

# DÍZELMOTOR LÉGMENEDZSMENTJE

Haszonjármű alkalmazások

BÁRDOS ÁDÁM

Témavezető: Dr. Németh Huba

TÉZISEK



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Kandó Kálmán Doktori Iskola  
Gépjárműtechnológia Tanszék  
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2019.



## BEVEZETÉS ÉS KUTATÁSI CÉLKITŰZÉS

---

Egy gépjármű szerkezetének kulcselemét jelenti a meghajtás, ami valamilyen energiaforrásból vonóerőt állít elő. A több mint száz évvel ezelőtt feltalált dízelmotor már az 1900-as évek elején egyeduralgó meghajtássá vált közúti járművekben, a benzinmotor mellett. Térhódításának korai szakaszában a fejlesztés céljai legfőképpen a magasabb fék- illetve fajlagos teljesítmény és simább járás voltak [1].

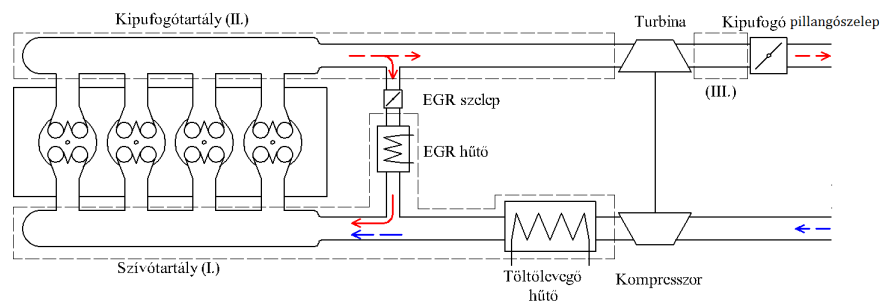
Az első légszennyezési problémák az 1940-es években, Los Angelesben tűntek fel. A szmog legfőképp a nitrogén-oxid és a szénhidrogén származékok reakciójaként keletkezik. Világossá vált, hogy a nitrogén-oxidok és szénhidrogének egyik fő forrásai városi területeken a belsőégésű motorok. Ebből kiindulva először Kaliforniában vezettek be belsőégésű motorok kipufogógázaira vonatkozó emissziós normákat a 60-as években, amit világszerte hasonló előírások követtek [3]. A határértékek szigorodása bevezetésük óta töretlen.

Emellett a 90-es évek végétől kezdődően a figyelem a szén-dioxid kibocsátás irányába fordult, amely alapvetően egy ideális égéstermék a szénhidrogének elégetésekor. Nem kizárólag a véges kőolajkészletek miatt érzett aggodalom hatására történt ez, hanem a szén-dioxid globális felmelegedésben betöltött szerepe is nyilvánvalóvá vált. Előbb önkéntes, majd kötelező flotta kibocsátási  $\text{CO}_2$  korlátozásokat léptettek életbe a világ minden táján [4].

A haszonjármű szektor, amely jelen kutatás fókuszát jelenti, egyébként is kiemelt helyen kezeli az alacsony üzemanyag fogyasztás, még pontosabban az alacsony üzemeltetési és emellett bekerülési költség témakörét.

A jelenleg érvényben lévő és jövőben várható emissziós előírások betartásához valószínűleg elengedhetetlen lesz a kipufogógáz utánkezelő rendszerek beépítése (DPF, SCR, stb.). Habár ezek alkalmazása hátrányokkal jár a jelentős költségükön felül is: például megnövekedett fogyasztás a DPF fojtó hatásának és regenerációs igényének köszönhetően, az SCR katalizátor névleges hatásfokát csak bizonyos hőmérséklet felett éri el, stb. Éppen ezért a motorfejlesztők célja az utánkezelő rendszerek beépített méretének csökkentése, a nyers emisszió mérséklése révén [5].

