

Marko Vuksan, student
Dr. sc. Ivica Šegulja
Pomorski fakultet u Rijeci
Studentska 2
51000 Rijeka
Hrvatska

Stručni članak
UDK: 621.43
004.94
Primljeno: 3. travnja 2008.
Prihvaćeno: 26. svibnja 2008.

SIMULACIJA PROCESA U MOTORU S PROGRAMOM AVL BOOST

Sve stroži propisi o zaštiti okoliša, a i potreba za što boljim iskorištavanjem goriva postavljaju pred konstruktore motora sve veće zahtjeve. Razvoj numeričkih metoda, a istovremeno i porast snage računala omogućavaju provjeru novih ideja još u ranoj fazi razvoja motora.

U radu je dan pregled mogućnosti programskog paketa AVL-BOOST firme AVL iz Graza. Opisano je grafičko sučelje koje omogućava korisnicima s osnovnim znanjem o simulacijskoj tehnologiji da u kratkom vremenu ovladaju programom. Predstavljen je model jednocilindričnog motora, izvršena je simulacija rada te analizirani dobiveni rezultati.

***Ključne riječi:** motori s unutarnjim izgaranjem, modeliranje, simulacije, programski alati*

1. UVOD

AVL - Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List je najveće privatno poduzeće na svijetu za razvoj pogonskih sustava motora s unutarnjim izgaranjem te mjerne i istraživačke opreme. Osnovao ga je 1948. god. prof. Hans List u Grazu. Svjetski su poznati specijalisti za konstrukciju i optimizaciju pogonskih agregata, te za izradu *softvera* i *hardvera* za njihovo testiranje. Projektiraju i izrađuju kompletne testne platforme za testiranje pogonskih agregata. Njihove usluge koriste svjetski renomirane tvrtke poput Porschea, Ferrarija, Peugeota, Citroëna, Volva, GM-a, Daimler Chryslera i drugih, a posebno su na dobrom glasu kao specijalisti za cijenjenu dizel tehnologiju. Osim toga, većina momčadi Formule 1 testira svoje super snažne pogonske agregate na njihovim testnim stolovima. O snazi AVL-a najbolje govore podaci o 45 svjetskih podružnica, te prošlogodišnji promet od 471 milijuna eura. Ukupno imaju preko 3600 zaposlenih od čega oko 1800 u Grazu.

Njihovo područje djelovanja je:

- razvijanje simulacijskog softvera za modeliranje fizikalnih procesa u motoru (proces ubrizgavanja goriva, izgaranje, vibracije itd.)
- razvijanje softvera za upravljanje mjerenjima i mjernom opremom koja se koristi za ispitivanje motora
- izrada proračuna po narudžbi za vanjske korisnike.

Mnogi poznati i nepoznati pogonski agregati duguju svoju pouzdanost, kvalitetu, performanse i ugladenost proračunima i simulacijama tvrtke AVL.

2. OPĆE ZNAČAJKE BOOST-A

BOOST je simulacijski program za simuliranje procesa u motoru specijalno razvijen za modeliranje pogonskih agregata. Stvoren je unutar AVL-ovog odjela za primijenjenu termodinamiku. Analiziranje motora koristeći termodinamička mjerenja i proračune je od velike važnosti zato što predstavlja bazu iz koje je stečeno znanje kako modelirati motor, tj. preduvjet za obavljanje ostalih zadaća. Grafičko korisničko sučelje BOOST-a omogućava korisnicima s osnovnim znanjem o simulacijskoj tehnologiji da u kratkom vremenu unaprijede svoje mogućnosti. Čak i početnici su u poziciji da riješe jednostavnije probleme nakon kratkog perioda osposobljavanja.

Boost simulira širok spektar pogonskih agregata, 4-taktne, 2-taktne, benzinske ili dizelske, sve od malih agregata za mopede pa do velikih brodskih pogonskih strojeva. Može se također koristiti za simulaciju karakteristika pneumatskih sistema.

Programski paket BOOST sastoji se od interaktivnog "pre" procesora koji služi za pripremu i ubacivanje podataka u glavni računalni program. Analiza rezultata podržana je interaktivnim "post" procesorom. Preprocesor AVL-ovog grafičkog korisničkog sučelja baziranog na windows tehnologiji sadrži urednik modela i navođeni upis potrebnih podataka. Računalni model motora dizajnira se odabirom potrebnih elemenata koji se zatim povežu neophodnim cjevovodi-ma. Na ovaj način i vrlo kompleksne izvedbe mogu se lako modelirati.

