

Iuliana Costiuc

**SUPRAALIMENTAREA
MOTOARELOR CU ARDERE INTERNĂ
FOLOSIND TEHNOLOGIA UNDELOR DE
PRESIUNE**



EDITURA
UNIVERSITĂȚII
TRANSILVANIA
DIN BRAȘOV

2023



Profesorilor mei.

CUPRINS

CUVÂNT ÎNAINTE	5
1. CAPITOL 1 - INTRODUCERE	8
1.1 Motoarele cu ardere internă. Rolul lor în lumea de astăzi.	8
1.2 Emisii – Previzionări, tendințe și consecințe	11
1.3 Soluții. Perspective.	15
2. CAPITOL 2 – LIMITE ALE PERFORMAȚELOR M.A.I.	17
2.1 Generalități	17
2.2 Supraalimentarea	18
2.3 Scurt istoric. Supraalimentarea. Tehnologia undelor de presiune.	23
3. CAPITOL 3 – SUPRAALIMENTATORUL CU UNDE DE PRESIUNE	38
3.1 Clasificare. Design și construcție	38
3.2 Principiile de funcționare ale SUP	44
3.3 Caracteristici de performanță	51
3.4 Tehnologia undelor de presiune - beneficii și neajunsuri	64
4. CAPITOL 4 – MODELARE ȘI ECUAȚII DESCRIPTIVE	69
4.1 Modelarea dimensională și a formelor geometrice	69
A. Stabilirea preliminară a dimensiunilor optime ale rotorului	72
B. Optimizarea configurației canalelor	73
a. Stabilirea suprafețelor de calcul	74
b. Stabilirea formei secțiunii canalelor noului SUP	77
4.2 Model de calcul al pierderilor de presiune	80
4.3 Calculul unghiului de înclinație al canalelor	86
4.3.1 Parametrii aerului de admisie.	88
4.3.2 Stabilirea unghiului de înclinație axială al canalelor	91
4.4 Modelarea ecuațiilor de curgere a fluidelor considerate vâscoase	95
4.5 Teoria undelor liniare	113
4.5.1. Modelul undei primare	116
4.5.2. Unde de presiune în SUP	118
4.6. Unde de șoc normale	121
4.7. Unde de șoc oblice	124
4.8. Secțiunea critică. Modelul curgerii înecate	126
4.9 Validarea modelului optimizat	131

5. CAPITOL 5 – SIMULARE SI VALIDARE EXPERIMENTALĂ ÎN MEDIUL VIRTUAL	133
5.1 Modelarea standului virtual	133
5.2 Simularea și validarea experimentală a noului SUP	144
5.3 Lucrul mecanic extras	145
5.4 Zgomotul	148
5.5 Randamentul transferului de energie	149
6. POSTFAȚĂ.	151
LISTA DE NOTAȚII SI ABREVIERI	153
BIBLIOGRAFIE	154

CUVÂNT ÎNAINTE

Prezenta monografie oferă o perspectivă detaliată asupra unui domeniu restrâns din cadrul supraalimentării motoarelor termice, și anume supraalimentarea cu unde de presiune. Ea se adresează în primul rând studenților dar și inginerilor din domeniul industriei autovehiculelor care își propun înțelegerea proceselor de supraalimentare a motoarelor cu ardere internă prin folosirea proprietăților acustice și gazo-termodinamice ale undelor de presiune.

Această lucrare își propune (re)aducerea în prim plan a supraalimentatorului cu unde de presiune, un echipament care a trezit interesul cercetătorilor pentru câteva decade ale secolului trecut, dar care a fost marginalizat după anii 2000 din cauza dificultății enunțării teoriilor și scrierii ecuațiilor care guvernează fenomenele complexe din interiorul acestuia, apogeul de interes fiind atins înaintea dezvoltării industriei computerelor și creșterii vitezei de lucru cu ajutorul soft-urilor specializate. Totuși, datorită avantajelor indiscutabile ale acestui echipament, în special robustețea, răspunsul rapid și posibilitatea de funcționare fără sursă de energie, supraalimentatorul cu unde de presiune (SUP) a rămas permanent în atenția inginerilor din zona industriei aeronautice, în special în aplicații de tip turbină. De curând a avut loc o revigorare a supraalimentatorului cu unde de presiune (2022) prin contribuția Antrova GmbH, compania deținătoare actualmente a patentului *Complex*.

