

Reparacija turbopuhala automobilskog motora

Mudri, Staša

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:937564>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

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



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

REPARACIJA TURBOPUHALA AUTOMOBILSKOG MOTORA

Rijeka, kolovoz 2024.

Staša Mudri

0069081250

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

REPARACIJA TURBOPUHALA AUTOMOBILSKOG MOTORA

Mentor: prof. dr. sc. Tomislav Senčić

Rijeka, kolovoz 2024.

Staša Mudri

0060081250

Rijeka, 08.03.2024.

Zavod: Zavod za termodinamiku i energetiku
Predmet: Toplinski strojevi i uređaji

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Staša Mudri (0069081250)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (2010)

Zadatak: **Reparacija tubopuhala automobilskog motora / Car engine turbocharger refurbishment**

Opis zadatka:

Turbopuhalo se često koristi kod suvremenih automobilskih motora, ali ponekad upravo ova komponenta uzrokuje probleme. Opisati suvremeni sustav prednabijanja. Izraditi tehnički opis razmatranog motora. Analizirati kvar i podatke pomoću sustava elektronske dijagnostike. Izraditi termodinamički proračun. Opisati postupak reparacije turbopuhala. Izraditi sklopni nacrt turbopuhala i radionički nacrt karakterističnih dijelova.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Tomislav Senčić

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad pod temom “Reparacija turbopuhala automobilskog motora” izradio potpuno samostalno uz stručnu pomoć mentora prof. dr.sc. Tomislav Senčić u razdoblju od 5. srpnja 2024. do 29. kolovoza 2024.

U Rijeci, 21. kolovoz 2024.

Stša Mudri

ZAHVALA

Ovim putem želim se zahvaliti mentoru prof. dr. sc. Tomislav Senčić na pomoći oko pisanja završnog rada, literature koja mi je omogućena te slobodi izbora teme koja me osobno vrlo zanimala.

Također želim zahvaliti obitelji koja je moja podrška kroz cijelo moje obrazovanje, bez njihove podrške i potpore ne bih mogao ovo ostvariti.

SADRŽAJ

1. UVOD	9
2. POVIJEST TURBOPUHALA U AUTOINDUSTRIJI	10
3. SUSTAV PREDNABIJANJA	11
3.1. Podjela sustava prednabijanja turbopuhalom	13
4. SUVREMENI SUSTAV PREDNABIJANJA	16
4.1. Pogon turbopuhala električnom energijom	16
4.2. PowerPulse tehnologija.....	17
4.3. Anti-lag sustavi	18
4.4. Dvostruko punjenje „Twin Charging“	19
4.5. Pametni sustavi upravljanja.....	19
4.6. Turbopuhala varijabilnih geometrija	20
5. UČESTALI UZROCI KVAROVA TURBOPUHALA	21
5.1. Nedostatak ulja za podmazivanje.....	21
5.2. Strana tijela ili prljavština u sustavu podmazivanja turbopuhla	22
5.3. Strana tijela	22
5.4. Pregrijavanje turbopuhala	23
6. KORACI U REPARACIJI TURBOPUHALA	24
6.1 Prvobitna dijagnoza	24
6.2. Vizualno i funkcionalno testiranje.....	24
6.2.1. Testiranje predtlaka na protjecanje van sustava.....	25
6.2.2. Ispravnost optočnog ventila	25
6.3. Rastavljanje turbopuhala s motora	25
6.4. Rastavljanje turbopuhala	26
6.5. Inspekcija i zamjena komponenti	28
6.5.1. Ležajevi i brtve	28
6.5.2. Rotori kompresora i turbine	29
6.5.3. Čišćenje	29
6.6. Sastavljanje turbopuhala	30
6.7. Testiranje turbopuhala	31
6.8. Ugradnja turbopuhala na motor	32
6.9. Završno testiranje i podešavanje	33
7. NAPREDNE TEHNOLOGIJE PRI POPRAVCIMA TURBOPUHALA	35

7.1. Napredni dijagnostički alati :	35
7.2. 3D skeniranje	36
7.3. Ultrazvučno čišćenje	37
7.4. 3D printanje	37
7.5. Krioterapija	38
8. TEHNIČKI OPIS MOTORA	39
9. ZADATAK	40
10. ZAKLJUČAK	48
LITERATURA	49
POPIS SLIKA	50
POPIS OZNAKA	52
SAŽETAK	54
SUMMARY	55
PRILOZI	56

1. UVOD

Turbopuhalo u autoindustriji postao je neizostavni dio zbog svoj utjecaja na povećanje snage, smanjenja potrošnje goriva, smanjenja emisije štetnih plinova te cjelokupnog utjecaja na dinamiku vozila. Sustav turbopuhala radi po principu da dovodi u cilindar znatno veću količinu zraka no što bi se ona sama usisala. Većoj količini zraka unutar cilindra možemo dovesti više goriva, te izgaranjem takve smjese oslobađa se veća energija koja za rezultat ima veću proizvodnju snage.

U ranijim fazama razvijanja turbopuhalo je prvobitno bilo dizajnirano za povećanje snage bez značajnog povećanja veličine i mase vozila. No kako je tehnologija napredovala tako se i sustav turbopuhala razvio u kompleksni uređaj koji je postao ključan dio suvremenih automobila. Kompleksna izvedba i ekstremni uvjeti rada pri brzinama do 200 000 okr/min i temperaturama do 1000 °C stupnjeva za rezultat imaju velika naprezanja dijelova turbopuhala.

U ovom radu detaljnije ćemo se upoznati sa mogućim razlozima kvarova turbopuhala, načinima kako prepoznati kvar unutar sustava turbopuhala i koji oni utjecaj imaju na pojedine dijelove. Također, razradit ćemo tehnike popravaka turbopuhala te načine na koje se one izvode.

2. POVIJEST TURBOPUHALA U AUTOINDUSTRIJI

Povijest turbopuhala duga je kao i povijest motora s unutarnjim izgaranjem. 1885. i 1896. godine Gottlieb Daimler i Rudolf Diesel istraživali su mogućnosti povećanja snage motora s unutarnjim izgaranjem i smanjenje potrošnje goriva uporabom komprimiranog zraka prilikom izgaranja u motoru[1]. 1925. godine švicarski inženjer Alfred Buchi prvi je uspješno napravio sustav turbopuhala koji radi pomoću ispušnih plinova i time postigao povećanje snage motora za 40 %. Taj događaj označio početak primjene turbopuhala u autoindustriji. Među prvima u autoindustriji koji su primijenili ovaj sustav u serijskoj proizvodnji bili su Chevrolet Corvair Monza koji je prikazan na slici 2.1. i Oldsmobile Jetfire u SAD-u 1962/63. godine, međutim njihova nepouzdanost rezultirala je brzim povlačenjem sa tržišta.

Masovna upotreba sustava turbopuhala započinje nešto kasnije, 1973. godine nakon velike naftne krize koja je za posljedicu imala veća ulaganja u razvoj tehnologije za smanjenje potrošnje goriva. Kako je uz povećanje snage sustav imao i utjecaj na smanjenje potrošnje goriva tako je njegova upotreba postala masovna.

