

Sustav prednabijanja motora s unutarnjim izgaranjem

Martan, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:194019>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

SUSTAVI PRED NABIJANJA MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM

INTERNAL COMBUSTION ENGINE AIR INTAKE SYSTEM

Mentor: mag. ing. traff. Tomislav Kučinić

Student: Antonio Martan

JMBAG: 0135260342

Zagreb, lipanj 2023.

Zagreb, 2. lipnja 2023.

Zavod: **Zavod za cestovni promet**
Predmet: **Cestovna prijevozna sredstva**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7188

Pristupnik: **Antonio Martan (0135260342)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Cestovni promet**

Zadatak: **Sustav prednabijanja motora s unutarnjim izgaranjem**

Opis zadatka:

U radu je potrebno analizirati stupanj punjenja motora s unutarnjim sagorijevanjem. Objasniti različite izvedbe prednabijanja te njihov utjecaj na tehničke karakteristike motora. Prikazat će se suvremeni sustavi prednabijanja i njihove prednosti u odnosu na dosadašnje sustave.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Tomislav Kučinić, mag. ing. traff.

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. PRINCIP RADA ČETVEROTAKTNOG MOTORA	3
2.1. Usis	3
2.2. Kompresija	4
2.3. Ekspanzija.....	4
2.4. Ispuh	4
2.5. Potrebni senzori za rad sustava	4
2.6. Hladnjak stlačenog zraka	10
3. STUPANJ PUNJENJA MOTORA S UNUTARNJIM SAGORIJEVANJEM	13
4. DINAMIČKO PREDNABIJANJE	15
4.1. Nabijanje oscilacijskom usisnom granom.....	15
4.2. Rezonancijsko nabijanje	16
4.3. Rezonancijsko – oscilacijska usisna grana	17
5. SUSTAV PREDNABIJANJA BEZ MEHANIČKOG POGONA	18
5.1. Turbo punjač s regulacijskim ventilom	19
5.2. Turbo punjač s varijabilnom geometrijom.....	20
5.3. Kombinirano prednabijanje	21
5.4. Nabijanje <i>Twin – scroll</i> turbo punjačem.....	23
6. PREDNABIJANJE MOTORA SUSTAVOM TURBO KOMPRESORA.....	25
6.1. Centrifugalni turbo kompresor	25
6.2. Vijčani turbo kompresori.....	27
6.3. Korijenski turbo kompresori.....	28
7. SUVREMENI SUSTAVI PRED NABIJANJA	29
7.1. Pogon turbo punjača električnom energijom	29
7.2. PowerPulse tehnologija.....	32
7.3. BMW – ov dizelski motor (B57S) koji koristi četiri turbo punjača.....	34
8. ZAKLJUČAK.....	35
Popis literature:	36
Popis slika	38
Popis tablica.....	39

1. UVOD

Punjenje cilindra motora s unutrašnjim izgaranjem gorive smjese je kroz povijest zahtijevalo sve veću pozornost, odnosno način za optimizacijom procesa. S razvojem automobilske industrije i povećanjem broja motornih vozila na prometnicama se povećalo i zagađenje okoliša štetnim plinovima i česticama koje nastaju kao posljedica izgaranja goriva u motoru. Kako bi se sam proces izgaranja goriva u motoru optimizirao, a samim time smanjilo i zagađenje okoliša, došlo je do razvoja raznih načina za poboljšanje punjenja radnog volumena cilindra. Samom optimizacijom procesa punjenja cilindra se omogućuje korištenje motora manjeg radnog volumena koji proizvodi istu snagu. Kako bi se to postiglo razvijeni su sustavi dinamičkog i vanjskog pred nabijanja motora. Dinamičko pred nabijanje obuhvaća konstrukcijske zahvate na motoru koji omogućavaju da se najbolje moguće iskoristi kinetička energija usisnog radnog medija kako bi ga se u radni prostor cilindra usisalo što više. Sustavi vanjskog pred nabijanja motora koriste dodatno ugrađene uređaje na motoru koji se dijele na turbo punjače, a koji su pogonjeni kinetičkom energijom ispušnih plinova produkata izgaranja goriva u motoru i na turbo kompresore koji za pogon koriste okretni moment koljenastog vratila.

Tema završnog rada je: Sustavi pred nabijanja motora s unutarnjim izgaranjem. Rad je podijeljen u osam cjelina:

1. Uvod
2. Princip rada četverotaktnog motora
3. Stupanj punjenja motora s unutarnjim sagorijevanjem
4. Dinamičko pred nabijanje
5. Sustav pred nabijanja bez mehaničkog pogona
6. Pred nabijanje motora sustavom turbo kompresora
7. Suvremeni sustavi pred nabijanja
8. Zaključak

U drugom poglavlju su opisani taktovi i princip rada četverotaktnog motora, a prikazani su elementi koji moraju postojati kako bi sustav uspješno i učinkovito obavljao funkciju. Također je u ovom poglavlju opisan i hladnjak stlačenog zraka.

U trećem poglavlju je pojašnjen stupanj punjenja cilindra s prikazanim vrijednostima za različite sustave pred nabijanja. Dodatno su prikazani načini za poboljšanje stupnja punjenja i značajke sustava koje onemogućavaju veći stupanj punjenja.

U četvrtom poglavlju su prikazani sustavi dinamičkog pred nabijanja s prikazanim principom rada oba karakteristična sustava koja se koriste u motorima suvremenih vozila.

U petom i šestom poglavlju su opisani sustavi vanjskog pred nabijanja koji su različito pogonjeni. Sustav pred nabijanja motora bez mehaničkog pogona je prikazan u petom poglavlju s prikazanim različitim izvedbama sustava i elementima koji su potrebni za uspješan i učinkovit rad sustava, a u šestom poglavlju je prikazan princip

rada sustava za pred nabijanje motora sustavom turbo kompresora zajedno s različitim izvedbama turbo kompresora i prikazanim značajkama istih.

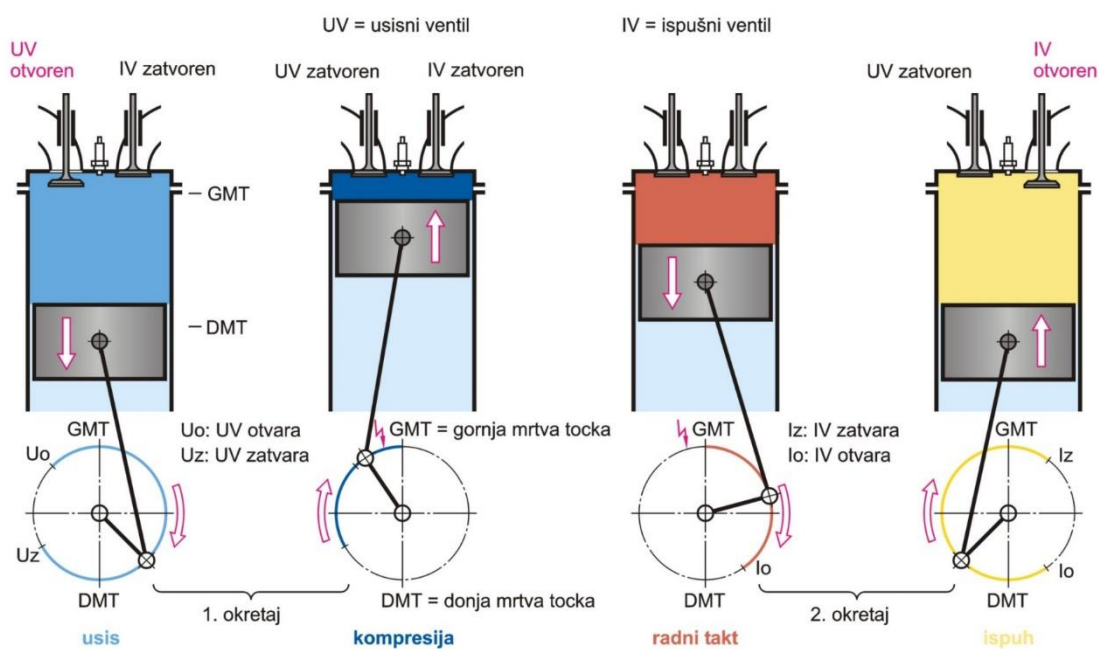
U sedmom poglavlju su prikazani suvremeni sustavi pred nabijanja koji se ne koriste na velikom broju vozila, ali čijim usavršavanjem se može poboljšati učinkovitost motora, užitak vožnje i eliminirati nedostatke određenih sustava za pred nabijanje.

2. PRINCIP RADA ČETVEROTAKTNOG MOTORA

Princip rada četverotaktnog motora se sastoji iz četiri takta:

1. Usis
2. Kompresija
3. Ekspanzija
4. Ispuh

Ova četiri takta se izmijene za dva okretaja koljenastog vratila, a koristan rad se dobije samo tijekom takta ekspanzije. Takt predstavlja kretanje klipa u cilindru od jedne do druge mrtve točke. Na slici 1 su prikazana sva četiri takta motora uz oznake položaja ventila i rasporeda pojedinih taktova u ovisnosti o okretanju koljenastog vratila.



Slika 1 prikaz taktova rada četverotaktnog motora, [1]

2.1. Usis

Tijekom takta usisa, klip se kreće od vanjske ka unutrašnjoj mrtvoj točki, usisni je ventil otvoren, dok je ispušni zatvoren. U određenim izvedbama razvodnog mehanizma postoji kratak interval tijekom kojeg su otvorena oba ventila između takta ispuha i usisa, a s ciljem poboljšanja pražnjenja cilindra od ispušnih plinova usisnim radnim medijem. Tijekom ovog takta se usisa u radni prostor cilindra radni medij, što može biti čisti zrak ili goriva smjesa. Takt završava u trenutku zatvaranja usisnog ventila, a to može biti čak i nakon što je klip prošao unutarnju mrtvu točku i krenuo je ka vanjskoj zbog velike kinetičke energije usisanog radnog medija. U određenim izvedbama motora s obzirom na način ubrizgavanja benzinskog goriva, tijekom ovog takta se ubrizgava gorivo kako bi do takta ekspanzije bilo potpuno pomiješano s usisanim zrakom.

2.2. Kompresija

Nakon što je zatvoren usisni ventil, također je tijekom ovog takta i ispušni zatvoren, klip se kreće ka vanjskoj mrtvoj točki. Tijekom ovog takta se radni medij tlači što uzrokuje povećanje tlaka i temperature radnog medija.

2.3. Ekspanzija

Nakon što je radni medij u cilindru komprimiran, a netom prije nego što je klip došao u vanjsku mrtvu točku dolazi do zapaljenja radnog medija, što uzrokuje nagli porast temperature i tlaka u cilindru potiskujući klip ka unutarnjoj mrtvoj točki. Na taj način se dobije koristan rad, a pravocrtno gibanje klipa se pomoću klipnjače pretvara u rotacijsko gibanje koljenastog vratila, koje preko prijenosnika snage pokreću vozilo. Zapaljenje radnog medija se provodi na dva različita načina. Kod Otto motora se zapaljenje gorive smjese vrši pomoću iskre na svjećici. Kod dizelskih motora se gorivo ubrizgava u početku takta ekspanzije, a koje se zapali zbog visoke temperature usisanog stlačenog zraka u cilindru.

2.4. Ispuh

Ovaj takt započinje otvaranjem ispušnog ventila što dozvoljava istrujavanje produkata izgaranja iz radnog prostora cilindra u ispušni sustav vozila. Ispušni ventil se otvori netom prije nego je klip došao u unutarnju mrtvu točku kako bi produkti izgaranja imali više vremena da napuste radni prostor cilindra, a pri tomu im dodatno pomaže zaostali tlak unutar cilindra koji je nastao pri izgaranju goriva.

2.5. Potrebni senzori za rad sustava

Moderni sustavi pred nabijanja su regulirani središnjom računalnom jedinicom koja nadzire parametre i upravlja radom aktuatora u sustavu kako bi radio učinkovito i sigurno, odnosno prema nominalnim vrijednostima. Veću potrebu za senzorima i regulacijom radnog procesa imaju vanjski sustavi za pred nabijanje kod kojih najveću važnost ima regulacija tlaka usisanog, odnosno stlačenog zraka. U slučaju da neki od senzora očita vrijednost koja je izvan granične motor ulazi u siguran način rada kako bi se izbjegla sva potencijalna oštećenja ili posljedice smanjile na najmanju moguću razinu. Potrebni senzori se nalaze na elementima usisa i ispuha, a mogu biti ispred ili nakon uređaja za pred nabijanje. [17]

Osnovni senzori koji se koriste u suvremenim motorima: [17]

- Senzor masenog protoka zraka: Ovaj se senzor koristi i na motorima koji koriste vanjski sustav pred nabijanja i na onima bez takvih sustava. Senzor se nalazi između pročištača usisnog zraka i usisnog kolektora, odnosno kod vozila koja koriste vanjski sustav pred nabijanja se nalazi između uređaja za pred nabijanje

i pročistača usisnog zraka. Unutar senzora se nalazi električni grijač koji je povezan na upravljačku jedinicu motora. Prolaskom zraka kroz senzor se grijač hladi, a podatak o protoku zraka se dobije iz informacije koliko struje potroši grijač u senzoru kako bi ostao na zadanoj temperaturi. U senzoru se uz grijač nalazi i senzor temperature jer sporiji protok hladnog zraka i brzi protok zagrijanog zraka može jednako djelovati na senzor, a protok zraka nije jednak. Na slici 2 je prikazan navedeni senzor koji se koristi motorima suvremenih vozila.