Nu în ultimul rând, lucrarea prezintă și o serie de metode de optimizare a configurației geometrice a compresorului cu unde de presiune pentru a putea fi folosit în supraalimentarea unei game mult mai largi de motoare termice, în special a celor care utilizează combustibili „prietenoși” cu

mediul. Pentru exemplificare sau comparație, sunt detaliate elemente specifice ale celui mai de succes model SUP elaborat până în prezent, care au echipat peste 150.000 de vehicule vândute și sub 0,05% probleme de orice natură, COMPREX CX-93.

Monografia de față a fost structurată pe mai multe capitole, cuprinzând generalități, istoric, noțiuni teoretice de bază, modelare matematică și metode de simulare a funcționării în mediul virtual. Ea sintetizează munca de cercetare a inginerilor preocupați de dezvoltarea și implementarea tehnologiei cu unde de presiune de-a lungul unui secol, dar și lucrări scrise de autor de-a lungul anilor despre supraalimentarea cu unde de presiune, respectiv capitole din teza [109] și articole la care se face referință în Bibliografie. În **Capitolul 1** introductiv, s-au prezentat câteva dintre problemele actuale specifice sistemelor de propulsie bazate pe arderea combustibililor fosili, principalul « punct nevralgic » fiind fără îndoială, emisiile poluante sau cele cu efect de seră, care au un impact deosebit asupra naturii, vieții și biodiversității pe planetă. De asemenea, s-au enunțat principalele soluții și perspective în diminuarea volumului de emisii, cu accent pe legislația și standardele internaționale impuse cu precădere în domeniul transporturilor, principala sursă de emisii de gaze cu efect de seră. A fost evidențiată necesitatea cercetării sistemelor de îmbunătățire a performanțelor sistemelor de propulsie, cu referire la supraalimentarea motoarelor cu ardere internă. **Capitolul 2** prezintă tehnologia supraalimentării și beneficiile aduse motoarelor cu ardere internă, și, de asemenea, evidențiază tehnologia undelor de presiune ca o alternativă la sistemele clasice de supraalimentare. Totodată, este prezentat un scurt istoric al aproximativ o sută de ani de cercetare și dezvoltare ale conceptului de schimbător de presiune cu rol de supraalimentator. Principiile de funcționare și particularitățile SUP, precum și caracteristicile de performanță atinse odată cu utilizarea acestuia în industria auto sunt prezentate detaliat în **Capitolul 3**, scopul fiind sublinierea limitelor de utilizare

și performanță ale SUP convențional, precum și a beneficiilor dar și neajunsurilor implementării acestei tehnologii. Optimizarea configurației rotorului SUP a presupus dezvoltarea unor modele matematice de configurare a dimensiunilor și geometriei acestuia, modele prezentate în **Capitolul 4** al prezentei lucrări. S-au avut în vedere: forma și secțiunea canalelor, modificarea numărului de canale sau a numărului de rânduri de canale, înclinarea direcției axiale a canalelor rotorului după o generatoare eliptică și reducerea lungimii rotorului în consecință. Validarea preliminară a noii geometrii s-a realizat prin elaborarea unui model de calcul pentru pierderile de presiune ale SUP, în ipoteze de lucru simplificate. Descrierea ecuațiilor de curgere și a teoriei undelor s-a realizat în cadrul aceluiași capitol, cu detalierea modelelor atât pentru undele de presiune care se propagă în interiorul canalelor SUP, cât și ale undelor de șoc normale și ale undelor oblice. Verificarea curgerii subsonice s-a realizat prin realizarea unui model matematic de calcul al secțiunii critice și al debitului maxim prin analogia curgerii din porturi înspre canalele rotorului cu curgerea prin ajutaje convergent-divergente. Modelarea standului experimental virtual folosit pentru cercetarea experimental în mediu virtual a fost prezentată la finalul acestui capitol. Simularea funcționării și validarea experimentală a noului SUP optimizat s-a realizat utilizând un stand virtual configurat corespunzător, iar metodologia a fost prezentată în **Capitolul 5**. Standul virtual propus pentru exemplificare, AVL Boost, a fost configurat inițial pentru validarea modelului prin simularea funcționării SUP convențional real, pornind de la datele de intrare raportate în literatura de specialitate și obținute pe cale experimentală reală, iar ulterior pentru simularea funcționării noului SUP optimizat. Exemplificarea simulării a utilizat date raportate în literatură pentru Complex CX-93, oferindu-se explicații și rezultate obținute pe standul virtual AVL Boost.