Veliku primjena je bila i u auto-moto sportovima, gdje je najznačajnija upotreba bila u Formuli 1, što je dovelo do velike popularnosti. Povećanjem popularnosti svaki proizvođač automobila u to vrijeme nudio je barem jedan model koji je primjenjivao sustav turbopuhala.

Najveći uspjeh kod dizelskog motora s unutarnjim izgaranjem bio je 1978. godine kada Mercedes počinje nuditi model 300SD, nakon toga dolazi Volkswagen Golf turbodizel 1981. godine. Ovo je značilo da dizelski motori mogu ostvarivati jednake performanse kao benzinski motori.



Slika 2.1. Chevrolet Corvair Monza

3. SUSTAV PREDNABIJANJA

Prednabijanje je sustav koji nam služi za povećanje tlaka zraka koji dopijeva u cilindar[2]. Dovođenjem veće količine zraka u cilindar omogućavamo dovođenje i veće količina goriva te samim time događa se jača ekspanzija i snaga koja se razvije unutar cilindra motora. Povećanje snage motora može se izvesti na nekoliko načina: ako povećamo brzinu vrtnje, no to nam uzrokuje probleme opterećenja ležajeva, možemo povećati stupanj djelovanja ili ogrjevnu moć te ako povećamo dimenzije motora. Od svih ponuđenih načina najekonomičnije je povećanje gustoće medija koji se koristi. Povećanjem tlaka radnog medija povećava se i gustoća, a za posljedicu događa se povećanje temperature. Izraz po kojemu se računa snaga motora je :

$$P_{ef} = \rho_s \cdot V_s \cdot H_s \cdot \eta_{ef} \cdot z \cdot \frac{2n}{\tau}$$

gdje je:

ρ_s - gustoća radnog medija kg/mm³

V_s - stapajni volumen mm³

H_s - ogrijevna moć gorive smjese MJ/kg

η_{ef} – stupanj djelovanja

z - broj cilindara

n – brzina vrtnje

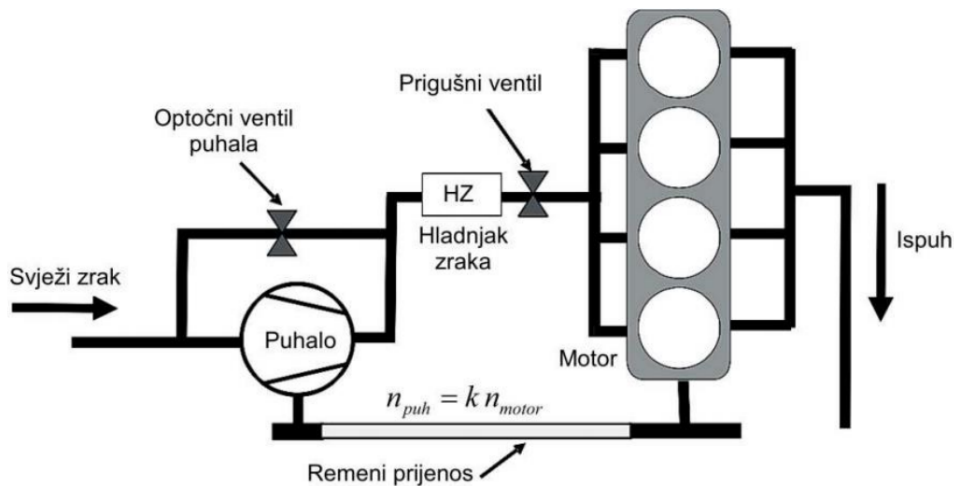
τ - broj taktova

Način izvedbe sustava prednabijanja ovisi o načinu pogona kojim se dovodi energija potrebna za vršenje prednabijanja. Prednabijanje može biti mehaničko, turbopuhalom ili primjenom valnih pojava. Kod izvedbe sa mehaničkim prednabijanjem energija koljenastog vratila se preko remena iskorištava za pogon puhala, dok se kod prednabijanja turbopuhalom iskorištavaju ispušni plinovi kako bi se pokretala turbina puhala. Kod sustava primjene valnih pojava izravna kompresija zraka potrebnog za prednabijanje vrši se pomoću ispušnih plinova.

Jedna od glavnih razlika u izvedbi mehaničkog prednabijanja i sustava za prednabijanje turbopuhalom je vrsta pogona puhala. Mehaničko prednabijanje koristi remeni prijenos koji se

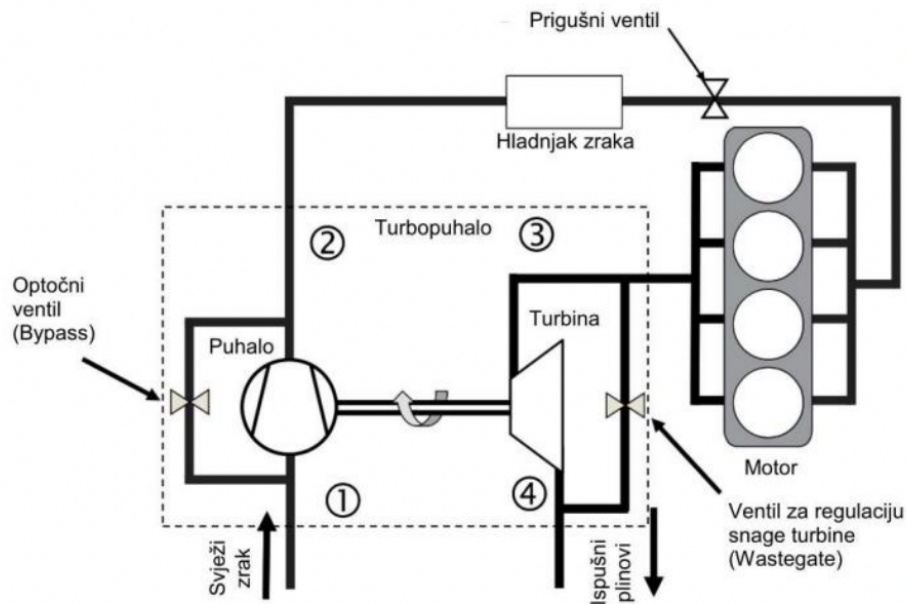
prenosi direktno sa koljenastog vratila za pogon puhala, dok prednabijanje turbopuhalom potrebnu snagu za pogon puhala iskorištava iz ispušnih plinova, ispušni plinovi pokreću vratilo koje pogoni turbinu.

Sustav mehaničkog prednabijanja ne iskorištava otpadnu toplinu koja je sadržana u ispušnim plinovima. Većinom su izrađena kao volumetrijska puhala koja svoju funkciju pumpanja zraka vrše promjenom volumena stroja.



Slika 3.1. Shema izvedbe mehaničkog turbopuhala

Na slici 3.1 prikazuje se shema motora s unutarnjim izgaranjem i njemu pripadajuće cilindre te koljenasto vratilo. Na vanjskom kraju koljenastog vratila nalazi se remenica koja pomoću remena pogoni vratilo turbopuhala, turbopuhalo zauzvrat vrši usis svježeg zraka te tlači usisani zrak prema motoru prolazeći kroz hladnjak.