Glavni program omogućava optimiziranu simulaciju za sve dostupne elemente. Protok kroz cijevi je obrađen kao jednodimenzionalan, što znači da vrijednosti tlakova, temperature i brzine protoka dobivene iz jednadžbe plinova predstavljaju prosječne vrijednosti duž presjeka cijevi. Gubici protoka zbog trodimenzionalnih efekata na pojedinim mjestima u motoru riješeni su odgovarajućim koeficijentima. U slučaju da trodimenzionalni efekti moraju biti promatrani detaljnije dostupan je i AVL-ov program FIRE za simulaciju protoka. Znači da višedimenzionalna simulacija protoka u kritičnim dijelovima motora može brzo biti zamijenjena jednodimenzionalnom. Ova mogućnost može biti

od značajne važnosti kod simulacije punjenja cilindra, procesa ispiranja kod 2-taktnih motora kao i kod kompliciranih prigušnih elemenata.

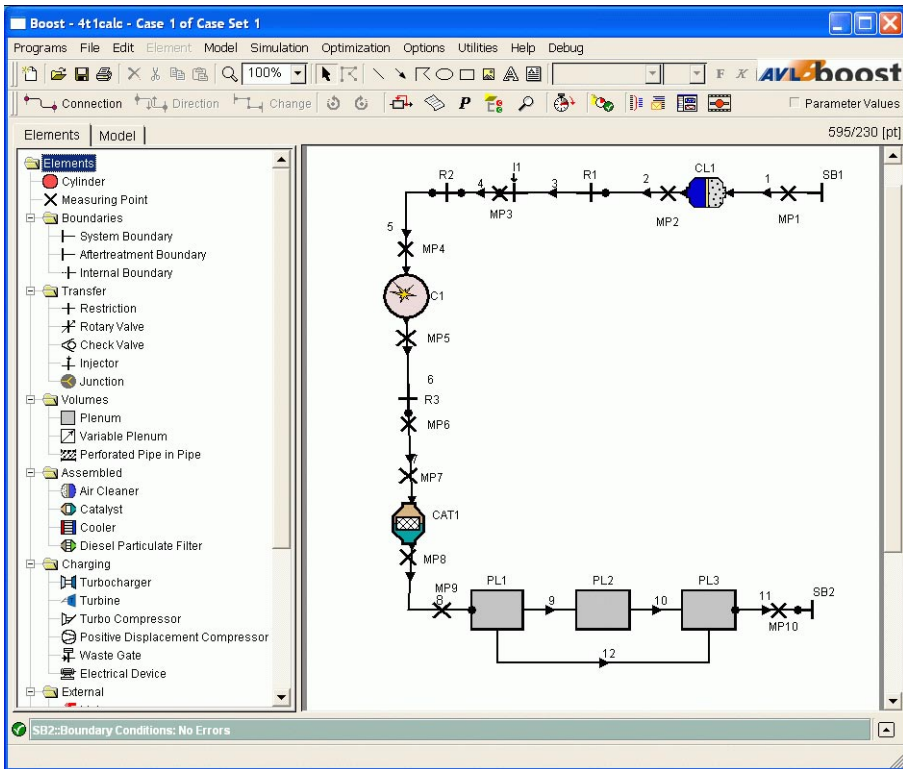
Drugi dio programa “postprocesor” analizira mnoštvo podataka koji su rezultat simulacije. Svi rezultati mogu biti uspoređeni s prijašnjim mjerenjima i računima. Štoviše, animirana prezentacija odabranih podataka je dostupna. Za lakšu pripremu završnih izvještaja paket sadrži šablone izvještaja.

