IOSUD - Universitatea Politehnica Timişoa
Şcoala Doctorală de Studii Inginereşti

Cercetări privind retehnologizarea motorului cu aprindere prin comprimare în vederea creșterii performanțelor și reducerea emisiilor poluante

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul de doctorat inginerie mecanică

autor ing. Suciu Cosmin Constantin
conducător științific Prof.univ.dr.ing. Ioana Ionel și Prof.univ.dr.ing. Liviu Mihon

Teza de doctorat abordează provocarea reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră și a poluanților atmosferici proveniți din transporturi, aceasta reprezintând una dintre prioritățile majore ale politicilor climatice internaționale și europene. Acordul de la Paris stabilește obiectivul limitării creșterii temperaturii medii globale la mult sub 2 °C și, ideal, la 1,5 °C față de nivelurile preindustriale, iar Uniunea Europeană a transpus această direcție strategică prin Legea europeană a climei și prin pachetul legislativ Fit for 55, care urmărește reducerea cu cel puțin 55% a emisiilor nete de gaze cu efect de seră până în 2030 și atingerea neutralității climatice până în 2050. În acest cadru, sectorul transporturilor ocupă un loc central, deoarece contribuie cu aproximativ un sfert la totalul emisiilor de gaze cu efect de seră ale Uniunii Europene, iar transportul rutier generează partea dominantă a acestor emisii. În plus, deși electrificarea, hidrogenul verde și combustibilii sintetici sunt considerate direcții strategice pentru viitorul mobilității europene, realitatea tehnică și economică arată că o parte importantă a flotelor comerciale și a vehiculelor diesel existente va continua să fie exploatată încă un număr semnificativ de ani, mai ales în regiunile Europei Centrale și de Est.

Această discrepanță dintre obiectivele climatice ambițioase ale Uniunii Europene și ritmul real de înnoire a parcului auto justifică necesitatea unor soluții de tranziție aplicabile imediat vehiculelor aflate deja în exploatare. Din această perspectivă, retehnologizarea motoarelor diesel existente devine o opțiune relevantă atât tehnic, cât și economic, deoarece poate reduce emisiile și îmbunătăți performanțele fără costurile și impactul de mediu asociate înlocuirii premature a întregii flote. Literatura recentă și analizele de tip life cycle assessment citate în teză arată că, dacă mixul energetic utilizat pentru soluțiile auxiliare este favorabil, modernizarea vehiculelor existente poate reduce emisiile totale pe ciclul de viață cu 30–50% față de scenariul de înlocuire directă cu vehicule noi, prin evitarea emisiilor încorporate în fabricație și prin reducerea emisiilor de operare. În consecință, teza se înscrie într-o direcție de cercetare compatibilă cu tendințele europene actuale: nu contestă traseul către mobilitatea cu emisii foarte scăzute sau zero, ci propune o soluție intermediară de decarbonizare progresivă pentru vehiculele diesel comerciale deja existente.

Pornind de la acest context, teza de doctorat investighează, dintr-o perspectivă integrată, posibilitățile de retehnologizare durabilă a unui motor diesel comercial omologat Euro 3, utilizat în transportul rutier, în condițiile în care reducerea emisiilor trebuie realizată fără înlocuirea completă a flotei și fără creșteri

excesive ale costurilor sau ale complexității tehnice. Cercetarea pornește de la observația că o parte semnificativă a parcului auto diesel din exploatare este supusă unor intervenții de retehnologizare orientate aproape exclusiv spre creșterea puterii și a cuplului, fără o evaluare riguroasă a efectelor asupra emisiilor, consumului și durabilității. În opoziție cu această abordare parțială, teza propune și validează conceptul de retehnologizare durabilă, definit ca modernizarea controlată a unui sistem de propulsie existent prin combinarea unor soluții compatibile între ele, capabile să reducă impactul de mediu, să mențină sau să îmbunătățească performanțele și să rămână fezabile pentru aplicații reale.

