

Numerička analiza rada sustava Valvetronic

Pakšec, Dora

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:703705>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dora Pakšec

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac, dipl. ing.

Student:

Dora Pakšec

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći navedenu literaturu i stečena znanja tijekom studija. Rad je napravljen pod vodstvom prof. dr. sc. Darka Kozarca na Katedri za motore i vozila.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Darku Kozarcu na pomoći, vremenu i savjetima prilikom izrade završnog rada.

Dora Pakšec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dora Pakšec**

Mat. br.: 0035198541

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza rada sustava Valvetronic**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical analysis of Valvetronic system operation**

Opis zadatka:

Numeričke simulacije postale su sastavni dio svakog razvoja motora i mogu se između ostalog koristiti za analizu utjecaja raznih parametara na promjene značajki rada motora.

U ovom radu potrebno je primjenom simulacijskog alata analizirati rad sustava Valvetronic i istražiti izvore promjena radnih značajki motora kada se umjesto tradicionalne zaklopke za promjenu opterećenja Ottovog motora koristi upravljivi razvodni mehanizam. U radu je potrebno primijeniti tzv. cikličke simulacije, a kao alat kojim se provode takve simulacije potrebno je primijeniti program AVL Boost™.

U radu je potrebno:

- napraviti pregled literature iz područja promjenjivih razvodnih sustava,
- odrediti način promjene podizaja ventila kod korištenja sustava Valvetronic,
- odabrati Ottov motor koji koristi taj sustav te izraditi simulacijski model odabranog motora,
- za isti motor pripremiti model koji snagu regulira tradicionalno, zaklopkom u usisnoj cijevi,
- verificirati modele i provesti proračun u nizu radnih točaka motora unutar mape motora definirane rasponom brzine vrtnje i opterećenja,
- analizirati utjecaj primjene sustava Valvetronic na vanjske značajke motora kao što su: potrošnja goriva, temperature u cilindru i ispuhu, tlakovi u cilindru itd.,
- analizirati izvore promjena vanjskih značajki motora usporedbom (p , V) dijagrama,
- izvesti zaključke.

Pri izradi se treba pridržavati pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Kozarac

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. RAZVODNI MEHANIZAM MOTORA	3
2.1. Razvodni mehanizam četverotaktnog motora.....	3
2.1.1. Dijelovi razvodnog mehanizma	4
2.2. Varijabilan ventilski razvod	8
2.2.1. Valvetronic.....	13
2.2.2. Gubici pumpanja	18
3. IZRADA MODELA	21
3.1. Opis simulacijskog modela	21
3.2. Modeliranje motora sa zaklopkom.....	22
3.3. Faze ventila sustava Valvetronic.....	25
4. REZULTATI PROVEDENIH SIMULACIJA	30
4.1. Potrošnja goriva	30
4.2. Štetne emisije	35
4.2.1. Općenito	35
4.2.2. Rezultati	36
4.3. Tlak i temperatura u cilindru.....	37
4.4. Temperature u ispuhu.....	39
4.5. Rezultati usporedbe motora u p-V dijagramu	40
5. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA	43

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prijenosni omjer radilice i bregaste osovine [1].....	3
Slika 2.	Viseći ventili: a) bregasto vratilo u bloku; b), c) i d) bregasto vratilo u glavi [1] ..	4
Slika 3.	Izvedba razvodnog mehanizma s gornjim razvodom [2]	4
Slika 4.	Bregasta osovina [3]	5
Slika 5.	Dijelovi bregaste osovine [4]	5
Slika 6.	Princip otvaranja i zatvaranja ventila [5]	6
Slika 7.	Položaj ventila u cilindru [6]	7
Slika 8.	Konstrukcija ventila [6].....	7
Slika 9.	Indikatorski dijagram 4T motora. Oznake: UO, UZ - usisni ventil otvara/zatvara; IO, IS – ispušni ventil otvara/zatvara [1]	10
Slika 10.	Razvodni dijagram 4T motora.....	11
Slika 11.	Kasno otvaranje usisnog ventila.....	12
Slika 12.	Pomak točke UZ u desno produljuje otvorenost usisnog ventila	12
Slika 13.	Motor s ugrađenim sustavom Valvetronic [13].....	14
Slika 14.	Dijelovi sustava Valvetronic [13]	15
Slika 15.	Potpuno zatvoreni (lijevo) i potpuno otvoreni usisni ventil (desno) [12]	16
Slika 16.	p.V dijagram idealnog (lijevo) i realnog Otto procesa (desno) [14, 15]	18
Slika 17.	Rano zatvaranje usisnog ventila [16]	20
Slika 18:	Prikaz proračunskog modela	22
Slika 19.	Rotacija zaklopke od potpuno otvorene do potpuno zatvorene	23
Slika 20.	Koeficijent protoka zaklopke	24
Slika 21.	Krivulje podizaja usisnog ventila pri djelomičnim opterećenjima za 1000 okretaja u minuti	25
Slika 22.	Krivulje podizaja ventila u mm pri punom opterećenju, za 1000 do 2000 o/min. 26	
Slika 23.	Krivulje podizaja ventila u mm pri punom opterećenju, za 2500 do 4500 o/min. 27	
Slika 24.	Krivulje podizaja ventila u mm pri punom opterećenju, za 5000 do 6500 o/min. 27	
Slika 25.	Potrošnja goriva pri 20% opterećenja	30
Slika 26.	Potrošnja goriva pri 60% opterećenja	30
Slika 27.	Potrošnja goriva pri 80% opterećenja	31
Slika 28.	Srednji indicirani tlak [1]	31

Slika 29.	Srednji indicirani tlak za 60% opterećenja, niskotlačni dio	32
Slika 30.	Srednji indicirani tlak za 60% opterećenja, visokotlačni dio	33
Slika 31.	Srednji indicirani tlak za 5% opterećenja, niskotlačni dio	33
Slika 32.	Srednji indicirani tlak za 20% opterećenja, niskotlačni dio	34
Slika 33.	Srednji indicirani tlak za 80% opterećenja, niskotlačni dio	34
Slika 34:	Emisije NO _x pri 20% opterećenja	36
Slika 35:	Emisije NO _x pri 80% opterećenja	36
Slika 36:	Vršni tlak u cilindru pri 20% opterećenja	37
Slika 37:	Vršni tlak u cilindru pri 80% opterećenja	38
Slika 38:	Najveća temperatura u cilindru pri 20% opterećenja	38
Slika 39:	Najveća temperatura u cilindru pri 80% opterećenja	39
Slika 40:	Temperature ispuha za 20%, 60% i 80% opterećenja	39
Slika 41:	p-V dijagram za puno opterećenje	40
Slika 42:	p-V dijagram za 5% opterećenja i 1500 okretaja/min	40
Slika 43:	p-V dijagram za 5% opterećenja i 3500 okretaja/min	41
Slika 44:	p-V dijagram za 5% opterećenja i 5500 okretaja/min	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Relativni pomak u odnosu na referentnu krivulju punog opterećenja za 80% opterećenja	28
Tablica 2. Relativni pomak u odnosu na referentnu krivulju punog opterećenja za 60% opterećenja	28
Tablica 3. Relativni pomak u odnosu na referentnu krivulju punog opterećenja za 40% opterećenja	29
Tablica 4. Relativni pomak u odnosu na referentnu krivulju punog opterećenja za 20% opterećenja	29

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{elipse}	mm^2	Površina elipse
A_{max}	mm^2	Maksimalna površina strujanja
$A_{stvarno}$	mm^2	Stvarna površina strujanja
$A_{zaklopke}$	mm^2	Površina zaklopke
b	mm	Mala poluos elipse
D_z	mm	Promjer zaklopke
f_z	-	Koeficijent protoka kroz zaklopku
$f_{z,max}$	-	Koeficijent protoka kroz potpuno otvorenu zaklopku
h_z	mm	Debljina zaklopke
n	o/min	Brzina vrtnje motora
p	Pa	Tlak
p_e	Pa	Srednji efektivni tlak
p_i	Pa	Srednji indicirani tlak
T	K	Temperatura
x	-	Apscisa
y	-	Ordinata
α	°KV	Kut zakreta koljenastog vratila
α_z	°	Kut zakreta zaklopke
λ_{pu}	$\frac{kg_{zr}}{kg_{zr}}$	Stupanj punjenja motora

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
4T	Četverotaktni motor
DMT	Donja mrtva točka
GMT	Gornja mrtva točka
MSUI	Motor s unutrašnjim izgaranjem
IO	Ispuh otvara
IV	Ispušni ventil
IZ	Ispuh zatvara
UO	Usis otvara
UV	Uisni ventil
UZ	Usis zatvara

SAŽETAK

Kako bi se ostvarile bolje performanse automobila proizvođačima se nameću novi tehnološki izazovi. S obzirom na današnju ekološku osviještenost i sve više prisutan efekt staklenika, motorima s unutarašnjim izgaranjem postavljaju se sve veći zahtjevi u pogledu emisija štetnih produkata izgaranja i potrošnje goriva. Potpuno varijabilni ventilski razvod prepoznat je kao jedna od tehnologija koje najviše obećavaju, posebno zbog prednosti u smanjenju potrošnje goriva i povećanju zakretnog momenta motora pri nižim brzinama vrtnje uz smanjenje štetnih emisija. Predmet ovog završnog rada je utjecaj sustava Valvetronic na rad Ottovog četverotaktnog, četverocilindarskog, rednog, automobilskog motora. Korištenjem AVL-ovog programskog paketa "Boost" biti će uspoređena dva motora. Radi se o BMW-ovom motoru N46B20 koji ima ugrađen sustav Valvetronic. Jedan motor će biti simuliran sa zaklopkom a drugi sa sustavom Valvetronic kako bi se mogli usporediti parametri motora i vidjeti koje parametre poboljšava Valvetronic sustav. Motor s Valvetronic sustavom ne koristi zaklopku za regulaciju snage već omogućuje beskonačno promijenljivo podizanje usisnog ventila i time je u stanju smanjiti potrošnju goriva i do 10% te ujedno smanjiti emisije. Kod klasičnog motora sa zaklopkom pritiskom papučice gasa povećavamo količinu zraka koji ulazi u cilindre. Sustav za ubrizgavanje goriva nadzire količinu zraka koja prolazi kroz zaklopku i zatim određuje potrebnu količinu goriva. Međutim pri slabo otvorenoj zaklopki kada je automobil npr. pod djelomičnim opterećenjem ili vozi nizbrdo, zaklopka se djelomično ili čak gotovo zatvara. Istodobno se klipovi još uvijek pokreću, usisavajući zrak iz djelomično zatvorenog usisnog razvodnika. Time će se između zaklopke i komore za izgaranje stvoriti djelomični vakuum i doći će do otežanog usisavanja u taktu usisa. To predstavlja gubitke pumpanja. Dakle, što je zaklopka zatvorenija gubi se više energije. Upravo to je jedan od razloga zašto se počela koristiti regulacija ventilima a ne zaklopkom. Simulacije su pokazale da motor sa sustavom Valvetronic ima brojne prednosti od kojih se najviše ističe manji gubitak pumpanja odnosno smanjena potrošnja goriva te smanjene emisije. Također, Valvetronic smanjuje troškove održavanja, poboljšava hladno pokretanje motora i omogućuje glađi rad motora, a zbog finog raspršivanja goriva ne zahtijeva posebnu vrstu ili kvalitetu goriva.

Ključne riječi: Valvetronic, ventili, zaklopka, potrošnja, emisije

SUMMARY

In order to improve car performance, manufacturers are continually challenged to develop new technologies. Given today's environmental awareness and the ever-increasing greenhouse effect, very strict requirements have been imposed on internal combustion engines regarding combustion emissions and fuel consumption. Fully variable valve timing is recognized as one of the most promising technologies, especially in view of reducing fuel consumption and increasing torque at low speeds while cutting harmful emissions. The aim of this thesis was to study the impact of the Valvetronic system on the operation of the Otto four-stroke, four-cylinder, inline, automobile engine. Using the AVL Boost software package, two different versions of the BMW N46B20 engine, a throttled engine and an engine with a Valvetronic system, were compared. To compare engine parameters and find out which parameters get improved when using the Valvetronic system, a throttled engine and a Valvetronic engine were simulated. The Valvetronic engine does not use throttle to regulate power, but it allows for an infinitely variable intake valve lift, reducing fuel consumption by up to 10% and cutting emissions at the same time. In a conventional throttled engine, by pressing the gas pedal the amount of air entering the cylinder gets. The fuel injection system controls the amount of air that passes through the throttle and saves the required amount of fuel. However, at light throttle, when the car is under partial load or drives downhill, the throttle butterfly is partially or almost completely closed. At the same time, the pistons are still running, taking air from the partially closed intake manifold. This creates a partial vacuum between the throttle and combustion chambers and results in difficult suction upon the intake stroke. This presents a waste of pumping. So, the more closed the throttle is, the more energy is lost. That is one of the reasons why regulating the valves instead of the throttle started to be used. Simulations have shown that the Valvetronic engine has many advantages, such as reducing pumping losses, fuel consumption and emissions. Also, the Valvetronic system reduces maintenance costs, improves the cold start of the engine and allows the engine to run smoothly. Finally because of its fine fuel atomization, it does not require a specific type or fuel quality.

Key words: Valvetronic, valves, throttle, fuel consumption, emissions

1. UVOD

Život bez automobila teško je zamisliti. Oni nam već više od sto godina pružaju individualnu mobilnost. Prvi motor s unutarnjim izgaranjem izradio je 1860. godine Francuz Lenoir. Bio je to dvotaktni dvoradni plinski motor s niskim stupnjem iskoristivosti od oko 3%. Lenoirov rad je dalje istraživao i unaprjeđivao njemački inženjer Nicolaus August Otto koji je kasnije izumio četverotaktni motor s izgaranjem goriva u cilindru. Već 1886. godine Karl Benz konstruirao je i napravio prvi automobil, a još dan danas se radi na unaprjeđivanju motora i motornih vozila u pogledu učinkovitosti, emisija, troškova, udobnosti, sigurnosti itd. Motori s unutrašnjim izgaranjem (MSUI) crpe snagu iz fosilnih goriva. Fosilna goriva još danas pružaju temelje za stvaranje mehaničke pogonske snage u automobilu. Primarni ciljevi u razvoju pogonskih sustava su smanjenje potrošnje goriva i smanjenje emisija ugljikovog dioksida. U nastojanju da se to dogodi, automobilska industrija razvija prikladne brojne nove tehnologije koje će se primjenjivati u budućim motorima. Upravo su fosilna goriva najopasniji izvori energije jer svojim sagorijevanjem ispuštaju velike količine ugljikovog dioksida koji je staklenički plin. Ugljikov dioksid većinom završava u atmosferi i svojim stakleničkim učinkom uzrokuje globalno zatopljenje. Još opasniji je plin koji se oslobađa prilikom nepotpunog sagorijevanja goriva (sagorijevanja bez dovoljne količine kisika), a to je ugljikov monoksid (CO). Budući da se danas jako malo koriste ekološki prihvatljivi izvori energije, ekološki problemi kao posljedica pretjerane uporabe fosilnih goriva zaslužuju posebnu pažnju ne samo s energetske već i s ekološkog gledišta. Uz smanjenje emisija proizvođači teže smanjenju potrošnje goriva (a time i nižim emisijama). Sve to treba postići sa što većim standardom udobnosti i sigurnosti na cesti. Homologacijskim propisima je kod motora cestovnih vozila ograničena količina štetnih tvari koje vozilo ispušta u okoliš. Te štetne tvari su CO, HC, NO_x, čestice te od 2005.god. i nemetanski ugljikovodici (NMHC). Europa, Japan i SAD primjenjuju različite dopuštene vrijednosti emisija i potrošnje goriva međutim do 30% potrošnje goriva ovisi o stilu vožnje koji vozač preferira. Danas se za pogon cestovnih vozila koriste gotovo samo četverotaktni klipni motori s unutarnjim izgaranjem te će se upravo na takvom motoru temeljiti ovaj rad. MSUI pretvaraju kemijsku energiju goriva u toplinsku energiju plinova koji će svojom ekspanzijom dati mehanički rad na radilici motora. Kod klasičnih motora snaga se regulira prigušivanjem usisa odnosno zaklopkom. Što je zaklopka otvorenija veća količina svježeg punjenja ulazi u cilindar i dobiva se veća snaga.

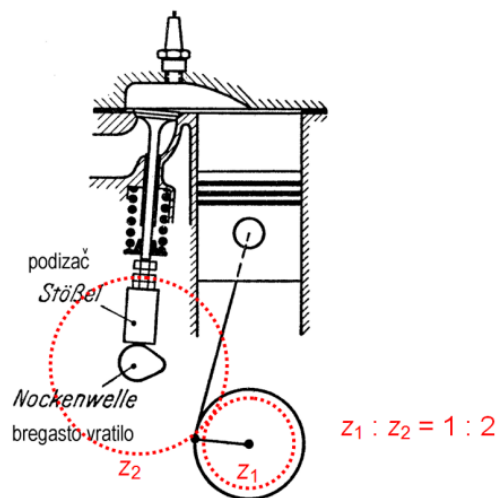
Radi manje potrošnje goriva, emisija i brojnih drugih prednosti danas se razvijaju tehnologije koje umjesto zaklopke traže druga rješenja za regulaciju snage.

Cilj ovog rada je usporediti klasičan motor sa zaklopkom s motorom koji primjenjuje jednu od tih novih tehnologija zvanu Valvetronic. Motor sa sustavom Valvetronic regulira snagu varijabilnim podizanjem ventila (od 0,23 mm do 9,7 mm) te varijabilnim trenutcima (uz korištenje sustava Vanos) i trajanju otvorenosti ventila. Upravo takav način rada može uspješno smanjiti emisije i potrošnju goriva u odnosu na rad motora sa zaklopkom. Ova napredna tehnologija ima električni mehanizam koji kontrolira podizanje ventila i time regulira količinu zraka koja ulazi u cilindre. Tako motor koristeći manje goriva donosi bolje performanse. Performanse motora su učinkovitije i brže, zahvaljujući uklanjanju gubitka pumpanja i ometanja protoka zraka koji se događa u uobičajenom sustavu sa zaklopkom. Optimiziranjem mješavine goriva i zraka, Valvetronic štedi do 10 posto goriva. Osim toga, Valvetronic poboljšava hladno pokretanje motora, smanjuje emisiju i donosi glađi i brži rad motora. Ovu tehnologiju prvi puta uvodi BMW u 2001. godini u modelu N42. Na žalost, učinkovitost motora s Valvetronicom naglo pada iznad 6500 okretaja jer su potrebne jače opruge ventila a one rade veće trenje dakle veće gubitke i veća je inertnost ventila. Upravo zato BMW nikada nije primjenjivao Valvetronic na svoje M motore s visokim performansama.