Simulacijski program Boost dakle pruža pouzdan način za analizu karakteristika motora s unutarnjim izgaranjem. Može se koristiti u različite svrhe uključujući sljedeće:

- usporedbe različitih koncepata strojeva
- optimiziranja geometrije komponenata (usisni sistemi, ispušni sistemi, veličine ventila ...)
- optimiziranje izlazne snage, zakretnog momenta, potrošnje goriva ...
- vremensko usklađivanje ventila i optimiziranje profila brjegovog bregastih osovine
- razmještaj sistema za prednabijanje
- optimiziranje otvora radi zvuka (buke)
- ocijenjivanje performansi motora (ubrzavanja/povećanja opterećenja, usporavanja/smanjenje opterećenja) uzimajući u obzir cijelokupni pogon i dinamiku vozila.

3. MODELIRANJE PROCESA U MOTORU I IZMJENE PLINOVA

U svrhu modeliranja procesa u motoru i izmjene plinova u motoru, izrađen je “uređivač” modela, koji je potpuno baziran na grafičkom sučelju. Primjer ekrana je dan na slici 1.



Slika 1. Uređivač modela
Fig. 1: Model organize

Model koji se modelira izrađuje se slažući elemente iz izborne liste s lijeve strane, pri čemu su mogući elementi:

- CILINDAR 

Za modeliranje cilindra potrebno je specificirati, tj. odrediti podatke za glavu motora, opće veličine cilindra i klipnog mehanizma kao što su (promjer cilindra, hod klipa, kompresijski omjer, duljina klipnjače, pomak osovinice klipa od simetrale (piston pin offset), redosljed paljenja, karakteristike izgaranja, prijelaza topline, proces ispiranja i specifikacije ventila/kanala. Štoviše potrebni su i početni uvjeti.

Pod dodatak prostoru za izgaranje (chamber attachment) može se odabrati i model s podijeljenom komorom izgaranja. Treba definirati i model izgaranja. Može se odabrati više modela izgaranja, pa čak i korisnički definiran model izgaranja.

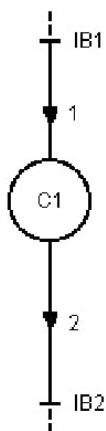
- MJERNE TOČKE ✕

Korištenjem mjernih točki korisnik ima uvid u podatke (tlak, temperatura, brzina protoka...) ovisno o kutu koljena koljeničastog vratila na nekim lokacijama u modelu. Dvije su vrste mjernih točaka dostupne, *standard* i proširena *extended*. Odabirom *extended* imamo uvid u neke dodatne podatke poput (koncentracije goriva, entalpije...).

- GRANICE






Dostupne su tri vrste granica:

- *System boundary* je element koji omogućuje povezivanje modela s okolinom koju određuje korisnik. Simbol je ─┬─
- *Aftertreatment boundary* element se može koristiti samo kod simulacija uređaja za naknadu obradu kao što su katalizatori i filtri. Simbol je ─┬─
- *Internal boundary* omogućava da se granični uvjeti sustava modela odrede direktno za zadnji presjek cijevi gdje model završava. To pomaže ako su poznati izmjereni granični uvjeti u usisnom i ispušnom cjevovodu. U tom slučaju stvara se pojednostavljeni podmodel između dvije mjerne točke.






Slika 2. Podmodel cilindra
Fig. 2: A cylinder submodel





- PRIJELAZNI (TRANSFER) ELEMENTI

- *Suženje/proširenje (Flow restriction)* su elementi koji se koriste za izrazit gubitak tlaka na pojedinim mjestima u modelu motora koji može biti uzrokovan promjenom presjeka cijevi, zbog raznih ventila, otvora...
Trebaju se definirati koeficijenti protoka koji ovise o vrsti restrikcije (da li se presjek povećava ili smanjuje, da li je ventil, otvor ili nešto drugo). Simbol je 
- *Rotacijski disk (Rotary valve)* koristi se za kontrolu protoka zraka u cijevi kao funkcija kuta koljena ili vremena. Tipičan primjer korištenja je kontrola procesa usisa kod dvotaktnih motora. Simbol je 
- *Check valve* je nepovratni ventil, koristi se za sprječavanje protoka u suprotnom smjeru (usisni ventil kod dvotaktnih motora). Simbol je 
- *Injektor goriva/rasplinjač (Fuel injector/carburator)*. Injektor se koristi za dobavu goriva u sustav usisa kod motora s vanjskom pripremom smjese. Gubici tlaka zbog višedimenzionalnog protoka ne mogu se predvidjeti ovim programom. Potrebno je specificirati koeficijente protoka kod injektora. Simbol je 
Ako se koristi model s rasplinjačem, trenutni protok mase kroz rasplinjač i omjer zrak/gorivo koriste se za izračun količine dobavljenog goriva.
- *Spojna mjesta (Junction)*. Koriste se za spajanje tri ili više cijevi. Postoji model s konstantnim tlakom i razrađeniji model samo za spojeve tri cijevi koji je precizniji i bolje definiran. Simbol je 