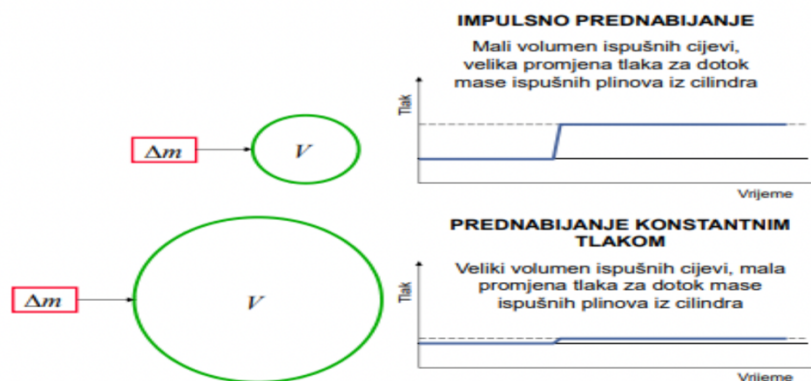


Slika 3.2. Shema klipnog motora s prednabijanjem turbopuhalom i hladnjakom zraka

Na slici 3.2. je prikaz spoja trubopuhala i klipnog motora s unutarnjim izgaranje te je dodatno ugrađen optočni ventil koji regulira snagu turbopuhala, tj. ograničava maksimalni tlak koji bi se mogao stvoriti unutar sustava. Optočni ventil ima zadatak vratiti višak zraka koji se nalazi sa tlačne strane turbopuhala natrag u smjeru usisnog dijela, dok će wastegate ventil višak ispušnih plinova propuštati neposredno pored turbine turbopuhala kako ne bi došlo do opterećenja turbopuhala.

3.1. Podjela sustava prednabijanja turbopuhalom

Sustav prednabijanja turbopuhalom dijelimo u dvije izvedbe, to su impulsno prednabijanje i prednabijanje konstantnim tlakom kao što je prikazano na slici 3.3.



Slika 3.3. Podjela sustava prednabijanja turbopuhalom

Impulsno prednabijanje koristi se radi poboljšanja brzine reakcije motora s prednabijanjem na promjene opterećenja, koje rezultiraju bržim odazivom snage, te se motor ponaša živahnije jer je inercija ispušnog sustava manja. Ova vrsta prednabijanja pogodna je pri pogonu motora vozila. Volumen ispušne grane manji je od dvostrukog stapajnog volumena priključenih cilindara motora. Pri uključivanju cilindara na istu ispušnu granu važno je pripaziti da ispuh jednog cilindra ne dovede do punjenja drugog cilindra koji se nalazi na ispušnom taktu. Prije početka ispuha jednog cilindra važno je da su ventili ostalih cilindara zatvoreni. Maksimalni broj cilindara četverotaktnog motora koji mogu biti spojeni na jednu ispušnu cijev iznosi tri, u suprotnom bi dolazilo do prestrujavanja između cilindara motora. Da bi spriječili tu pojavu koriste se turbine sa dva ulaza. Dvije struje ispušnih plinova odvojeno nastrujavaju lopatice turbine zbog pregrade koja se nalazi unutar kućišta turbine. Zadatak pregrade je sprječavanje prestrujavanja dviju struji ispušnih plinova. Kod turbopuhala s pregradom dobivamo niži stupanj djelovanja u odnosu na turbopuhala s konstantnim tlakom, a to je uzrokovano velikim promjenama tlaka koje naglo mijenjaju uvjete strujanja. Tlak pri impulsnom prednabijanju niži je u odnosu na tlak kod prednabijanja konstantnim tlakom.

Prednabijanje konstantnim tlakom pogodno je kod brodskih motora zbog njihovog dugog vremenskog razdoblja rada pri ustaljenim režimima rada te zato što nema potrebe naglih promjena opterećenja prilikom rada. Volumen ispušne cijevi je deseterostruko veći u odnosu na stapajni volumen unutar jednog cilindra. Velika se pozornost obraća na brzinu kojom je motor opterećen kako ne bi došlo do ispadanja iz pogona. Potrebna nam je samo jedna ispušna cijev koja bi objedinila sve cilindre i djelovala kao zajednička cijev. Stupanj djelovanja turbopuhala pri pogonu konstantnim tlakom znatno je veći u odnosu na sustav impulsnog prednabijanja zbog promjene tlaka ispred turbine, te su optimalniji uvjeti strujanja u samoj turbini.

Regulacija tlaka prednabijanja vrši se optočnim ventilom prikazanim na slici 3.4. poznatijim pod nazivom „wastegate“ ili „bypass“. Zadaci optoćnog ventila su ograničenje tlaka i kontrola radne temperature. Ograničenje tlaka važno je kako bi se rasteretila turbina koja bi u suprotnom proizvodila previše tlaka te izazvalo prekomjerno opterećivanje motora. Ograničenje se postiže na način da optoćni ventil dio ispušnih plinova preusmjerava u ispušni sustav, a time se smanjuje količina energije koja bi dolazila na turbinu, usporava brzina rada turbine i smanjuje tlak. Regulacijom brzine turbine optoćni ventil održava optimalnu radnu temperaturu motora i turbopuhala čime sprječava pregrijavanje i mogućnost oštećenja dijelova turbopuhala. Optoćni ventil može biti izrađen u dvije vrste. Prva vrsta je interni optoćni ventil koji je integriran unutar samog kućišta turbopuhala, on je nešto manji i jednostavnije izrade te se često koristi u serijskoj proizvodnji. Druga vrsta je eksterni optoćni ventil montiran izvan turbopuhala i povezan ispušnim

sustavom. Njegova primjena najčešće se koristi kod visokoučinkovitih i trkaćih motora zbog svoje sposobnosti da podnosi velike količine ispušnih plinova i pruža precizniju kontrolu tlaka.

KINUGAWA 



Slika 3.4.. Turbopuhalo s optočnim ventilom

4. SUVREMENI SUSTAV PREDNABIJANJA

Suvremena autoindustrija na razne načine rješava nedostatke motora, smanjivanjem dimenzija samog motora, povećavanjem učinkovitosti i smanjenjem emisije štetnih plinova koje proizvodi proces unutarnjeg izgaranja u motoru[3].

4.1. Pogon turbopuhala električnom energijom

Suvremena tehnologija prednabijanja motora s unutarnjim izgaranjem je da se turbopuhalo pogoni električnom energijom prikazanim na slici 4.1. Trenutna tehnologija za pokretanje turbopuhala iskorištava kinetičku energiju plinova izgaranja, a kao dodatni pogon iskorištava se električna energija koja omogućava rad unutar određenih uvjeta gdje to inače nije moguće. Aktivacija električnog turbopuhala ovisi o potrebama vozača za ubrzanjem i mogućnošću motora na raspoloživu snagu, broja okretaja i samog opterećenja motora.