2. RAZVODNI MEHANIZAM MOTORA

2.1. Razvodni mehanizam četverotaktnog motora

Svrha razvodnog mehanizma je upravljanje izmjenom radnog medija kroz otvore za usis i ispuh, tj. mehanizam određuje trenutak otvaranja i zatvaranja ventila. Trenutci u kojima će se usis i ispuh otvarati daju se u stupnjevima zakreta radilice. Razvodni mehanizam dobiva pogon od radilice (koljenastog vratila) preko zupčastog remena, lančastog prijenosa ili zupčanika na bregastu osovinu. Brjegovi bregaste osovine preko prijenosnih članova, podizača, suprotstavljajući se silama opruga ventila otvaraju usisne i ispušne ventile. Ventilski cilindrična zavojna opruga pritišće ventil na brijeg kako se za vrijeme gibanja od njega ne bi odvojio i drži ga na sjedištu dok miruje. Sile opruge potom zatvaraju ventile uslijed rasterećenja. Kako se radni proces odvija tijekom četiri takta, tj. dva okreta radilice, a ventili se pritom pokreću samo jednom, bregasta osovina mora imati dvostruko manji broj okretaja od radilice. Zupčanik bregaste osovine u odnosu na zupčanik radilice, mora imati dvostruko više zubaca. Prijenosni omjer između radilice i bregaste osovine je 2:1.

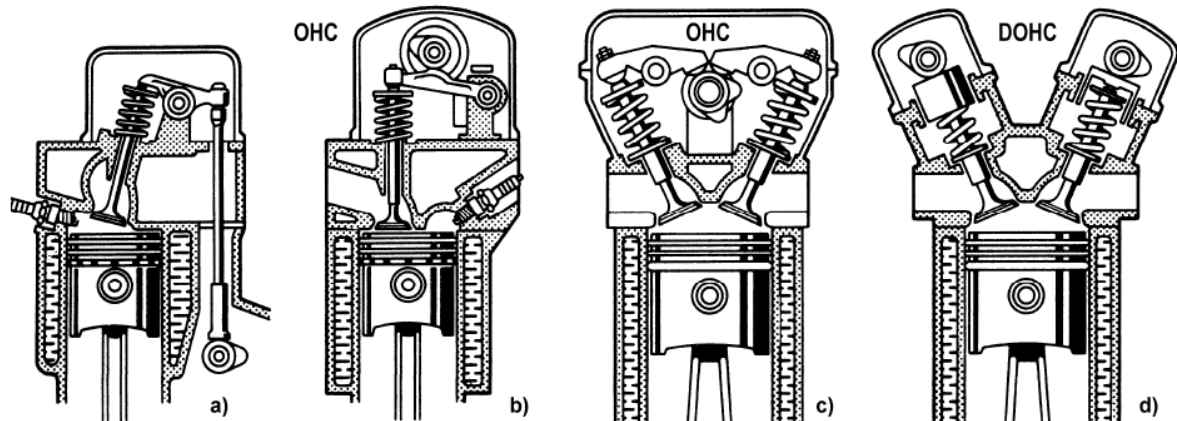


Slika 1. Prijenosni omjer radilice i bregaste osovine [1]

Položaji ventila mogu biti:

1. Viseći: otvori se zatvaraju gibanjem ventila prema gore. Motori s visećim ventilima nazivaju se OHV motori (eng. over head valves – ventili u glavi motora).
2. Ležeći ili stojeći: gibanjem ventila prema dolje zatvaraju se otvori. Ventili su smješteni sa strane u bloku, pa je oblik prostora izgaranja nepovoljan. Motori s takvim ventilima nazivaju

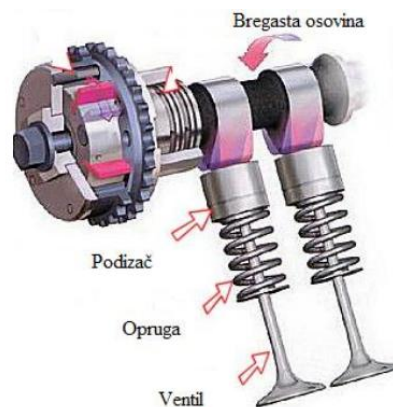
se i SV motori (eng. side valves).



Slika 2. Viseći ventili: a) bregasto vratilo u bloku; b), c) i d) bregasto vratilo u glavi [1]

Razvodni mehanizam prema položaju bregaste osovine dijelimo na:

1. Donji razvod
2. Gornji razvod: npr. OHC (bregasta osovina iznad glave motora - OverHead Camshaft), DOHC (dvije bregaste osovine iznad glave motora - Double OHC), CIH (bregasta osovina je smještena u glavi motora - Camshaft in Head)



Slika 3. Izvedba razvodnog mehanizma s gornjim razvodom [2]

2.1.1. Dijelovi razvodnog mehanizma

1. Bregasta osovina

Bregaste osovine (brjegovi) su dijelovi koji pretvaraju rotacijsko gibanje u translacijsko. Na bregastoj osovini (Slika 4) smješteni su brjegovi za podizanje ispušnih i usisnih ventila.

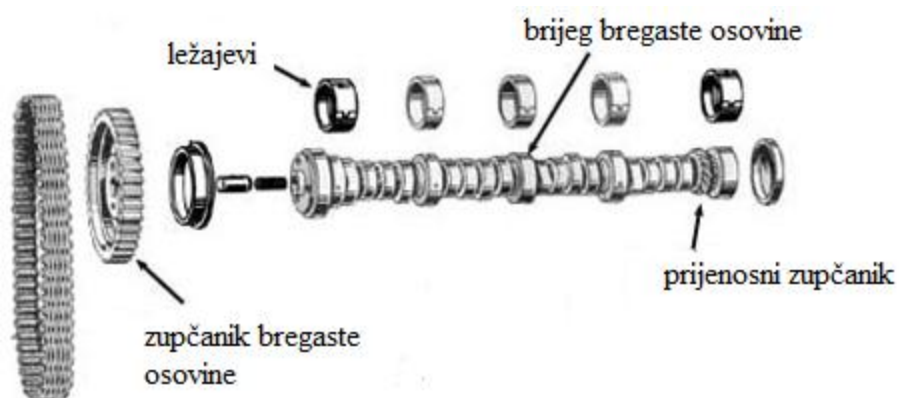
Zadatak bregaste osovine je zatvaranje i otvaranje ventila određenim redoslijedom i u određenom trenutku. Brjegovi usisnih i ispušnih ventila pomaknuti su za određeni kut.

Vremena i redoslijed otvaranja ventila određena su položajem brjegova. Trajanje otvorenosti, brzine otvaranja i zatvaranja, te hod ventila određeni su oblikom brijega.



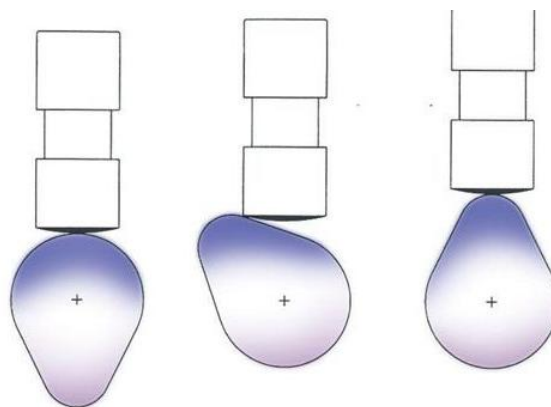
Slika 4. Bregasta osovina [3]

Okrećući se, brjeg počinje pritiskati na podizač ventila, koji gura ventil prema sredini cilindra, omogućujući time dotok smjese zraka i goriva. Daljnjim okretom osovine spušta se vrh brijega s podizača ventila, a opruga ventila uzrokuje vraćanje ventila u poziciju zatvaranja. Budući da bregasta osovina direktno djeluje na punjenje cilindra smjesom goriva i zraka, ali i ispuh plinova, poboljšanje u njenom radu može donijeti mjerljive rezultate u boljem radu motora. Bregasta osovina je fiksirana na mjesto ležajevima, a u situaciji kad je između ležajeva i rukavaca prevelik zazor dolazi do nepravilnog rotiranja osovine (jačeg oštećenja i trošenja), što na kraju može uzrokovati nepravilan rad motora.



Slika 5. Dijelovi bregaste osovine [4]

Oblici brjegova mogu biti različiti npr. okrugli, jajoliki, eliptični, itd. Uzlazne i silazne putanje brjegova vrlo često nisu simetrične. Desetljećima su konstrukcije brjegova bile simetrične, no kada su se uočile prednosti asimetričnog dizajna, sve je češće bio u upotrebi. Prednost je svakako manja brzina pri zatvaranju ventila, što osigurava manje trošenje. Što je strmija putanja otvaranja i zatvaranja ventila, to će se oni brže otvarati i zatvarati, no za stabilan rad potrebno je slijediti optimalne dimenzije. Kod otvaranja teži se većoj brzini, a kod zatvaranja ipak nešto smirenijem zatvaranju ventila, upravo je zato pogodna asimetrična konstrukcija. Otvaranje i zatvaranje ventila funkcionira tako da se u trenutku okretanja brijega, kada podizač klizi po uzlaznoj putanji brijega ventil otvara (omogućujući usis smjese zraka i goriva ili pak ispuh plinova), sve do maksimalne visine brijega, nakon koje počinje zatvaranje ventila. Dakle dok se podizač „uspinje“ na eliptični dio brijega započinje otvaranje ventila, a nakon što prijeđe vrh elipse brijega, započinje zatvaranje ventila.

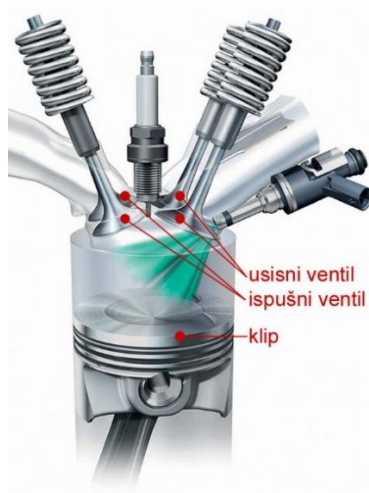


Slika 6. Princip otvaranja i zatvaranja ventila [5]

2. Ventili

Svaki cilindar četverotaktnog motora ima najmanje jedan usisni (UV) i jedan ispušni ventil (IV). Promjer i hod ventila tako su odabrani da se izmjena plinova odvija uz što manje otpore. Zbog boljeg brtvljenja ventili se otvaraju prema cilindru, čime tlak izgaranja pripomaže brtvljenju. Ispušni ventil vrlo često ima manji promjer od usisnog, jer visok tlak ispušnih plinova pri njegovu otvaranju osigurava brzo pražnjenje prostora izgaranja. Radi brže izmjene plinova postavlja se više istovrsnih ventila (viševentilska tehnika). Manji otpori strujanju povisuju snagu motora zbog većeg koeficijenta punjenja. Kombiniraju se dva ili tri usisna s jednim ili dva ispušna ventila. Prednost viševentilske tehnike je manja težina ventila, tj. manja inercija uz velike površine otvora (manja mehanička opterećenja na sjedala, opruge i površine

brjegova). Najčešća izvedba u viševentilskoj tehnici je s četiri ventila. Dva veća usisna stavljena su nasuprot dva manja ispušna ventila. Za takav pogon potrebne su dvije bregaste osovine: jedna upravlja usisnim, a druga ispušnim ventilima.



Slika 7. Položaj ventila u cilindru [6]

Kod konstrukcije ventila razlikuje se:

1. tijelo ili struk
2. pladanj ili tanjur



Slika 8. Konstrukcija ventila [6]

3. Ventilske opruge

Sile koje nastaju potiskivanjem dijelova ventilske opruge mogu biti toliko velike da podizači više ne prate oblik bregova bregastog vratila. Kako bi se spriječilo odvajanje podizača od bregova koriste se ventilske opruge koje ujedno i ublažavaju udarce i titraje nastale zbog ubrzanja ili usporenja masa. [7]

4. Vodicice ventila

Vodicice ventila osiguravaju pravocrtno gibanje, odnosno vođenje usisnih i ispušnih ventila kroz glavu motora a osim vođenja zadatak im je i hlađenje ventila. Pretežno su napravljeni od materijala poput bronce. Visoke temperature u komorama izgaranja uzrokuju njihovo trošenje, što može dovesti do povećane potrošnje ulja. Također, istrošene vodilice mogu propustiti ulje u komore izgaranja, što može uzrokovati dim i gubitak snage motora. Osim bronce rade se i od sivog lijeva kojem izlučeni ugljik daje dobra klizna svojstva. [8]

2.2. Varijabilan ventilski razvod

Varijabilni ventilski razvod omogućuje promjenu krivulje podizaja ventila kao i njezin pomak u odnosu na kut koljenastog vratila. Parametri važni za rad motora su: položaj faze (razvodnih točaka u odnosu na kutni pomak radilice), razvodni presjek, podizaj ventila, trajanje otvorenosti te nagib uzlaznog i silaznog boka krivulje podizaja, odnosno njihove kombinacije. Uz promjenjivo vrijeme otvaranja i zatvaranja ventila (pomak krivulje u odnosu na kut vratila) postiže se bolje punjenje cilindra u širokom rasponu brzina vrtnje motora. Punjenje cilindra kod klasičnih motora s nepromjenjivim vremenom otvaranja i zatvaranja ventila optimalno je pri samo jednoj brzini vrtnje motora. Na toj brzini motor postiže svoj najveći okretni moment, a time i najveću vučnu silu. S većim brzinama raste snaga, ali okretni moment pada zbog sve slabijeg punjenja. Kad bi usisni ventili bili duže otvoreni, na višim brzinama povisio bi se stupanj punjenja cilindra, λ_{pu} . Pri nižim brzinama vrtnje motor je suviše nemiran, a i povećavaju se gubici štetnih tvari u ispušnim plinovima.

Prednosti promjenjivog vremena otvaranja i zatvaranja ventila su:

- a) veća snaga
- b) veći i ravnomjerniji okretni moment u širem području brzina vrtnje motora
- c) manja emisija štetnih tvari
- d) manja potrošnje goriva
- e) manja buka motora.

Varijabilno podizanje ventila omogućuje promjenu ne samo vremena otvaranja i zatvaranja ventila, već i interval otvorenosti ventila koji se postiže visinom krivulje. Trenutak otvaranja i zatvaranja ventila namješta se promjenom profila brijega bregastog vratila. Parametri koji određuju otvaranje i zatvaranje su:

a) brzina vrtnje i opterećenje motora

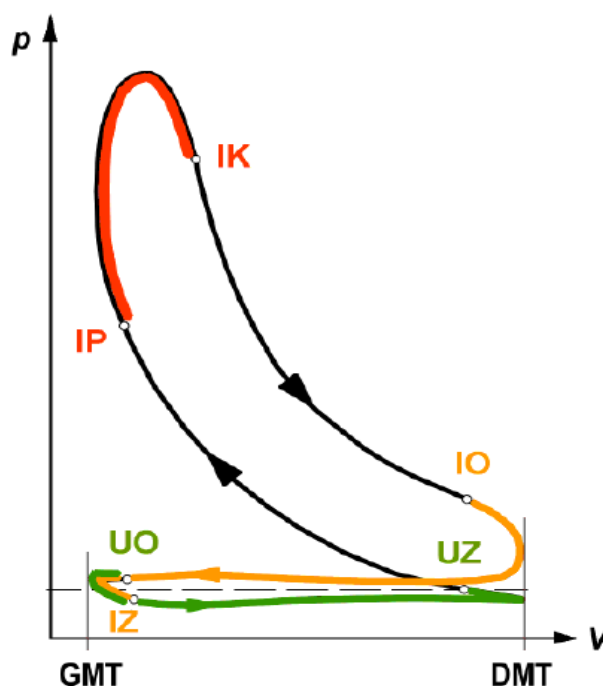
b) brzina vozila

c) temperatura rashladne tekućine [7]

Dakle, postoje dva načina podešavanja ventila: VVT (Variable Valve Timing) koji podešava trenutak otvaranja i zatvaranje ventila te VVL (Variable Valve Lift) koji podešava visinu podizanja ventila. Kada motor radi pod djelomičnim opterećenjem, vrijeme preklapanja usisnih i ispušnih ventila treba biti veće (usisni i ispušni ventili su duže otvoreni) kako bi došlo do boljeg ispiranja cilindra tj. izmjene radnog medija. Međutim, to će smanjiti stupanj punjenja pod većim opterećenjima jer će veća količina svježeg punjenja pobjeći u ispuh. U tom slučaju treba smanjiti vrijeme preklapanja ventila. Tijekom usisnog takta, zrak u blizini usisnog ventila će se usisati u cilindar, stvarajući područje niskog tlaka. Stoga će vanjski zrak ući na to područje, stvarajući "tlačni val". Ova vrsta vala ima kinetičku energiju pa čak i kada klip dosegne donju mrtvu točku i započne takt kompresije, tlačni val još uvijek može poslati u cilindar više zraka zbog većeg tlaka. Stoga, optimalan odabir je održavanje usisnog ventila otvorenim neko vrijeme tijekom takta kompresije, kako bi se poboljšao stupanj punjenja. Na taj se način razvila tehnologija varijabilnih trenutaka otvaranja i zatvaranja ventila. VVT dizajn obično koristi mehanički uređaj za podešavanje faze rotacije brijega na bregastom vratilu. Međutim, budući da je oblik brijega fiksiran, dužina trajanja otvorenosti ventila također je fiksirana. To znači da se može promijeniti trenutak otvaranja, ali se ne može podesiti vrijeme otvorenosti ventila. Da bi se moglo podesiti i vrijeme otvorenosti ventila, većina proizvođača koristi podesivi podizaj ventila (VVL). Svaki proizvođač ima svoj oblik brijega na bregastom vratilu. Različiti oblici ne mijenjaju samo visinu podizanja ventila, već i vrijeme koliko dugo može ventil ostati otvoren. [9]