Slika 2 prikaz senzora masenog protoka zraka, [18]

- Senzor tlaka usisanog zraka: Svrha korištenja ovog senzora je mjerenje razlike tlaka između tlaka zraka okoline i tlaka zraka u usisnom dijelu motora. Kod motora bez pred nabijanja, senzor mjeri veličinu podtlaka u usisnom kolektoru, a koji ovisi o opterećenju motora, broju okretaja motora i položaju leptira gasa. Kod motora koji koriste vanjski sustav pred nabijanja, ovaj senzor mjeri iznos pretlaka u usisnom kolektoru, odnosno tlak pred nabijanja koji stvara sustav i tu informaciju šalje upravljačkoj jedinici. Senzor se nalazi na usisnom dijelu motora, kod motora bez pred nabijanja se senzor nalazi u blizini usisnog kolektora, a kod motora koji koriste vanjski sustav pred nabijanja se senzor nalazi između uređaja za pred nabijanje i usisnog kolektora. Na slici 3 je prikazan opisani senzor.



Slika 3 prikaz senzora tlaka usisanog zraka, [19]

- Senzor temperature ispušnih plinova: Svrha korištenja ovog senzora je kontrola temperature ispušnih plinova u određenim elementima ispušnog sustava vozila. Temperatura ispušnih plinova se najčešće mjeri na izlazu iz ispušnog kućišta turbo punjača, kod katalizatora i filtera čestica u ovisnosti kojim od navedenih elemenata je opremljeno vozilo. Svrha mjerenja temperature kod kućišta turbo punjača je zaštita elemenata od pregrijavanja zbog vrlo visoke temperature ispušnih plinova, a kod katalizatora i filtera čestica se temperatura mjeri kako bi se dobila informacija je li uređaj zagrijan na radnu temperaturu što znači da tada obavlja zadanu funkciju. Određene izvedbe motora imaju poseban režim rada za vrijeme dok motor radi ispod radne temperature i dok katalizator te filter čestica nisu zagrijani na radnu temperaturu. Cilj takvog režima rada je brzo i efikasno zagrijavanje navedenih elemenata. Prikaz senzora je vidljiv na slici 4 s popratnim elementima za ugradnju na ispušni sustav vozila i instalaciju na motorno računalo.



Slika 4 prikaz senzora temperature ispušnih plinova, [20]

- Senzor temperature zraka u usisnom kolektoru: Ispravan rad ovog senzora je važan jer šalje informacije o temperaturi zraka u usisnom kolektoru upravljačkoj jedinici kako bi se optimirala goriva smjesa, odnosno doziranje goriva u usisani zrak. Zrak niže temperature je gušći i ima veći udio kisika u sebi što govori upravljačkoj jedinici da smije dozvoliti ubrizgavanje veće količine goriva u usisni zrak. Senzor se nalazi netom prije usisnog kolektora kako bila što manja razlika između izmjerene vrijednosti i stvarne temperature zraka. Kod vozila koja su opremljena hladnjakom stlačenog zraka, senzor se nalazi nakon hladnjaka netom prije usisnog kolektora. Senzor je prikazan na slici 5. [21]



Slika 5 prikaz temperature usisanog zraka, [21]

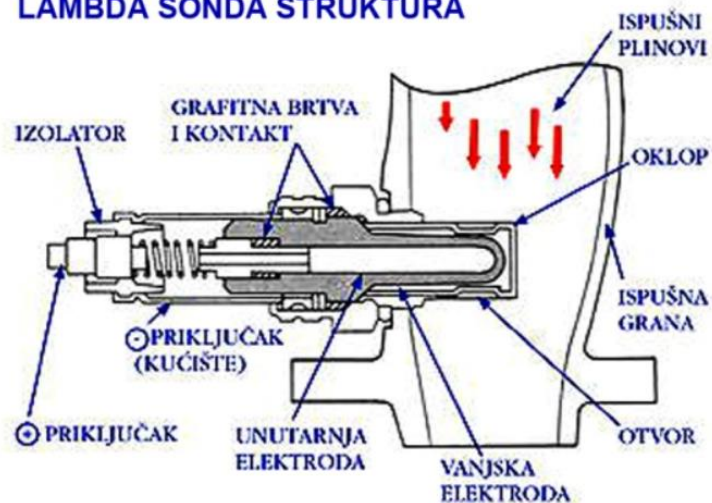
- Senzor položaja klapne gasa: Ovaj senzor, zajedno s klapnom gasa se koristi samo na Otto motorima. Na slici 6 je prikazan senzor položaja klapne gasa. Ispravan rad ovog senzora nije ključan za rad motora, odnosno kvarom senzora se ne bi dogodila havarija i otkaz motora. Otkaz može uzrokovati povećanu potrošnju goriva što povećava emisiju štetnih plinova, a isto tako prekinuti komunikaciju između zahtjeva vozača preko pedale gasa i klapne gasa u slučaju elektronske pedale gasa, odnosno u slučaju pedale gasa koja je izravno povezana na klapnu gasa uzrokuje prekid komunikacije između upravljačke jedinice motora i stvarnog položaja klapne gasa. Senzor radi na principu potencijometra, što znači da se informacija o položaju klapne gasa šalje upravljačkoj jedinici na temelju promjene otpora u senzoru. Ispravan rad ovog senzora omogućava optimizaciju rada motora i sigurnu vožnju. [22]



Slika 6 prikaz senzora položaja klapne gasa, [22]

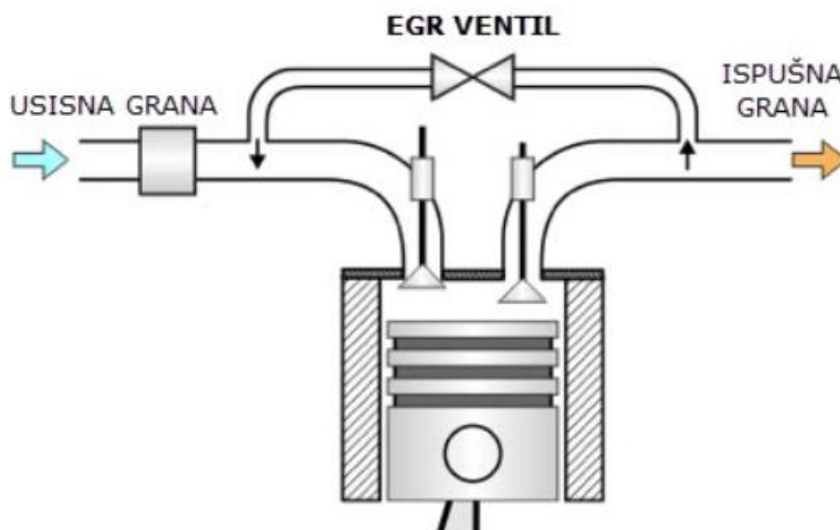
- Lambda sonda: ovaj senzor se koristi za mjerenje količine kisika u ispušnim plinovima motora. Senzor se zove lambda, jer lambda u ovom slučaju predstavlja stehiometrijski omjer. Lambda sonda šalje informaciju o količini kisika upravljačkoj jedinici motora koja regulira i podešava količinu ubrizganog goriva. U slučaju da je vrijednost lambda jednaka jedan, znači da je omjer goriva i zraka idealan, odnosno za izgaranje jedne litre goriva je usisano 14,7 kg zraka, što predstavlja stehiometrijski omjer. Na slici 7 je prikazana struktura lambda sonde. Ovaj se senzor postavlja na ispušni sustav vozila. Vozila koja su opremljena katalizatorom, mogu imati dvije lambda sonde, od kojih je jedna ispred, a druga iza katalizatora. Svrha dvije lambda sonde je mjerenje učinkovitosti rada katalizatora.

LAMBDA SONDA STRUKTURA



Slika 7 strukturni prikaz lambda sonde, [23]

Uz navedene senzore, na motore se ugrađuje i EGR ventil koji ima za cilj smanjenje temperature ispušnih plinova i štetnih emisija. EGR ventil vraća dio ispušnih plinova na ponovno izgaranje tako što ih preusmjerava iz ispušnog u usisni kolektor. Udio ispušnih plinova koji se preusmjeravaju u usisni kolektor ovisi o režimu rada motora i opterećenju. Kvar ili začepljenje mogu dovesti do nepravilnosti u radu motora na način da se zaglave u potpuno otvorenom ili zatvorenom položaju, a isto tako mogu biti zagušeni produktima izgaranja. U eksploataciji se koriste pneumatski i elektronski upravljani EGR ventili, ali im je svrha u radu jednaka. EGR ventil je prikazan na slici 8. EGR ventili se ugrađuju i na motore pogonjene dizelskim i benzinskim gorivom. [17]



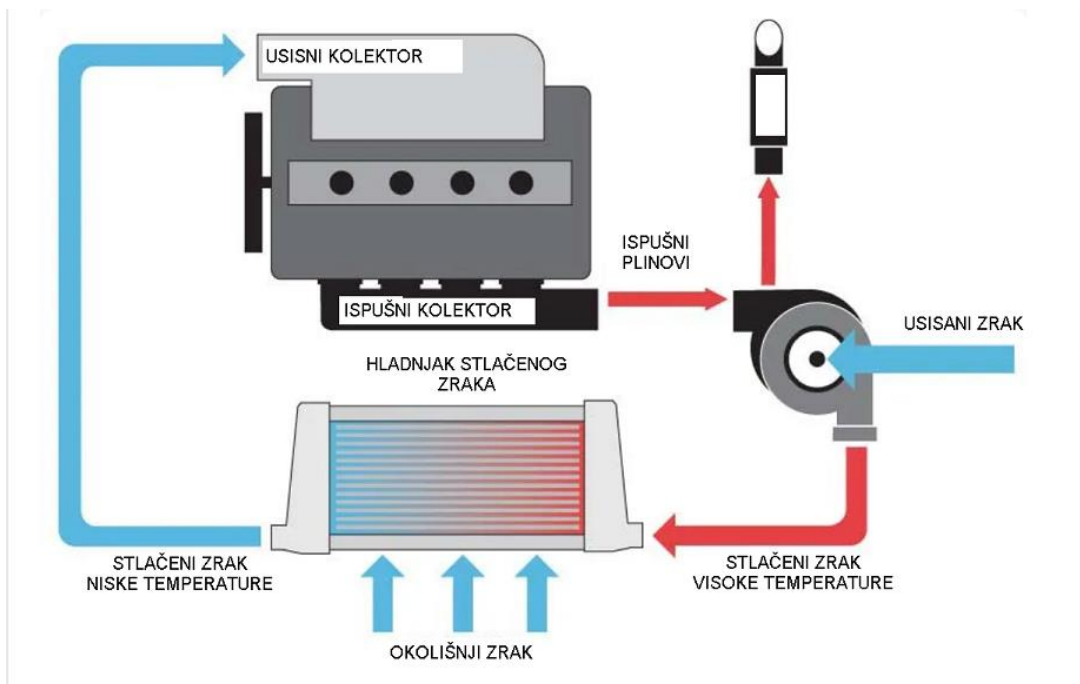
Slika 8 prikaz EGR ventila, [24]

2.6. Hladnjak stlačenog zraka

Hladnjak stlačenog zraka se ugrađuje najčešće na vozila koja koriste vanjski sustav za pred nabijanje poput turbo punjača, odnosno turbo kompresora. Hladnjak stlačenog zraka se postavlja između samog uređaja za pred nabijanje i usisnog kolektora. Svrha ugradnje i korištenja je hlađenje usisanog zraka iz okoline koji se tlači u radni prostor cilindra motora. Usisani zrak je potrebno ohladiti jer mu se na taj način povećava gustoća, a samim time i udio kisika u usisanom zraku što rezultira povećanjem snage i učinkovitosti motora. Usisani zrak se zagrijava pri samom stlačivanju, a isto tako prikuplja toplinu sa uređaja za pred nabijanje i samog motora vozila. Bez korištenja hladnjaka stlačenog zraka se ne bi mogao efikasno iskoristiti sustav pred nabijanja jer bi pri eksploataciji vozila usisani zrak bio vrlo visoke temperature što toplinski opterećuje komponente motora i uzrokuje nepoželjno detonativno izgaranje gorive smjese. [16]