Sustav električnog turbopuhala iskorištava se pri niskom broju okretaja te niskim opterećenjima motora kako bi se povećala raspoloživa snaga i okretni moment u cilju ubrzanja vozila. Najčešća pojava pri niskim okretajima je turbo-rupa tj. vremenski razmak između trenutka kada se pritisne papučica gasa i trenutka kada turbopuhalo postigne punu snagu. Razlog nastanka turbo-rupe je potreba sustava turbopuhala da dobije određenu količinu ispušnih plinova kako bi se mogao pokretati. Kako bi spriječili pojavu turbo-rupe, turbopuhalo pokretano električnom energijom ne ovisi o kinetičkoj energiji dobivenoj iz ispušnih plinova već o električnoj energiji koja je raspoloživa unutar samog vozila te je u mogućnosti odmah se pokrenuti i dostaviti motoru najveći potrebni stlačen zrak pri niskim okretajima motora. Povećanjem broja okretaja motora, raste i kinetička energija sadržana u ispušnim plinovima te se električno turbopuhalo isključuje iz rada dok mehaničko turbopuhalo nastavlja opskrbljivati motor potrebnim stlačenim zrakom.

Kako bi se smanjilo zauzimanje prostora oko motora unutar vozila, konstrukcijsko rješenje je postavljanje elektromotora unutar samog turbopuhala. Elektromotor je izravno povezan sa turbopuhalom te stvara predtlak unutar usisnog kolektora i rezultira poboljšanjem punjenja cilindra.

Prednosti koje se ostvaruju iskorištavanjem elektromotora unutar turbopuhala su :

- Vrlo jednostavna konstrukcijska izvedba
- Smanjenje nastanka turbo-rupe
- Omogućena veća učinkovitost motora
- Veća snaga i okretni moment dostupni su na širem spektru okretaja motora
- Kinetička energija nastala iz ispušnih plinova iskorištava se za pogon elektromotora turbopuhala koji u tim režimima rada vrši ulogu generatora.



Slika 4.1. Turbopuhalo pogonjeno električnim sustavom

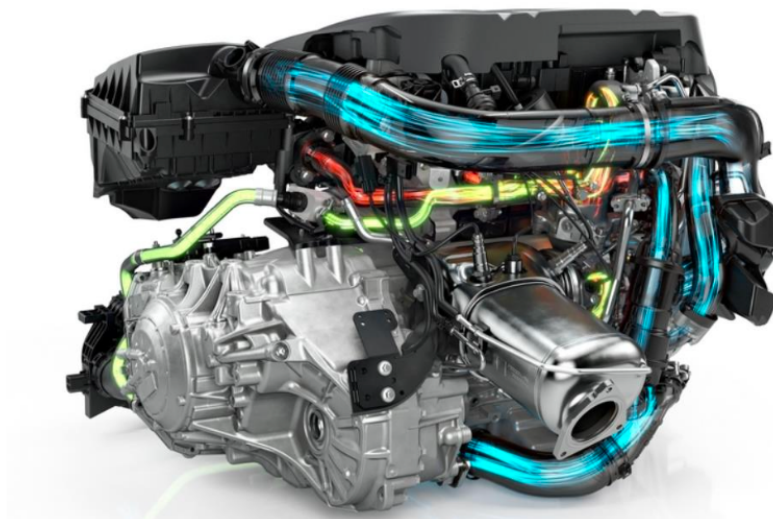
4.2. PowerPulse tehnologija

PowerPulse tehnologija prikazana na slici 4.2. trenutno je razvijana od strane proizvođača marke „Volvo“ te ga koriste na suvremenim dizelskim motorima namijenjenim pogonu osobnih automobila. Ovaj sustav omogućuje eliminaciju ili mogućnost znatnog smanjenja nastanka turbo-rupe.

Način na koji ovaj sustav funkcionira temelji se na utjecaju stlačenog zraka na turbopuhalo, točnije ispušni impeler turbopuhala kako bi se zadržao nužan broj okretaja vratila turbopuhala nakon smanjena potrebe za snagom motora.

Sustav se sastoji od spremnika za stlačeni zrak volumena od dvije litre te kompresora pogonjenog elektromotorom koji sustavu služi za dobavu i tlačenje zraka nužnog za rad. Zrak unutar spremnika nalazi se na 12 bara, a regulacija ispuštanja zraka vrši se elektromagnetskim ventilima.

Primjene ovog sustava kao glavnu prednost ima eliminaciju utjecaja turbo-rupe, nema negativan utjecaj na komponente motora, zahvaljujući jednostavnom dizajnu osjetljivost na eksploatacijske uvjete je minimalna te ne zahtjeva kompleksnu ugradnju i održavanje. Pored navedenih prednosti PowerPulse sustava ova tehnologija doprinosi dugotrajnosti životnog vijeka turbopuhala jer komprimirani zrak ujedno i hladi samo turbopuhalo što nam doprinosi smanjenju temperature usisanog zraka, ispušnih plinova te samog kućišta i ležajeva vratila.



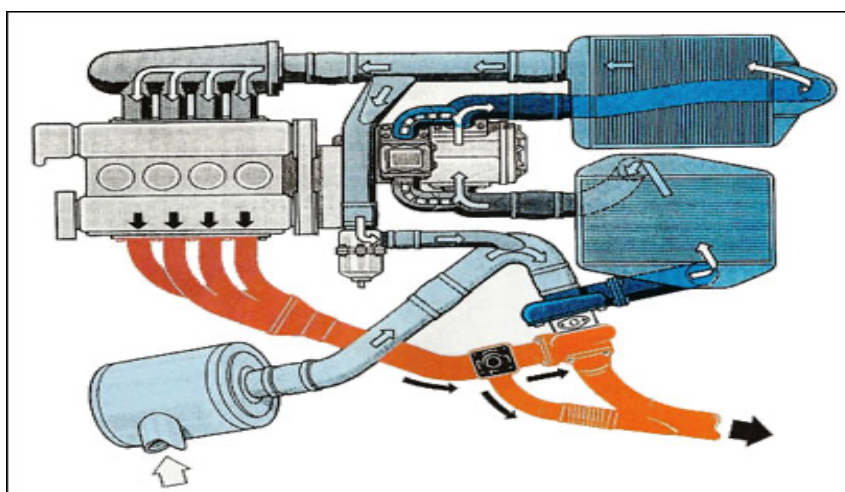
Slika 4.2. PowerPulse tehnologija na motoru

4.3. Anti-lag sustavi

Anti-lag sustav napravljen je tako da održava turbinu turbopuhala u pokretu čak i pri malim okretajima motora ili kada se otpusti papučica gasa, tada motor ne proizvodi dovoljno ispušnih plinova za pokretanje turbopuhala. Jedna od najčešćih metoda anti-lag sustava je odgađanje paljenja gorive smjese unutar cilindra. Paljenje smjese odvija se kada je ispušni ventil već djelomično otvoren. Na taj način dio ne izgorjele smjese dospjeva unutar ispušnog sustava gdje zajedno sa ispušnim plinovima dodatno izgara. Dodatno izgaranje proizvodi pritisak koji održava turbopuhalo u rotaciji, čime se osigurava pripremnost turbopuhala na zahtjev za dodatnu snagu motora. Prednost ovog sustava su brži odaziv na promjene rada motora, poboljšane performanse pri nižim okretajima motora. Dok nedostaci koji prate ovaj sustav su povećano trošenje komponenti turbopuhala, nešto veća potrošnja goriva, povećana buka sustava te proizvodnja topline.