- VOLUMENSKI ELEMENTI

- *Spremnik (Plenum)* je volumen u kojem su tlak i temperatura u svakom dijelu konstantni. Definira se obujmom ili promjerom i duljinom. Simbol je 
- *Spremnik promjenjivog volumena (Variable plenum)* sličan je kao standardni samo s promjenjivim obujmom. Korisnik može odabrati jedan od sljedećih: kućište motora (crankcase), ispirna pumpa (scavenging pump) ili sam definirati s opcijom *user defined*. Simbol je 
- *Cijev izbušena u cijevi (Perforated pipe in pipe)* element koji sadrži dvije cijevi, unutarnju perforiranu i vanjsku običnu. Simbol je 



- SKLOPLJENI (ASSEMBLED) ELEMENTI

- *Filtar zraka (Air cleaner)*. Boost automatski kreira finiji model volumencijev-volumen (plenum-pipe-plenum) za filter zraka. To se koristi za učinkovitost dinamike plinova filtera, kao i za pad tlaka u filtru koji ovisi o trenutnim uvjetima protoka. Simbol je 
- *Katalizator (Catalyst)*. Vrijedi isto što i za filter zraka. Simbol je 
- *Rashladnik zraka (Air cooler)*. Tretira se slično kao i filter zraka, s tim da se bazira još i na podacima o razmješčaju (poziciji). Simbol je 
- *Filtar čestica dizel motora (Diesel particulate filter-DPF)* tretira se isto kao i filter zraka. Simbol je 






- ELEMENTI PUNJENJA (CHARGING)

- *Turbopuhalo (Turbocharger)*. Dostupna su dva modela, jednostavniji i potpuniji model. Prednosti jednostavnijeg su manje potrebnih podataka za definiranje turbopuhala. Za potpuni model potrebno je unijeti cijelu mapu (plan) za puhalo i turbinu. Simbol je 
- *Turbina* također ima jednostavniji i potpuniji model. Simbol je 
- *Turbokompresor* - mehanički pogonjen kompresor. Također ima jednostavniji i potpuniji model. Potreban je još i mehanički stupanj djelovanja za pogon kompresora. Simbol je 
- *Stapni kompresor (Positive displacement compressor)* za mehanički pogonjen kompresor potrebno je specificirati karakteristike učinkovitosti pri konstantnoj brzini kompresora. Simbol je 
- *Prekotlačni ventil (Waste gate)* je ventil upravljan razlikom tlaka koja djeluje na tijelo ventila i razlike tlaka na membrani spojenoj na ventil. Simbol je 


- VANJSKI VEZNI ELEMENTI (EXTERNAL LINKS) ELEMENTI

- *FIRE link* simulacija 3D režima protoka. BOOST u vezi s AVL-ovim FIRE programom nudi mogućnost 1D/3D hibridni izračun protoka s termodinamičkom simulacijom. Za modeliranje jednodimenzionalnog modela koristi se BOOST, a za modeliranje višedimenzionalnog modela koristi se program FIRE. *FIRE link* element smješten je u BOOST-ovom modelu, predstavlja vezni sklop između 1D BOOST domene i 3D FIRE domene. Simbol je 
- *Korisnički definirani elementi (User defined elements)* omogućavaju korisniku primjenu elementa koje će sam definirati. Elementi su podržani od “pre” i “post” procesora. Simbol je 