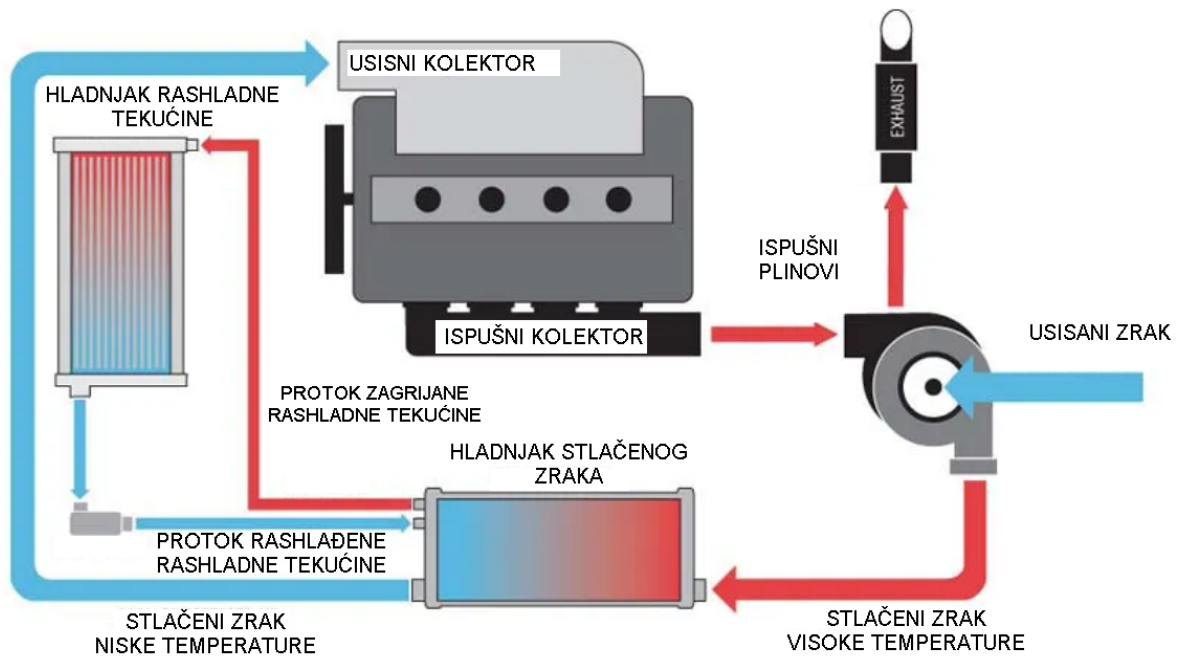
Postoje dvije glavne vrste hladnjaka stlačenog zraka: [16]

1. Na slici 9 je prikazan hladnjak stlačenog zraka koji se hladi okolnim zrakom. Okolni zrak struji kroz hladnjak i ne zahtijeva mehanički pogon radnog medija koji se koristi za hlađenje. Nedostaci ove konstrukcijske izvedbe su u velikoj važnosti za pravilnim postavljanjem hladnjaka kako bi se osigurao konstantan protok hladnog zraka, a ukoliko taj uvjet ne bude zadovoljen radna sposobnost ovog hladnjaka je uvelike umanjena.



Slika 9 prikaz hladnjaka stlačenog zraka hlađenog strujom okolišnog zraka, [16]

2. Na slici 10 je prikazan hladnjak stlačenog zraka, a koji se hladi rashladnom tekućinom koja ujedno hladi i motor. Hlađenje rashladnom tekućinom je učinkovitije od hlađenja okolnim zrakom jer rashladna tekućina ima veći specifični toplinski kapacitet nego zrak i stoga na sebe može prihvatiti veću količinu toplinske energije. Položaj ugradnje i dimenzije hladnjaka nisu od presudne važnosti jer radna sposobnost hladnjaka ne ovisi o struji hladnog okolišnog zraka, ali je i dalje poželjno da se hladnjak ugradi na položaj u kojem kroz njega prostrujava okolišni zrak. Najčešće se postavlja netom prije usisnog kolektora kako se zrak ne bi naknadno zagrijao nakon hladnjaka.



Slika 10 prikaz hladnjaka stlačenog zraka hlađenog rashladnom tekućinom, [16]

3. STUPANJ PUNJENJA MOTORA S UNUTARNJIM SAGORIJEVANJEM

Proces punjenja cilindra predstavlja masu plinova, koja tijekom kretanja klipa od vanjske mrtve točke prema unutrašnjoj u taktu usisa, napuni cilindar. U stvarnom procesu rada motora zbog raznih otpora u usisnim kanalima, zagrijavanja usisnog zraka ili gorive smjese i postojanja zaostalih plinova izgaranja, u radni volumen cilindra ulazi manje smjese nego što odgovara zapremini cilindra. Snaga motora je veća što je i punjenje cilindra bolje. Stupanj punjenja predstavlja omjer volumena usisane gorive smjese ili zraka i volumena cilindra. Prema [1] stupanj punjenja cilindra se može izračunati pomoću formule (1):

$$\lambda_p = \frac{m_{stv}}{m_{teo}} \quad (1)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

λ_p – koeficijent punjenja

m_{stv} - stvarna količina usisanog zraka ili gorive smjese [kg]

m_{teo} – teorijski moguća količina usisanog zraka ili gorive smjese [kg]

Prekrivanjem ventila je moguće povećati stupanj punjenja. Prekrivanje ventila predstavlja situaciju u kojoj su u prijelaznoj fazi takta ispuha u takt usis istovremeno otvoreni i usisni i ispušni ventil. Usisni se ventil otvara prije vanjske mrtve točke zato što tada postoji izvjesna razina podtlaka zbog smanjenja brzine klipa i istrujavanja plinova izgaranja preko ispušnog ventila. U istom se trenutku odvija takt usisa i ispuha bez štetnog međudjelovanja, ali se ispušni ventil mora zatvoriti na vrijeme kako svježa smjesa koja se usisava u cilindar ne bi počela strujati preko njega. Sa ciljem povećanja stupnja punjenja cilindra usisni ventil se zatvara nakon što klip prođe unutrašnju mrtvu točku i krene se kretati prema vanjskoj stlačujući usisanu smjesu zbog velike tromosti i brzine usisane smjese.

Punjenje cilindra se može povećati smanjenjem otpora strujanju usisnih plinova i nižom temperaturom u cilindrima, a to se postiže:

- pravilnom konstrukcijom i izradom usisne grane
- adekvatno dimenzioniranim prekrivanjem ventila
- povoljno odabranim oblikom prostora izgaranja
- velikim presjecima usisnih kanala
- više - ventilskom tehnikom
- primjerenim hlađenjem
- čistim i adekvatnim pročištačem usisnog zraka

Punjenje cilindra se pogoršava:

- velikim otporom leptira gasa
- kraćim vremenskim intervalom otvorenosti usisnog ventila pri visokim brojevima okretaja
- manjim tlakom okoline

Uporabne karakteristike u pogledu snage i okretnog momenta značajno ovise o udjelu gorive smjese u punjenju cilindra u taktu usisa. Stupanj punjenja λ_p se može povisiti pomoću raznih sustava za pred nabijanje. S povećanjem stupnja punjenja povećava se snaga, okretni moment i efektivna korisnost motora, a smanjuje se specifična potrošnja goriva i emisija štetnih produkata izgaranja. Vrijednosti stupnja punjenja raznih motora je moguće vidjeti u tablici 1.

Tablica 1 prikaz vrijednosti stupnja punjenja raznih motora

MOTOR	STUPANJ PUNJENJA, λ_p
atmosferski četverotaktni motori	0,7 – 0,9
atmosferski dvotaktni motori	0,5 – 0,7
motori s pred nabijanjem	1,2 – 1,6

Prevelik stupanj punjenja kod motora s pred nabijanjem može dovesti do detonativnog izgaranja jer takt kompresije preuzima jedan dio procesa nabijanja. Tlak kompresije postaje vrlo visok što uzrokuje prijevremeno zapaljenje gorive smjese i stoga može doći do pojave oštećenja klipnog mehanizma. U slučaju Otto motora, motori s pred nabijanjem imaju niži stupanj kompresije od motora bez pred nabijanja, a u slučaju Diesel motora zbog postojećeg vrlo visokog stupnja kompresije, odnosno omjera kompresijskog i ukupnog volumena cilindra, visok stupanj punjenja može stvoriti dodatna mehanička naprezanja koja mogu uništiti motor jer za to nije dimenzioniran.

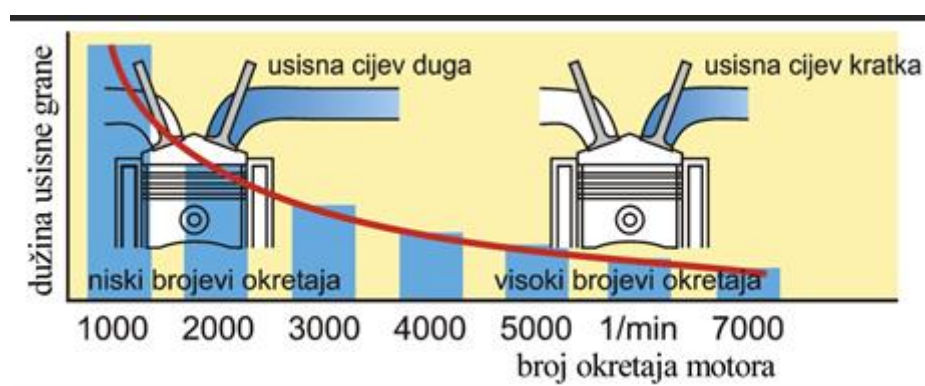
4. DINAMIČKO PREDNABIJANJE

Tijekom usisnog takta, zrak ili goriva smjesa što se usisava u prostor cilindra struji velikom brzinom i stoga ima određenu količinu kinetičke energije. Na kraju usisnog takta se usisna smjesa naglo zaustavlja i tlači udarajući o zatvoreni usisni ventil. Na taj način dolazi do pojave tlačnog vala koji se giba brzinom zvuka u smjeru suprotnom gibanju svježije usisavane smjese. Novonastali tlačni val se ponovno odbija od svježije usisavane smjese. Novonastali tlačni val se ponovno odbija od svježije usisavane smjese i kreće se ponovno prema usisnom ventilu. U slučaju da se poklopi vrijeme otvaranja usisnog ventila i dolaska tlačnog vala do tog istog usisnog ventila pospješuje se punjenje cilindra. Frekvencija nastalih tlačnih valova pri radu motora ovisi o dimenzijama usisne grane i usisnih kanala te o broju okretaja motora. Prema oblikovanju usisne cijevi razlikujemo:

- nabijanje oscilacijskom usisnom granom
- rezonancijsko nabijanje

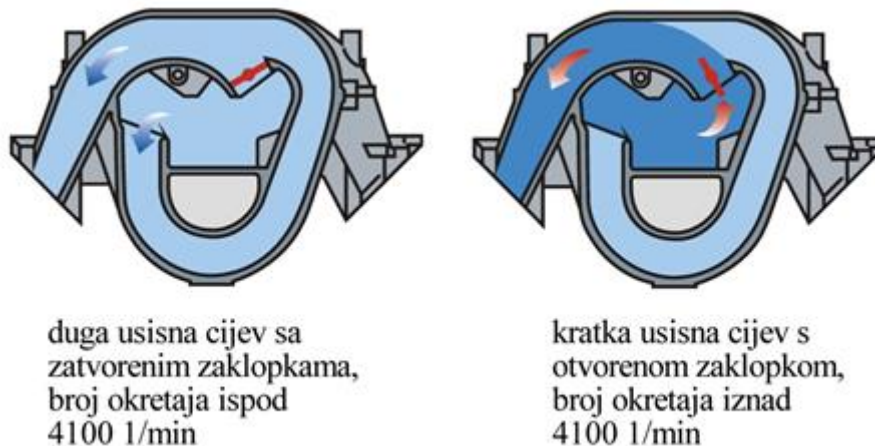
4.1. Nabijanje oscilacijskom usisnom granom

Svaki cilindar ima vlastitu usisnu cijev na koju se nastavlja usisni kanal kroz koji se on opskrbljuje svježom gorivom smjesom ili zrakom. Kroz interakciju strujanja usisane gorive smjese i otvorenosti, odnosno zatvorenosti usisnog ventila uslijed rada motora dolazi do pojave oscilacija plina gorive smjese, tj. do pojave tlačnog vala unutar usisne cijevi. Pravilnim odabirom duljine usisne cijevi se postiže optimizacija trenutka kada povratni tlačni val nailazi na usisni ventil i taj isti ventil da bude otvoren. U slučaju da se ta dva trenutka poklope, pospješuje se punjenje i nabijanje cilindra. Ovisno o eksploatacijskim uvjetima tog motora se odabiru adekvatne dimenzije usisnih cijevi. U slučaju da se želi postići bolje punjenje cilindra motora na nižim brojevima okretaja, koriste se dugačke tanke cijevi malog poprečnog presjeka, a ako se želi postići bolje punjenje cilindra na višim brojevima okretaja, onda se koriste kratke usisne cijevi većeg poprečnog presjeka. Ovisnost duljine usisne cijevi i broja okretaja u pogledu poboljšanja punjenja cilindra se može vidjeti na slici 11.



Slika 11 prikaz ovisnosti duljine usisne cijevi i broja okretaja motora, [1]

Korištenjem oscilacijske usisne grane se kombiniraju karakteristike i usisne grane kraće i duže duljine, odnosno pospješuje se prednabijanje i u području niskih i visokih okretaja. Pri nižem broju okretaja usisni zrak struji kroz dugačke usisne kanale, dok su kratki usisni kanali zatvoreni zaklopkama. Pri višem broju okretaja motora se zaklopke otvaraju te se usisni zrak kreće kroz kratke usisne kanale pospješujući prednabijanje i radne sposobnosti motora na visokom broju okretaja. Na slici 12 se može vidjeti prikaz oscilacijske usisne grane zajedno s položajima zaklopki tijekom rada motora kroz cijeli raspon broja okretaja pri radu.