Prva tehnologija koja je imala i VVL i VVT jest Hondin VTEC (Variable Valve Timing and Lift Electronic Control) sustav. Honda je smatrala da je mali motor s puno snage ključ za proboj na globalno tržište, no prirodno aspirirani motori imaju potrebu za više zraka kako bi ostvarivali snažne performanse. Ikuo Kajitani je vjerovao da je rješenje sustav koji bi promijenio rad ventila ovisno o brzini vrtnje motora što je opsežno testirano i konačno evoluiralo u VTEC motor. Ventili se dovoljno otvaraju pri niskim brzinama vrtnje motora, dok se hod ventila povećava s brzinom vrtnje motora. Radi se o vrlo elegantnom i jednostavnom mehanizmu koji prebacuje između nižeg i visokog hoda ventila putem dva profila bregaste osovine te dvije klackalice ventila po cilindru. Režim rada prebacuje se preko

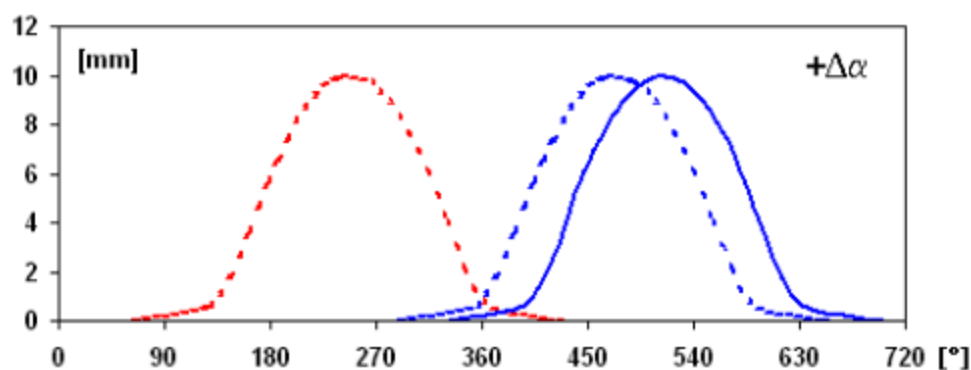
hidrauličkog pritiska koji spaja/odvaja klizeće pero te zaključava/otključava centralnu klackalicu ventila. Pri niskim okretajima motora, pero je povučeno te je srednja klackalica ventila van funkcije. Ventilima upravljaju uške niskih profila s vanjske strane, čime ventili ostvaruju niži hod. Pri visokim okretajima motora, povećani hidraulički pritisak izbacuje pero te aktivira centralnu klackalicu ventila. Sada ventilima upravlja centralna, visokoprofilna bregasta osovina te sukladno tome ventili imaju duži hod. [10]



Slika 9. Indikatorski dijagram 4T motora. Oznake: UO, UZ - usisni ventil otvara/zatvara; IO, IS – ispušni ventil otvara/zatvara [1]

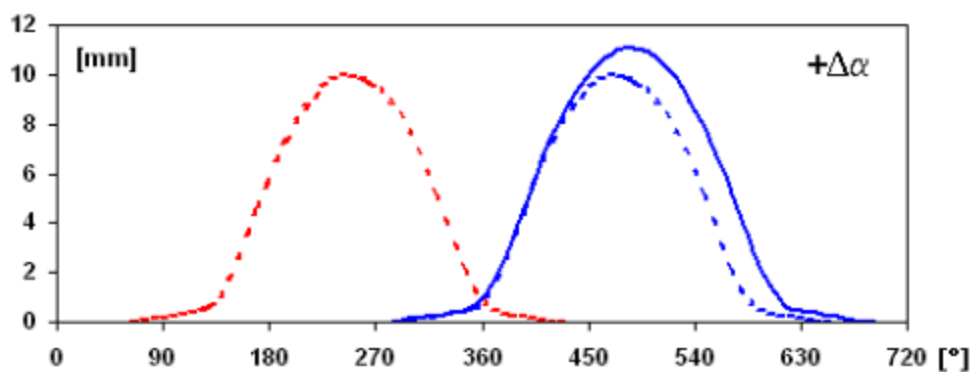
Kako bi bolje shvatili bitnu prednost varijabilnog ventilskog razvoda, a to je manji gubitak energije u niskotlačnom dijelu procesa, potrebno je opisati indikatorski dijagram 4T motora sa zaklopkom. Indikatorski dijagram (Slika 9) prikazuje promjenu tlaka u cilindru motora u ovisnosti o kutu zakreta koljenastog vratila. Sastoji se od radnog dijela koji je desnokretan (visokotlačni dio) i ljevokretnog koji je niskotlačni. Niskotlačni služi za izmjenu radne tvari te je beskoristan za proizvodnju rada. Rad visokotlačnog dijela je pozitivan a niskotlačnog negativan. Rezultirajući ili indicirani rad jednak je zbroju ovih radova. Za obavljanje ljevokretnog kružnog procesa troši se rad a izmjena radnog medija se vrši pomoću razvodnog mehanizma koji obuhvaća ventile i elemente koji ih pokreću. Upravo na tom dijelu se vide

Iduće slike prikazuju neke od primjera kako varijabilan ventilski razvod utječe na izgled krivulja podizanja ventila, odnosno koje sve regulacije može izvršiti.



Slika 11. Kasno otvaranje usisnog ventila

Na apscisi se nalaze stupnjevi zakreta radilice a na ordinati podizaj ventila u milimetrima. Lijeva crvena krivulja predstavlja krivulju ispuha a desna plava krivulju usisa. Osnovne krivulje su označene crtkanom linijom dok puna linija pokazuje da je uz varijabilan razvod moguć pomak krivulje usisa (ili ispuha) u desno (ili u lijevo) čime postizemo manje preklapanje ventila. U ovom slučaju točke UO i UZ su pomaknute za isti iznos čime visina krivulje ostaje konstantna dok na idućoj slici je pomaknuta samo točka UZ (usis je duže otvoren) i time se mijenja visina krivulje.



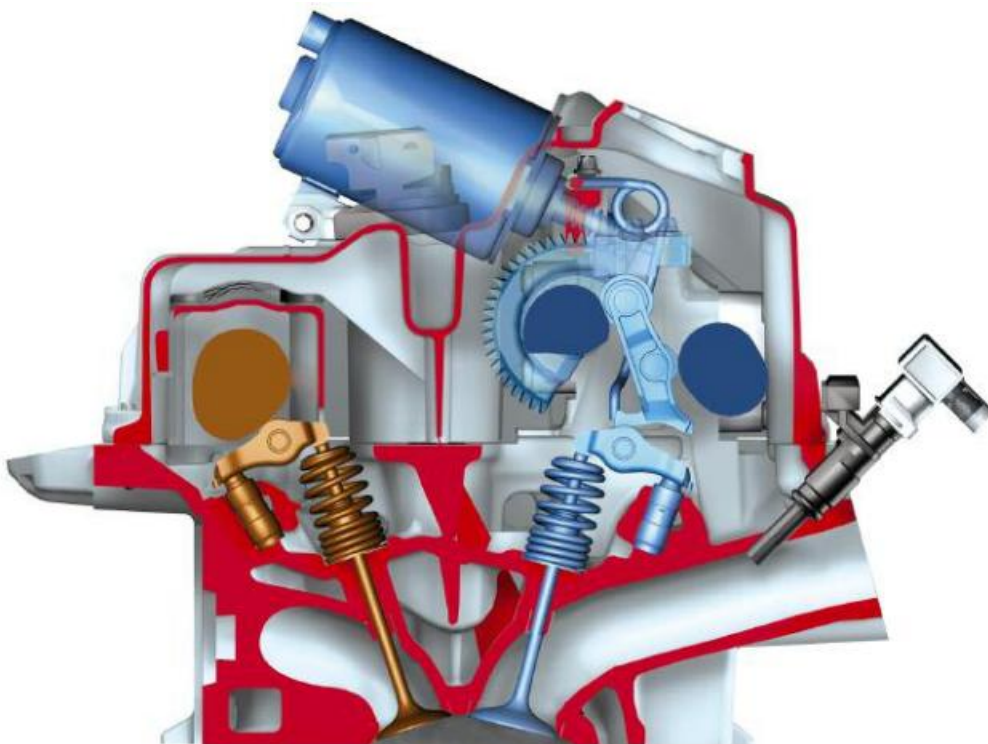
Slika 12. Pomak točke UZ u desno produljuje otvorenost usisnog ventila

Također, točka UZ može ostati ista a točku UO možemo pomaknuti kasnije pa ćemo postići kraće trajanje usisa odnosno nešto nižu krivulju. Sve ta kombinacije mogu se napraviti i s ispuhom na isti način ili i s ispuhom i s usisom u isto vrijeme. Koju od brojnih opcija ćemo odabrati ovisi o tome što želimo postići. Za najveću snagu pri najvećoj brzini vrtnje usis treba

zatvoriti što kasnije, za najveći moment usis treba zatvoriti ranije, za zadržavanje plinova u cilindru usis treba započeti znatno prije kraja ispuha, itd. U ovom radu je za svaku brzinu vrtnje i za svako opterećenja ispitana svaka od ovih opcija kako bi se pronašlo optimalno rješenje što i jest svrha varijabilnog razvoda. Tako da su možda neke naizgled nelogične kombinacije podizaja ovdje prihvaćene kao ispravne upravo zbog svojeg optimalnog rješenja.

2.2.1. Valvetronic

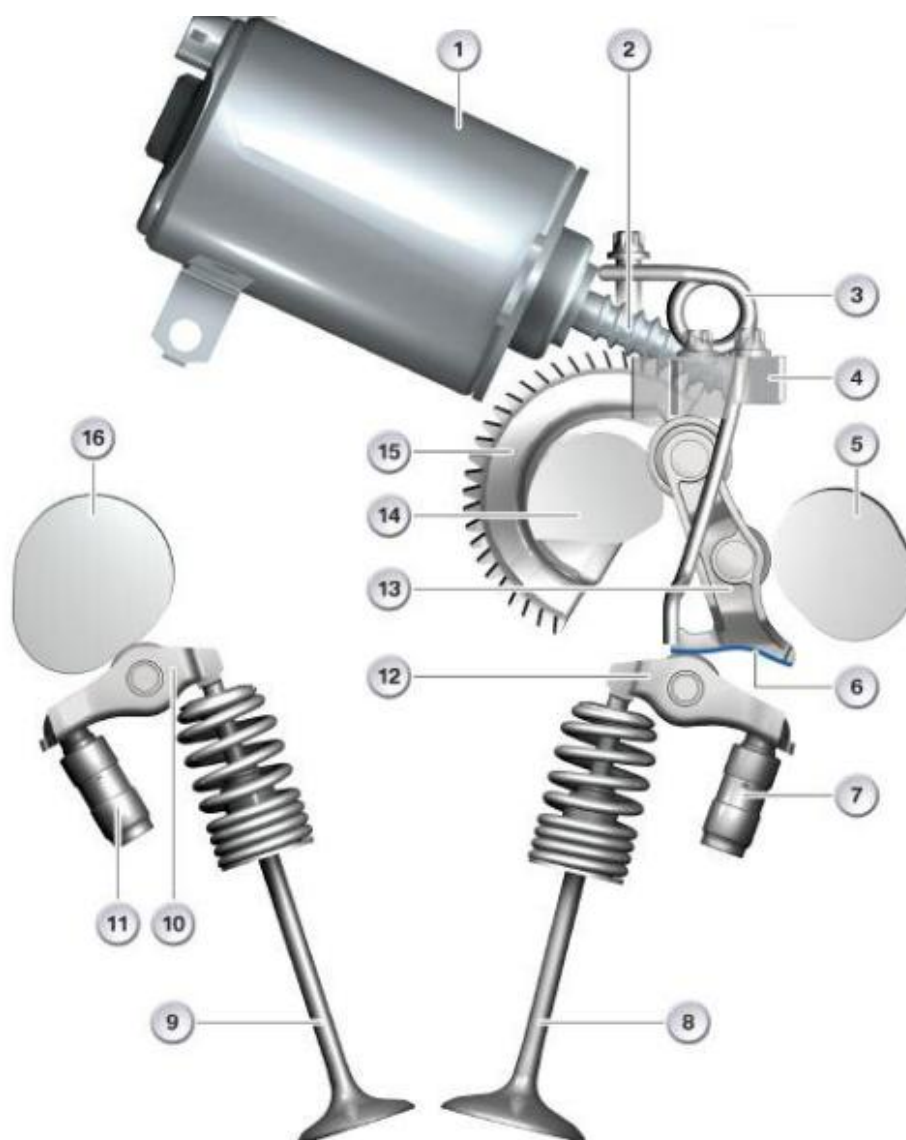
Valvetronic sustav je prva tehnologija u svijetu koja omogućuje rad motora bez zaklopke. Stupanj punjenja (λ_{pu}) je omjer mase svježe radne tvari koja ostane u cilindru nakon zatvaranja usisnog ventila i referentne mase tj. mase svježe radne tvari koja bi stala u radni volumen cilindra kod stanja okolne atmosfere. Pod djelomičnim opterećenjem ovisi o trajanju otvorenosti ventila. Što je λ_{pu} veći, motor daje veću snagu. Ulazno i izlazno bregasto vratilo pokreće BMW-ova Vanos tehnologija koja omogućuje varijabilan trenutak otvaranja ventila dok Valvetronic određuje visinu podizaja ventila. Kombinacijom te dvije tehnologije, Valvetronic i Vanos, omogućeno je varijabilno trajanje, varijabilni trenutak otvaranja i varijabilan podizaj ventila. Time je postignut potpuno varijabilan ventilski razvod. Ova tehnologija omogućuje korištenje trokomponentnog katalizatora i time je u stanju zadovoljiti i najstrože norme koje propisuju dopuštene vrijednosti emisija. Valvetronic tehnologija zahtijeva jedan od najvećih sustava elektroničke kontrole i upravljanja. Njegova najvažnija značajka jest da je u stanju smanjiti potrošnju goriva za 10% na cijelom radnom području motora koji je bitan za vozače. Time ima manje štetnih emisija, bez obzira na kvalitetu goriva. Za učinkovit rad Valvetronic sustava nije potrebna nikakva neobična vrsta ulja posebne kvalitete. Kao što će biti detaljnije objašnjeno u poglavlju Gubici pumpanja, kod motora sa zaklopkom koja je djelomično zatvorena, klipovi se i dalje pomiču i zrak se usisava u cilindre kroz djelomično zatvorenu usisnu granu. Usisna grana je u djelomičnom vakuumu između zaklopke i cilindra tako da se klipovi opiru tom vakuumu i za to se troši energija. Što sporije radi motor, zaklopka je više zatvorena i više se energije gubi. Motor sa sustavom Valvetronic također ima zaklopku no samo u slučaju ako bi Valvetronic sustav zakazao te služi prilikom pokretanja motora. Inače je van funkcije i ne ometa protok zraka te su time smanjeni gubici pumpanja. [11]



Slika 13. Motor s ugrađenim sustavom Valvetronic [13]

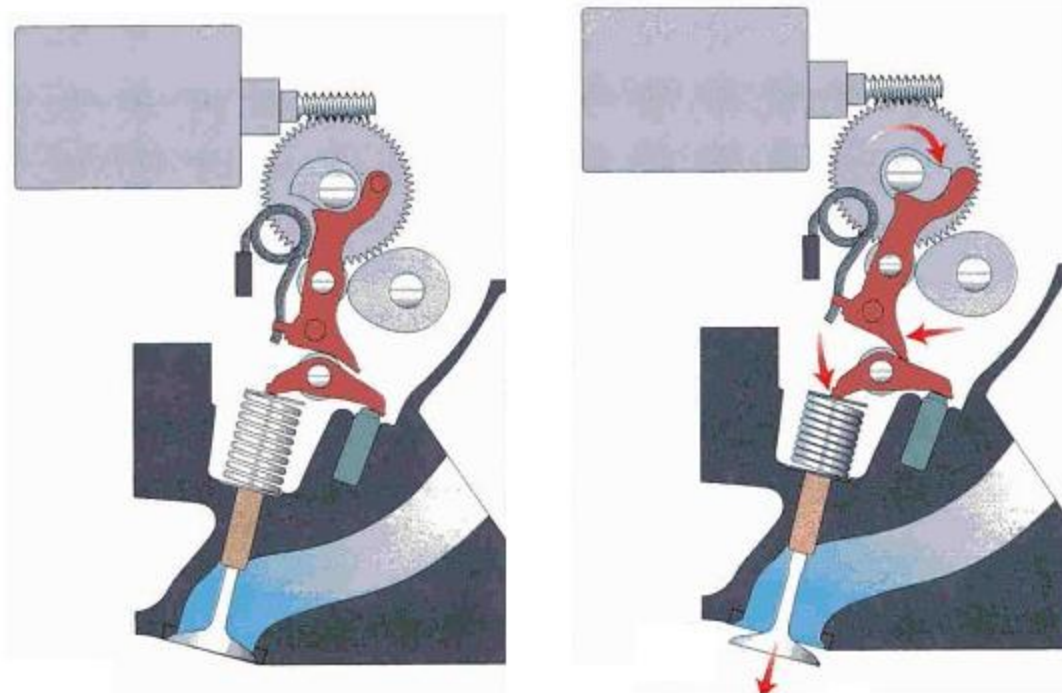
Na slici (Slika 13) je prikazan presjek motora koji ima ugrađen sustav Valvetronic. Ovdje se može vidjeti raspored dijelova tog sustava u motoru. Svaki od dijelova sustava imenovan je na slici ispod (Slika 14).

U usporedbi s konvencionalnim motorom, Valvetronic tehnologija dodaje elektromotor, ekscentarsko vratilo i na svakom usisnom ventilu poluklackalicu s kotačićem. Usisno bregasto vratilo djeluje preko međupluge na poluklackalicu s kotačićem. Kada vozač zatraži veću snagu, elektromotor okreće ekscentarsko vratilo koje gura poluklackalice i zauzvrat se ventili otvaraju dublje.