- KONTROLNI ELEMENTI

- *Wire* je vizualna prezentacija spoja između ECU i elementa.
- *Upravljačka jedinica motora (Engine control unit - ECU)* modelira sve važne funkcije za elektroničnu kontrolu motora, npr. izlazne veličine ECU-a su regulacija paljenja i početak ubrizgavanja goriva. Simbol je 
- *MATLAB DDL* spojevi se koriste za izmjenu podataka između elemenata u BOOST-u i MATLAB/Simulink iz Mathworks. To se radi povezivanjem elemenata i MATLAB DDL pomoću elementa *wire*. Simbol je 
- *MATLAB API* Simbol je 
- *Engine interface* koristi se za dobavu podataka elementima modela u BOOST-u koji su povezani pomoću elementa *wire*. Simbol je 
- *PID controler* regulator s proporcionalnim, integralnim i derivacijskim djelovanjem. Simbol je 

- ZVUČNI (ACOUSTIC) ELEMENTI

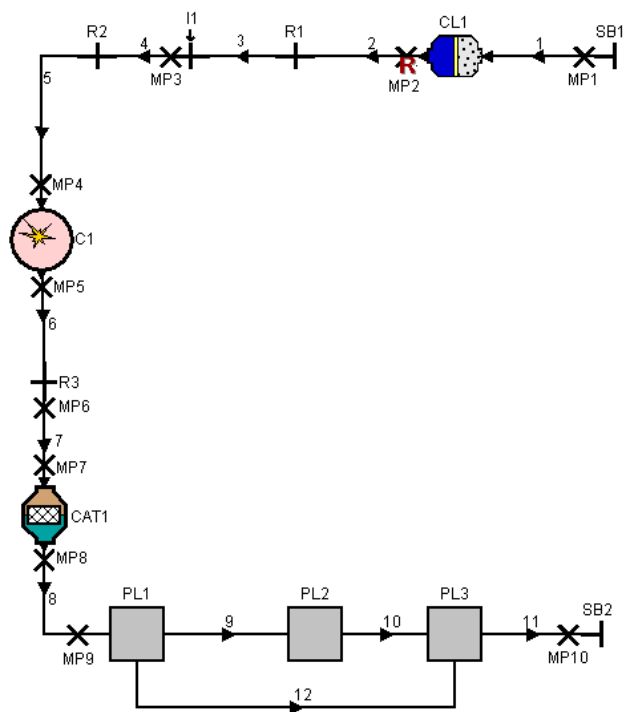
- *Mikrofon (microphone)* se može dodati bilo kojem modelu za mjerenje zvučnih podataka u dB. Simbol je 

4. IZRADA MODELA

Model se izrađuje ubacivanjem potrebnih elemenata u radno područje, njihovim pozicioniranjem, a zatim se elementi povezuju cjevovodima, nakon čega se postavljaju točke mjerenja.

Izrađen je model jednocilindričnog motora, a isti se sastoji od sljedećih elemenata:

- | | |
|-----------------------|----------------------|
| • 1 Cilindar | C |
| • 1 Filtar zraka | CL |
| • 1 Katalizator | CAT |
| • 1 Rasprskič goriva | I |
| • 2 Granice sistema | SB |
| • 3 Ispušna kolektora | PL |
| • 3 Restrikcije | R |
| • 10 Mjernih točaka | MP |
| • 12 Cijevi | (brojevi od 1 do 12) |



Slika 3. Model jednocilindričnog motora
 Fig. 3: One-cylinder engine model

U ovom primjeru odabrana je simulacija radnog ciklusa, sa sljedećim podacima:

| | |
|---------------------------|-----------------------|
| Stapaj | 90 mm |
| Kompresijski omjer | 9 |
| Dužina klipnjače | 174.5 mm |
| Istup osovinice klipa | 0 mm |
| Srednji tlak u karteru | 1 bar |
| Model ispiranja | <i>perfect mixing</i> |
| Broj okretaja motora | 6000 rpm |
| Priprema smjese | vanjska |
| Vrsta goriva | benzin |
| Donja ogrjevna moć | 43500 kJ/kg |
| Stehiometrijski omjer Z/G | 14.5 |