1.1 MOTOARELE CU ARDERE INTERNĂ. ROLUL LOR ÎN LUMEA DE AZI.

Dependența societății moderne de transport și energie plasează încă motoarele cu ardere internă ca subiecte importante de cercetare și dezvoltare, care abordează în principal optimizarea managementului energetic și ecologic al acestora, împreună cu îmbunătățirea performanțelor, designului și dimensiunilor și, nu în ultimul rând, scăderea semnificativă a emisiilor poluante sau cu efect de seră. Într-adevăr, fără motorul cu ardere internă, lumea, așa cum o știm astăzi, ar funcționa destul de diferit! Îmbunătățirea calității vieții și a muncii datorită existenței motorului termic este considerabilă, la fel sunt și efectele neplăcute cu care ne confruntăm astăzi, cu consecințe pe termen lung asupra planetei noastre: poluarea sau încălzirea globală. Prin urmare, constructorii de automobile sunt interesați să lanseze vehicule cu sisteme de propulsie cu performanțe îmbunătățite dar cu emisii reduse, lansând în ultimii ani noi modele care utilizează combustibili low-carbon (cum ar fi cele cu gaz natural), hidrogen, sau modele hibride ori electrice. Chiar dacă există o tendință ascendentă în lansarea modelelor electrice și facilități consistente pentru achiziția lor, pentru majoritatea producătorilor de automobile, vehiculele echipate cu motoare cu ardere internă se vor menține pe liniile de producție pentru mulți ani.

Motorul termic are o istorie de peste trei secole, evoluând de la primitivele lui „rude” – motorul cu piston cu ardere internă care folosește praful de pușcă drept combustibil, sugerat de [Jean de Hautefeuille](#) în 1678 [1] și prototipat de [Christiaan Huygens](#) în 1680 [2] – până la motoarele contemporane extrem de computerizate și tehnologizate. Primele motoare cu ardere internă, așa cum le cunoaștem astăzi, s-au dezvoltat începând cu a