Slika 14. Dijelovi sustava Valvetronic [13]

Broj	Objašnjenje	Broj	Objašnjenje
1	Elektromotor	9	Ispušni ventil
2	Pužni vijak	10	Poluklackalica s kotačićem, ispuh
3	Povratna opruga	11	Hidraulički uređaj za poništavanje zračnosti, ispuh
4	Graničnik	12	Poluklackalica s kotačićem, usis
5	Usisno bregasto vratilo	13	Međupoluga
6	Kontakt ploha međupoluge	14	Ekscentarsko vratilo
7	Hidraulički uređaj za poništavanje zračnosti, usis	15	Pužni zupčanik
8	Usisni ventil	16	Bregasto vratilo, ispuh



Slika 15. Potpuno zatvoreni (lijevo) i potpuno otvoreni usisni ventil (desno) [12]

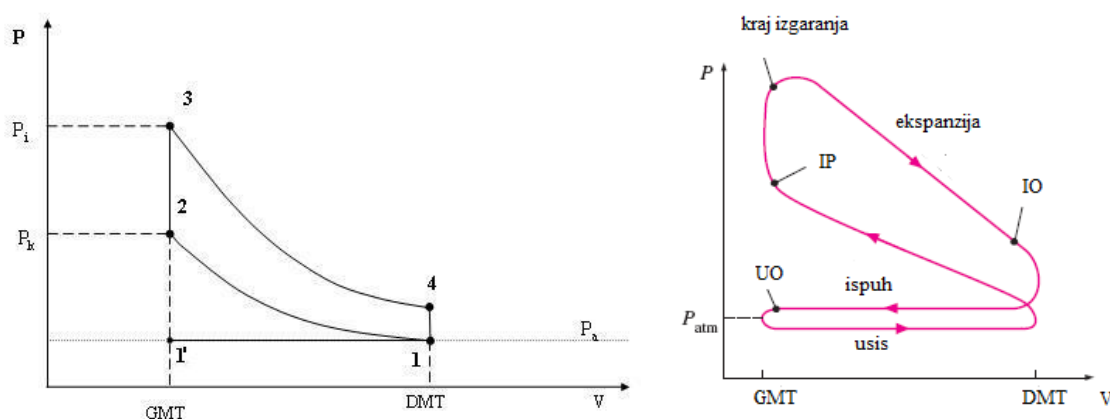
Na lijevoj slici (Slika 15.) prikazan je položaj dijelova za otvaranje ventila koji se nalaze iznad cilindra, u trenutku kada je ventil u potpunosti zatvoren. Opruga služi da međupoluga cijelo vrijeme bude u kontaktu s bregastim vratilom. Elektromotor je povezan s pužnim vijkom koji preko pužnog zupčanika okreće ekscentarsko vratilo. Ekscentarsko vratilo svojim oblikom prati oblik međupoluge. Međupoluga djeluje preko bregastog vratila i u trenutnom položaju ona je u kontaktu sa svojom najvišom točkom odnosno s vrhom brijega. U klasičnom motoru bi to značilo da je ventil potpuno otvoren no ovdje je on u potpunosti zatvoren. Razlog tomu je što se poluklackalica nalazi na ravnoj površini te međupoluge i dok god je na tom ravnom dijelu neće biti pomaka ventila koji je određen poluklackalicom. Ako želimo otvoriti ventil preko elektromotora trebamo pokrenuti pužni zupčanik gdje će ekscentarsko vratilo svojim oblikom pokrenuti međupolugu i pomaknuti je bliže bregastom vratilu. Kao rezultat toga cijela međupoluga će se zaokrenuti i ravan dio međupoluge (skroz donji dio) koji je do sada bio u kontaktu s poluklackalicom, više neće biti u kontaktu s njom već skroz desni donji kraj međupoluge koji je zaobljen. Što se više zaokreće međupoluga, poluklackalica je u kontaktu sa sve više zaobljenim donjim dijelom međupoluge i tako biva potiskivana prema dolje. Na desnoj slici je prikazan takav slučaj u kojem je međupoluga u potpunosti zarotirana. Time je poluklackalica potisnuta skroz prema dolje i otvara ventil do kraja. Taj sustav je 2001. godine predstavio BMW tvrdeći da od potpuno zatvorenog položaja

(0 mm) do potpuno otvorenog položaja (9.7 mm) se može doći u samo 0.3 sekunde. Bregasto vratilo se u odnosu na koljenasto vratilo može pomicati za 60°. Novi koncept unakrsnog hlađenja kod ove tehnologije smanjuje otpor protoka rashladnog sredstva pa zbog manjeg otpora se koriste manje pumpe za vodu koje imaju 60% snage od uobičajenih. Blok motora je izrađen od aluminijske i završava s ravninom koja prolazi kroz središte glavnih ležajeva radilice. Zajednički poklopac svih glavnih ležajeva ujedno prihvaća i osovinu za uravnoteženje sila inercije te dvo-stepenu pumpu za ulje. To čini cijelu pogonsku jedinicu vrlo krutom i robusnom, minimizirajući bilo kakve vibracije ostalih komponenti vozila koje bi vozač inače osjetio na volanu, mjenjaču i pedalama. Već je spomenuto da ovdje zaklopka nije u potpunosti uklonjena. Ona je cijelo vrijeme u potpuno otvorenom položaju. Služi kao sigurnost u slučaju zakazivanja sustava i prilikom pokretanja motora. Ukoliko sustav zakaže motor se vraća na program koji regulira zaklopku i tako motor radi na klasičan način. Prilikom pokretanja motora zaklopka će se djelomično zatvoriti kako bi se napravio određeni vakuum koji je potreban za određene funkcije motora kao na primjer kontrola emisija. Cijeli sustav vozaču pruža izravne prednosti, primjerice smanjena potrošnja goriva, smanjene emisije, bolje performanse motora, brza reakcija motora te gladi rad budući da se ventili neznatno pomiču u precizno kontroliranom procesu. Za goriva s oktanskim brojem između 87 i 99 ima ugrađen sustav za kontrolu detonantnog izgaranja. Sustav zapaljenja s individualnim svjećicama ne zahtijeva održavanje. Koristi se dvomaseni zamašnjak za maksimalnu glatkoću rada motora. Općenito, da bi se ublažio najveći okretni moment koji nastaje kada je najveći tlak u cilindru, koristi se dvomaseni zamašnjak. Jedan dio zamašnjaka uz pomoć opruge skladišti kinetičku energiju i vraća ju na drugi dio zamašnjaka. Time rasterećuje koljenasto vratilo, mjenjač i sve pokretne dijelove automobila. Zahvaljujući dvomasenim zamašnjacima počeli su se upotrebljavati lakši, manji i konstrukcijski slabiji mjenjači čime se štedi novac u proizvodnji a vozači štede gorivo na cesti i manje zagađuju okoliš. Za dodatno smanjenje emisija motor ima ugrađen napredni katalizator blizu motora u posebnom razvodniku dizajniran za minimalne emisije. U motorima s Valvetronic sustavom rashladno sredstvo teče preko glave motora što reducira temperaturu za 60% do 70%. Tekućina servoupravljača se brzo zagrijava pa se smanjuje potrebna snaga za hidrauličku pumpu. Brjegovi koji kontroliraju ekscentarsko vratilo obrađeni su na toleranciju od nekoliko desetaka mikrometara. Zbog visoke tehnologije i naprednih softvera proizvođač riskira greške. Uz to glavni nedostatak je što učinkovitost motora s Valvetronicom pada iznimno brzo iznad 6500

okretaja u minuti jer su potrebne jače opruge za ventile. [13]

2.2.2. Gubici pumpanja

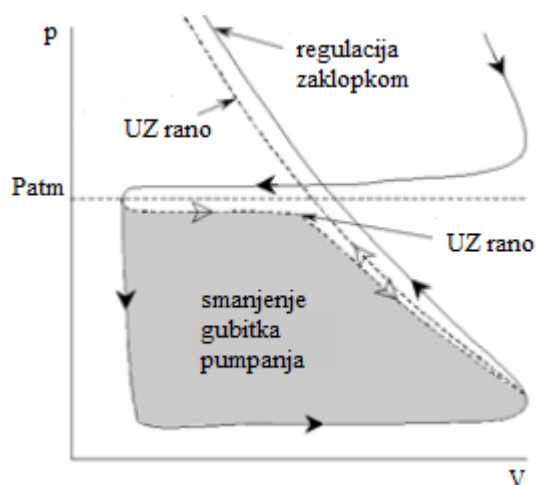
Kako bi bolje shvatili od kuda proizlaze neke od prednosti sustava Valvetronic, u ovom poglavlju će biti detaljnije objašnjeni gubici pumpanja koji su ključ kada se radi o smanjenju potrošnje goriva. Već je rečeno da se kod MSUI djelomično opterećenje postiže zaklopkom koja regulira protok zraka u cilindre, čime se dozvoljava smanjenje količine goriva koje se ubrizgava uz održavanje konstantnog omjera goriva i zraka. Stupanj punjenja je omjer mase svježe radne tvari koja ostane u cilindru nakon zatvaranja usisnog ventila i referentne mase tj. mase svježe radne tvari koja bi stala u radni volumen cilindra kod stanja okolne atmosfere. Kada se radi pod punim opterećenjem, stupanj punjenja MSUI bi trebao biti što je moguće veći tako da se masa mješavine zraka i goriva, a time i izlazna snaga, maksimizira. Motori su stoga dizajnirani tako da minimiziraju otpor strujanja zraka u motor, tako da zrak može ući u cilindar pod što je bliže moguće atmosferskom tlaku. Kod rada pod djelomičnim opterećenjem zaklopka ograničava protok zraka u motor, smanjujući stupanj punjenja, a kao rezultat toga tlak zraka u usisnoj cijevi iza zaklopke i u cilindru pada znatno ispod atmosferskog tlaka. Kako bi se zrak iz usisnog razvodnika usisao u cilindar, klip se mora kretati unatoč podtlaku u usisnom razvodniku na što se troši energija.



Slika 16. p-V dijagram idealnog (lijevo) i realnog Otto procesa (desno) [14, 15]

Na slici (Slika 16.) je prikazan p -V dijagram idealnog Otto procesa, referentni proces za Otto motore. U točki 1 na dijagramu (klip u DMT) smjesa goriva i zraka se ubacuje u cilindar i

tada počinje kompresija, gibanje klipa prema GMT. Smjesa se komprimira, raste joj tlak i temperatura, a smanjuje se obujam. Ovaj proces traje sve do GMT i točke 2 kada svjećica baca iskru i pali smjesu. Smjesa trenutno izgara povećavajući tlak i temperaturu u cilindru, pri konstantnom obujmu, sve do točke 3 kada je završilo izgaranje i kada klip započinje svoje gibanje prema DMT u procesu ekspanzije. Ekspanzija traje do točke 4 kada klip stiže u DMT. Tada nastupa ispuh, tlak i temperatura u cilindru padaju sve do točke 1. U točki 1 započinje izmjena medija koja traje od 1 preko 1' te natrag do 1, kada počinje novi ciklus. Tijekom teoretskog procesa izgaranje i izmjena medija se dešava trenutačno u mrtvim točkama, a kompletan proces je zamišljen bez izmjene topline s okolinom, tj. adijabatski. Iz usporedbe dvaju dijagrama može se vidjeti da idealni ciklus nema negativni rad izmjene radne tvari odnosno donju petlju. To ukazuje na to da se izmjena plina iz usisnog razvodnika u cilindar i od cilindra u ispušni razvodnik nakon izgaranja treba idealno dogoditi bez ikakvih gubitaka. U praksi to nikada ne može biti realizirano, a rad se uvijek troši izvlačenje zraka u cilindar i ispuštanje ispušnih plinova iz cilindra. Pri radu pri punom opterećenju, usisni razvodnik će biti malo ispod atmosferskog tlaka, a ispušni razvodnik će biti malo iznad atmosferskog tlaka. Kada želimo smanjiti snagu motora, zaklopka mora smanjiti tlak u razvodniku ispod atmosferskog povećavajući donju petlju koja predstavlja negativni rad. Rezultirajući ili indicirani rad procesa jednak je zbroju gornje i donje petlje. Gornja je pozitivna i predstavlja visokotlačni dio koji je desnokretan, a donja je negativna i predstavlja niskotlačni dio koji je ljevokretan. Kako se snaga motora reducira zaklopkom negativna površina u dijagramu se povećava i u konačnici smanjuje pozitivnu površinu odnosno koristan rad proizveden motorom. Dio rada će se potrošiti na svladavanje gubitaka trenja a dio na gubitke pumpanja. Zbog takve situacije motori sa zaklopkom pokazuju lošu korisnost pri nižim opterećenjima za razliku kod punog opterećenja. Povećanje rada izmjene radne tvari kod smanjenog opterećenja, i zbog toga veća potrošnja goriva, jedan je od glavnih nedostataka Ottovog motora u usporedbi s Dieselovim. Kada bi se smanjila negativna površina u dijagramu smanjila bi se i potrošnja. Upravo to radi Valvetronic sustav s primjerice ranim ili kasnim zatvaranjem usisnog ventila te varijabilnim podizajem od 0.23 mm do 9.7 mm. Točku UO drži u fiksnom položaju dok pomicanjem točke UZ regulira visinu podizaja s ciljem smanjivanja gubitka pumpanja odnosno potrošnje goriva.



Slika 17. Rano zatvaranje usisnog ventila [16]

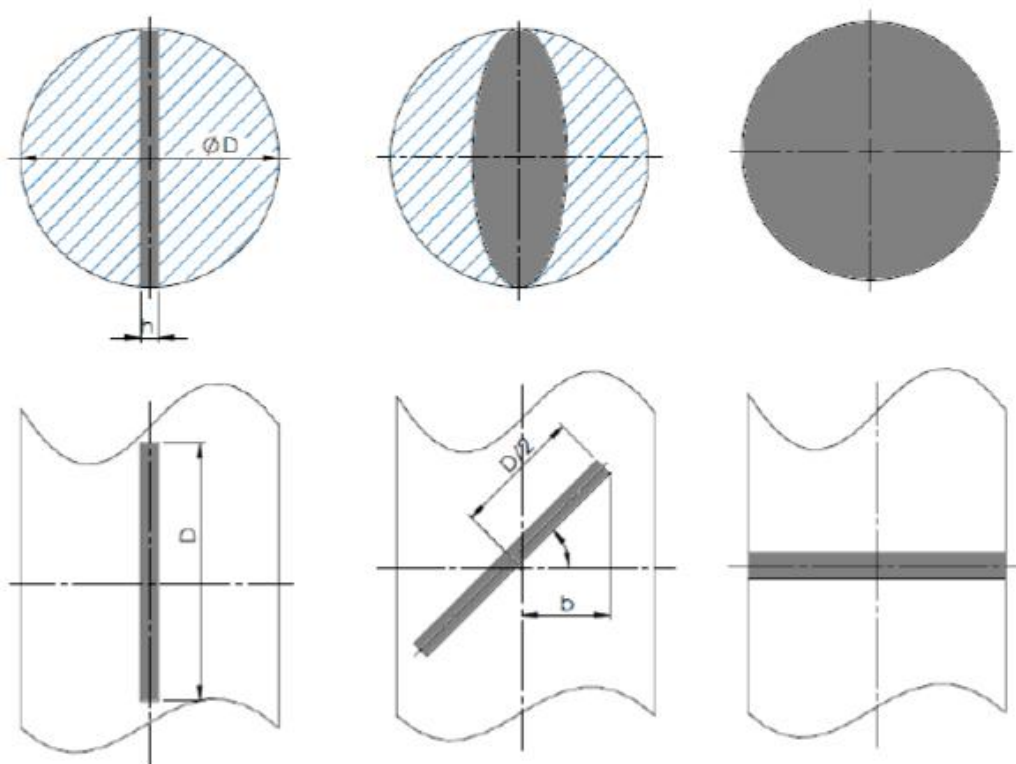
Rano zatvaranje usisnog ventila omogućuje da se zrak usiše u cilindre pri tlaku bliskom atmosferskom na početku usisnog takta. Usisni ventil određuje koliko će zraka ući u cilindar odnosno određuje stupanj punjenja. Kada se usisni ventil zatvori, tlak unutar cilindra će pasti dok se klip pomiče prema DMT, ali rad koji vrši klip da bi zrak ekspandirao uglavnom će se vratiti na početku kompresijskog takta. Slika 17 prikazuje princip ranog zatvaranja usisnog ventila u usporedbi s radom motora sa zaklopkom i ističe smanjenje gubitka pumpanja koje se teoretski može postići. Može se vidjeti da rano zatvaranje usisnog ventila još uvijek ima gubitak pumpanja, jer u praksi ispušni takt neće smanjiti tlak u cilindru na atmosferski zbog povratnog tlaka ispušnih plinova, a usisni takt će uvijek povući zrak u cilindar lagano ispod atmosferskog tlaka. U poglavlju Rezultati su prikazani p-V dijagrami simuliranih motora gdje se vidi smanjenje negativnog rada izmjene radne tvari.

3. IZRADA MODELA

3.1. Opis simulacijskog modela

U svrhu ovog rada model koji je korišten je četverotaktni četverocilindarski Otto motor. U grafičkom sučelju napravljen je takav model te uz rubne uvjete motoru su definirane i dimenzije koje nisu navedene radi povjerljivosti podataka proizvođača. Navedeni proračunski model opisivat će BMW-ov motor N46B20. Isti model će biti korišten i za motor s ugrađenim sustavom Valvetronic i za klasični motor sa zaklopkom. Na taj način se mogu izvršiti usporedbe tih dvaju načina regulacije snage (sa zaklopkom i s ventilima) i izvesti se zaključci o učinkovitosti rada sustava Valvetronic. Jedina razlika između ta dva modela je upravo zaklopka. Kod motora s Valvetronicom zaklopku će predstavljati ventili. Program ima mogućnost zadavanja krivulja kao promjenjivih te ih se može ručno podešavati upisivanjem željenih vrijednosti. S tom opcijom će biti upravljana snaga motora pomoću različitih krivulja podizanja ventila. Kao model izgaranja korišten je dvozonski Vibe-ov model koji dijeli prostor na dio s izgorjelom i neizgorjelom smjesom te pri određenim uvjetima predviđa pojavu detonacije u neizgorjeloj zoni.

Iduća slika (Slika 18.) prikazuje shemu motora koja se koristila za dobivanje rezultata, a dobivena je na temelju podataka proizvođača. Shema motora se sastoji od filtera za zrak (CL), zaklopke (TH), prigušnih lonaca (PL), injektora u cijev (I), cilindara (C), katalizatora (CAT) i cijevi (1-20). Rubnim uvjetima su na usisnoj strani (SB1) određeni tlak i temperatura u usisnoj cijevi te sastav smjese.