Haszonjármű dízelmotor töltetcsere rendszerében nagyszámú elhelyezési lehetőség mutatkozik szelepek számára. Például a turbófeltöltő turbinája előtt, után vagy a kompresszor előtt vagy után. Bizonyos beépítések széles körben elterjedtek, gondoljunk csak a tartós fékként használatos kipufogófékre. Bár erre a célra csupán egy kétállású (teljesen zárt vagy teljesen nyitott) pillangószelepet alkalmaznak



1.1. ábra. Optimális szelepelhelyezés motor töltetcsere rendszerében

[10, 11]. A fenti dízelmotor fejlesztési kihívásokat figyelembe véve a motor töltetcsere rendszerében elhelyezhető gyors, fokozatmentesen változtatható állású szelepek számos új motorfunkció megvalósítását tehetik lehetővé: hengertöltet összetétel szabályzást, kipufogógáz hőmérsékletmenedzsmenetet, automatizált sebességváltó váltási folyamatának gyorsítását, illetve az üzemi fék kiegészítését motorfékkel, mely lehetséges új funkciók a disszertáció 1. részében kerültek kidolgozásra. Ezen funkciók optimális megvalósítása és demonstrációja adja a dolgozat célját.

Az egyes szelepelhelyezésekkel hasonló hatások érhetők el (pl.: kipufogógáz visszavezetés növelhető turbina utáni és kompresszor után elhelyezett támogatással is), de a főbb motorikus jellemzőkre (fajlagos fogyasztás, emisszió, stb.) gyakorolt hatásuk nem azonos. Az egymásra és a motorikus jellemzőkre gyakorolt hatások feltérképezése céljából egy részletes motormodell került felépítésre és validálásra motorfékpadi mérésekkel. A szimulációs környezet segítségével megvalósított hatásvizsgálatok segítségével azonosításra került az optimális számú és elhelyezkedésű szelepet használó haszonjármű töltetcsere rendszer a mű 2. részében. Ez, mint turbina utáni- és magasnyomású kipufogógáz visszavezető szelepet használó rendszerként került meghatározásra (1.1. Ábra). Ezen elrendezés képezi az alapját a továbbiakban megvalósított funkcióknak.

Az előzőekben meghatározott lehetséges új motorfunkciók megvalósítására szabályozási stratégiák kerültek azonosításra. Ez kipufogótartályi ellennyomás szabályzást és kipufogó oldali- és magasnyomású kipufogógáz visszavezető szeleppel történő hengertöltet összetétel szabályzást jelent.

A disszertáció 3. részében az ellennyomás szabályzás megvalósításának kidolgozására került sor. Első lépésként fizikai törvényszerűségek segítségével felépítésre került a rendszer dinamikus modellje, mely validálása fékpadi mérésekkel történt. Állapottér alakba történő átalakítás után ez szolgálta a szabályozótervezés alapját. Négy szabályzó került megtervezésre: egy LQ servo, egy modellalapú előreca-  
tolással kiegészített LQ servo, egy H-végtelen és egy csúszómód. A szabályzók teljesítménye három különböző fékpadi ciklus segítségével

vel került megvizsgálásra, majd kiértékelésre. Az előre definiált követelményeket végül az előrecsatolással kiegészített LQ servo elégítette ki maradéktalanul.

A 4. rész a motor hengertöltet összetétel szabályzásának megalkotását foglalja magába. A kipufogógáz visszavezetés hatásának elemzéséből [6–9] kitűnik, hogy a széles körben elterjedt kipufogógáz visszavezetési arány nem jól tükrözi a hengerben a munkaciklust megvalósító gáz összetételét és károsanyag képződés szempontjából sem hordoz releváns információt [2]. Ezen okokból kifolyólag szabályozott jellemzőként a szívótartályi oxigénkoncentráció került megválasztásra. Az előzőekben sikeresen alkalmazott módszer alapján jelen esetben is egy motorfékpadi mérésekkel validált, fizikai elvek alapján létrehozott, állapotér modell adja a szabályzótervezés alapját. A megtervezett szabályzó teljesítménye, mely kielégíti a motor töltetcsere veszteségeinek minimalizálását, motorfékpadi mérések segítségével került demonstrálásra.