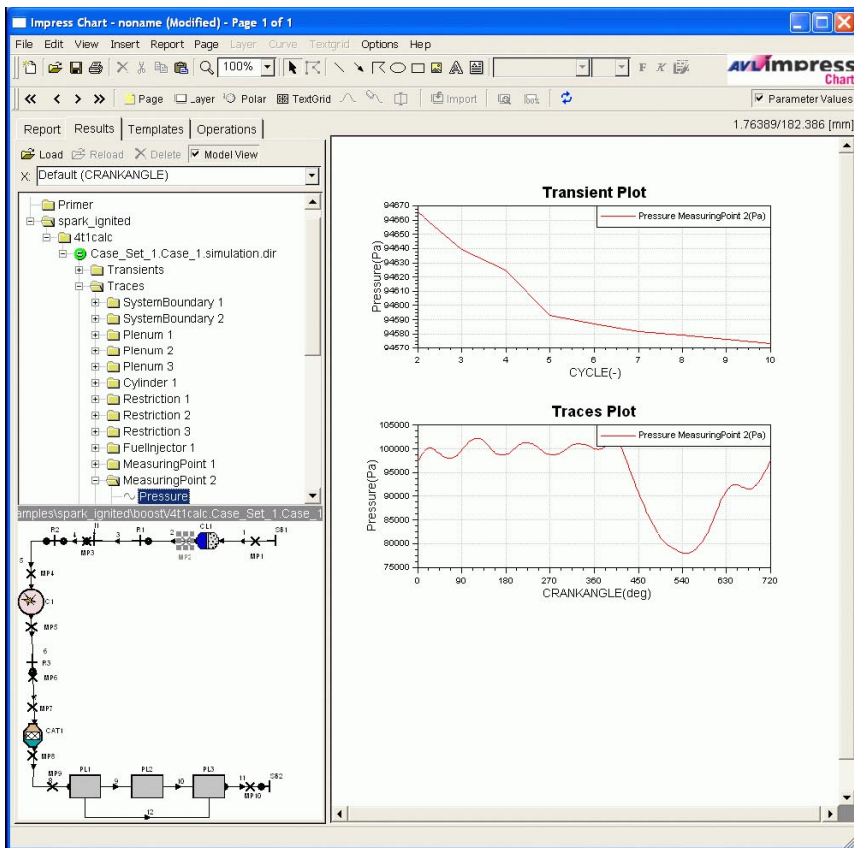
Referentni uvjeti:

| | |
|--------------|----------|
| Tlak | 1 bar |
| Temperatura | 24.85 °C |
| Broj taktova | 4-taktni |

| | |
|---------------------------------|----------|
| Max. period proračuna: | |
| Stupnjevi koljeničastog vratila | 7200 deg |
| Cijevi: | |
| Prosječna veličina ćelije | 25 mm |
| Traces saving interval | 720 deg |

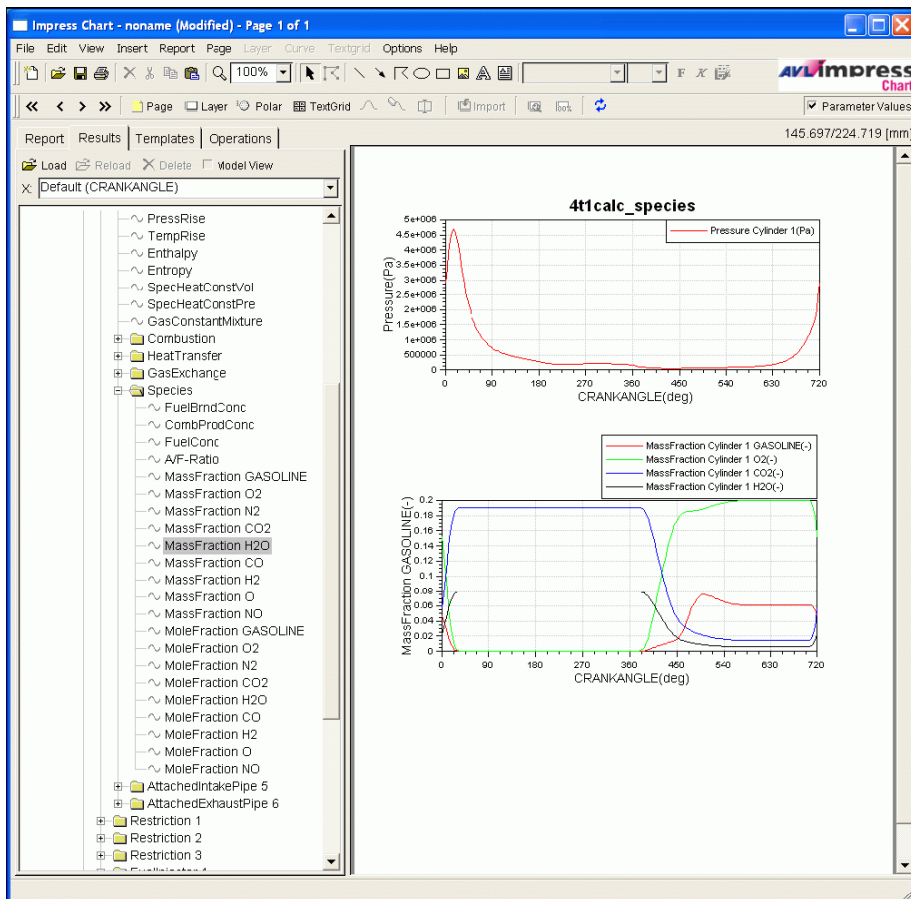
Nakon definiranja svih potrebnih podataka pokrene se simulacija, te nakon završetka proračuna simulacije, mogu se pogledati rezultati odabirom opcije *simulation/show results/cycle simulation*. Moguće je pogledati rezultate putem već pripremljenih izvještaja i/ili grafova, ili se mogu izraditi specifični izvještaji i/ili grafovi.