4.4. Dvostruko punjenje „Twin Charging“

Sustav koristi mehanički kompresor takozvani „supercharger“ zajedno sa turbopuhalom, kako bi se dvostruko punilo turbopuhalo kao što je prikazano na slici 4.3.. Mehanički kompresor izravno je povezan sa motorom pomoću remena te pruža trenutna povećanja zraka prilikom niskih okretaja motora. Kako se okretaji motora povećavaju turbopuhalo preuzima ulogu dobave stlačenog zraka motoru pružajući veći pritisak zraka. Preklapanjem rada mehaničkog kompresora i turbopuhala što omogućuje se snažan okretni moment u cijelom rasponu okretaja motora što nam omogućava eliminaciju turbo-rupe i kontinuiranu snagu motora.



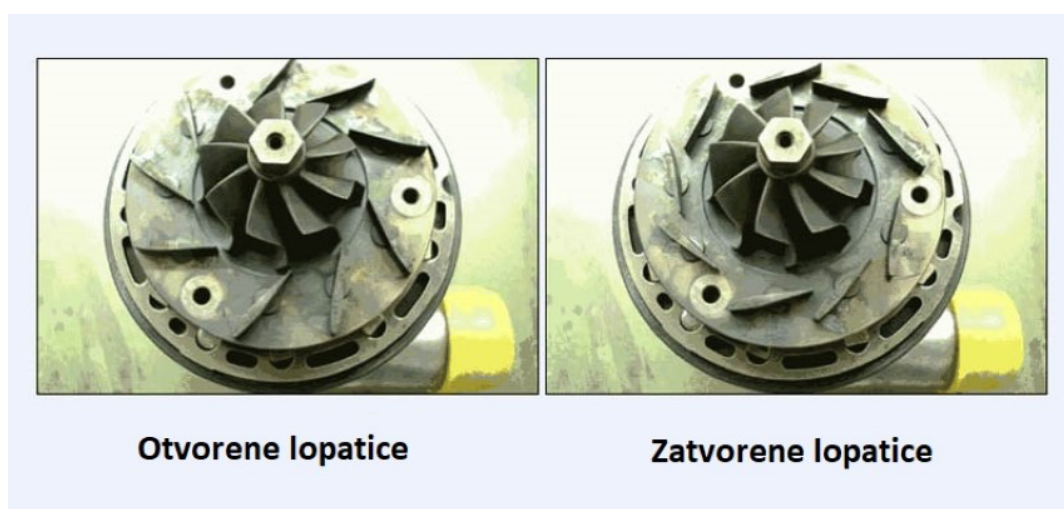
Slika 4.3. Dvostruko punjenje turbopuhala

4.5. Pametni sustavi upravljanja

Suvremeni hibridni sustavi prednabijanja opremljeni su električnim sustavima upravljanja koji omogućavaju kontinuirano nadziranje režima rada motora, nastala opterećenja, temperature koje se razvijaju unutar motora kao i ostale važne parametre. Ovi sustavi omogućuju dinamičko uključivanje i isključivanje kompresora ili turbopuhala ovisno o potrebi motora i uvjetima vožnje. U uvjetima niskog opterećenja sustav koristi samo električni kompresor koji pruža maksimalnu učinkovitost, dok će pri visokim opterećenjima koristiti oba sustava zajedno kako bi bila osigurana maksimalna snaga motora.

4.6. Turbopuhala varijabilnih geometrija

Turbopuhala varijabilnih geometrija rade po principu da kontroliraju ulaz ispušnih plinova u turbopuhalo. U cilju im je optimizacija snage koja se određuje intenzitetom protoka ispušnih plinova za pogon turbopuhala. Ovaj sustav služi kako bi neprekidno mijenjao efekt turbine i omogućavao da se potpuna energija ispušnih plinova može iskoristiti za regulaciju pritiska punjenja. Podesive lopatice prikazane na slici 4.4. omogućuju rad u velikom području okretaja i istovremeno pružaju visoki stupanj iskorištenja plinova izgaranja. Prilikom nižih brzina motora i manjeg protoka goriva, lopatice varijabilne geometrije kontroliraju protok ispušnih plinova i time omogućuju njegovo pravilno usmjerenje na lopatice turbine što rezultira većim brojem okretaja turbopuhala i povećanje pritiska. S obzirom da je pri manjim okretajima motora količina ispušnih plinova manja, sustav omogućava da položaj lopatica smanji poprečni presjek i time ubrza ispušne plinove koji prolaze kroz turbopuhalo, i na taj način se povećava brzina vrtnje osovine. Kao rezultat toga dobijemo povećanje pritiska unutar turbopuhala. Povećanjem pritiska omogućavamo ubrzanje i pri malim okretajima motora. S druge strane ako je količina ispušnih plinova velika, sustav mijenjanjem položaja lopatica povećava poprečni presjek unutar kućišta turbine. Lopatice su tada u otvorenijem položaju što omogućuje manje okretaje turbine i na taj način smanjuje tlak i količinu zraka koja bi ulazila u motor i tako sprječava prekomjerna naprezanja turbine.



Slika 4.4. Podesive lopatice geometrijski varijabilnog turbopuhala

5. UČESTALI UZROCI KVAROVA TURBOPUHALA

Postoje razni utjecaji koji mogu dovesti do kvara sustava turbopuhala, no 90 % slučajeva može se svesti u četiri glave kategorije kvarova[4]. Te kategorije dijelimo na: nedostatak ulja za podmazivanje, strana tijela ili prljavština unutar sustava za podmazivanje, strana tijela unutar sustava turbopuhala i utjecaj topline.

5.1. Nedostatak ulja za podmazivanje

Turbopuhalo se vrti velikim brzinama do 200.000 okr/min te je iz tog razloga potreba za uljem od visoke važnosti. Ulje se koristi podmazivanje potisnog i kliznog ležaja, a njegova prednost je stabilizacija rotirajućih djelova kao što su osovina i ležajevi, te djeluje kao rashladno sredstvo

Kako se brzina turbopuhala i opterećenje motora povećavaju, tako se i potreba za uljem kao mazivom i rashladnom tekućinom povećava. Ako dođe do zastoja u opskrbi turbopuhala s uljem može doći do kvara ležaja.

Ovaj problem može se prepoznati po promjeni boje ležaja ili vratila. Dijelovi postaju modre boje kao što je prikazano slici 5.1. zbog izloženosti visokim temperaturama koje se ostvaruju u turbopuhalu.



Slika 5.1. Modra boja na vratilu turbopuhala

5.2. Strana tijela ili prljavština u sustavu podmazivanja turbopuhla

Filter ulja nije u mogućnosti zaustaviti svu prljavštinu i strana tijela koja se mogu nalaziti unutar ulja. Strana tijela i prljavština koja se nalazi u ulju mogu dospjeti unutar turbopuhala kao što je prikazano na slici 5.2., te mogu prouzrokovati oštećenje ležajeva te provrta kućišta ležajeva. Ako su čestice prljavštine dovoljno velike mogu dovesti do blokiranja unutarnjih prolaza za ulje turbopuhala.



Slika 5.2. Prljavština unutar ulja

5.3. Strana tijela

Strana tijela poput vijaka, sitnih kamenčića, komada gume mogu dospjeti u sustav usisa zraka turbopuhala i izazvati oštećenje komponenti kompresora ili turbine turbopuhala kao što je prikazano na slici 5.3.. Kako bi se spriječilo oštećenje stranim tijelima od znatne je važnosti da se redovito izmjenjuje filter zraka te provjerava da li turbopuhalo ima oslabljene spojeve gdje bi onečišćenje moglo dospjeti.