Fundamentul tezei constă în reducerea emisiilor la motoarele diesel nu poate fi obținută eficient doar prin măsuri izolate, aplicate pe un singur subsistem, ci necesită o abordare sistemică, în care combustibilul, strategia de injecție, supraalimentarea, controlul electronic și monitorizarea în timp real sunt tratate ca elemente interdependente ale aceluiași sistem de propulsie. Pe această bază, cercetarea propune o arhitectură experimentală care combină alimentarea dual diesel–hidrogen sub formă de HHO, injecția de apă și apă–metanol, modernizările mecanice ale sistemului de injecție și ale supraalimentării și integrarea unui sistem IoT de măsurare a cuplului și monitorizare a funcționării. Astfel, teza nu este o succesiune de studii izolate, ci un program unitar de cercetare, construit etapizat, care urmărește atât evaluarea efectelor individuale ale fiecărei soluții, cât și analiza efectelor cumulative și a interacțiunilor dintre acestea.

Scopul general al tezei este dezvoltarea și validarea unui pachet integrat de soluții de retehnologizare pentru un motor diesel comercial Euro 3, astfel încât să se obțină reduceri relevante ale emisiilor de NOx, CO, HC și particule, concomitent cu menținerea sau chiar îmbunătățirea performanțelor energetice și mecanice ale sistemului de propulsie. Țintele formulate în teză vizează reduceri de ordinul a 20–30% pentru principalii poluanți raportați la configurația de referință, menținerea sau reducerea emisiilor specifice de CO_2, creșteri moderate de eficiență și limitarea costurilor suplimentare de retehnologizare la aproximativ 20% din valoarea inițială a vehiculului. Pentru atingerea acestui scop sunt definite șase obiective specifice: evaluarea alimentării duale diesel–hidrogen/HHO, investigarea injecției de apă–metanol, analiza modificărilor de tip retrofit ale sistemului de injecție și ale ECU, evaluarea conceptuală a supraalimentării asistate electric, dezvoltarea unui sistem IoT de monitorizare și, în final, integrarea sinergică a tuturor soluțiilor într-o configurație complet retehnologizată.

Din punct de vedere experimental, teza utilizează ca platformă de cercetare un motor diesel cu patru cilindri în linie, cilindree totală de 1896 cm^3, raport de comprimare 19,5:1, pompă rotativă Bosch VP37 în configurația de bază, turbocompresor Garrett GT1749V cu geometrie variabilă și intercooler lateral, montat pe un vehicul cu omologare Euro 3. Valorile nominale de serie sunt 66 kW putere maximă la 3750 rpm și 210 Nm cuplu maxim la aproximativ 2100 rpm. Configurația de referință este comparată cu mai multe stadii succesive de modificare, pentru a identifica separat efectul fiecărei intervenții și, ulterior, al combinațiilor dintre ele. Măsurătorile de putere și cuplu au fost realizate pe bancul dinamometric MAHA LPS 3000, iar emisiile gazoase și opacitatea au fost determinate cu analizorul Capelec 3200 și echipamente certificate conform standardelor aplicabile, în condiții controlate de temperatură și presiune atmosferică.

Metodologia experimentală este organizată etapizat, de la configurația de referință către configurația integrată finală. Etapa E1 furnizează baza de comparație, E2 tratează alimentarea dual diesel–HHO, E3 analizează injecția apă–metanol, E4 se concentrează pe optimizarea injecției și a parametrilor ECU, E5 tratează conceptual supraalimentarea hibrid-electrică, E6 introduce monitorizarea IoT, iar E7 validează

funcționarea integrată a soluțiilor într-un scenariu de retehnologizare completă. Toate măsurătorile au fost realizate cu controlul variabilelor, cu serii repetate pe punctele de funcționare relevante și cu o abordare menită să asigure comparabilitatea directă între configurații.