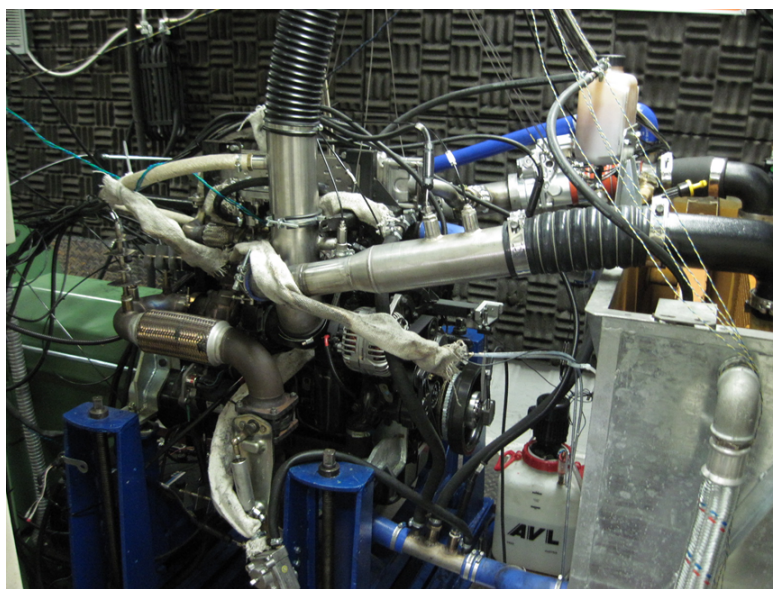
A disszertáció utolsó részében az elért tudományos eredmények négy tézispontba tömörítve találhatók meg.

# 2

## A FELHASZNÁLT ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

---

Mind a kutatási munka során elkészített modellek (részletes és szabályzótervezési célú) identifikációjához és validálásához, mind pedig a tervezett szabályzási funkciók teszteléséhez motorfékpadi mérésekre volt szükség. Ebből a célból a BME Gépjárműtechnológia Tanszék MG épületbeli laboratóriumában egy közepes nagyságú, négyhengeres, négyliteres, közös csöves, közvetlen befecskendezéses és turbófeltöltött haszonjármű dízelmotor került fékpadra állításra (2.1. ábra). A fékpadon, mind statikus, mind dinamikus tesztciklusok futtatására lehetőség nyílt. A motor üzeme szempontjából releváns jellemzők mérhetősége biztosított volt: motor fordulatszám, terhelés, gravimetrikus fogyasztás, nyomások és hőmérsékletek a szívó- és kipufogórendszer minden kitüntetett pontján (környezet, kompresszor előtt, töltőlevegő hűtő előtt stb.). A motor minden hengere indikáló szenzorokkal került felszerelésre, valamint alacsony nyomású indikálás is elvégezhető volt.



2.1. ábra. A fékpadra szerelt tesztmotor

A fékpad vezérlésére, illetve adatrögzítésre dSpace MicroAutoBox gyors prototípus hardver került felhasználásra. A szívó- és kipufogótartályi oxigénkoncentrációk szélessávú lambdaszondák, a nyers nitrogén-oxid emisszió kipufogócsőbe szerelt szenzor segítségével került mérésre. A motor töltetcsere rendszerében a Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft. által kifejlesztett elektromechanikus, pozíciószabályzott pillangószelepek kerültek felhasználásra.

A részletes modell implementációjára GT-Suite környezetben került sor. A szabályozótervezés alapjául szolgáló modellek MATLAB/-Simulink környezetben kerültek felépítésre, identifikálásra és validálásra.

A szabályzótervezés célú modellek fizikai alapokon kerültek felírásra. Koncentrált paraméterű dinamikus modellek felépítéséhez megmaradási elvekből származó differenciál egyenletekre van szükség, amelyek algebrai egyenletekkel kiegészítve különböző eljárásokkal megoldhatók. A modellezés kezdetén már bizonyos egyszerűsítő feltevések adhatók, amelyek segítségével a kimenetet nem jelentősen befolyásoló viselkedések elhagyhatók.