Slika 5.3. Oštećenje lopatica turbopuhala

5.4. Pregrijavanje turbopuhala

Do pregrijavanja turbopuhala može doći zbog prekomjerne brze vožnje, duge vožnje pri visokim okretajima, nedostatka rashladnog medija, onečišćivanju filtera zraka, korištenja ulja loše kvalitete, zakašnjenja u servisiranju vozila i zamjeni ulja, kvara u sustavu podmazivanja turbopuhala i pokvarenih injektora.

Pregrijavanje dijelova može proizvesti velike štete poput širenja materijala komponenti turbopuhala, ispadanja rotirajućih dijelova poput rotora kompresora, rotora turbine i vratila iz balansa, oštećenja ležajeva, povećane potrošnje ulja i nastajanje naslaga ugljika(čade).

6. KORACI U REPARACIJI TURBOPUHALA

6.1 Prvobitna dijagnoza

Sastoji se od analize simptoma kao što su gubitak snage, neuobičajeni zvukovi, previše dima u ispušnom sustavu, povećana potrošnja ulja te visoke temperature ispušnog sustava[5].

Ako primijetimo da automobil gubi snagu moguće da je riječ o turbopuhalu koje ne proizvodi dovoljno pretlaka. Ako turbopuhalo ne proizvodi dovoljno pretlaka neki od razloga su mogućnost da sustav propušta, neispravni optočni ventil ili šteta unutar samog turbopuhala.

Neuobičajeni zvukovi poput zviždanja, cviljenja ili mljevenja pokazatelji su istrošenosti ležajevi unutar turbopuhala ili da su lopatice turbokompresora oštećene te da zapinju o kućište.

Plavi ili smeđi dim u ispuhu pokazatelj je da postoji propuštanje ulja unutar turbopuhala. Bijeli dim ukazuje da nam rashladna tekućina propušta u sustav, dok crni dim govori da motor koristi previše goriva odnosno nedostatak zraka unutar smjese goriva i zraka.

Povećana potrošnja ulja može ukazati da ulje curi kroz potrošene brtve unutar turbopuhala. Visoke temperature unutar ispušnog sustava ukazuju na to da je turbopuhalo preopterećeno zbog potencijalnih ograničenja protoka, kvar optočnog ventila ili kvar same ispušne grane.

6.2. Vizualno i funkcionalno testiranje

U ovom koraku provjerava se postoji li protjecanje ulja unutar sustava tako što se pregledava kućište kompresora i turbine. Ulje na strani kompresora pokazivač je problema sa brtvom, što bi rezultiralo prevelikom tlakom ulja ili potrošenim dijelovima.

Labavo vratilo znači da se vratilo može kretati po aksijalnim ili radijalnim osima. Prevelika kretnja može ukazivati da su ležajevi potrošeni ili oštećeni te da je samo vratilo oštećeno. Mala količina radijalnog kretanja su dopuštena, dok aksijalna ne bi smjela postojati.

6.2.1. Testiranje predtlaka na protjecanje van sustava

Korištenjem alata koji omogućavaju provjeru postoji li protjecanje tlaka, usisni sustav stavlja se pod pritisak kako bi provjerili da li se čuje zvuk siktanja koji bi ukazao na protjecanje zraka. Pri ovom testiranju može se koristiti i otopina sapunice koja će preko mjehurića koje proizvodi otkriti mjesto protoka zraka.

6.2.2. Ispravnost optočnog ventila

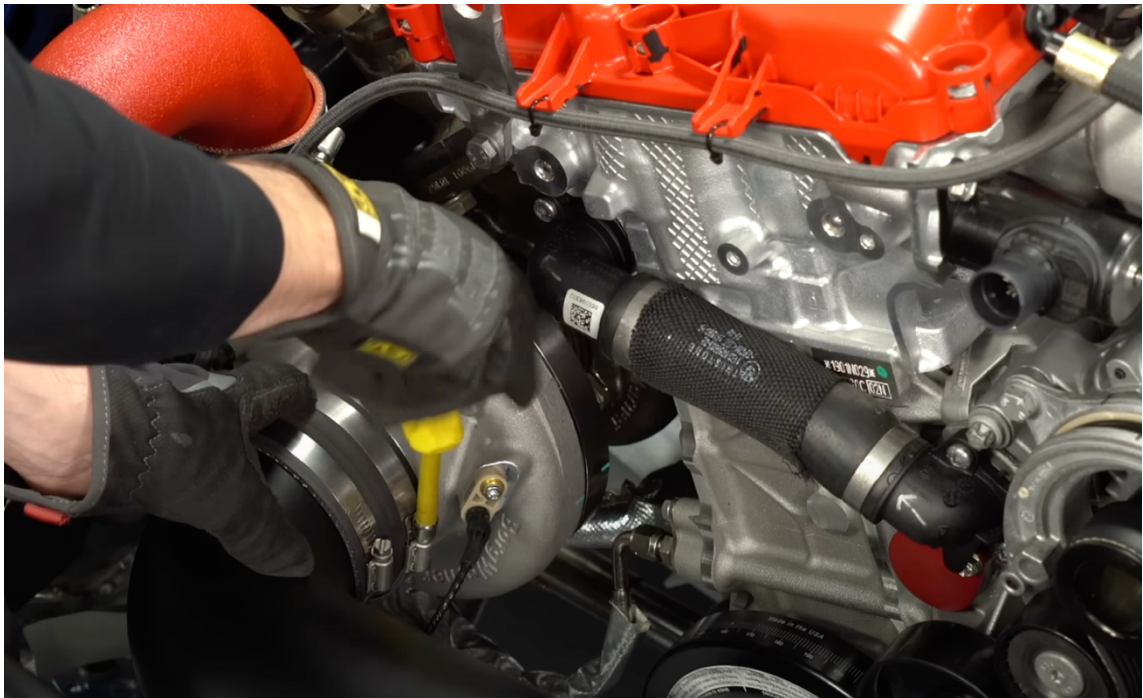
Kroz korak vizualne inspekcije provjerava se ispravnost otvaranja i zatvaranja optočnog ventila. Ako je optočni ventil zaglavio, on može uzrokovati previše ispušnih plinova koji bi preopteretili sustav turbopuhala.

6.3. Rastavljanje turbopuhala s motora

U ovom koraku uklanja se turbopuhalo s motora kao što je prikazano na slici 6.1. a za to je potrebno osigurati sigurnosne mjere i osloboditi prostor oko turbopuhala kako bi se mogao izvaditi iz motornog prostora. Pod sigurnosnim pripremama podrazumijeva se da motor automobila mora biti hladan kako ne bi došlo do opekotina, te baterija mora biti odspojena kako ne bi došlo do električnog udara. Ovisno o dizajnu motora i prostoru u kojem se može pristupiti turbopuhalu moguće je rastavljanje dodatnih komponenti motora, poput usisne grane, intercoolera, a ponekad i ispušne grane.

Sljedeće je rastavljanje ispušne grane sa kućišta turbine i usisne grane s kućišta kompresora. Važno je pripaziti na brtve, te provjeriti da li je potrebno zamijeniti ih novima.