Rezultatele obținute pentru obiectivul O1 arată că suplimentarea cu HHO în admisia motorului diesel influențează favorabil emisiile primare și calitatea arderii. În testele realizate la aproximativ 820 rpm și 2000 rpm, concentrația de CO scade de la 0,061% la 0,020% la ralanti și de la 0,084% la 0,026% la 2000 rpm, în timp ce HC se reduce de la 45 ppm la 14 ppm la ralanti și de la 37 ppm la 15 ppm la 2000 rpm. Totodată, fracția de CO_2 în gazele de evacuare scade de la 3,91% la 2,56% la ralanti și de la 4,22% la 2,58% la 2000 rpm, iar concentrația de O_2 crește de la 14,30% la 17,02%, respectiv de la 14,10% la 16,89%. Aceste rezultate indică o ardere mai completă, o reducere a fracției de carbon fosil ars și o îmbunătățire a caracterului oxidant al amestecului, confirmând că alimentarea dual̆ă diesel–HHO poate constitui o soluție eficientă de reducere a emisiilor de CO și HC, dar și o bază pentru optimizări ulterioare.

Pentru obiectivul O2, injecția de apă–metanol este analizată ca tehnică de răcire internă a arderii și control al formării NOx. Literatura integrată în teză și rezultatele proprii arată că raporturi adecvate de apă sau apă–metanol pot reduce temperatura gazelor de evacuare cu aproximativ 100–200 °C și emisiile de NOx cu 30–60%, mai ales la sarcini ridicate și în zona de turație reprezentativă pentru exploatarea rutieră. În logica tezei, rolul injecției apă–metanol este dublu: pe de o parte, funcționează ca soluție independentă de reducere a NOx în configurația de bază, iar pe de altă parte este utilizată ca metodă de compensare a efectelor termice nedorite generate de alimentarea dual̆ă și de creșterea performanțelor prin recalibrare ECU și modernizări mecanice. Prin această poziționare, tehnologia WMI devine un element de echilibrare între obiectivele de eficiență și cele de emisii.

Obiectivul O3, dedicat modificărilor sistemului de injecție și ale ECU, ocupă un loc central în teză, deoarece face legătura directă între intervențiile mecanice, controlul electronic și răspunsul funcțional al motorului. Modernizările implementate includ înlocuirea duzelor injectoarelor cu unele de 0,270 mm, trecerea la un plunger de 12 mm pentru pompa Bosch VP37, montarea unui turbocompresor Garrett GT1749VB, înlocuirea intercoolerului lateral cu unul frontal și adaptarea traseului de admisie prin conducte metalice și galerie de diametru mărit. În paralel, ECU Bosch EDC15 a fost recalibrat prin modificarea hărților de combustibil, avans la injecție, limitatori de cuplu și fum, EGR și presiune de supraalimentare. Rezultatele arată că această combinație coerentă de modificări permite creșterea puterii maxime de la 66 kW la peste 110 kW și a cuplului maxim de la 210 Nm la aproximativ 300 Nm, ceea ce confirmă capacitatea unui pachet de retrofit bine proiectat de a crește substanțial performanța motorului fără a compromite controlul procesului de combustie.

Teza discută critic și efectele unei reparametrări ECU aplicate izolat, fără integrarea altor măsuri de control. Datele prezentate pentru configurațiile testate arată că simpla recalibrare orientată spre performanță poate reduce aparent unele semnale de fum sau poate modifica favorabil anumite regimuri de funcționare, dar poate conduce simultan la creșteri ale CO_2 și la un bilanț global de emisii mai puțin favorabil dacă nu este corelată cu aportul de aer, cu răcirea arderii și cu caracteristicile sistemului de injecție. Această observație este importantă pentru concluzia generală a tezei: performanța și reducerea emisiilor nu trebuie tratate separat, ci printr-un compromis optimizat la nivel de sistem.

Pentru obiectivul O4, teza realizează o analiză sistematică a literaturii privind turbosuflantele hibride electrice și supraalimentarea asistată electric. Studiile sintetizate indică potențiale creșteri ale eficienței

termice de 3–10% și reduceri comparabile ale consumului specific de combustibil, mai ales în cicluri dinamice, printr-o gestionare mai eficientă a energiei gazelor de evacuare. Deși această tehnologie nu este implementată experimental în configurația finală a tezei, analiza sa are rol strategic: arată cum soluțiile validate pe motorul experimental pot fi extinse în viitor către arhitecturi de propulsie mai avansate, compatibile cu tendințele europene de electrificare parțială și hibridizare funcțională a sistemelor auxiliare.