Slika 19. Rotacija zaklopke od potpuno otvorene do potpuno zatvorene

Na lijevoj slici se vidi zašto protok nije maksimalan i koja površina smeta protoku. Dok je zaklopka djelomično zatvorena svojom površinom čini elipsu.

Maksimalni koeficijent protoka definiran je omjerom stvarne površine protoka te površine zaklopke umanjen za gubitke strujanja uz rubove a glasi:

$$f_{\max} = \frac{A_{\text{stvarno}}}{A_{\max}} \cdot 0,9 = \frac{A_{\max} - A_{\text{zaklopke}}}{A_{\max}} \cdot 0,9 \quad [-] \quad (1)$$

Gdje su:

$$A_{\max} = \frac{D_z^2 \pi}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (2)$$

$$A_{\text{zaklopke}} = h_z \cdot D_z \quad [\text{mm}^2] \quad (3)$$

Kada je kut zakreta zaklopke manji od 90° , površina zaklopke se pretvara u elipsu čiji izraz za površinu glasi:

$$A_{\text{elipse}} = \frac{D_z \cdot \pi \cdot b}{2} \quad [\text{mm}^2] \quad (4)$$

Gdje je:

b – mala poluos elipse [mm^2]

$$b = D_z \cos \alpha \quad (5)$$

Izraz za koeficijent protoka glasi:

$$f = \frac{A_{\text{max}} - A_{\text{elipse}}}{A_{\text{max}}} \cdot f_{\text{max}} [-] \quad (6)$$

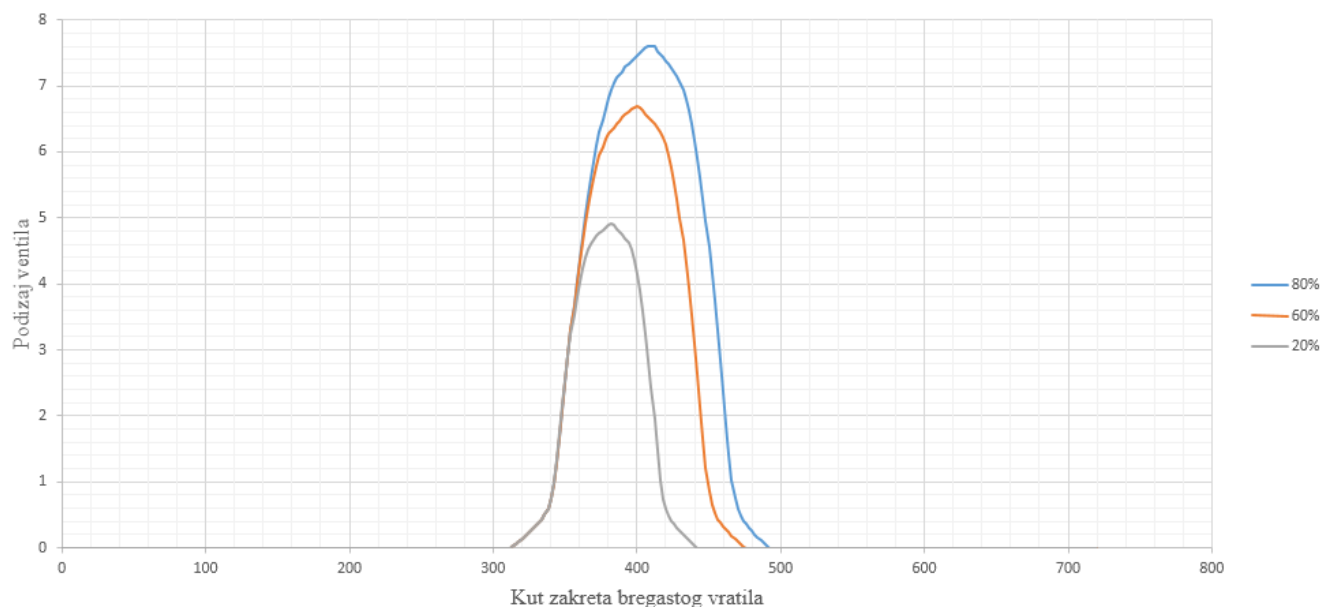


Slika 20. Koeficijent protoka zaklopke

Djelomična opterećenja kod motora sa zaklopkom dobivena su pomoću BMEP Control opcije u programu koja uz definiranje integracijske konstante prilagođava zaklopku za sva opterećenja. Najprije se odredi srednji efektivni tlak pri punom opterećenju, zatim se izračunaju tlakovi za djelomična opterećenja i ručno upisuju u program skupa s integracijskom konstantom.

3.3. Faze ventila sustava Valvetronic

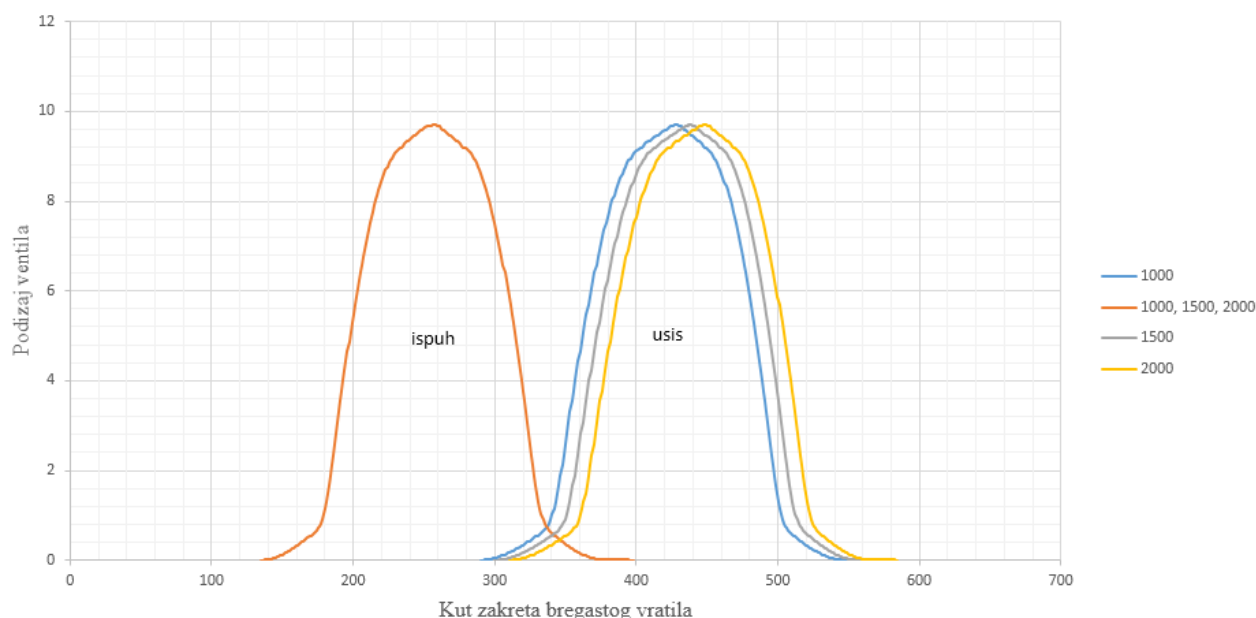
Najbitniji dio ovoga rada bio je pronaći odgovarajuće krivulje podizaja ventila. Ako krivulje podizaja ventila prikazujemo na dijagramu na apscisi su stupnjevi zakreta bregastog vratila, a na ordinati podizaj ventila u milimetrima. Krivulja ispuha je konstantnog oblika odnosno visine. Jedino što joj se mijenja je pomak u lijevo i u desno, odnosno pomoću Vanos tehnologije se mijenja trenutak otvaranja. Važniju ulogu ima krivulja usisa koja uz promjenjive trenutke otvaranja ima i promjenjivu visinu podizaja s kojom se regulira trajanje otvorenosti ventila. Čim se smanji visina krivulje početna i krajnja točka te krivulje se približe pa je ventil kraće otvoren. Krivulje su odabrane tako da se postignu rezultati koji bi se u teoriji postigli ugradnjom Valvetronica. Budući da nema točnih podataka o podizanjima ventila odabrana su optimalna rješenja koja su najbliža specifikacijama tog motora. To su ona rješenja koja daju najmanju potrošnju, najmanje emisije ali i dovoljan moment odnosno snagu. Kako bi se dobio bolji uvid o utjecaju visine podizaja na trajanje otvorenosti prikazani su neki primjeri.



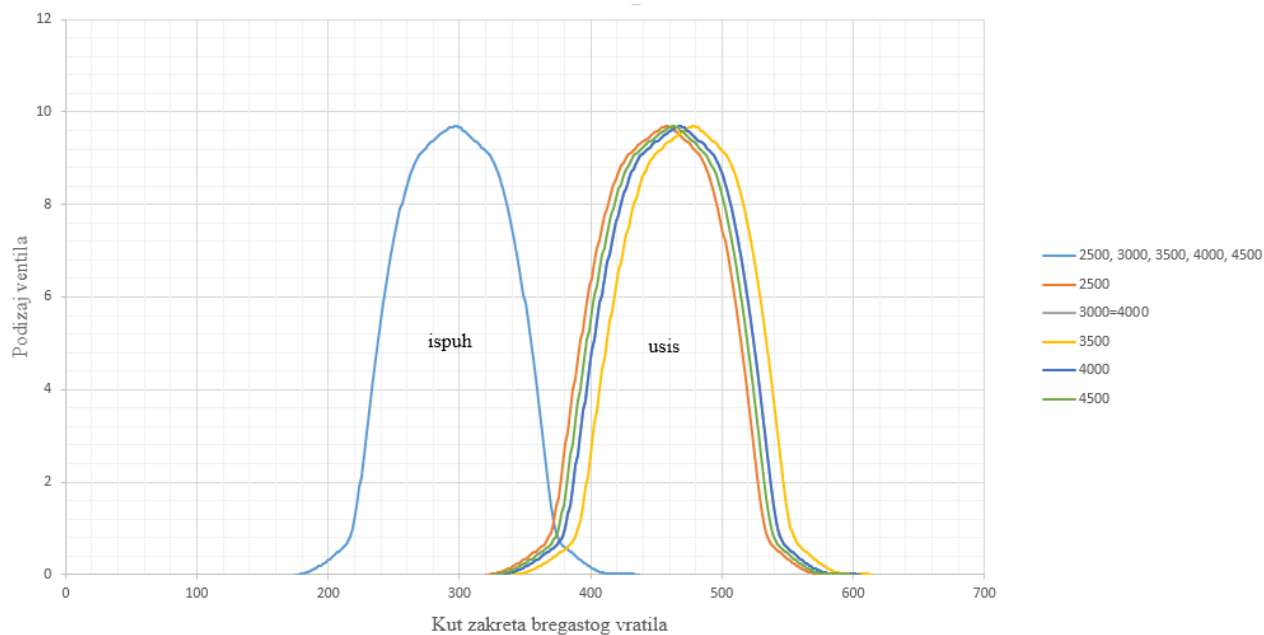
Slika 21. Krivulje podizaja usisnog ventila pri djelomičnim opterećenjima za 1000 okretaja u minuti

Prvo je odabrana krivulja za puno opterećenje te njenim postupnim smanjivanjem se tražilo rješenje koje opisuje rad motora pri određenim djelomičnim opterećenjima. Tako da podizaj za na primjer 80% opterećenja ne odgovara visinom u iznosu od 80% punog opterećenja već se tražilo 80% momenta punog opterećenja. Točka UZ se približava točki UO svakim smanjenjem podizaja i tako dobivamo kraću otvorenost ventila.

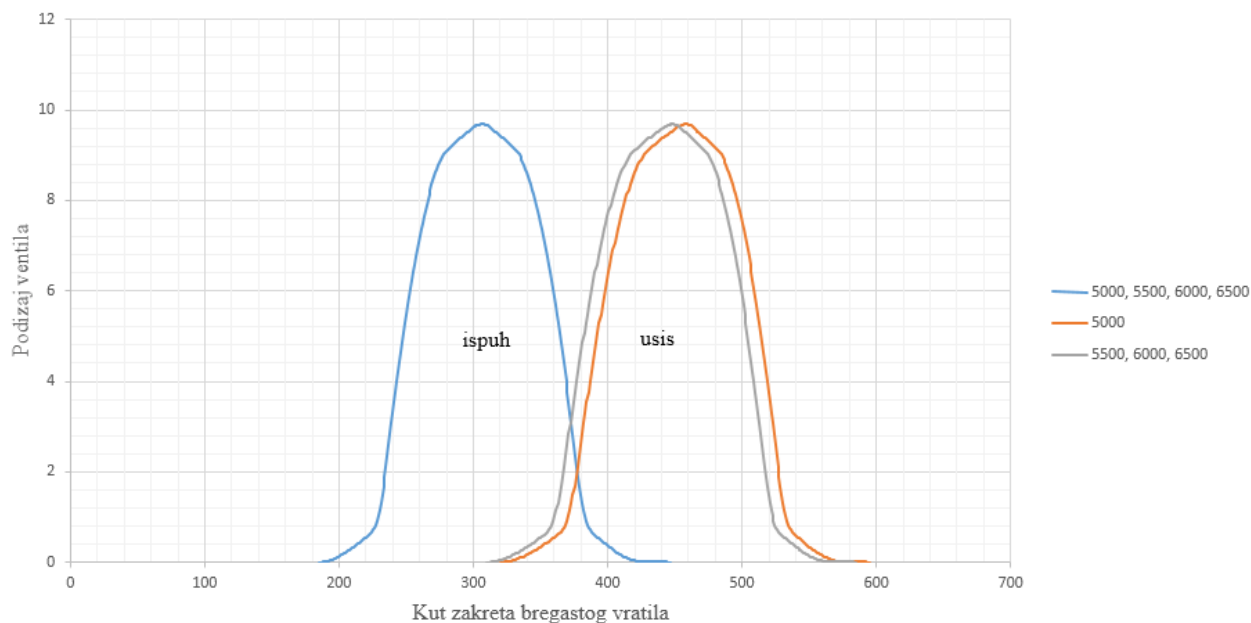
Na idućim slikama su prikazani svi položaji ventila pri punom opterećenju. Za niske brzine vrtnje krivulja usisa pomiče se u desno odnosno usis se kasnije otvara i manje je preklapanje ventila. Tim potezom se u odnosu na klasični motor sa zaklopkom postiču znatno bolja rješenja u pogledu potrošnje goriva i emisija. Pomicanje u desno traje do 3500 okretaja nakon čega se krivulja vraća u lijevo otvarajući usis sve ranije.



Slika 22. Krivulje podizaja ventila u mm pri punom opterećenju, za 1000 do 2000 o/min



Slika 23. Krivulje podizaja ventila u mm pri punom opterećenju, za 2500 do 4500 o/min



Slika 24. Krivulje podizaja ventila u mm pri punom opterećenju, za 5000 do 6500 o/min

U programu AVL Boost je jedna krivulja prilagođena za sva opterećenja i sve brzine vrtnje pomoću opcije koja omogućuje stvaranje "različitih slučajeva". Ovdje bi ti slučajevi bili trenuci u kojima se ventili otvaraju i zatvaraju. U odnosu na gore prikazane krivulje za 100%

opterećenja tom opcijom su one pomicanje u desno (pozitivni smjer) ili u lijevo (negativni smjer) a ti predznaci su upisani kao + i – ispred odgovarajućeg stupnja zakretaja u tablicu sa slučajevima. Na slikama se može vidjeti da kako se približavamo nižim opterećenjima, krivulja usisa je sve uža a time sve niža. Točka UO se držala kao istom za sva opterećenja no mijenjala se s brzinama vrtnje motora i imala je drugačiju točku UZ koja je sve negativnija, dakle približava se točki UO.