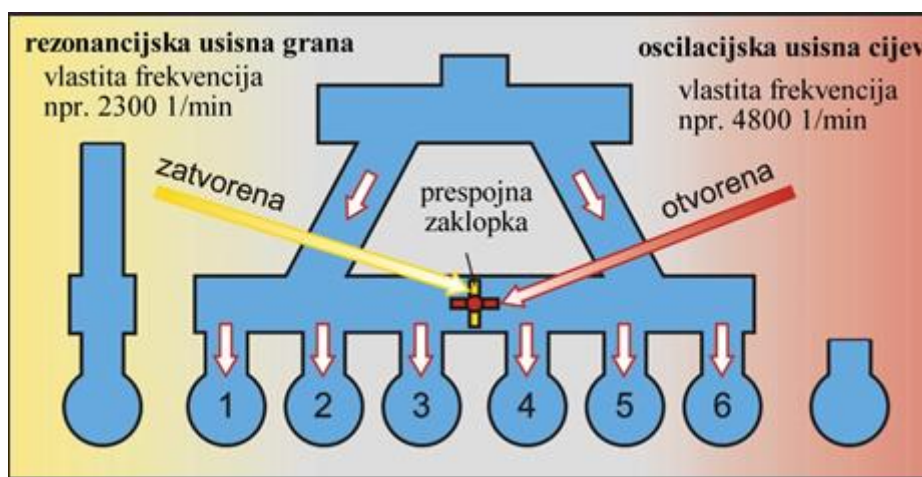
Slika 12 prikaz oscilacijske usisne grane, [1]

4.2. Rezonancijsko nabijanje

U slučaju podudaranja trenutka otvaranja usisnih ventila s trenutkom oscilacije plina u usisnoj grani se pojavljuje rezonancija. Poklapaju se frekvencije titranja i sama frekvencija titranja se povećava. Pojavom rezonancije u usisnoj grani i kanalima se povećava tlak koji djeluje na ventile. U području srednjih okretaja dugačke usisne cijevi koje su spojene s rezonancijskom komorom daju dugačke oscilirajuće plinske stupce koje djeluju na usisne ventile visokim tlakom. U tom srednjem radnom području okretaja rezonancijsko nabijanje pospješuje punjenje cilindara. Potrebno je posvetiti pažnju pri konstrukciji takvog sustava za nabijanje cilindara kako ne bi došlo do preklapanja procesa strujanja sa idućim cilindrom po redu paljenja. Iz tog razloga, svaka rezonancijska komora mora biti spojena sa svojom rezonancijskom usisnom cijevi na usisnu granu.

4.3. Rezonancijsko – oscilacijska usisna grana

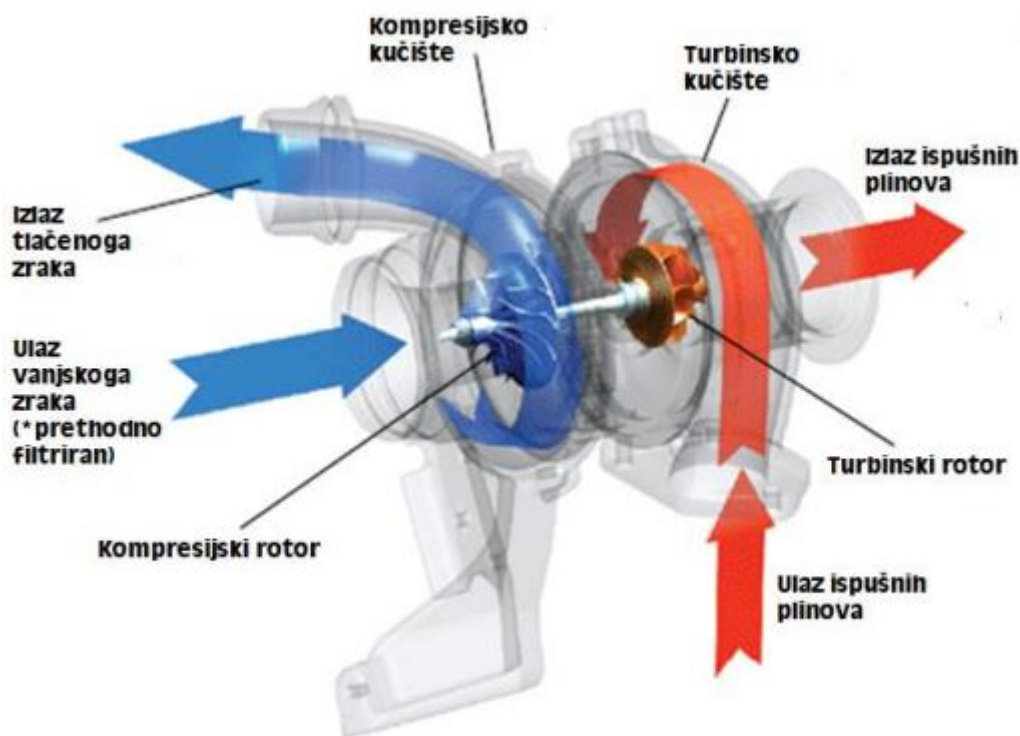
Paralelnim korištenjem oba sustava za prednabijanje pospješuju se eksploatacijske karakteristike motora u cijelom spektru broja okretaja, a ne samo na određenom. Sustav rezonancijskih usisnih cijevi pospješuje radne sposobnosti u srednjem području rada motora, a s povećanjem broja okretaja motora rezonancijski sustav prelazi u oscilacijski i na taj način pospješuje prednabijanje motora i u visokom broju okretaja. Ovisno o zahtjevu vozača i broju okretaja motora se zaklopke između rezonancijskih komora otvaraju, odnosno zatvaraju i na taj način te rezonancijske komore postaju kanali zraka za oscilacijske cijevi. Na slici 13 je moguće vidjeti sustav s rezonancijsko – oscilacijskom usisnom granom.



Slika 13 rezonancijsko - oscilacijska usisna cijev, [1]

5. SUSTAV PREDNABIJANJA BEZ MEHANIČKOG POGONA

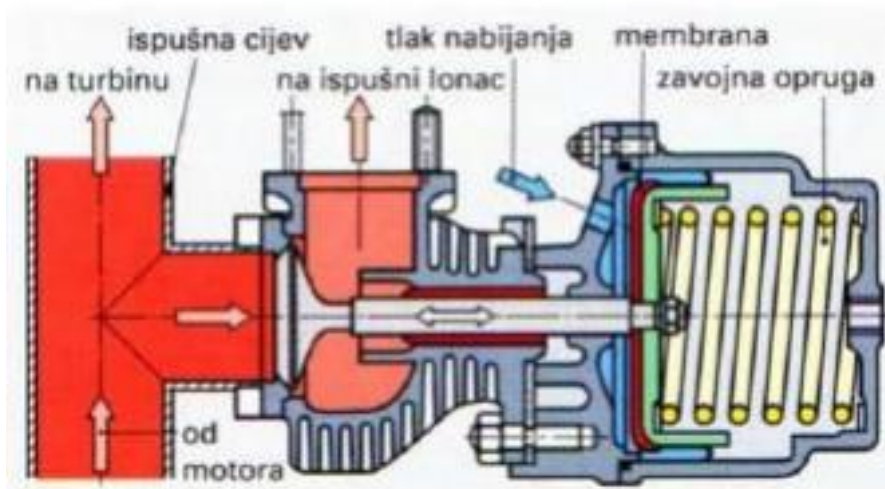
Ovaj sustav za pred – nabijanje motora koristi kinetičku energiju ispušnih plinova za pogon turbo - punjača. Turbo – punjač je kompresor koji služi za pred – nabijanje motora s unutrašnjim izgaranjem, sastoji se od usisnog i ispušnog dijela koji su međusobno povezani vratilom. U ispušnom i usisnom dijelu turbo punjača se nalazi rotor na kojeg u ispušnom dijelu djeluje kinetička energija ispušnih plinova, a u usisnom dijelu rotor služi za usisavanje i tlačjenje usisnog zraka u sustav. Rotori se nalaze unutar kućišta i međusobno su povezani vratilom. Vratilo je uležišteno u kućištu turbo punjača. Vratilo i ležajevi se podmazuju sustavom za podmazivanje kompletnog motora i brtvama su izolirani od usisnog i ispušnog dijela turbo punjača. Ispušni dio se pogoni kinetičkom energijom ispušnih plinova, a budući da je izravno povezan vratilom s usisnim dijelom, pogoni ga i usisni dio potom usisava svježi zrak u sustav te ga dalje stlači prema usisnom kolektoru i cilindrima u konačnici. U sustavu za pred – nabijanje motora, turbo punjač se ispušnim dijelom nalazi izravno nakon ispušne grane vozila, dok se usisni dio nalazi između pročištača usisnog zraka i hladnjaka stlačenog zraka. Izgled i sastavni dijelovi turbo punjača su vidljivi na slici 14 turbo punjač tlači usisni zrak u prostor cilindra i zbog toga se usisni zrak zagrijava. Usisni zrak se mora ohladiti u hladnjaku stlačenog zraka kako bi se povećala gustoća zraka i shodno tomu pospješilo punjenje cilindra.



Slika 14 prikaz sastavnih elemenata turbo punjača, [2]

5.1. Turbo punjač s regulacijskim ventilom

Broj okretaja rotora turbo punjača ovisi o kinetičkoj energiji ispušnih plinova. Kako bi se sustav zaštitio i regulirao broj okretaja rotora i tlak pred nabijanja, neposredno uz turbo punjač se ugrađuje regulacijski ventil. Regulacijski ventil služi da dio ispušnih plinova preusmjeri prestrujnim kanalom koji zaobilazi ispušni impeler turbo punjača i usmjeri ispušne plinove direktno u ispušni sustav vozila. Na taj način se regulira tlak pred nabijanja i brzina vrtnje rotora turbo punjača. U slučaju otkaza regulacijskog ventila tlak prednabijanja prelazi granične vrijednosti i postoji mogućnost da dođe do oštećenja ili otkaza rada motora zbog nastalih kvarova. Kod Otto motora, u slučaju previsokog tlaka pred nabijanja može doći do detonativnog izgaranja, a kod Diesel motora tlakovi izgaranja mogu biti previsoki i u oba slučaja može doći do otkaza klipnog sustava motora. Na slici 15 je moguće vidjeti prikaz regulacijskog ventila turbo punjača. [3]



Slika 15 prikaz regulacijskog ventila turbo punjača, [3]

Prednosti korištenja ovog sustava:

- jednostavna izvedba sustava za pred nabijanje
- jeftin način za povećanje snage i korisnosti motora
- omogućuje korištenje motora manje zapremine za proizvodnju jednakog iznosa snage kao i motori većih zapremina bez vanjskog pred nabijanja

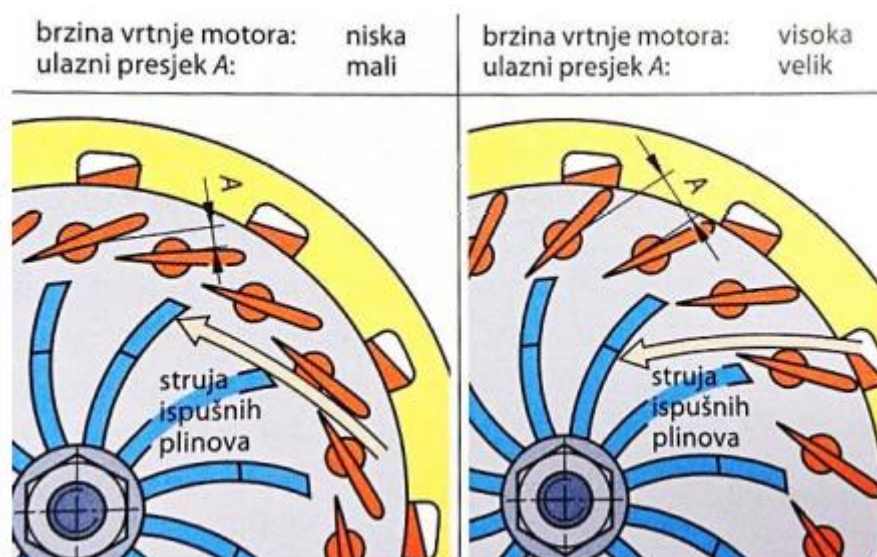
Nedostaci korištenja ovog sustava:

- odgovor sustava na zahtjev vozača može biti dug
- efektivnost turbo punjača je svedena na samo uzak broj okretaja motora

5.2. Turbo punjač s varijabilnom geometrijom

Tijekom rada motora koji koristi turbo punjač, postoji izvjestan nedostatak u pogledu „turbo – rupe“. Ta pojava predstavlja potreban vremenski interval da turbo punjač postigne potreban broj okretaja za tlačenje usisnog zraka od trenutka kada vozač od motora zatraži povećanje snage. Turbo punjač s varijabilnom geometrijom je moderan način za smanjenje neželjenog učinka „turbo – rupe“. U ispušnom dijelu turbo punjača se nalaze zakretna krilca koja svojim zakretanjem usmjeravaju ispušne plinove izravno na ispušni rotor, odnosno smanjuje se površina prestrujavanja.

Pri niskim brzinama strujanja ispušnih plinova, zakretanjem krilaca se usmjeravaju na rub rotora kako bi ga lakše i brže pokrenuli. S porastom broja okretaja motora zakrilca se otvaraju kako bi povećali površinu prestrujavanja. Na slici 16 je moguće vidjeti zakretanje krilaca turbo punjača u ovisnosti o broju okretaja i kinetičkoj energiji ispušnih plinova. Lopatice su raspoređene po cijelom obodu ispušnog kućišta turbo punjača.