Zadnji korak je skidaje vijaka koji osiguravaju položaj turbopuhala na motoru.



Slika 6.1. Proces rastavljanja turbopuhala sa motora automobila

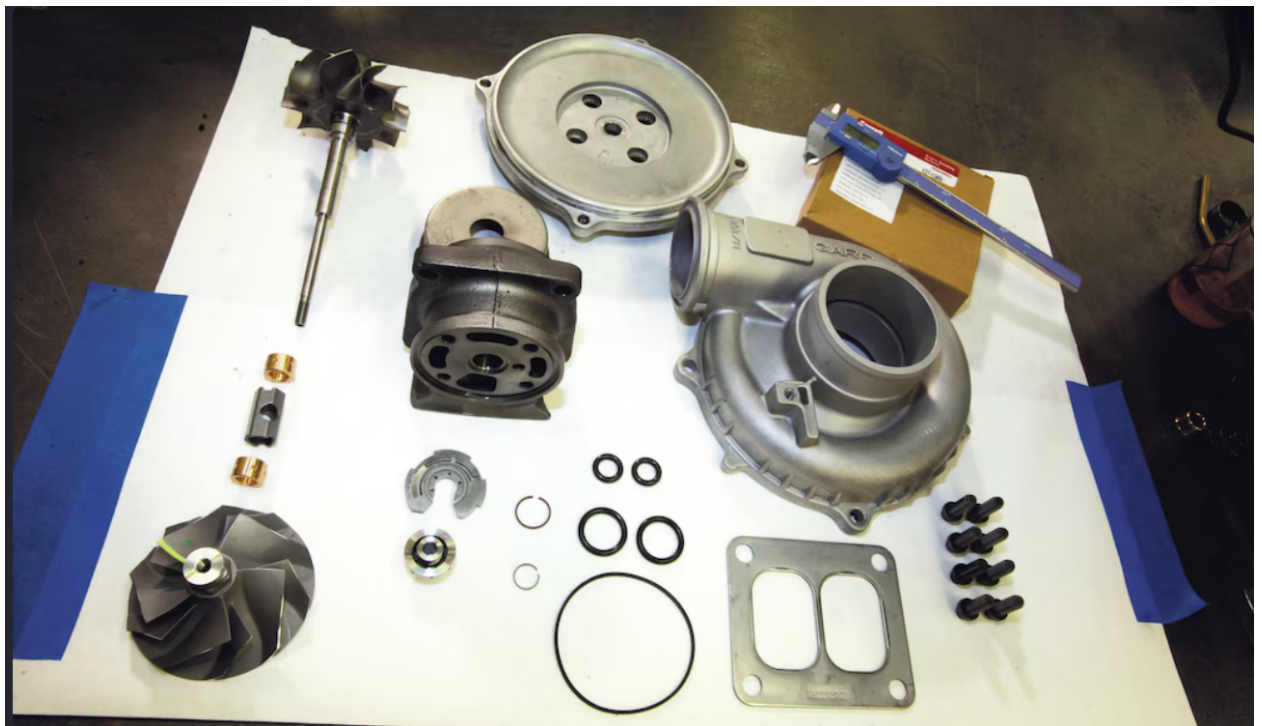
6.4. Rastavljanje turbopuhala

Važno je osigurati pravilan položaj dijelova, to se vrši s oznakama na dijelovima kao što je prikazano na slici 6.2. i dokumentacijom istih. Koristeći markere označava se pravilno poravnavanje kućišta kompresora, kućište turbine i središnjeg rotirajućeg sklopa „CRA“ (center rotating assembly). Ovim postupkom se osigurava da prilikom ponovnog sastavljanja sve komponente budu na ispravnom položaju kako bi se osiguralo balansiranje i pravilno prijanjanje dijelova. Dokumentiranjem kao što je slikanje svakog koraka rastavljanja dijelova osigurava se ispravan redoslijed sastavljanja dijelova.



Slika 6.2. Označavanje položaja dijelova turbopuhala

Proces rastavljanja turbopuhala započinje uklanjanjem kućišta kompresora, nakon uklanjanja važno je provjeriti da li se unutar njega nalaze ostatci ulja ili ako postoji šteta na rotoru kompresora. Zatim se rastavlja kućište turbine te provjerava da li je došlo do pucanja i da li postoje znakovi previsokih temperatura. Ako se optočni ventil nalazi unutar kućišta treba provjeriti da li radi ispravno i postoje li znakove trošenja. Zatim kada su uklonjena oba kućišta može se izvaditi središnji rotirajući sklop koji se sastoji od vratila, rotora kompresora, rotora turbine i ležajeva. Provjerava se sve navedene komponente kao što su prikazani na slici 6.3., na trošenje, nastalo oštećenje i znakove zagađenja uljem.



Slika 6.3. Dijelovi turbopuhala

6.5. Inspekcija i zamjena komponenti

6.5.1. Ležajevi i brtve

Zavisno o tipu turbopuhala koristi se klizni ležaj prikazan na slici 6.4., ili kuglični ležaj. Klizni ležajevi zahtijevaju tlak ulja kako bi držali vratilo u poziciji dok kuglični ležajevi nude smanjeno trenje i bržu reakciju. Treba provjeriti ove dijelove na oštećenja, promjenu boje ili znakove trošenja.

Potisni ležaj podnosi aksijalna opterećenja unutar turbopuhala, zbog toga treba provjeriti znakove trošenja i oštećenja kako bi se utvrdilo da nije došlo do prevelikih opterećenja unutar turbopuhala.

Na poslijetku treba provjeriti brtve ulja prikazane na slici 6.4. na oba kraja vratila, te brtve osiguravaju da ulje ne prelazi unutar kućište kompresora i turbine. Ako su potrošene ili stvrdnute moraju se zamijeniti kako bi se spriječilo propuštanje ulja.

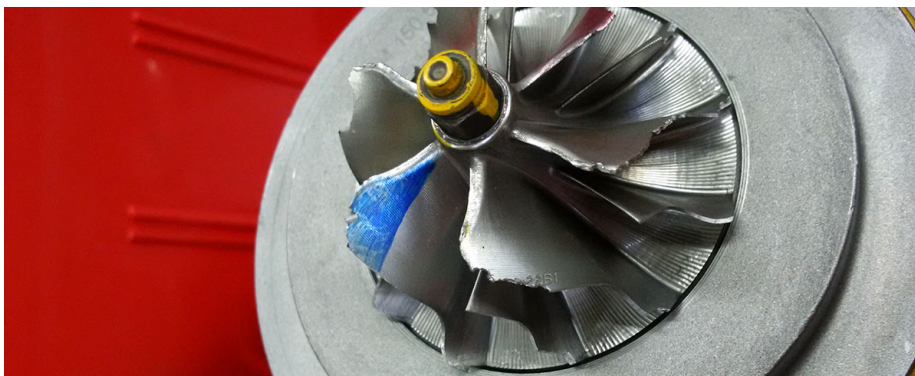


Slica 6.4. Brtva i ležaj turbopuhala

6.5.2. Rotori kompresora i turbine

Sljedeća provjera je pregled da nije došlo do napuknuća kao što je prikazano na slici 6.5., puknuća ili većih znakova trošenja na lopaticama rotora kompresora i turbine. Čak i najmanja oštećenja mogu dovesti do neispravnog rada jer rotor nije u balansu i ne može ispravno raditi, što uzrokuje otkazivanje u radu pri visokim brzinama.