Tablica 1. Relativni pomak u odnosu na referentnu krivulju punog opterećenja za 80% opterećenja

n	UO	UZ	IO	IZ
Okretaji u min	Stupnjevi	Stupnjevi	Stupnjevi	Stupnjevi
1000	-60	-95	30	30
1500	-50	-88	30	30
2000	-40	-80	30	30
2500	-30	-78	40	40
3000	-20	-78	40	40
3500	-10	-77	40	40
4000	-20	-85	40	40
4500	-25	-86	40	40
5000	-30	-78	50	50
5500	-40	-66	50	50
6000	-40	-65	50	50
6500	-40	-65	50	50

Tablica 2. Relativni pomak u odnosu na referentnu krivulju punog opterećenja za 60% opterećenja

n	UO	UZ	IO	IZ
Okretaji u min	Stupnjevi	Stupnjevi	Stupnjevi	Stupnjevi
1000	-60	-112	20	20
1500	-50	-109	20	20
2000	-40	-105	30	30
2500	-30	-105	30	30
3000	-20	-102	30	30
3500	-10	-107	30	30
4000	-20	-107	30	30
4500	-25	-105	30	30
5000	-30	-100	30	30
5500	-40	-89	40	40
6000	-40	-85	40	40
6500	-40	-86	40	40

Tablica 3. Relativni pomak u odnosu na referentnu krivulju punog opterećenja za 40% opterećenja

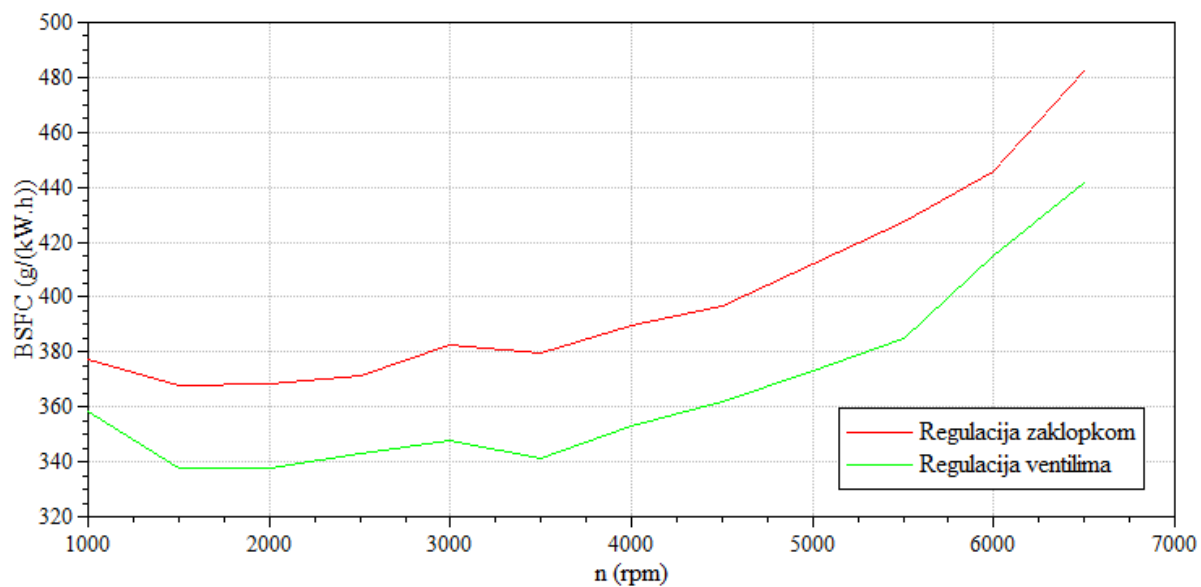
n	UO	UZ	IO	IZ
Okretaji u min	Stupnjevi	Stupnjevi	Stupnjevi	Stupnjevi
1000	-60	-128	20	20
1500	-50	-127	20	20
2000	-40	-126	30	30
2500	-30	-125	30	30
3000	-20	-125	30	30
3500	-10	-125	30	30
4000	-20	-123	30	30
4500	-25	-120	30	30
5000	-30	-115	30	30
5500	-40	-112	40	40
6000	-40	-100	40	40
6500	-40	-100	50	50

Tablica 4. Relativni pomak u odnosu na referentnu krivulju punog opterećenja za 20% opterećenja

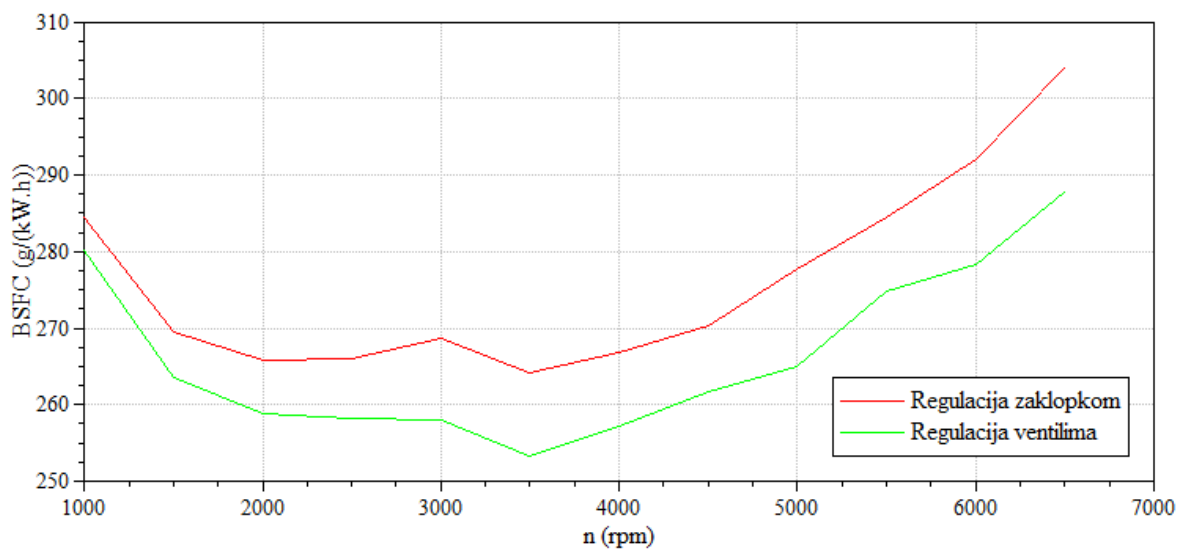
n	UO	UZ	IO	IZ
Okretaji u min	Stupnjevi	Stupnjevi	Stupnjevi	Stupnjevi
1000	-60	-145	20	20
1500	-50	-147	20	20
2000	-40	-148	30	30
2500	-30	-148	30	30
3000	-20	-148	30	30
3500	-10	-142	30	30
4000	-20	-138	30	30
4500	-25	-136	30	30
5000	-30	-131	30	30
5500	-40	-131	40	40
6000	-40	-120	40	40
6500	-40	-117	50	50

4. REZULTATI PROVEDENIH SIMULACIJA

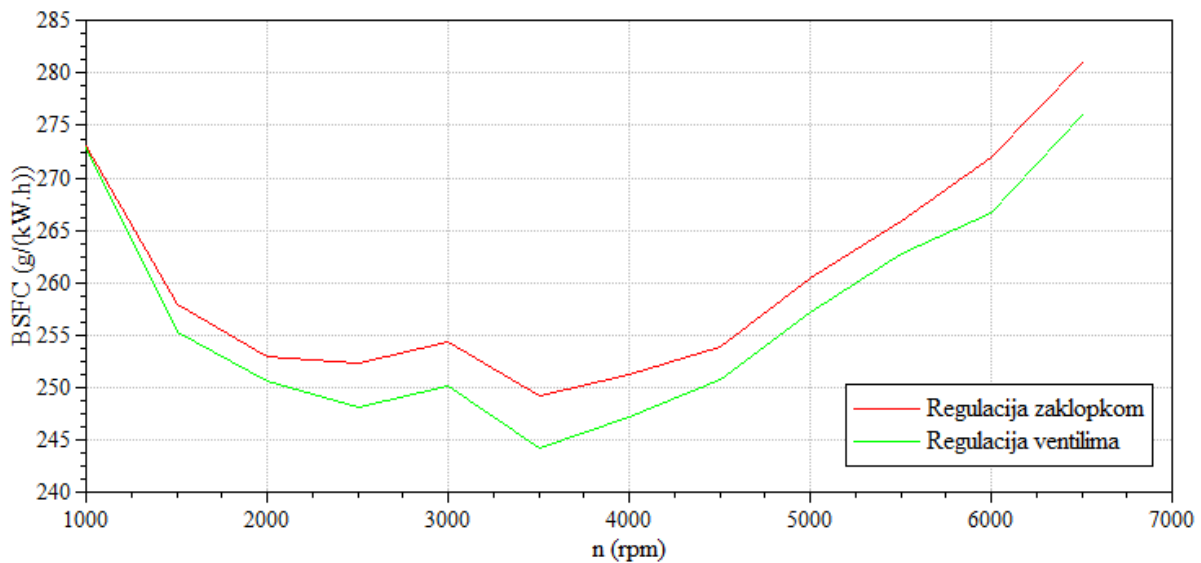
4.1. Potrošnja goriva



Slika 25. Potrošnja goriva pri 20% opterećenja

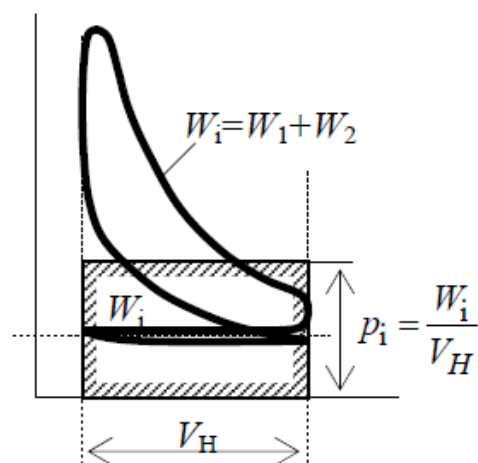


Slika 26. Potrošnja goriva pri 60% opterećenja



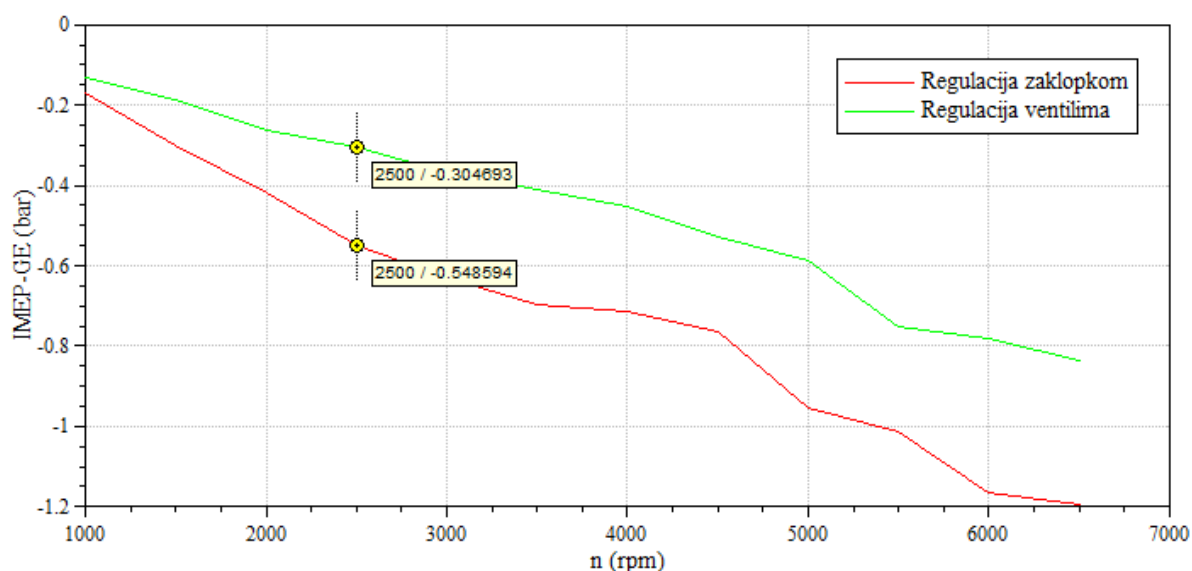
Slika 27. Potrošnja goriva pri 80% opterećenja

Usporedbom motora sa zaklopkom i motora s Valvetronic sustavom dobiveni rezultati prikazani su na slikama iznad. BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) predstavlja specifičnu potrošnju goriva i ona se obično koristi za usporedbu učinkovitosti MSUI. Računa se kao maseni protok goriva podijeljen sa snagom na vratilu. Mjerna jedinica je kg/Ws ili g/Ws no najčešće se koristi u g/kWh pa je tako prikazano i ovdje. Iz prikazanih dijagrama možemo zaključiti da motor s Valvetronic sustavom postiže puno manju potrošnju goriva koja se postiže već spomenutim smanjenjem gubitka pumpanja. Smanjena potrošnja goriva osobito dolazi do izražaja pri nižim opterećenjima motora kao što je i bilo za očekivati. Budući da se pri većim opterećenjima javljaju veće sile trenja i tromost Valvetronic gubi svoju funkciju. Najveću potrošnju ima na maksimalnoj brzini vrtnje motora.

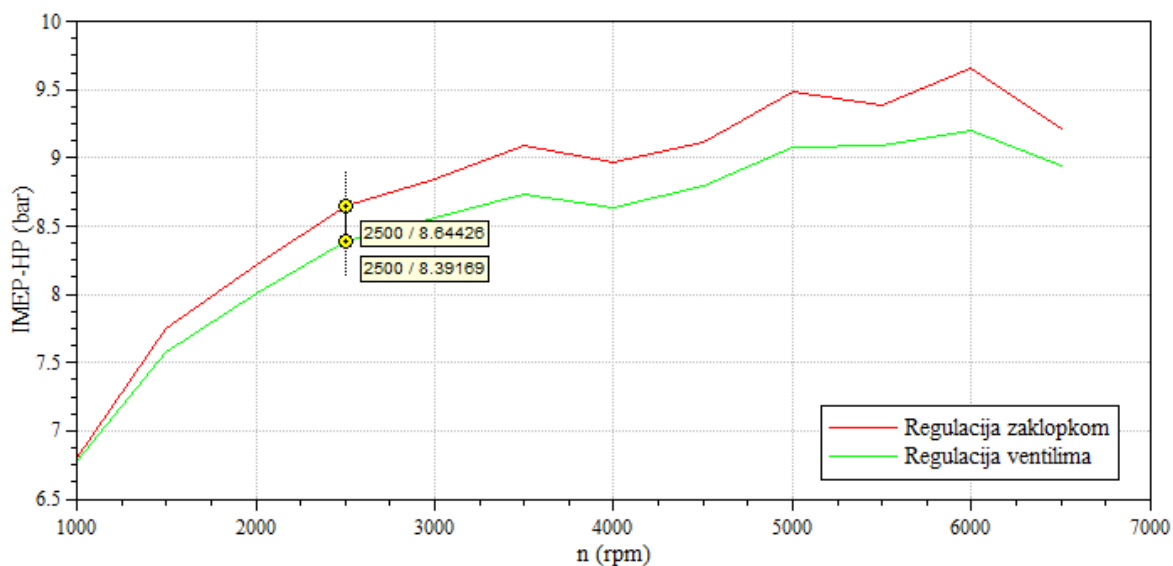


Slika 28. Srednji indicirani tlak [1]

Indicirani rad W_i se može prikazati u obliku pravokutnika kako je prikazano na slici (Slika 28.). Površina je jednaka radu, a osnovica radnom volumenu cilindra. Visina pravokutnika naziva se srednjim indiciranim tlakom p_i . Na isti način se može prikazati i efektivni rad i srednji efektivni tlak. Promjena indiciranog tlaka u ovisnosti o volumenu tvori indikatorski dijagram koji se sastoji od pozitivne desnokretne petlje te negativne ljevokretne petlje. Obje petlje se mogu svesti na srednje vrijednosti na isti način kao i srednji indicirani tlak. U programskom paketu AVL Boost negativan rad izmjene radne tvari odnosno ljevokretna petlja može se prikazati krivuljom IMEP-GE a desnokretna krivuljom IMEP-HP (Indicated Mean Effective Pressure- High Pressure). Kako krivulja koja opisuje negativan rad izmjene radne tvari direktno utječe na potrošnju, ona ja kod motora sa sustavom Valvetronic nešto manjeg iznosa za razliku kod motora sa zaklopkom. Obje krivulje možemo prikazati i u obliku pravokutnika koji će u zbroju za oba motora dati isti rezultat. Dakle, pozitivna i negativna petlja u zbroju daju kod oba motora isto rješenje odnosno IMEP-GE u zbroju s IMEP-HP daje IMEP odnosno srednji indicirani rad. Jedina je razlika u tome što kod motora sa sustavom Valvetronic negativna krivulja ima veću vrijednost (manje je negativna) a pozitivna krivulja je u odnosu na krivulju sa zaklopkom niže vrijednosti. Primjer je prikazan na idućim slikama.