A szabályozástervezés céljára készített modellnek a valós rendszer minden jelentős dinamikai tulajdonságával rendelkeznie kell (ilyenek például a stabilitási tulajdonságok, vagy a rendszer fő időállandói), azonban ne tartalmazzon olyan viselkedést, amely az állapotváltozóknak elhanyagolható hatású, vagy nem kapcsolódik a szabályozási célokhoz. A modell állapotter alakban való felírásához az algebrai egyenletek differenciálegyenletekbe való behelyettesíthetőségét kell megvizsgálni. Ha azok mindegyike behelyettesíthető, akkor a modellezés végeredménye közönséges differenciálegyenletek formájában kapható meg, amelyek nemlineáris állapotter modellé alakíthatók.

# 3

## ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

---

Az értekezésben bemutatott új tudományos eredményeket az alábbi négy tézispontban foglaltam össze.

1. **Tézis** Dízelmotor töltetcsere rendszerébe épített, áramlási keresztmetszet szabályozással elérhető új motorfunkciók meghatározása, valamint ezek megvalósítására szabályzási stratégia és optimális beavatkozó elrendezés azonosítása (a disszertáció 1. és 2. része), [P1, P2, P3, P4].

Új motorfunkciókat határoztam meg, melyek a dízelmotor töltetcsere rendszerének különböző helyein elhelyezhető szelepek segítségével valósíthatók meg. Ez magába foglalja a jármű üzemi fékrendszerének motorfékkel történő kiegészítését, automatizált sebességváltó váltási folyamatának támogatását, kipufogógáz termomenedzsmentet, valamint a hengertöltet összetételének szabályzását. Megvizsgáltam a motor szívó-, kipufogó-, illetve EGR rendszerében különböző pontokon elhelyezett szelepek hatását validált részletes motormodell segítségével. Ennek eredményeképpen meghatároztam egy pillangószelepeket alkalmazó optimális dízelmotor töltetcsere rendszer kialakítást, magasnyomású kipufogógáz visszavezető szelep és turbina után beépített szelep formájában. Levezetem, hogy minden fenti új motorfunkció elérhető a kialakított optimális töltetcsere rendszerbeli beavatkozókkal, ellennyomás- és szívótartályi oxigén koncentráció szabályozással.

2. **Tézis** Egyszerűsített, szabályzótervezés célú dízelmotor töltetcsere rendszer dinamikus modelljei, a kitűzött új motorfunkciók megvalósítására (a disszertáció 4. része és 9. fejezete), [P5, P6, P7, P8, P9].

Felírtam és validáltam a turbina utáni szeleppel és magasnyomású kipufogógáz visszavezetést végző szeleppel rendelkező dízelmotor egyszerűsített, szabályzótervezési célú modelljeit vegyes termodinamikai rendszerként. A modellek a következő speciális tulajdonságokkal rendelkeznek:

1. A szelepeket használó dízelmotor töltetcsere rendszer modelljei nemlineáris differenciál- algebrai egyenletek formájában írtam fel. A differenciál egyenleteket a gáz tömeg mérleg megmaradási egyenletei alkotják a szívótartályra, a kipufogótartályra és a turbina utáni szelep közötti térfogatra, mint mérlegelési térfogatokra vonatkozóan.

