], v. 44, n. 4, p. 201-208, 2016. ISSN 1587-3811.
- [17] P. Bauer, G. Ritzinger, S. A., J. Bokor, LQ servo control design with Kalman filter for a quadrotor UAV, Periodica Polytechnica 36 (1-2) (2008) 9–14. doi:10.3311/pp.tr.2008-1-2.02.
- [18] B. Szimandl, H. Németh, Optimal position control of an electro-pneumatic clutch system, in: Proceedings of the 11th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'12), Seoul, Korea, 2012, pp. 1 – 6.
- [19] Burl, J. B.: Linear Optimal Control, Addison Wesley, Boston, MA, USA 1999. (p. 306)