Slika 16 zakretanje krilaca varijabilnog turbo punjača, [4]

Prednosti ovog sustava:

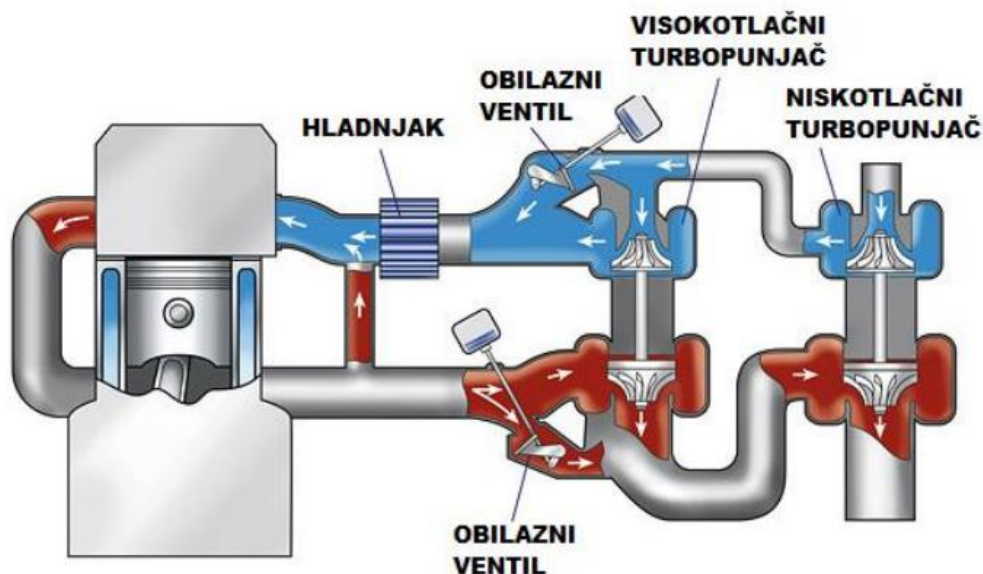
- visok iznos okretnog momenta koji je konstantan na širokom broju okretaja motora
- jednostavan koncept budući da zahtijeva korištenje jednog turbo punjača
- aktivira se pri niskom broju okretaja pružajući raspoloživi okretni moment već pri niskim okretajima

Nedostaci ovog sustava:

- zbog osjetljivosti na temperaturu ispušnih plinova, češće se koriste na motorima pogonjenim dizelskim gorivom.
- za korištenje na Otto motorima, dolazi do potrebe za korištenjem skupih i teško dostupnih materijala za izradu krilaca u turbini kako bi izdržali visoku temperaturu ispušnih plinova.

5.3. Kombinirano pred nabijanje

Korištenje dva serijski spojena turbo punjača omogućavaju efektivniji način punjenja motora. Ovakav se sustav sastoji od dva turbo punjača različitih dimenzija koji su međusobno povezani obilaznim ventilom. Turbo punjač manjih dimenzija pri niskom broju okretaja motora postiže potrebnu brzinu vrtnje za rad, što povećava okretni moment pri nižim brojevima okretaja motora. S povećanjem broja okretaja motora, obilazni ventil se postupno otvara te dio ispušnih plinova preusmjerava s turbo punjača malih dimenzija na turbo punjač većih dimenzija. Nakon što motor postigne adekvatno visok broj okretaja motora za pokretanje turbo punjača većih dimenzija, obilazni ventil se skroz otvara i sva kinetička energija ispušnih plinova se usmjerava na taj turbo punjač. Turbo punjač velikih dimenzija je efektivan pri visokom broju okretaja motora, jer zahtjeva veliku količinu kinetičke energije ispušnih plinova kako bi ušao u radno područje. U slučaju da se koristi sustav samo s malim turbo punjačem, pri visokim okretajima motora brzina vrtnje turbo punjača bi porasla iznad radnog područja okretaja turbo punjača te turbo punjač ne bi bio efektivan tj. ne bi povećavao punjenje motora. S druge strane, da se koristi sustav samo s velikim turbo punjačem, pri niskim okretajima motora kinetička energija ispušnih plinova bi bila nedovoljna za pokretanje turbo punjača, odnosno za postizanje potrebne brzine vrtnje turbo punjača kako bi pospješio punjenje cilindra motora. Na slici 17 je moguće vidjeti shematski prikaz sustava s dvostrukim nabijanjem. [4]



Slika 17 prikaz dvostrukog nabijanja motora, [4]

Karakteristike korištenja ovog sustava:

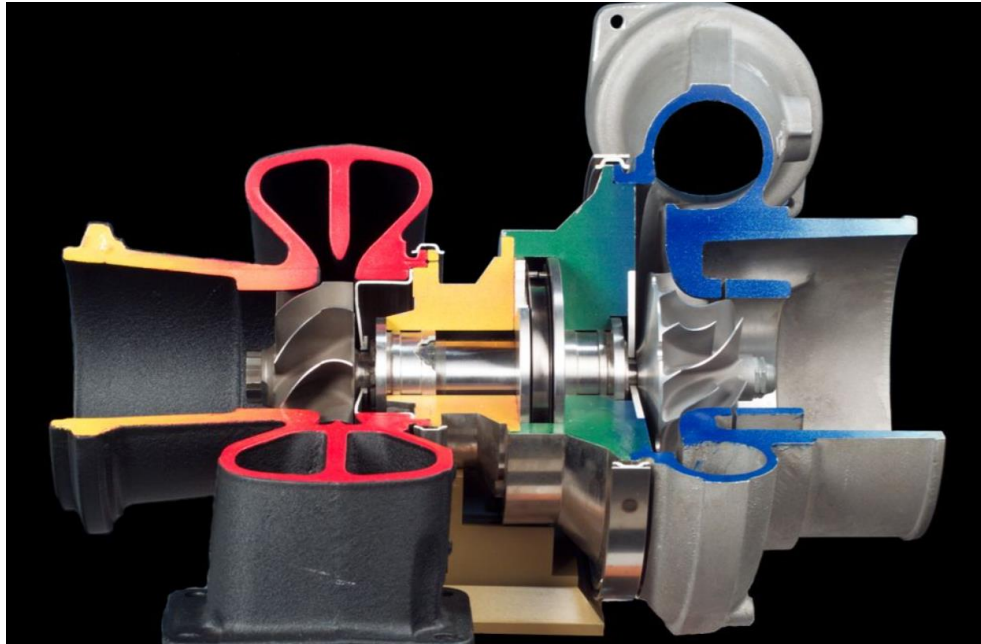
- u sustavu koji koristi dva paralelno spojena turbo punjača ili u sustavu za pred nabijanje motora s cilindrima u V – rasporedu, prednosti i nedostaci u jednaki kao i kod korištenja turbo punjača s regulacijskim ventilom
- u sustavu koji koristi dva sekvencijski spojena turbo punjača na način da je jedan manji turbo punjač aktivan pri niskim, a drugi veći turbo punjač aktivan pri visokim brojevima okretaja, sustav pruža visok okretni moment pri niskim brojevima okretaja motora i visoku snagu pri visokim brojevima okretaja
- glavni nedostaci su u visokoj cijeni i složenosti sustava jer se koriste dva turbo punjača, a ne jedan i stoga mogućnost kvarova se značajno povećava.
- uz to, moguće je postići jednake rezultate s drukčijim načinima prednabijanja koji koriste jedan turbo punjač i stoga su jednostavniji, primjerice turbo punjač s varijabilnom geometrijom ili *Twin – scroll* turbo punjač.

5.4. Nabijanje *Twin – scroll* turbo punjačem

Standardne ispušne grane koje se koriste i na motorima bez i s pred nabijanjem imaju karakteristiku da se prije ispušnog sustava sve grane spoje u jednu. Iz toga proizlazi situacija da su ispušne grane pojedinačnih cilindara različito dugačke. Ispušni plinovi iz cilindara ne izlaze konstantno nego samo tijekom takta ispuha, što uzrokuje pojavu pulsiranja ispušnih plinova.

Ako ispušne grane sustava nisu jednako dugačke onda impuls jednog cilindra može stvoriti prepreku i utjecati na impuls drugog cilindra i umanjiti njegovu kinetičku energiju. Zbog tog preplitanja impulsa ispušnih plinova dolazi do pojave zagušenja u sustavu i do pojave otpora ispušnim plinovima. Kod motora bez vanjskog pred nabijanja to uzrokuje smanjenje snage i okretnog momenta, a kod motora koji koriste kinetičku energiju ispušnih plinova za pokretanje sustava za pred nabijanje pojava preplitanja impulsa ispušnih plinova uzrokuje smanjenje raspoložive kinetičke energije ispušnih plinova, a kao rezultat sustav ne reagira na zahtjev vozača dovoljno brzo, turbo rupa je velika, a okretni moment je smanjen. Korištenjem standardnih ispušnih grana nejednakih duljina, u niskim brojevima okretaja otpor ispušnog sustava je visok i reakcija na zahtjev vozača je produljena, a u visokim brojevima okretaja rada motora s visokim opterećenjem dolazi do pada snage jer turbo punjač nema kapacitet da propusti toliku količinu ispušnih plinova. [6]

Twin – scroll sustav omogućuje spajanje ispušnih grana jednakih duljina u samom turbo punjaču, a u slučaju korištenja ovog sustava na motoru s četiri cilindra, dva odvojena cilindra napajaju jedan dio turbo punjača, a druga dva drugi dio turbo punjača. Prikaz turbo punjača koji koristi ovaj princip rada je vidljiv na slici 18. Odabir parova cilindara koji se zajedno spajaju u turbo punjaču su tako određeni da jedan na drugoga ne utječu nego da svaki impuls ispušnih plinova nesmetano putuje do turbo punjača. Zbog toga se smanjuje opterećenje sustava ispušnim plinovima, tj. tlak koji se javlja u ispušnom sustavu vozila je snižen, odgovor sustava na zahtjev vozača je ubrzan. Pri visokom opterećenju i visokom broju okretaja motora, ovakav sustav pred nabijanja ne pruža visok otpor ispušnim plinovima, a shodno tomu ne dolazi do pada snage i omogućena je proizvodnja visokih iznosa snage korištenjem turbo punjača manjih dimenzija kako bi se smanjila i turbo rupa, a isto tako i veličina turbo punjača. [6]



Slika 18 Twin - scroll turbo punjač, [6]

Određene negativne karakteristike ovog sustava su: [6]

- visoka razina složenosti sustava
- veće zauzeće prostora u motornom prostoru zbog potrebe za postavljanjem turbo punjača na položaj koji odgovara izvođenju ispušnih grana jednakih dimenzija, a ne najbliže motoru
- visoko opterećenje motora
- visoka cijena sustava

6. PREDNABIJANJE MOTORA SUSTAVOM TURBO KOMPRESORA

Sustav pred nabijanja motora koji uvjetuje korištenje mehaničke energije motora. Turbo kompresor je pričvršćen na motor, pogoni se izravno s motora pomoću remenskog prijenosa. U usporedbi sa sustavom pred nabijanja motora turbo punjačem, ovaj sustav je efektivan po cijelom području broju okretaja motora, što znači da i pri niskim okretajima motora ovaj sustav pruža veću snagu i okretni moment nego motori s turbo punjačem ili motori bez vanjskog pred nabijanja. Prednosti korištenja ovog sustava se očituju kroz jednako raspoređen okretni moment i snagu kroz radno područje okretaja motora i nema pojave „turbo rupe“. Nedostatci se očituju kroz povećanu potrošnju goriva jer sustav da bi povećao snagu i okretni moment motora, od motora mora oduzeti dio snage za vlastiti pogon. Uz to, ovaj sustav povećava masu motora, samim time i vozila, zahtjeva preciznu izradu što rezultira višom proizvodnom cijenom. Trenutno u proizvodnji postoje tri konstrukcijske izvedbe turbo kompresora: centrifugalni, vijčani i korijenski. Njihov princip i značajke rada su prikazane u nastavku završnog rada.