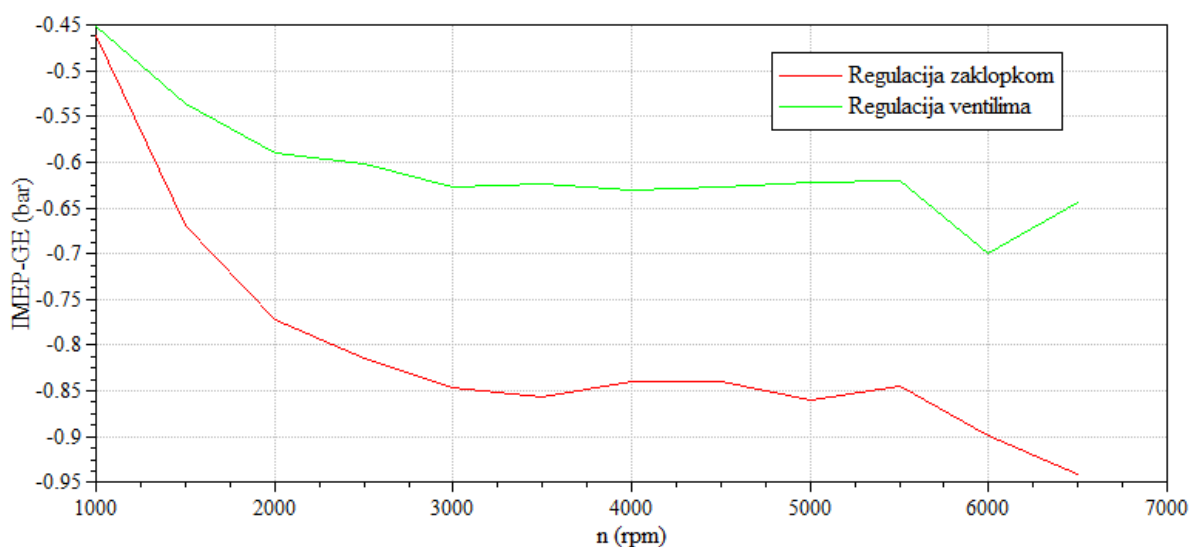


Slika 29. Srednji indicirani tlak za 60% opterećenja, niskotlačni dio

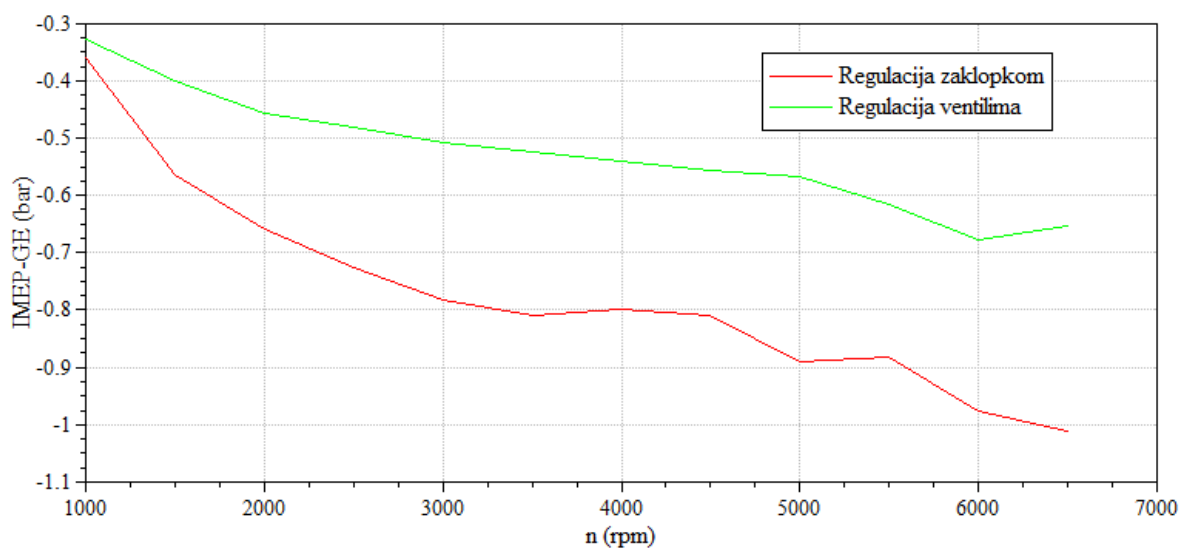


Slika 30. Srednji indicirani tlak za 60% opterećenja, visokotlačni dio

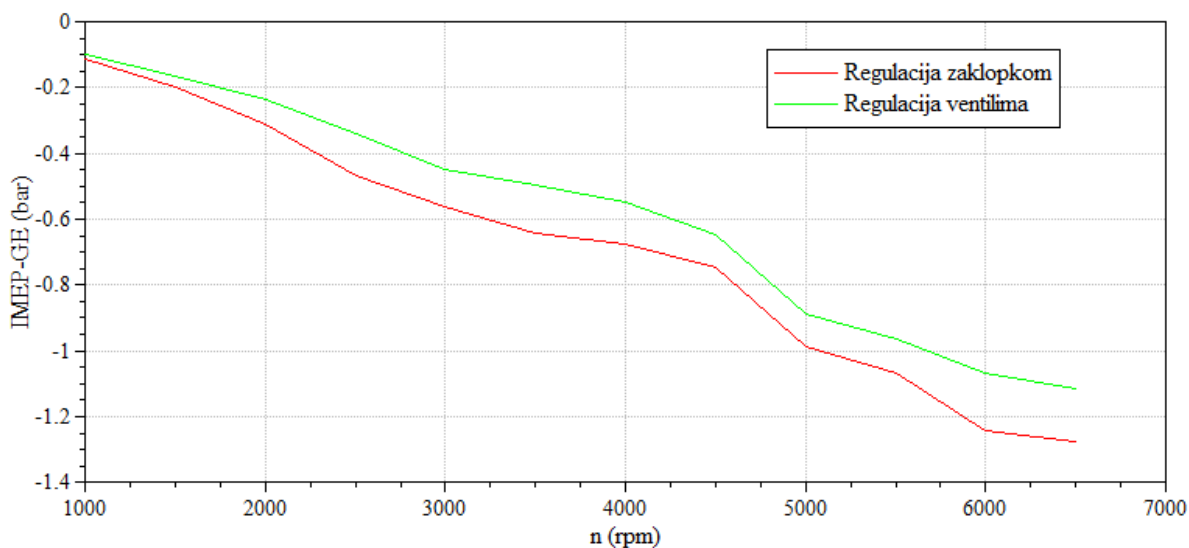
Kao primjer uzeto je opterećenje od 60% i brzina vrtnje od 2500 okretaja u minuti. Kada se za obje krivulje zbroje tlakovi niskotlačnog i visokotlačnog dijela dobit će se isto rješenje i za zelenu krivulju (Valvetronic) i za crvenu (zaklopka). Iz prikazanog se vidi da je krivulja niskotlačnog dijela kod motora sa sustavom Valvetronic bliže pozitivnom dijelu i time utječe na smanjenje potrošnje goriva. Dakle dobit ćemo istu snagu za manju potrošnju goriva.



Slika 31. Srednji indicirani tlak za 5% opterećenja, niskotlačni dio



Slika 32. Srednji indicirani tlak za 20% opterećenja, niskotlačni dio



Slika 33. Srednji indicirani tlak za 80% opterećenja, niskotlačni dio

Kao što je već spomenuto, Valvetronic svoje prednosti u odnosu na zaklopku najviše pokazuje pri nižim opterećenjima a to je pokazano na prethodnim slikama. Što je veće opterećenje razlike između zaklopke i Valvetronica su manje izražene.

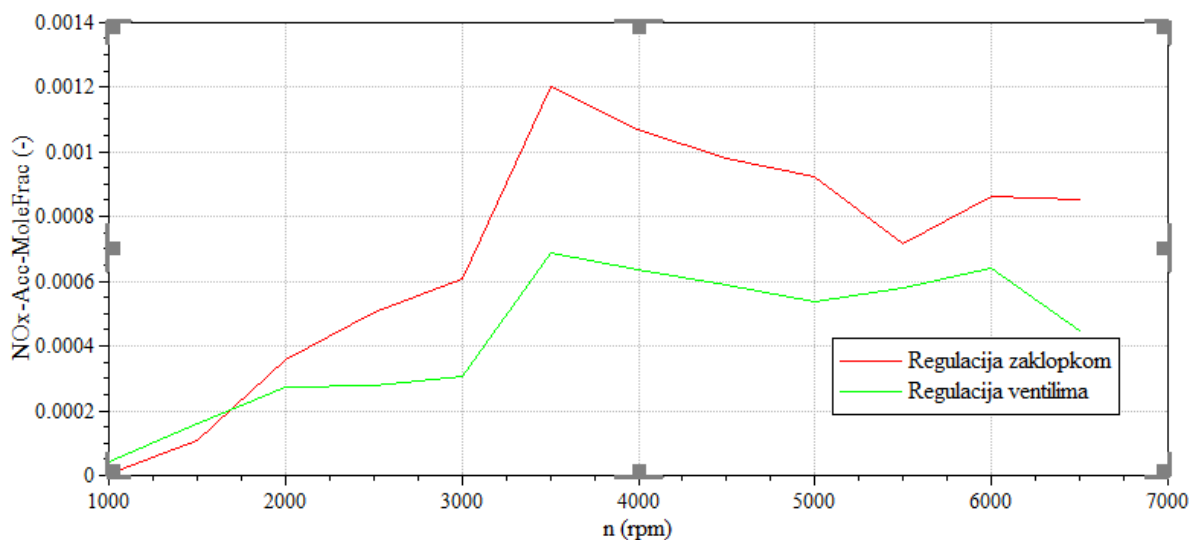
4.2. Štetne emisije

4.2.1. Općenito

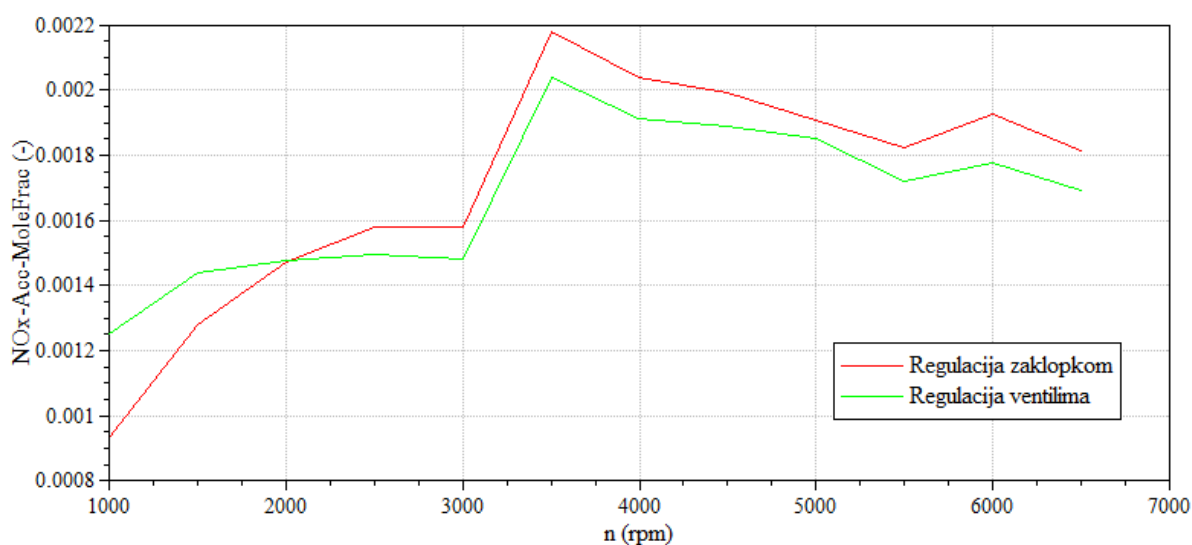
Homologacijskim propisima određene su dopuštene granice emisija štetnih tvari i propisane metode ispitivanja sljedećih štetnih sastojaka: ugljikovog monoksida (CO), ugljikovodika (HC), dušikovih oksida (NOX), čestica i nemetanskih ugljikovodika (NMHC). Katalizator je uređaj koji je izrađen od posebnih materijala preko kojih struji ispušni plin, a u ovisno o načinu djelovanja može biti oksidacijski katalizator, koji oksidira neizgorene ugljikovodike i katalizator redukcije koji se bavi dušičnim oksidima. Prve ugradnje katalizatora bile su 1975. u SAD-u. Katalizator se sastoji od više slojeva, aktivnog (katalitičkog) sloja i nosača aktivnog sloja. Katalitički sloj je od plemenitih metala, platine, rodija ili paladija i nanosi se vrlo malim količinama, dok se nosač aktivnog sloja najčešće izrađuje od keramike. Katalizator je sačastog oblika, odnosno ima veliki broj kanala (više od 100 po cm²) kroz koje struji plin. Budući da je za dodatnu oksidaciju potreban kisik motor mora raditi s pretičkom zraka ili se zrak naknadno dovodi ispred katalizatora. Naknadna oksidacija uzrokuje oslobađanje topline i povećanje temperature u katalizatoru što je osobito izraženo kad je smjesa bogata, pa se katalizatori moraju dobro toplinski izolirati. Današnji katalizatori su redovito trokomponentni, što znači da eliminiraju sve tri glavne negativne komponente u ispuhu, CO, CH i NO_x. Katalizatori su vrlo osjetljivi na nečistoću, a posebno na olovo u benzinu koje se taloži na aktivnom sloju i čini katalizator neupotrebljivim, pa motori koji imaju katalizator moraju koristiti bezolovni benzin. [17]

Valvetronic sustav je sposoban održati najbitnije mjere za smanjenje emisije. Zbog velike brzine protoka u području oko ventila, dolazi do dobre atomizacije goriva što će u smjesi poboljšati omjer goriva i zraka a time bolje izgaranje. Općenito za izgaranje molekule ili atomi iz goriva moraju biti okruženi dovoljnim brojem molekula kisika, a bez obzira u kakvom je polaznom agregatnom stanju gorivo, da bi ono moglo gorjeti, moraju mu se molekule ili čestice atomizirati (pocijepati do atoma). Također su smanjene i HC emisije pri hladnom pokretanju motora. [18]

4.2.2. Rezultati



Slika 34: Emisije NOx pri 20% opterećenja

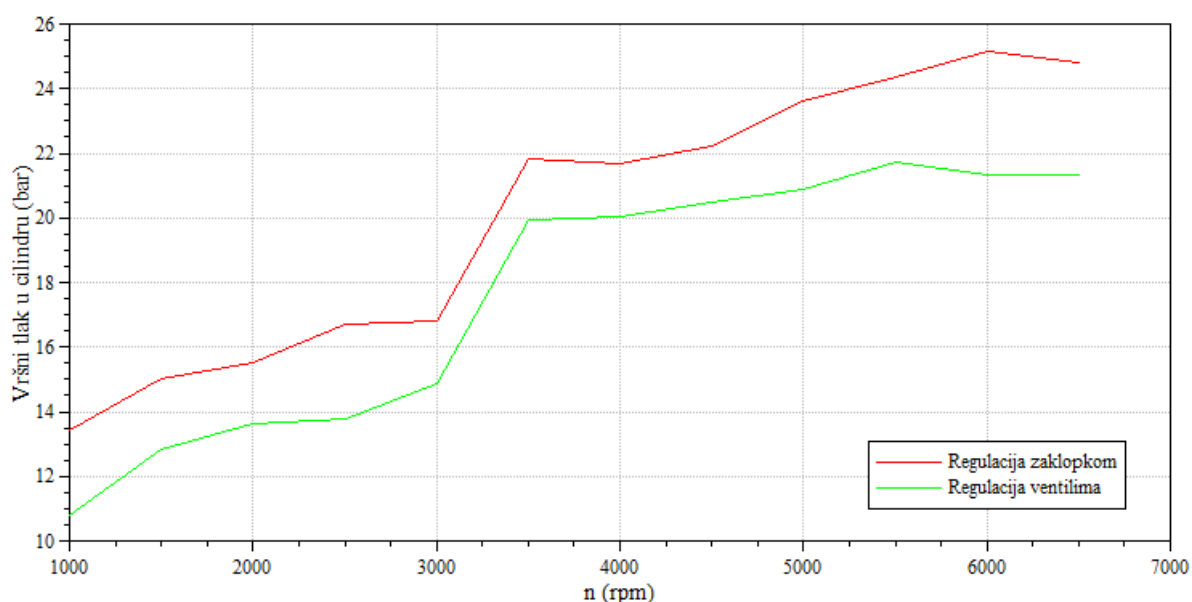


Slika 35: Emisije NOx pri 80% opterećenja

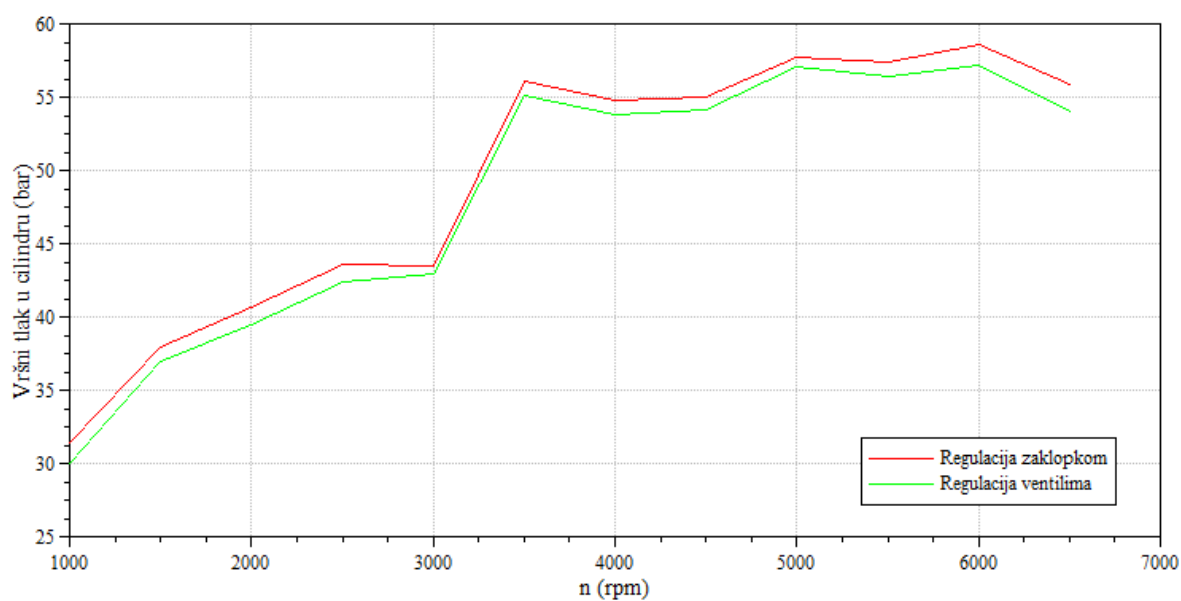
Na slikama iznad prikazani su rezultati simulacija. Bez obzira na to što se na nekim dijelovima zaklopka čini boljom opcijom za smanjenje emisija, sveukupno gledajući Valvetronic pokazuje bolja rješenja po pitanju emisija.

4.3. Tlak i temperatura u cilindru

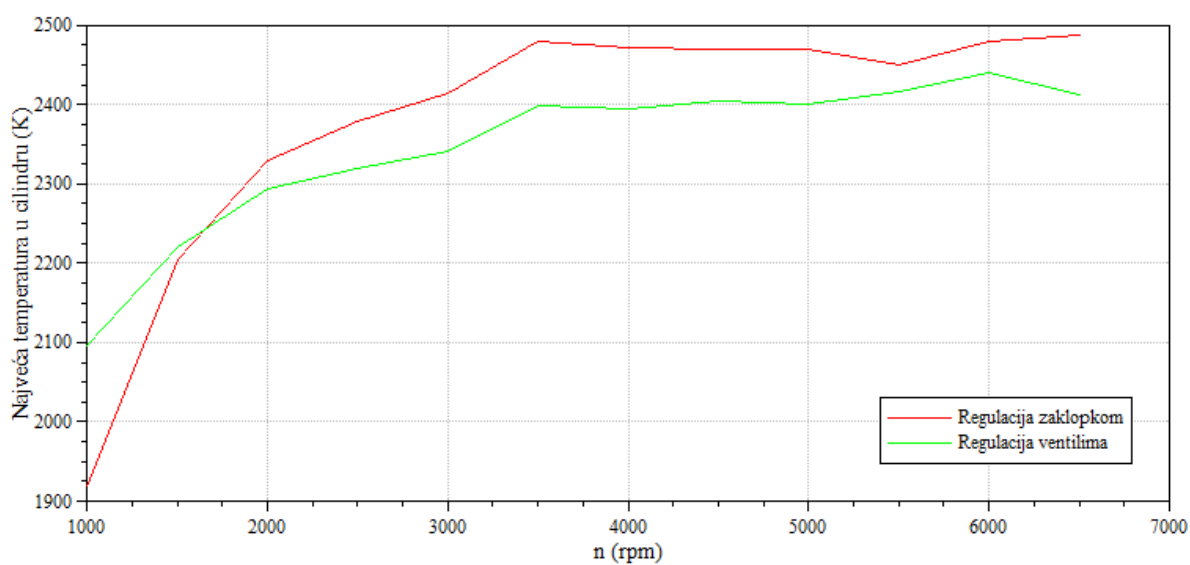
Vršni tlak ovisi o faktoru zraka, kompresijskom omjeru, stupnju punjenja, kutu pretpaljenja te konstrukcijskim parametrima. Najveći vršni tlak u cilindru imaju nabijeni motori, a on kod automobilskih Ottovih motora iznosi oko 60 bara dok najveća temperatura u cilindru može lokalno dostići i 3000 K. Najveći utjecaj na temperaturu na kraju usisa ima opterećenje. Što je opterećenje veće, veća je i temperatura u cilindru. Rezultati pokazuju da Valvetronic daje i niže tlakove i niže temperature u cilindru. Kao što je rečeno, vršni tlakovi i temperature rastu s opterećenjem kao što prikazuju dijagrami za 20% i 80% opterećenja.