Primjer na slici 4. prikazuje tlak (Pa) u mjernoj točki 2, u prvom dijagramu u ovisnosti o ciklusu motora, a u drugom dijagramu u ovisnosti o kutu koljeničastog vratila (deg).



Slika 4. Prikaz rezultata simulacije
Fig. 4: Simulation results

Na slici 5. u prvom dijagramu vidljiva je promjena tlaka u cilindru u odnosu na kut koljeničastog vratila, a drugi dijagram prikazuje promjenu masa benzina, O_2 , CO_2 i H_2O u odnosu na kut koljeničastog vratila.



Slika 5. Prikaz rezultata simulacije

Fig. 5: Simulation results

5. ZAKLJUČAK

Program Boost pruža pouzdan način za analizu karakteristika motora s unutarnjim izgaranjem. Može se koristiti u različite svrhe uključujući sljedeće:

- usporedbe različitih koncepata strojeva
- optimiziranja geometrije komponenata (usisni sistemi, ispušni sistemi, veličine ventila ...)

- optimiziranje izlazne snage, zakretnog momenta, potrošnje goriva ...
- vremensko usklađivanje ventila i optimiziranje profila brjegovih bregastih osovine
- razmještaj sistema za prednabijanje
- optimiziranje otvora radi zvuka (buke)
- ocjenjivanje performansi motora (ubrzavanja/povećanja opterećenja, usporavanja/smanjenje opterećenja) uzimajući u obzir cjelokupni pogon i dinamiku vozila.

LITERATURA

- [1] "AVL Boost users guide" - AVL, Graz 2006
- [2] "AVL Boost Primer" - AVL, Graz 2006
- [3] "AVL Boost Aftertreatment" - AVL, Graz 2006
- [4] "AVL Boost Linear Acoustic" - AVL, Graz 2006
- [5] "AVL Boost Thermal Network Generator, TNG" - AVL, Graz 2006
- [6] "AVL Boost Examples" - AVL, Graz 2006
- [7] "AVL Boost BASIC TRAINING COURSE, 4-stroke gasoline engine, diesel engine"

Summary

AN AVL BOOST SOFTWARE FOR ENGINE PROCESS SIMULATION

The more and more rigorous regulations on the environmental protection, as well as the need for a much better fuel exploitation, have raised greater demands on the designer. The development of numerical methods and, at the same time, a computing power growth, makes the checking of new ideas possible, even in the early stage of the engine development.

The paper aims at presenting a survey of all the possibilities offered by the AVL-BOOST software produced by the firm AVL from Graz: A graphical interface, that enables the user with only a basic knowledge of a simulation technology to master the computer programme in a very short time, has been described too. A one-cylinder engine model has been presented and its operation simulated. The results thus obtained have been analyzed.

Key words: *internal combustion engines, modeling, simulations, software packages.*

Marko Vuksan, student

Ivica Šegulja, Ph. D.

Faculty of Maritime Studies Rijeka

Stuđenska 2

51000 Rijeka

Croatia