Prednosti korištenja turbo kompresora: [7]

- učinkovit i jednostavan način za povećanje snage motora
- izravna i istovremena dostava snage, nema pojave turbo – rupe
- povećanje snage po cijelom području okretaja, sustav nije ograničen na određeno radno područje okretaja
- jeftin način povećanja snage

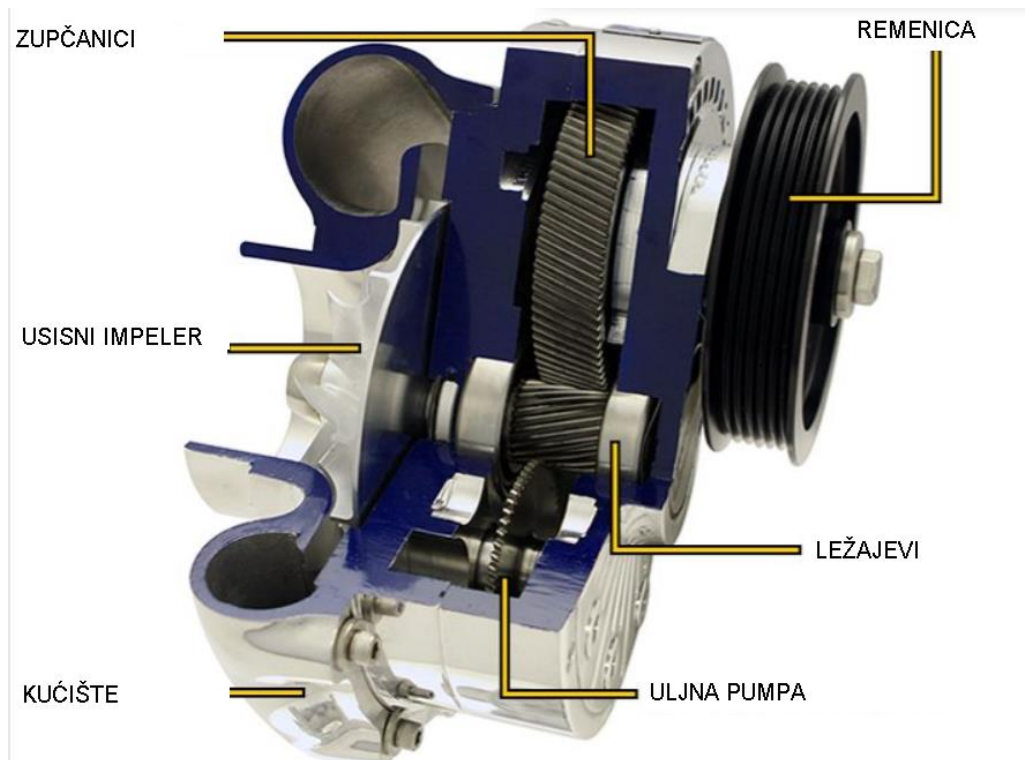
Nedostaci korištenja turbo kompresora: [7]

- smanjena učinkovitost, za pogon turbo kompresora, koristi se snaga i okretni moment što ga proizvodi motor čime se povećava opterećenje motora i samim time potrošnja goriva
- složenija konstrukcija sustava podložna kvarovima što rezultira smanjenom pouzdanošću
- znatno zauzimanje prostora zbog potrebe za pravilnim pozicioniranjem turbo kompresora

6.1. Centrifugalni turbo kompresor

Ova izvedba turbo kompresora ima izgled i karakteristike poput turbo punjača koji je pogonjen kinetičkom energijom ispušnih plinova i vidljiv je na slici 19. Umjesto da je pogonjen ispušnim plinovima, ovaj se turbo kompresor, pokreće preko remenskog prijenosa s koljenastog vratila motora. Ovaj se turbo kompresor rijetko ugrađuje u serijske motore automobila u tvornici, a češće se koristi za naknadnu ugradnju na motore zbog jednostavnosti izvedbe ugradnje. [8]

Pogon kompresora je preko remenskog prijenosa s koljenastog vratila, remenski prijenos pokreće usisni impeler kompresora koji usisava zrak u kompresor te ga dalje tlači u usisni sustav vozila, preko hladnjaka stlačenog zraka u cilindre. [8]



Slika 19 Centrifugalni kompresor, [8]

Prednosti: [8]

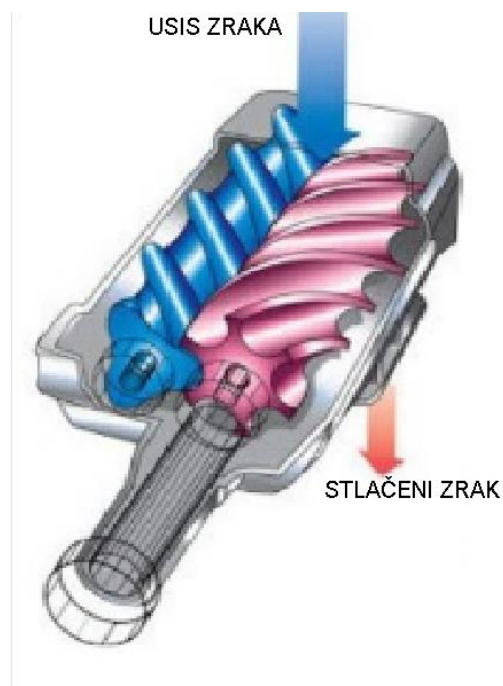
- jednostavna ugradnja u sustav i uparivanje s hladnjakom stlačenog zraka
- linijski porast snage tijekom cijelog područja okretaja motora
- pružaju i stvaraju više snage pri visokim okretajima nego ostale konstrukcije izvedbe
- niska razina zauzeća motornog prostora

Nedostaci: [8]

- ne proizvode visok iznos okretnog momenta pri niskim brojevima okretaja u usporedbi s drugim izvedbama
- najkompliciranija konstrukcija samog turbo kompresora

6.2. Vijčani turbo kompresori

Unutar vijčanog turbo kompresora se nalaze dva rotora koja svojom rotacijom omogućavaju stlačivanje usisnog zraka u motor. Rotori se rotiraju jedan prema drugom i na taj način stlaču i usisavaju zrak. Pogone se remenskim prijenosom preko koljenastog vratila motora. Na slici 20 se može vidjeti izgled vijčanog turbo kompresora. Stlačivanje usisnog zraka se vrši između samih uparenih rotora turbo kompresora što znači da uvijek isti volumen zraka je stlačen pri svakom broju okretaja motora, a time i turbo kompresora. [10]



Slika 20 Vijčani turbo kompresor, [9]

Prednosti: [8]

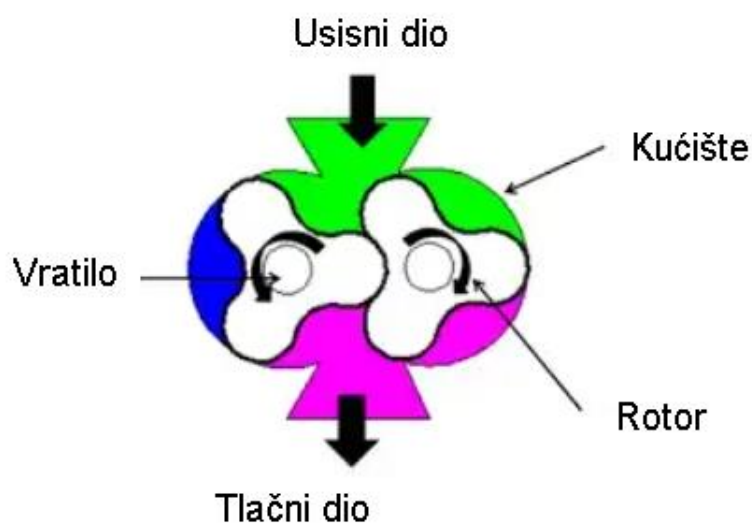
- visok okretni moment pri niskim okretajima
- jednostavna ugradnja
- manje zagrijavanje turbo kompresora, a samim time i usisnog zraka
- viša učinkovitost nego ostale izvedbe

Nedostaci: [8]

- ne pružaju visoku količinu snage pri visokim okretajima kao centrifugalni turbo kompresori
- visoka cijena
- visoka masa

6.3. Korijenski turbo kompresori

Ova tehnička izvedba turbo kompresora je najstarija i prvu je uporabu našla pri pogonu ventilacijskog sustava rudnika. Prva uporaba na motoru vozila je bila na dvotaktnom Detroit dizelskom motoru. Ovaj se turbo kompresor pogoni preko remenskog prijenosa s koljenastog vratila motora, a rotori unutar samog kompresora su upareni kao i kod vijčanog kompresora, ali se rotiraju jedan od drugog što znači da se usisni zrak stlaču u samom kućištu kompresora i dalje u usisnom dijelu motora. Pri radu i rotaciji kompresora je ista količina zraka usisana i stlačena pri okretaju radilice kao i kod vijčanog. Prikaz ove konstrukcijske izvedbe kompresora je vidljiv na slici 21. [8]



Slika 21 prikaz korijenskog turbo kompresora, [11]

Prednosti: [11]

- visoka razina okretnog momenta pri niskim brojevima okretaja
- jednostavna ugradnja
- jeftinija aplikacija od vijčanih turbo kompresora
- ne koriste motorno ulje za podmazivanje

Nedostaci: [11]

- niži iznos snage pri visokim brojevima okretaja u odnosu na centrifugalne
- veće zagrijavanje
- niska učinkovitost

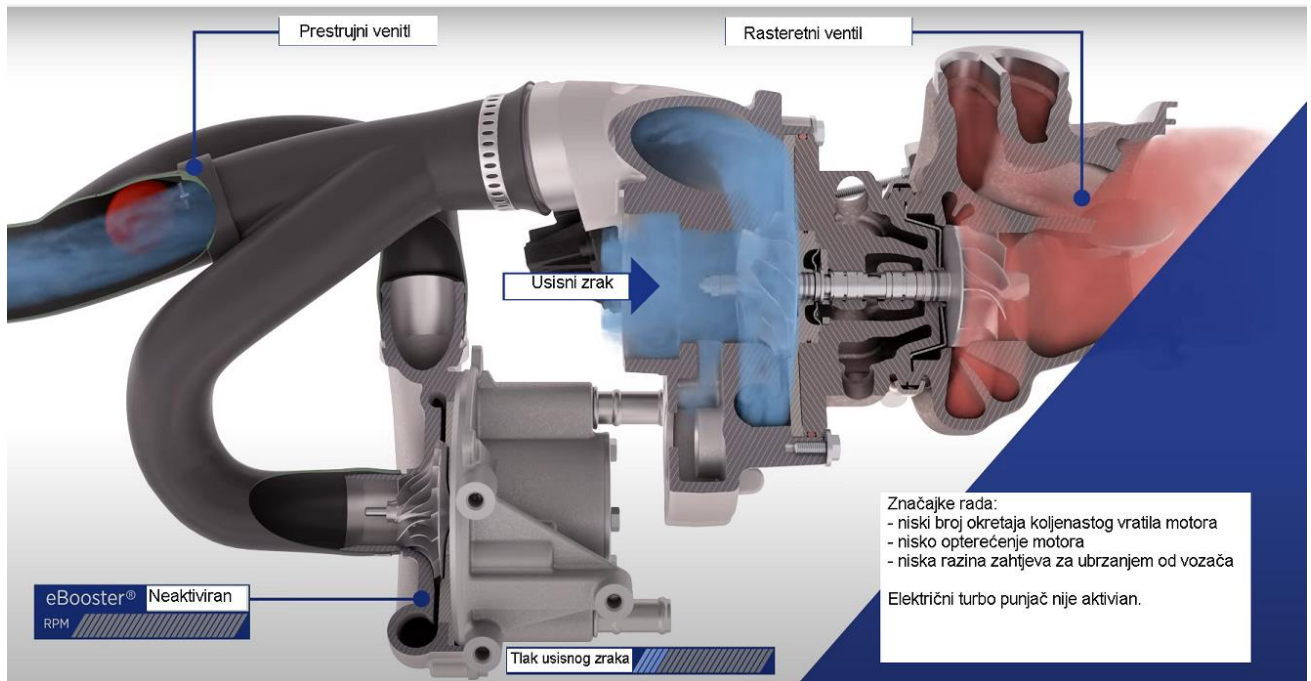
7. SUVREMENI SUSTAVI PRED NABIJANJA

Suvremena automobilska industrija pokušava na razne načine doskočiti trenutnim nedostacima motora u pogledu smanjenja dimenzija motora, povećanja učinkovitosti i minimiziranja štetnih emisija što ih proizvodi motor. U ovom poglavlju su prikazana razna tehnološka rješenja koja nisu u velikoj mjeri korištenja u današnjim vozilima, a predstavljaju adekvatna tehnološka rješenja koja bi se mogla u skorijoj budućnosti koristiti na velikom broju vozila.