Obiectivul O5 dezvoltă componenta de monitorizare și validare a cercetării prin realizarea unui sistem IoT de măsurare bidirecțională a cuplului, bazat pe tensometre rezistive montate pe arbore, punte Wheatstone, modul HX711 și microcontroler ESP8266 cu transmisie wireless a datelor. Calibrarea statică, realizată în intervalul 5–50 Nm și în ambele sensuri de rotație, a evidențiat o relație aproape liniară între semnal și cuplul aplicat, cu $R^2 \approx 0{,}999$, eroare medie absolută de circa 0,56 Nm și precizie mai bună de 2,5 Nm pe întreg domeniul analizat. Aceste rezultate arată că sistemul IoT propus poate fi utilizat nu doar ca instrument auxiliar de laborator, ci și ca infrastructură de date pentru monitorizarea în timp real a funcționării sistemului de propulsie, oferind suport pentru diagnoză, analiză predictivă și dezvoltarea ulterioară a unui geamăn digital.

Obiectivul O6 reprezintă etapa de sinteză și validare integrată a tezei. În această fază, soluțiile investigate separat sunt reunite într-o configurație complet retehnologizată, iar motorul este testat în scenarii comparative de tip înainte–după, la aceleași regimuri de funcționare. Analiza integrată arată că, atunci când injecția apă–metanol, modificările ECU și mecanice sunt combinate coerent, se pot obține reduceri totale de emisii de aproximativ 25–40% față de configurația de referință alimentată exclusiv cu carburant. Totodată, aceste reduceri sunt obținute fără compromisuri majore asupra performanței mecanice, iar în anumite zone de funcționare apar chiar îmbunătățiri ale eficienței globale și ale răspunsului sistemului de propulsie. Importanța acestei etape constă în demonstrarea faptului că soluțiile propuse nu sunt doar fezabile separat, ci pot funcționa sinergic într-o arhitectură unitară de retehnologizare durabilă.

Din punct de vedere științific și aplicativ, contribuțiile originale ale tezei sunt multiple. În primul rând, teza definește și validează experimental un concept integrat de retehnologizare durabilă pentru un motor diesel comercial Euro 3, adaptat realităților tehnice și economice ale flotelor existente. În al doilea rând, cercetarea cuantifică, pe aceeași platformă experimentală și în condiții comparabile, efectele alimentării duale diesel–HHO, ale injecției apă–metanol și ale modificărilor ECU si mecanice asupra performanțelor și emisiilor. În al treilea rând, teza dezvoltă și validează un sistem IoT de măsurare a cuplului, capabil să susțină monitorizarea avansată și extinderea către modele de tip digital twin. Lucrarea demonstrează că integrarea coerentă a acestor soluții poate transforma un motor diesel comercial existent într-o configurație semnificativ mai apropiată de cerințele actuale de eficiență și emisii, oferind o cale realistă de tranziție între flota convențională existentă și obiectivele climatice asumate de Europa.

În concluzie, teza se înscrie într-o direcție de cercetare de actualitate pentru Uniunea Europeană, în care decarbonizarea transportului rutier nu este abordată exclusiv prin substituția rapidă a vehiculelor existente, ci și prin modernizarea inteligentă a celor aflate deja în exploatare. Rezultatele obținute confirmă că alimentarea dual cu HHO, injecția apă–metanol, optimizarea injecției, monitorizarea IoT și integrarea etapizată a acestor soluții pot constitui un pachet tehnologic viabil pentru reducerea emisiilor și creșterea performanțelor motoarelor diesel comerciale. Prin această contribuție, teza oferă atât o bază

experimentală solidă, cât și un cadru conceptual aplicabil strategiilor de tranziție energetică și tehnologică din transportul rutier european.

Cuvinte-cheie: motor cu aprindere prin comprimare, retehnologizare, reducerea emisiilor poluante, creșterea performanțelor.