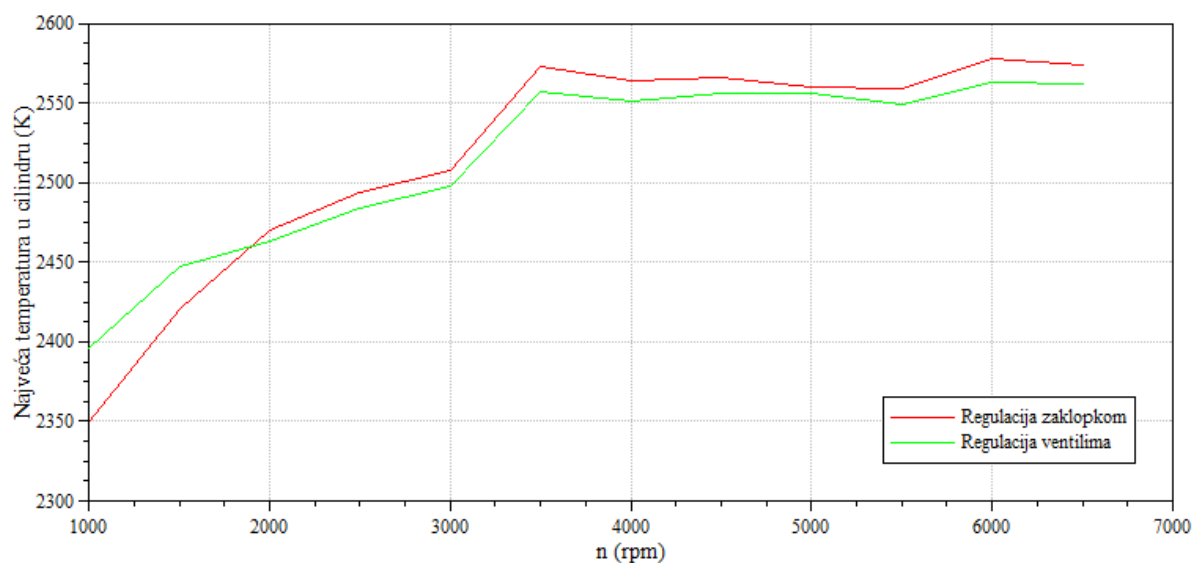
Slika 36: Vršni tlak u cilindru pri 20% opterećenja



Slika 37: Vršni tlak u cilindru pri 80% opterećenja

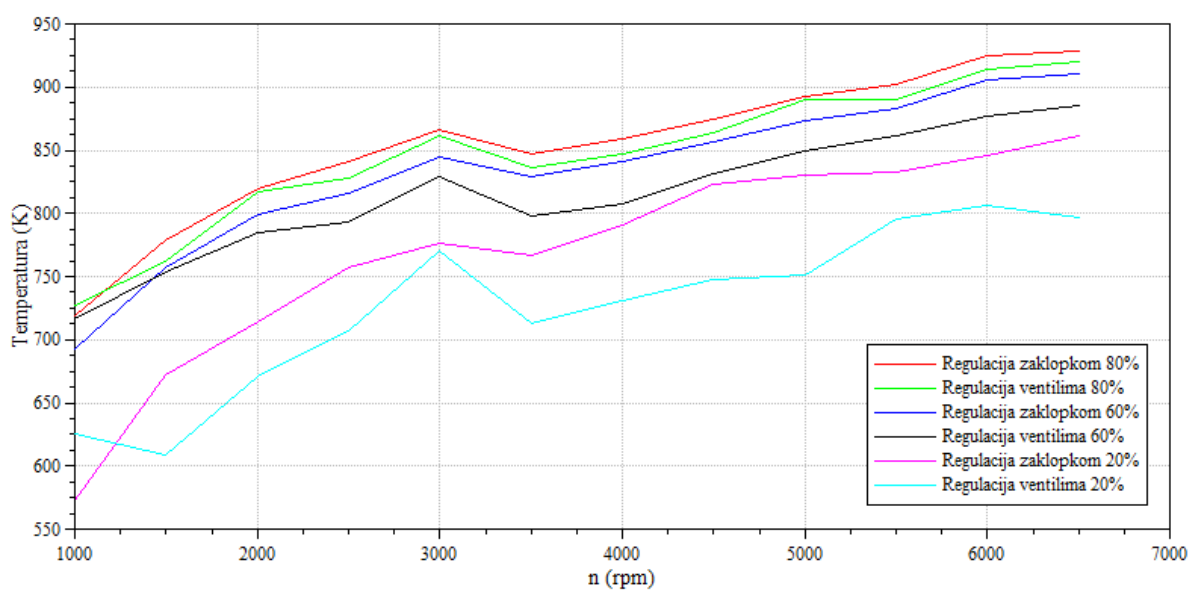


Slika 38: Najveća temperatura u cilindru pri 20% opterećenja



Slika 39: Najveća temperatura u cilindru pri 80% opterećenja

4.4. Temperature u ispuhu

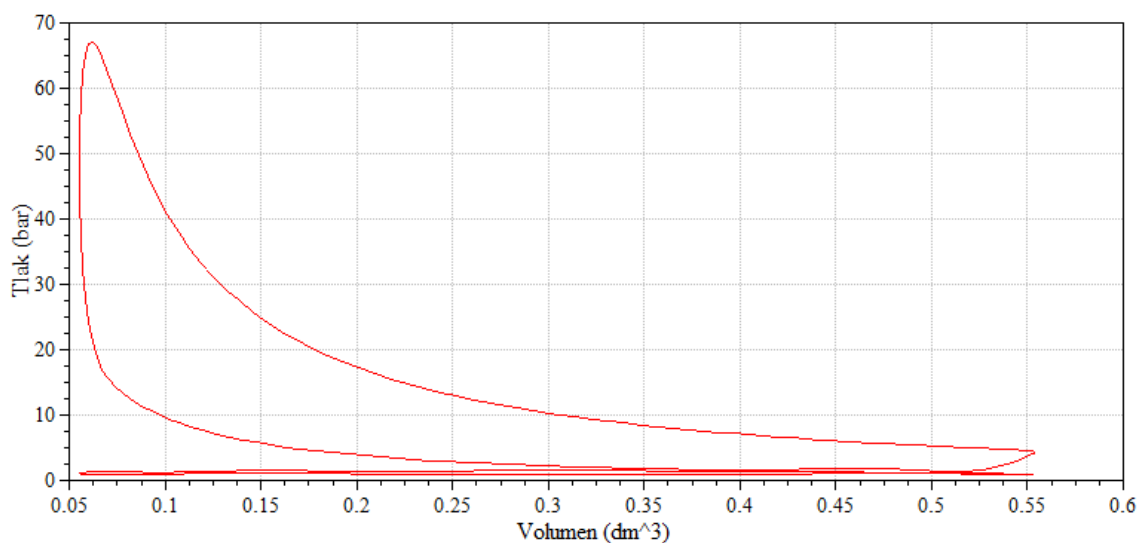


Slika 40: Temperature ispuha za 20%, 60% i 80% opterećenja

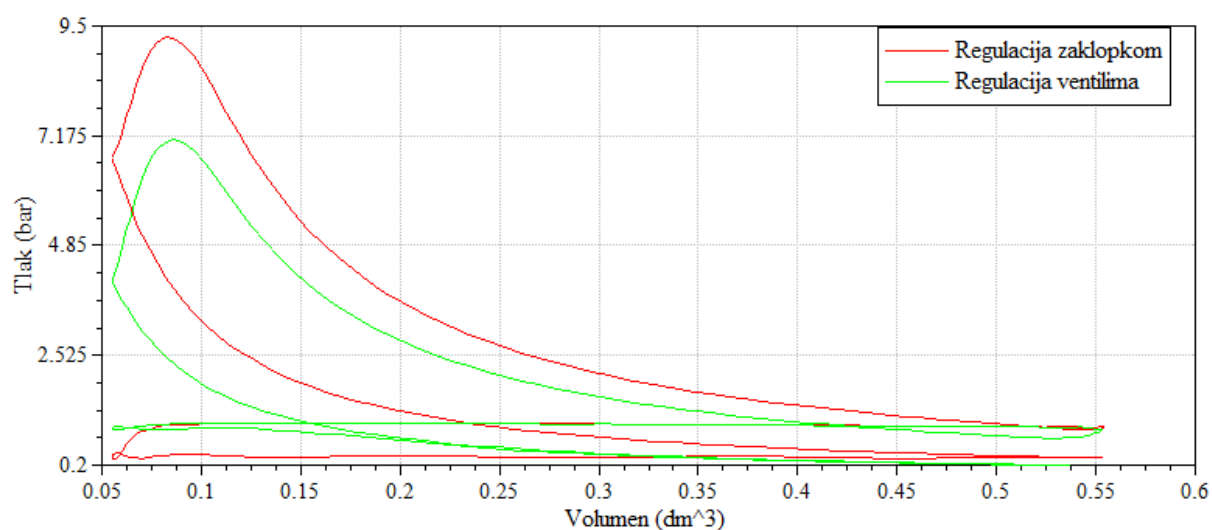
Uobičajene temperature ispušnih plinova Ottova motora pri srednjim brzinama vrtnje i djelomičnom opterećenju iznosi 800 do 950 K a pri punom opterećenju do 1120 K. Za sva opterećenja motor s Valvetronic sustavom ima nižu temperaturu ispuha.

4.5. Rezultati usporedbe motora u p-V dijagramu

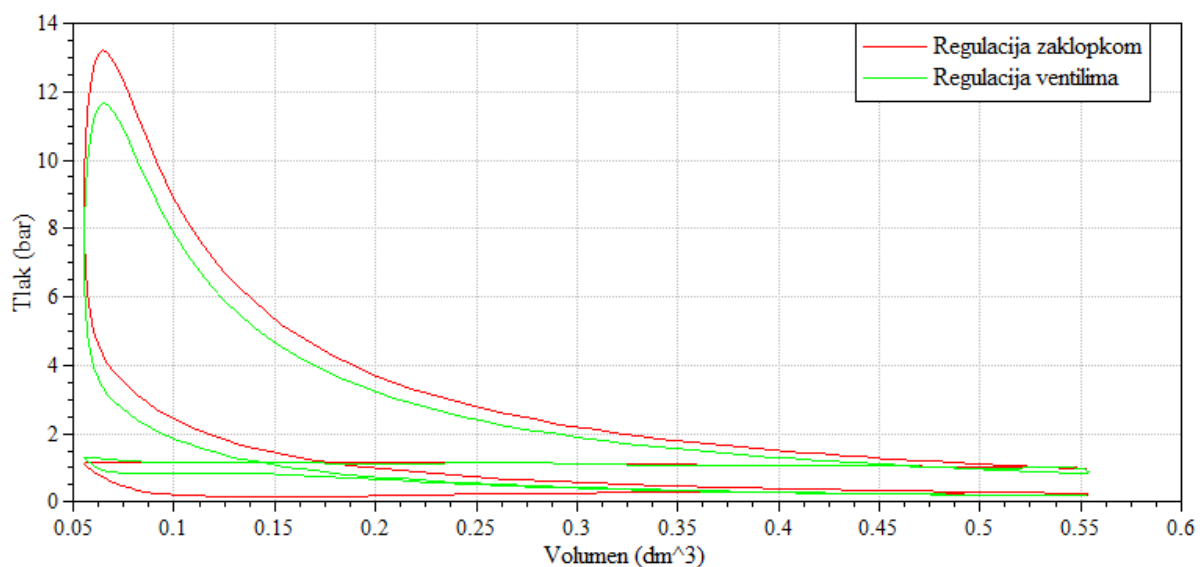
Na slici (Slika 42.) je prikazan p-V dijagram za puno opterećenje koji je dobiven simulacijom u programu. Ispod su prikazane usporedbe motora sa i bez zaklopke za opterećenje od 5%. Budući da se prednost Valvetronica najviše vidi pri nižim opterećenjima na slikama se može uočiti veliko smanjenje negativnog rada izmjenne radne tvari. Ujedno su i smanjeni vršni tlakovi u cilindru.



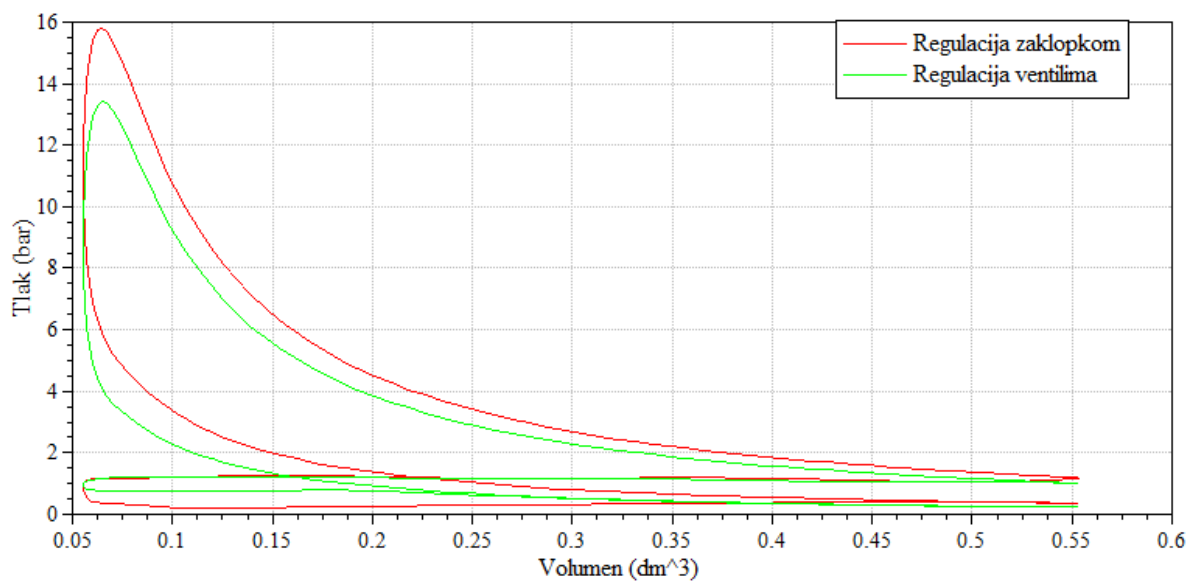
Slika 41: p-V dijagram za puno opterećenje



Slika 42: p-V dijagram za 5% opterećenja i 1500 okretaja/min



Slika 43. p-V dijagram za 5% opterećenja i 3500 okretaja/min



Slika 44. p-V dijagram za 5% opterećenja i 5500 okretaja/min

5. ZAKLJUČAK

Radi sve većih zahtjeva za nižim emisijama a time i nižom potrošnjom goriva razvijaju se brojne tehnologije. Jedna od tih tehnologija opisana je u ovom Završnom radu a radi se o BMW-ovom sustavu Valvetronic. Klasični motori snagu reguliraju zaklopkom. Što je ona otvorenija više zraka ulazi u cilindar. Valvetronic zaklopku koristi samo prilikom pokretanja motora i u slučaju zakazivanja sustava a regulaciju snage vrši ventilima. Valvetronic sustavom omogućen je varijabilan ventilski razvod pomoću kojeg se postiže ušteda goriva do čak 10%, a sa smanjenom potrošnjom dolaze i niže emisije. Kako kod trkaćih automobila potrošnja nije od velike važnosti već snaga, Valvetronic se primjenjuje u gradskim automobilima za svakidašnju vožnju. U takvim uvjetima on pokazuje najveću učinkovitost dok ona naglo pada iza 6500 okretaja u minuti. Analizom rezultata dobivenih simulacijom rada Ottovog motora sa zaklopkom i motora sa sustavom Valvetronic pokazalo se da je motor bez zaklopke učinkovitiji. Na svim brzinama vrtnje i svim opterećenjima vidljivo je smanjenje potrošnje goriva a time su smanjene i emisije. U p-V dijagramu je prikazana razlika negativnog rada izmjene radne tvari. Osim što motor bez zaklopke ima manju negativnu površinu ima i manje vršne tlakove u cilindru. U konačnici kada se zbroje pozitivna i negativna površina u p-V dijagramu, za oba motora su dobiveni isti rezultati no motor sa zaklopkom pri djelomičnom opterećenju ima gubitke pumpanja koji povećavaju negativni rad i povećavaju potrošnju goriva. Također, temperature u cilindru su manje kod motora bez zaklopke što je povoljno s tehničke strane.

LITERATURA

- [1] Mahalec, Lulić, Kozarac: *Motori s unutarnjim izgaranjem*, Fsb, Zagreb, 2012
- [2] <http://www.enginebuildermag.com/2014/01/the-inner-workings-of-variable-valve-timing/>
- [3] <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Camshaft>
- [4] <http://www.secondchancegarage.com/articles/images/valvetrain/cam.jpg>
- [5]
http://image.superchevy.com/f/8566166+w640+h426+q80+re0+cr1+ar0+st0/p114216_ima
- [6] <http://www.autonet.hr/arhiva-clanaka/ventili>
- [7] Popović Goran: *Tehnika motornih vozila*, Pučko otvoreno učilište, Zagreb, 2004.
- [8] <http://motor-diht.hr/asortiman/motorna-grupa/vodilice-ventila/>
- [9]
https://www.reddit.com/r/AutoTalk/comments/2xsffa/engine_valve_technologies_vvt_and_vv/
- [10] <http://www.oktan.hr/hondin-tehnoloski-dragulj-sto-je-vtec-motor-i-kako-funkcionira/>
- [11] <http://www.ijettjournal.org/volume-4/issue-5/IJETT-V4I5P55.pdf>
- [12] http://www.autozine.org/technical_school/engine/vvt_5.html
- [13]
<https://www.e90post.com/forums/attachment.php?attachmentid=1584189&d=1488748541>
- [14] https://hr.wikipedia.org/wiki/Benzinski_motor
- [15] <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~pzugec/Otto/Otto.html>
- [16] <http://www.mechadyne-int.com/reference/throttle-less-operation/intake-valve-closing-strategies/>
- [17] <https://autoportal.hr/clanak/ovo-trebate-znati-o-ispusnom-sustavu>
- [18] <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2006-01-0849/>