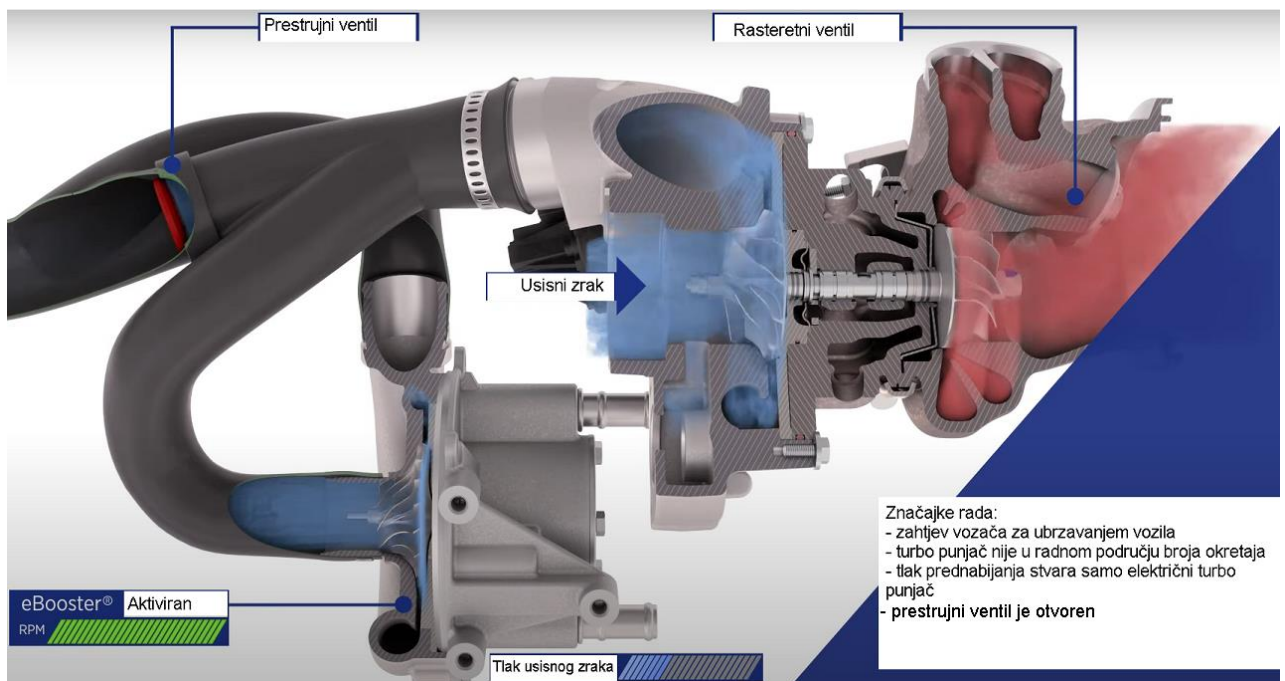
7.1. Pogon turbo punjača električnom energijom

Jedan od suvremenih sustava pred nabijanja motora s unutrašnjim sagorijevanjem je pogon turbo punjača električnom energijom. Trenutno se koristi sustav pred nabijanja koji kao osnovni sustav pred nabijanja koristi turbo punjač koji je pogonjen kinetičkom energijom ispušnih plinova, a kao dodatni podsustav se koristi električno pogonjen turbo punjač koji služi za aktivaciju u određenim uvjetima rada. Električni turbo punjač se aktivira u ovisnosti o zahtjevu vozača za ubrzanjem i o postojećem stanju rada motora u pogledu raspoložive snage, broja okretaja i opterećenja motora. [12]

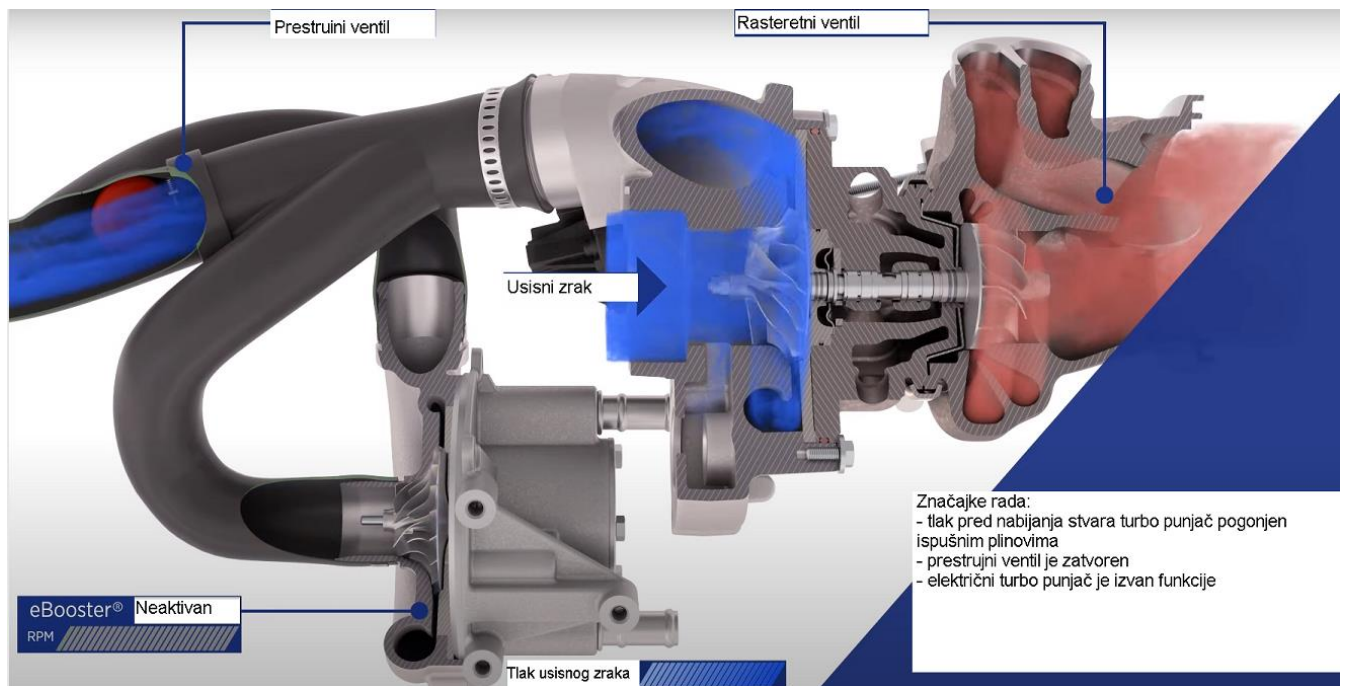
Sustav se aktivira u situaciji u kojoj motor radi pri niskom broju okretaja i niskom opterećenju na zahtjev vozača za povećanjem raspoložive snage i okretnog momenta s ciljem ubrzavanja vozila. Kako bi se eliminirala situacija pojave „turbo – rupe“ električno pogonjen turbo punjač ne ovisi o kinetičkoj energiji ispušnih plinova nego samo o raspoloživoj struji iz vozila i stoga na zahtjev vozača se električni turbo punjač odmah pokrene i proizvodi najveći raspoloživi tlak pred nabijanja u području niskog broja okretaja koljenastog vratila. S povećanjem broja okretaja koljenastog vratila, povećava se i kinetička energija ispušnih plinova što rezultira pogonom klasičnog turbo punjača koji tada ulazi u radno područje broja okretaja i stvara potreban tlak pred nabijanja, a električni turbo punjač se zaustavlja i isključuje iz rada. Na slikama 22, 23 i 24 je prikazan princip rada sustava u kritičnim situacijama sa sastavnim elementima. [12]



Slika 22 prikaz načina rada pri niskom opterećenju, [12]



Slika 23 prikaz načina rada sustava pri ubrzanju vozila, [12]



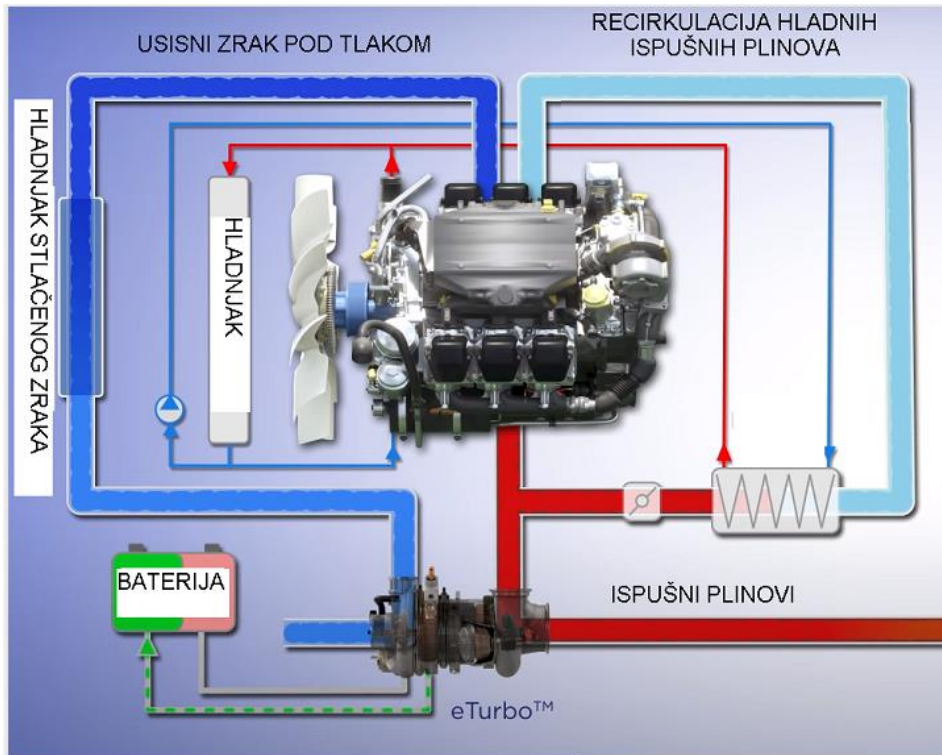
Slika 24 prikaz načina rada sustava pred kraj ubrizgavanja, [12]

S ciljem smanjenja zauzimanja prostora oko motora u vozilima, postoji konstrukcijska izvedba u kojoj je u samom kućištu klasičnog turbo punjača postavljen i elektromotor koji služi kao dodatni podsustav za pogon turbo punjača u određenim eksploatacijskim uvjetima. Korištenje takve konstrukcijske izvedbe omogućava rad turbo punjača koji za pogon koristi kinetičku energiju ispušnih plinova, ali u situacijama poput rada pri niskom broju okretaja koljenastog vratila motora u kojima je kinetička energija ispušnih plinova mala. Elektro motor koji je izravno vezan za turbo punjač pogoni isti kako bi se stvorio pretlak u usisnom kolektoru i poboljšalo punjenje cilindara. S druge strane, korištenje ove konstrukcijske izvedbe omogućava iskorištenje kinetičke energije ispušnih plinova tijekom vožnje konstantnom brzinom, kad se od motora ne zahtijeva visok iznos okretnog momenta, za napajanje baterija čiju električnu energiju koristi elektromotor turbo punjača. [12]

Prednosti korištenja ovakve konstrukcijske izvedbe: [12]

- jednostavna konstrukcijska izvedba
- smanjen utjecaj „turbo – rupe“
- veća učinkovitost motora
- visok iznos snage i okretnog momenta je dostupan na širem području broja okretaja koljenastog vratila motora
- kinetička energija ispušnih plinova se može koristiti za pogon električnog motora turbo punjača koji se u tom režimu rada ponaša kao generator

Na slici 25 je vidljiv prikaz konstrukcijske izvedbe korištenja električki potpomognutog turbo punjača s njegovim smještajem u prostoru motora.



Slika 25 prikaz električki potpomognutog turbo punjača, [13]

7.2. PowerPulse tehnologija

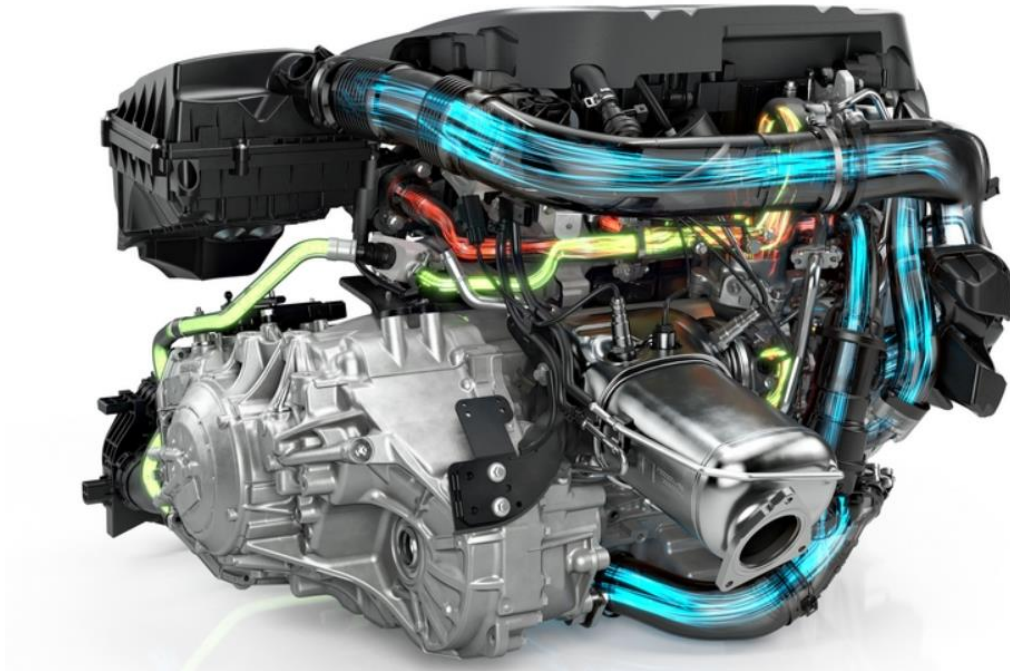
Ovu tehnologiju trenutno razvija proizvođač automobila „Volvo“ i koristi ga na suvremenom dizelskom motoru koji pogoni osobni automobil. Cilj korištenja i implementacije ovog tehnološkog rješenja je eliminacija ili značajno smanjenje utjecaja turbo – rupe. [14]

Princip rada se temelji na djelovanju stlačenog zraka na turbo punjač, točnije na ispušni impeler turbo punjača kako bi zadržao potreban broj okretaja vratila turbo punjača nakon smanjenja zahtjeva vozača za snagom motora pa sve dok se ponovno ne zatraži povećanje snage za ubrzavanje vozila. [14]

Ovaj se sustav sastoji od spremnika stlačenog zraka volumena dvije litre i kompresora na električni pogon koji služi za dobavu i tlačenje zraka potrebnog za rad sustava. Tlak zraka unutar spremnika se održava na 12 bara, a ispuštanje zraka se regulira elektromagnetskim ventilima. [14]