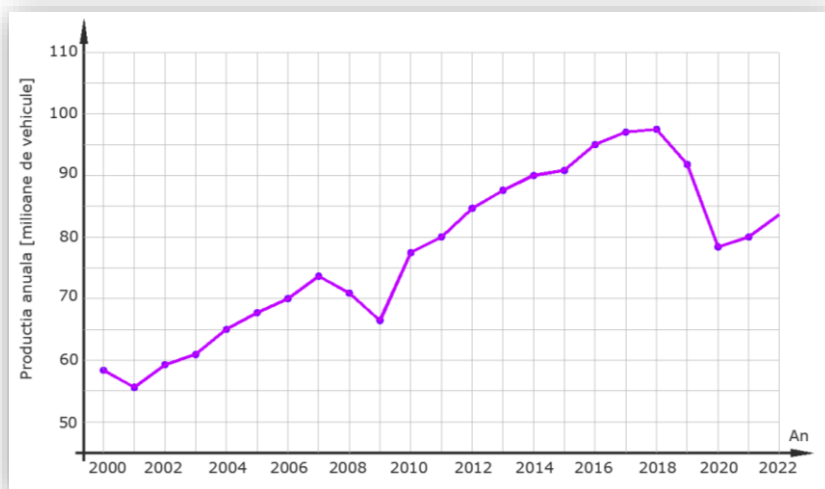
8

doua jumătate a secolului al XIX-lea (motorul „modern” cu aprindere prin scânteie realizat în 1876 de [Nicolaus Otto](#) [3] sau cu aprindere prin comprimare din 1892 al lui [Rudolf Diesel](#) [4]) și au fost curând folosite pentru transport; mai târziu au făcut posibilă dezvoltarea industriei de automobile, maritime și aviatice sau producerea de energie electrică.

În mod tradițional, motoarele cu aprindere prin scânteie (m.a.s.) și motoarele cu aprindere prin comprimare (m.a.c.) sunt utilizate pentru aplicații ușoare sau grele. Designul unui m.a.s. este de obicei mai ușor și mai compact decât cel al unui m.a.c. și funcționează mai silențios, ceea ce reprezintă o caracteristică importantă de exigență în domeniul autoturismelor. În schimb, motorul diesel este mai puternic, necesită mai puțină întreținere și consumă mai puțin combustibil la aceeași putere față de motorul cu aprindere prin scânteie. Acești factori fac motorul diesel mai puțin costisitor, devenind motorul preferat pentru aplicațiile feroviare, ambarcațiuni mari și camioane sau aplicațiile off-road. Mai mult, dovedindu-se a fi sigure în funcționare, motoarele diesel sunt utilizate de asemenea, pe scară largă pentru generarea de energie electrică, în special ca generatoare de urgență pentru instalații electrice care deservește de exemplu spitale sau centrale nucleare.

În prezent, dezvoltarea domeniului transporturilor a dus la creșterea explozivă a numărului de vehicule care utilizează ca sistem de propulsie motorul cu ardere de combustibili fosili și, implicit, a emisiilor poluante și de gaze cu efect de seră. Una dintre principalele îngrijorări ale omenirii se referă la creșterea temperaturii medii globale pe planetă și a consecințelor pe termen lung precum: schimbările climatice rapide, fenomenele meteo surprinzătoare în sens negativ, topirea gheții polare și creșterea nivelului mărilor, riscurile pentru viața sălbatică, efectul negativ asupra agriculturii, energiei și turismului, riscurile pentru sănătatea umană, costurile semnificative suportate de societate și economie. Uniunea Europeană a stabilit în 2020 ca obiectiv prioritar pentru 2030 o reducere cu 55% a emisiilor de gaze cu efect de seră în

comparație cu 1990 [5]. Cel mai semnificativ gaz cu efect de seră este CO_2 – dioxidul de carbon, principala sursă de producere a acestuia fiind arderea combustibililor fosili. Consumatorul primar de combustibili fosili îl constituie sistemele de propulsie bazate pe combustia acestora, fiind declarat [6] că sectorul transportului rutier este unul principala sursă de emisii de gaze cu efect de seră și poluanți atmosferici. Prin urmare, motoarele cu combustie internă au devenit punctul de interes în ceea ce privește reducerea emisiilor, precum și utilizarea eficientă a energiei.



*Figura 1.1 – Evoluția industriei producătoare de vehicule
(realizat conform datelor din [7])*

Parcul mondial de autovehicule depășește actualmente 1 miliard de unități [7], cu o creștere constantă rapidă. În 1976 existau 340 milioane de vehicule, în 1992 existau 590 de milioane, în 2001 numărul s-a ridicat la 713 milioane iar în 2010 la peste 920 de milioane. Statisticile indică în jur de 1,3 miliarde în 2016 și 1,446 miliarde în 2021. Se preconizează ca până în 2036 numărul de vehicule pe plan mondial să crească la aprox. 2,8 miliarde de unități. Conform OICA (International Organization of Motor Vehicle