2. A hengertöltet szabályzásra felírt modell teljesítmény-kimenetét a szívótartály oxigén koncentrációjaként adtam meg.
3. Megmutattam, hogy a kipufogó ellennyomásra kettő, a hengertöltet összetételre öt állapotváltozóval rendelkező nemlineáris dinamikus modell felírható szabványos input affin alakban.

$$\frac{dx}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{u}, \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}).$$

4. Megmutattam, hogy a nemlineáris modell koordináta függvényei a következő tulajdonságúak:
  - a) Az  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  koordináta függvény függ a  $\mathbf{d}$  zavarás vektortól is, valamint hibrid viselkedésű:  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{d}, r)$ , ahol  $r : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{N}$  egy tartományonként konstans kapcsoló függvény, amely az állapotteret a következő véges egész halmazra képezi  $\mathbb{N} = \{1, 2\}$  értékkel az ellennyomás modellre és  $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  értékkel a hengertöltet összetétel modellre vonatkozóan,  $\mathbf{x}$  pedig az állapot vektort jelöli.
  - b) A  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  koordináta függvény affin kombinációja az állapotvektornak, azaz  $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{b}$ , ahol  $\mathbf{B}$  egy konstans mátrix és  $\mathbf{b}$  egy konstans vektor.
  - c) A kimeneti egyenlet koordináta függvénye az alábbi alakú:  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{e}(\mathbf{d})$ , ahol  $\mathbf{C}$  egy konstans mátrix és  $\mathbf{e}$  egy nemlineáris függvénye a  $\mathbf{d}$  zavarás vektornak.

3. **Tézis** A motor kipufogó tartály ellennyomás szabályozási feladat és az ellennyomás szabályozó megtervezése (a disszertáció 10. fejezete) [P5, P6, P7].

1. Meghatároztam a kipufogótartályi nyomás jelkövető szabályozási problémáját fokozatmentesen változtatható áramlási keresztmetszetű szelep segítségével, mely a turbina után kerül alkalmazásra. Figyelembe vettem az egyes hengerek kipufogási folyamataiból eredő nyomásváltozást, amely a rendszer nem modellezett dinamikája.
2. A szabályozási célokat öt pontban foglaltam össze.
3. A fenti feltételezésekkel négy különböző szabályzót terveztem és hangoltam be. A szabályozott rendszerek különböző jellemzőit három tesztciklusban hasonlítottam össze motorfékpadi mérések segítségével, melyek kipufogógáz termomenedzsmentet, kipufogógáz visszavezetés támogatását és az üzemi fék motorfékkel történő kiegészítése során elért teljesítményt vizsgálják. Ezekkel a vizsgálatokkal a következő megfigyelésekre jutottam:

- a) Az LQ servo szabályzó pontos jelkövetést mutat, de nem képes egyidejűleg kielégíteni a zárt hurkú válaszütem és szabályzási bemenet oszcillációjának korlátozására kiírt feltételeket.
  - b) A H-végtelen szabályzó válaszüteme gyors, de a szabályzási bemenet oszcillációja túl magas és nagy számítási kapacitás szükséges az implementációhoz.
  - c) A csúszómód szabályzó válaszüteme gyors, de az állandósult állapotbeli szabályzási hiba meghaladja a követelmény szintjét néhány tesztesetben.
  - d) Az LQ servo szabályzó modellalapú előrebecsléssel kiegészített alakja kielégíti a válaszütemre és kis szabályzási aktivitásra vonatkozó követelményeket is.
4. A fenti összehasonlítás eredményei alapján a modellalapú előrebecsléssel kiegészített LQ servo szabályzót választottam, mint javasolt szabályzási metódus. Ez a szabályzó minden szükséges kritériumot kielégít, úgy mint a nyomás túllendülésére, jelkövetési pontosságra, szabályzási bemenet oszcillációjára, számítási kapacitásigényre és könnyű kalibrálhatóságra vonatkozó előírásokat együttesen.
4. **Tézis** A hengertöltet összetételének szabályzási problémája és a szívótartályi oxigénkoncentráció szabályozása, magas nyomású kipufogógáz visszavezetést végző szelep és a kipufogócsőben a turbina után elhelyezett szelep segítségével (a disszertáció 4. része), [P9, P10].
- 1. Definiáltam a hengertöltet összetételének jelkövető szabályzási problémáját turbina után alkalmazott szelep és magas nyomású kipufogógáz visszavezetést végző szelep segítségével.
  - 2. A széles körben elterjedt kipufogógáz arány helyett, annak hátrányainak megvilágítása után, egy új szabályozandó jellemzőt választottam: a szívótartályi oxigénkoncentrációt.
  - 3. A fenti feltételezésekkel egy LQ servo szabályzót terveztem és hangoltam be a szívótartály oxigén koncentrációjának szabályzására. A szabályozott rendszer jellemzőit fékpadi mérések segítségével ellenőriztem, amelynek eredményeképpen a következő következtetésekre jutottam:
    - a) A szabályzó kielégíti a jelkövetés pontosságának követelményét.
    - b) A szabályzó kielégíti a motor töltetcsere veszteségeinek minimalizálásának követelményét.

## AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK

---

Az értekezés témájában a következő konferencia- és folyóiratcikkek készültek (zárójelben a publikációhoz kapcsolódó tézis szerepel):

[P1] Ádam Bárdos és Huba Németh. "EGR Support Investigation on a Diesel Engine." In: A Jövő Járműve 3-4 (2011), pp. 48–53.

(Thesis 1)

[P2] Bárdos Ádám és Németh Huba. "Dízelmotor légmenedzsmen-tje - a gázcserefolyamat irányítása." In: I. BME Doktorandusz Konferencia. Nov. 2011. (1. Tézis)

[P3] Huba Németh, Ádám Bárdos, és Jörg Mellar. "Selektive Turboaufladung des Luftpressers an NFZ Dieselmotoren." In: 5. MTZ Fachtagung Ladungswechsel im Verbrennungsmotor. Stuttgart, Németország: Wiesbaden, 2012.10.23-2012.10.24, pp. 1–10. (1. Tézis)

[P4] Ádam Bárdos, Sándor Vass és Huba Németh. "Validation of a detailed commercial vehicle turbocharged diesel engine model." In: A Jövő Járműve 1-2 (2014), pp. 25–31. (1. Tézis)

[P5] Ádam Bárdos, Barna Szimandl, és Huba Németh. "Feedforward LQ servo backpressure controller for engine exhaust throttles." In: I. Zobory (szerk.) VSDIA 2014 14th Mini Conference On Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies. Budapest, Hungary, 10.11.2014-12.11.2014. (2. és 3. Tézis)

[P6] Ádám Bárdos, Barna Szimandl, és Huba Németh. "H-infinity Backpressure Controller for High Response Engine Exhaust Throttles." In: Periodica Polytechnica Transportation Engineering 44.4 (2016), pp. 201–208. doi: 10 . 3311 / PPtr . 8470. (2. és 3. Tézis)

[P7] Ádam Bárdos, Barna Szimandl és Huba Németh. "Controller structure for high response engine exhaust throttles." In: International Journal of Heavy Vehicle Systems (accepted for publication). (2. és 3. Tézis)

[P8] Ádam Bárdos és Huba Németh. "Control oriented air path model for compressed air boosted Diesel engines." In: Periodica Polytechnica 41.1 (2013), pp. 3–12. doi: 10.3311/PPtr.7093.

(2. és 4. Tézis)

[P9] Ádám Bárdos és Huba Németh. "Model development for intake gas composition controller design for commercial vehicle diesel engines with HP-EGR and exhaust throttling." In: Mechatronics 44. Supplement C (2017), pp. 6–13. (2. és 4. Tézis)

[P10] Bárdos Ádam és Németh Huba. "Haszonjármű dízelmotor szívótartályi oxigén koncentrációjának szabályzása magasnyomású EGR szeleppel és kipufogó oldali fojtással." In: Gép 3 (2017), pp. 9–14. (4. Tézis)

[P11] Ádam Bárdos és Huba Németh. "Diesel engine cylinder-charge composition control with HP-EGR and exhaust throttling" In: I. Zobory (szerk.) VSDIA 2018 16th Mini Conference On Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies. Budapest, Hungary, 5-7 November 2018 (4. Tézis)

## AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA

---

A kutatás eredményeként kialakított szelepeket használó, optimális haszonjármű dízelmotor töltetcsere rendszer sikerrel alkalmazható szériakonstrukciókban is, ezzel is csökkentve a motor előállítási költségeit, emisszióját és növelve élettartamát. Mind az ellennyomás szabályzó, mind pedig a hengertöltet összetétel (oxigén koncentráció) szabályzó megalkotása során elsődleges szempont volt a beágyazott környezetben való gyakorlati megvalósíthatóság. Ezt segíti elő a kis számítási kapacitásigény és a kevés számú, megfogható jelentéssel bíró paraméterrel való kalibrálhatóság, a fizikai modell alapú tervezés eredményeként. A megalkotott egyszerű modellek (motor ellennyomás és szívótartályi oxigén koncentráció) továbbá felhasználható konstrukciós paraméterek vizsgálatára, optimalizálására, illetve bármely szenzor elhagyására irányuló törekvés esetén állapotmegfigyelő tervezésére.



## BIBLIOGRAPHY

---

- [1] Richard van Basshuysen and Fred Schäfer. *Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. Springer Vieweg, 2015. DOI: [10.1007/978-3-658-04678-1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-04678-1) (cit. on p. 1).
- [2] Olaf Erik Herrmann. "Emissionsregelung bei Nutzfahrzeugmotoren über den Luft- und Abgaspfad." PhD thesis. Aachen: Technische Hochschule, 2005, 145 S. : graph. Darst. URL: <http://publications.rwth-aachen.de/record/52065> (cit. on p. 3).
- [3] B. J. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, Inc., 1988. (Cit. on p. 1).
- [4] Timothy V. Johnson. "Review of CO<sub>2</sub> Emissions and Technologies in the Road Transportation Sector." In: *SAE Int. J. Engines* 3 (1 2010), pp. 1079–1098. DOI: <https://doi.org/10.4271/2010-01-1276> (cit. on p. 1).
- [5] Thomas Körfer, Ludger Ruhkamp, Olaf Erik Herrmann, René Linsen, and Dirk Adolph. "Verschärfte Anforderungen an die Luftpfadregelung bei Nutzfahrzeugmotoren." German. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 69.11 (2008), pp. 958–965. DOI: [10.1007/BF03227504](https://doi.org/10.1007/BF03227504). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF03227504> (cit. on p. 1).
- [6] N. Ladommatos, S. Abdelhalim, H. Zhao, and Z. Hu. "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions - Part 1: Effect of Reducing Inlet Charge Oxygen." In: *SAE Technical Paper 961165* (1996). DOI: [10.4271/961165](https://doi.org/10.4271/961165) (cit. on p. 3).
- [7] N. Ladommatos, S. Abdelhalim, H. Zhao, and Z. Hu. "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions - Part 2: Effects of Carbon Dioxide." In: *SAE Technical Paper 961167* (1996). DOI: [10.4271/961167](https://doi.org/10.4271/961167) (cit. on p. 3).
- [8] N. Ladommatos, S. Abdelhalim, H. Zhao, and Z. Hu. "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions - Part 3: Effects of Water Vapour." In: *SAE Technical Paper 971659* (1997). DOI: [10.4271/971659](https://doi.org/10.4271/971659) (cit. on p. 3).
- [9] N. Ladommatos, S. Abdelhalim, H. Zhao, and Z. Hu. "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions - Part 4: Effects of Carbon Dioxide and Water Vapour." In: *SAE Technical Paper 971660* (1997). DOI: [10.4271/971660](https://doi.org/10.4271/971660) (cit. on p. 3).

- [10] D. Thompson and R. G. Baines. "Exhaust pressure modulation valve US5394901 patent." US5394901 (A). 1995-03-07 (cit. on p. 2).
- [11] D. Thompson and M. E. Flett. "Exhaust brake and pressure modulation valve EP0578373 patent." EP0578373 (A1). 1994-01-12 (cit. on p. 2).