Korištenje ovog sustava, uz glavnu prednost za eliminiranje turbo – rupe, ne djeluje negativno na komponente motora, a zahvaljujući jednostavnom dizajnu nije osjetljiv na eksploatacijske uvjete niti zahtjeva složenu ugradnju i održavanje. Uz navedene prednosti, korištenje ove tehnologije može doprinijeti dugotrajnosti turbo punjača jer komprimirani zrak hladi turbo punjač što rezultira smanjenjem temperature i ispušnih plinova i usisanog zraka, a u pogledu održavanja turbo punjača pospješuje hlađenje samog kućišta i ležajeva vratila. [14]

Na slici 26. je vidljiv prikaz korištenja ove tehnologije. Crvenom bojom je prikazan tok ispušnih plinova koji djeluju na turbo punjač, ali je potrebno izvjesno vrijeme da kinetička energija ispušnih plinova ubrza ispušni impeler na potreban broj okretaja. Zelenom je bojom prikazan tok komprimiranog zraka iz spremnika koji također djeluje na ispušni impeler turbo punjača i u vrlo kratkom vremenu je vratilo turbo punjača postiglo potreban broj okretaja. Proizvođač automobila „Volvo“ tvrdi da je vrijeme odaziva ovog sustava na zahtjev vozača 0.3 sekunde. [14]



Slika 26 prikaz protoka radnog medija unutar motora pri korištenju PowerPulse tehnologije, [14]

7.3. BMW – ov dizelski motor (B57S) koji koristi četiri turbo punjača

Ovaj dizelski motor koristi četiri turbo punjača, dva su manjih dimenzija, a dva većih. Dva turbo punjača manjih dimenzija stvaraju potreban tlak pred nabijanja pri niskom broju okretaja motora, dok s povećanjem broja okretaja motora se otvaraju prestrujni ventili te ispušni plinovi djeluju na dva veća turbo punjača koji tada stvaraju potreban tlak prednabijanja. Svrha korištenja ove tehnologije je smanjenje turbo – rupe, ali i povećanja učinkovitosti dizelskih motora. Zbog uvođenja novih Euro normi, emisija štetnih plinova mora biti dodatno snižena što BMW – ovi dosadašnji motori nisu mogli zadovoljiti. Uz povećanje učinkovitosti i smanjenja štetnih emisija, značajka ovog motora je visoka snaga i okretni moment, a vrijednosti su prikazane u tablici 2. [15]

Tablica 2 prikaz tehničkih karakteristika motora B57S

BROJ CILINDARA	6
RADNI VOLUMEN	2,994 dm ³
SNAGA	294 kW pri 4400 min ⁻¹
OKRETNI MOMENT	760 Nm u rasponu 2000 – 3000 min ⁻¹
POTROŠNJA	6,4 l / 100km

Izvor:[15]

8. ZAKLJUČAK

Pojavom sustava za pred nabijanje motora je došlo do razvoja vozila u cestovnom prometu koja su obuhvaćala i osobna i teretna vozila. Razvojem sustava za pred nabijanje motora se povećava učinkovitost i kompaktnost pogonskih agregata vozila. U samim počecima su ovi sustavi bili vrlo nepouzdana, odnosno bili su veoma kompleksni i nedovoljno razvijeni kako bi sam pogonski agregat uspješno obavljao nazivnu funkciju pri nominalnim vrijednostima. Razvojem samih sustava su se nedostaci eliminirali ili su se sveli na nisku razinu kako ne bi značajno utjecali na eksploataciju vozila. U teretnom prometu je značajnije korištenje turbo punjača, dok se u osobnim vozilima mogu naći sve izvedbe sustava za pred nabijanje ovisno o namijeni vozila i preferencijama korisnika.

Današnji sustavi omogućavaju povećanje iskorištenja pogonskog goriva, a i korištenje pogonskih agregata čiji je radni volumen značajno manji u odnosu na pogonske agregate koji su se proizvodili u počecima, a da motori imaju isti iznos snage i okretnog momenta. Dodatno, korištenjem sustava za pred nabijanje se povećava i raspoloživost visokog iznosa okretnog momenta na širem radnom području broja okretaja.

Sami sustavi za pred nabijanje zahtijevaju i veću pozornost pri održavanju vozila, a shodno tomu povećavaju kompleksnost pogonskog agregata vozila. Cijena vozila je veća, broj elemenata na pogonskom agregatu je veći što povećava proizvodne troškove i zahtijeva stručnost pri održavanju vozila. Moderni sustavi za ispravan rad zahtijevaju velik broj električnih senzora i aktuatora koji nadziru rad motora i upravljaju njime. Korištenje električnih turbo punjača se uvelike eliminira problem konvencionalnih u pogledu „turbo – rupe“, a i omogućava se iskorištenje kinetičke energije ispušnih plinova u eksploatacijskim uvjetima u kojima bi se oba nepovratno pretvorila u ostale oblike energije.

Popis literature:

1. Popović G. *Tehnologija motornih vozila*, Zagreb: Pučko otvoreno učilište Zagreb; 2004.
2. Fot M. *Servis turbopunjača s varijabilnom geometrijom*. Završni rad. Veleučilište u Karlovcu, Veleučilište u Karlovcu; 2020. Preuzeto s: <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A1630/datastream/PDF/view> [Pristupljeno: 03.05.2023.]
3. Milek L. *Proračun odziva momenta Ottovog motora nabijenog s dva različita turbopunjača*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojarstva i brodogradnje; 2018. Preuzeto s: <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A4187/datastream/PDF/view> [Pristupljeno: 03.05.2023.]
4. Molnar M. *Usporedba odziva momenta Ottovih motora koji primjenjuju različite vrste nabijanja*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018. Preuzeto s: http://repozitorij.fsb.hr/8459/1/Molnar_2018_zavrsni%20preddiplomski.pdf [Pristupljeno: 10.05.2023.]
5. Car throttle – Engineering Explained. *Engineering Explained: 6 different types of turbocharger and the advantages of each setup*. Preuzeto s: <https://www.carthrottle.com/post/engineering-explained-6-different-types-of-turbocharger-and-the-advantages-of-each-setup/> [Pristupljeno: 10.05.2023.]
6. Motortrend. *A look at twin scroll turbo systems design – divide and conquer*. Preuzeto s: <https://www.motortrend.com/how-to/modp-0906-twin-scroll-turbo-system-design/> [Pristupljeno: 16.05.2023.]
7. Car throttle – Engineering Explained. *The pros and cons of turbochargers vs superchargers: Engineering explained*. Preuzeto s: https://www.carthrottle.com/post/engineering-explained-the-pros-and-cons-of-turbochargers-vs-superchargers/?fbclid=IwAR0vOtCSZnDIw_fR7_t_50M4XNhbyC0gfLjM2l-VGCyg_epKZd_f7ltfcn8 [Pristupljeno: 16.05.2023.]
8. Car throttle – Engineering Explained. *The different kinds of superchargers and their benefits*. Preuzeto s: <https://www.carthrottle.com/post/a7bzmy3/> [Pristupljeno: 10.06.2023.]
9. Youtube. *Superchargers: What they are, how they work and why you need one*. Preuzeto s: <https://www.youtube.com/watch?v=iq8KWnFGNf8> [Pristupljeno: 10.06.2023.]
10. Road and track. *Here's how to choose between superchargers*. Preuzeto s: <https://www.roadandtrack.com/car-culture/car-accessories/a32315507/types-of-supercharger-comparison/> [Pristupljeno: 10.06.2023.]
11. Mechanical Booster. *How roots supercharger works – easily explained*. Preuzeto s: <https://www.mechanicalbooster.com/2017/08/roots-supercharger.html> [Pristupljeno: 20.07.2023.]

12. Youtube. *Technology eBooster – electrically driven compressor for light vehicles*. Preuzeto s: <https://www.youtube.com/watch?v=iEGisoNewg&t=164s> [Pristupljeno: 20.07.2023.]
13. Youtube. *eTurbo™*. Preuzeto s: https://www.youtube.com/watch?v=8OswYe69_E [Pristupljeno: 20.07.2023.]
14. Torquing cars. *Tech talk – What is Volvo PowerPulse?* Preuzeto s: <https://www.torquingcars.com/tech-talk/volvo-powerpulse/> [Pristupljeno: 17.08.2023.]
15. BMW blog. *Full details on the new BMW quad – turbo diesel B57 engine*. Preuzeto s: <https://www.bmwblog.com/2016/05/12/full-details-new-bmw-quad-turbo-diesel-b57-engine/> [Pristupljeno: 17.08.2023.]
16. Car Throttle. *How intercoolers add power and why you need one*. Preuzeto s: <https://www.carthrottle.com/news/how-intercoolers-add-power-and-why-you-need-one> [Pristupljeno: 18.08.2023.]
17. Malčić I. *Sustavi za ubrizgavanje goriva dizelovih motora*. Završni rad. Veleučilište u Šibeniku; 2018. Preuzeto s: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vus:919/preview> [Pristupljeno: 18.08.2023.]
18. Auto Stanić. *Simptomi kvara MAF senzora*. Preuzeto s: <https://www.autostanic.hr/blog/simptomi-kvara-maf-senzora> [Pristupljeno: 28.8.2023.]
19. Moj Volan. *MAP senzor – princip rada i simptomi kvarova*. Preuzeto s: <https://www.mojvolan.com/map-senzor-princip-rada-i-simptomi-kvarova/> [Pristupljeno: 28.8.2023.]
20. Race Shop. *AEM Exhaust Gas Temperature Sensor*. Preuzeto s: <https://race-shop.hr/zamjenski-senzori/282001-aem-exhaust-gas-temperature-egt-sensor.html> [Pristupljeno: 28.8.2023.]
21. Student Lesson, *Understanding Intake Air Temp Sensor*. Preuzeto s: https://studentlesson.com/understanding-intake-air-temp-sensor/?utm_content=cmp-true [Pristupljeno: 28.8.2023.]
22. HAK Revija. *Senzor položaja leptira zaklopke gasa: Kako prepoznati kvarove na tom dijelu vozila?* Preuzeto s: <https://revijahak.hr/2021/03/24/senzor-polozaja-leptira-zaklopke-gasa-kako-preoznati-kvarove-na-tom-dijelu-vozila/> [Pristupljeno: 28.8.2023.]
23. K Dijagnostika. *Lambda sonda i sve što trebate znati o njoj*. Preuzeto s: <https://www.kdijagnostika.hr/lambda-sonda-i-sve-o-njoj/> [Pristupljeno: 28.8.2023.]
24. K Dijagnostika. *Što je EGR ventil i što kada počne stvarati probleme*. Preuzeto s: <https://www.kdijagnostika.hr/sto-je-egr-ventil/> [Pristupljeno: 28.8.2023.]

Popis slika

Slika 1 prikaz taktova rada četverotaktnog motora, [1].....	3
Slika 2 prikaz senzora masenog protoka zraka, [18].....	5
Slika 3 prikaz senzora tlaka usisanog zraka, [19].....	6
Slika 4 prikaz senzora temperature ispušnih plinova, [20].....	7
Slika 5 prikaz temperature usisanog zraka, [21].....	8
Slika 6 prikaz senzora položaja klapne gasa, [22].....	9
Slika 7 strukturni prikaz lambde sonde, [23].....	9
Slika 8 prikaz EGR ventila, [24].....	10
Slika 9 prikaz hladnjaka stlačenog zraka hlađenog strujom okolišnog zraka, [16] ...	11
Slika 10 prikaz hladnjaka stlačenog zraka hlađenog rashladnom tekućinom, [16] ...	12
Slika 11 prikaz ovisnosti duljine usisne cijevi i broja okretaja motora, [1].....	15
Slika 12 prikaz oscilacijske usisne grane, [1]	16
Slika 13 rezonancijsko - oscilacijska usisna cijev, [1].....	17
Slika 14 prikaz sastavnih elemenata turbo punjača, [2].....	18
Slika 15 prikaz regulacijskog ventila turbo punjača, [3]	19
Slika 16 zakretanje krilaca varijabilnog turbo punjača, [4].....	20
Slika 17 prikaz dvostrukog nabijanja motora, [4]	22
Slika 18 Twin - scroll turbo punjač, [6].....	24
Slika 19 Centrifugalni kompresor, [8].....	26
Slika 20 Vijčani turbo kompresor, [9].....	27
Slika 21 prikaz korijenskog turbo kompresora, [11].....	28
Slika 22 prikaz načina rada pri niskom opterećenju, [12]	30
Slika 23 prikaz načina rada sustava pri ubrzanju vozila, [12]	30
Slika 24 prikaz načina rada sustava pred kraj ubrizgavanja, [12].....	31
Slika 25 prikaz električki potpomognutog turbo punjača, [13].....	32
Slika 26 prikaz protoka radnog medija unutar motora pri korištenju PowerPulse tehnologije, [14].....	33

Popis tablica

Tablica 1 prikaz vrijednosti stupnja punjenja raznih motora	14
Tablica 2 prikaz tehničkih karakteristika motora B57S	34

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad _____

(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Sustavi pred nabijanja motora s unutarnjim izgaranjem , u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 05.07.2023.

ANTONIO MARTAN, *Antonio Martan*
(ime i prezime, potpis)