Ako vratilo i rotor pokazuju znakove trošenja, ali su u dovoljno dobrom stanju da se mogu popraviti vrlo je važno da se balansiraju kako ne bi došlo do vibracija ili preuranjenog trošenja brtvi i ležajeva.



Slika 6.5. Puknuće lopatica rotora turbopuhala

6.5.3. Čišćenje

Zbog nakupljanja ugljika, ostataka ulja i krhotina koje su mogle nastati bitno je temeljno očistiti dijelove turbopuhala. U ovom koraku koriste se jednostavne metode čišćenja poput skidanja slojeva električnim ili pneumatskim uređajima prikazanim na slici 6.6. ili ultrazvučno čišćenje kako bi se mogle očistiti geometrije kompleksnih dijelova poput rotora. Nakon čišćenja još jednom treba provjeriti sve dijelove kako bi se utvrdilo da nema dodatnih oštećenja koje zbog nečistoća nisu mogle biti viđene.



Slika 6.6. Proces čišćenja pomoću jednostavnog pneumatskog uređaja za skidanje slojeva

6.6. Sastavljanje turbopuhala

Kod sastavljanja turbopuhala bitno je osigurati precizno balansiranje. Dijelovi rotirajućeg sustava poput vratila, rotora kompresora i rotora turbine moraju biti dinamično balansirana strojem koji je prikazan na slici 6.7. Taj postupak uključuje okretanje sustava na velikim brzinama te dodavanjem sitnih utega kako bi se osiguralo ispravno balansirane dijelova. Ukoliko sustav nije potpuno u balansu može prouzrokovati vibracije i nova oštećenja. Nakon balansiranja dijelova koji se okreću započinje se sastavljanje tako što se spajaju rotor turbine i kompresora sa vratilom pazeći da se osigura ispravno poravnavanje oznakama koje su napravljene. Ovo osigurava da turbopuhalo radi kako je i namijenjeno te da balansirani dijelovi ostanu u centralnim osima.

Nakon montaže rotirajućih dijelova obraća se pažnja na ležajeve, prilikom ugradnje novih ležajeva u centralno kućište potrebno je pripaziti da su točno pozicionirani kako bi se osigurao ispravan položaj prolaza za ulje. Nakon postavljanja ležajeva, postavlja se nova brtva na oba kraja vratila kako bi se osiguralo da ne dođe do curenja ulja. Na posljjetku spajaju se kućišta turbine i kompresora pazeći da budu pravilno postavljeni. Zatezajući vijke pomoću moment ključa osigurava se da ne dođe do preopterećenja vijaka te time se završava proces sastavljanja turbopuhala.



Slika 6.7. Stroj za balansiranje vratila i rotora turbine te kompresora

6.7. Testiranje turbopuhala

Prije ugradnje turbopuhala u vozilo bitno je obaviti nekoliko testiranja kako bi se ispitala točnosti ispravnog postavljanja. Testiranje se vrši u dvoje faze, stolna testiranja i testiranje na protjecanje medija.

Stolna testiranja se sastoje od testiranja protoka i testa okretanja dijelova. Testiranje protoka ulja vrši se prije početka drugih testiranja kako bi se osigurao protok ulja na ležajeve turbopuhala te spriječilo suho pokretanje. Testiranje okretanja dijelova vrši se pri niskim brzinama koristeći komprimirani zrak pomoću uređaja prikazanog na slici 6.8.. Prati se da turbopuhalo ne proizvodi nikakve zvukove, da se dijelovi okreću neometano te da nema nikakvih vibracija. Sustavi bi se trebao okretati nesmetano i tiho, ukoliko je ispravno balansiran.

Testiranja protoka vrši se tako da se obavlja provjera pritiska i testira ispravni rad optočnog ventila. Pritisak se provjerava tako da se pušta stlačeni zrak na stranu kompresora dok se svi drugi otvori drže zatvorenima provjeravajući da zrak ne curi unutar kućišta ili brtvi. Ako dođe do pritjecanja zraka to ukazuje na neispravnost sastavljanja turbopuhala. Prilikom provjere optočnog ventila provjerava se da li pokretač ispravno otvara i zatvara ventil.



Slika 6.8. Uređaj za testiranje okretanja dijelova koji radi po principu niskih brzina

6.8. Ugradnja turbopuhala na motor

Priprema za ugradnju sastoji se pripreme čistih podloga nalijeganja turbopuhala na motor kao što je prikazano na slici 6.9. kako bi se osiguralo dobro brtvljenje prilikom ugradnje važna je upotreba novih brtvi između turbopuhala i motora. Kada se to osigura može se započeti sa ugradnjom turbopuhala pažljivim pozicioniranjem na mjesto ugradnje te pričvršćivanjem vijcima za motor. Nakon toga spajaju se potrebne instalacije poput dopreme ulja i rashladne tekućine. Kao završni korak spajaju se usisna i ispušna grana osiguravajući da su svi vijci i spojevi pravilno stegnuti.



Slika 6.9. Priprema površine nalijeganja turbopuhala na motor

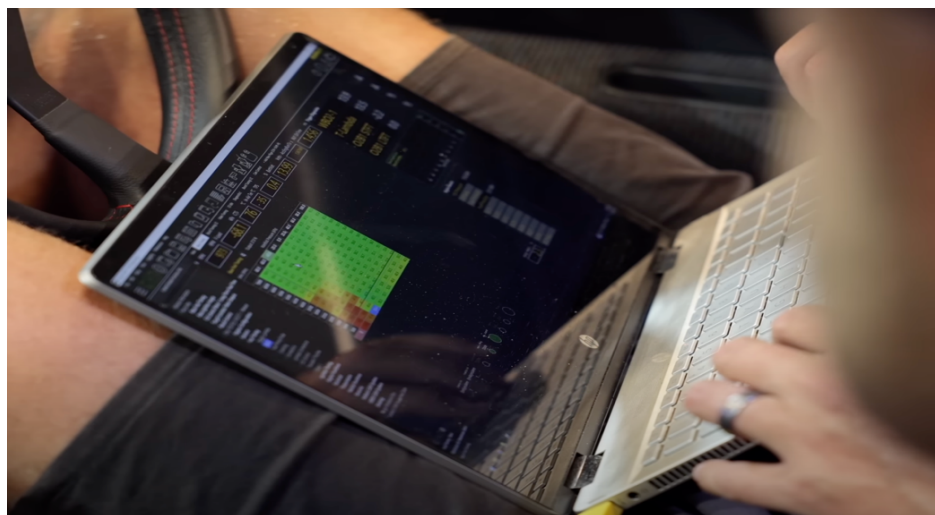
6.9. Završno testiranje i podešavanje

Nakon sastavljanja turbopuhala započinje se sa završnim testiranjem i potrebnim podešavanjem parametara pri kojima turbopuhalo radi kao što je prikazano na slici 6.10. Prije pokretanja motor vozila mora se napuniti turbopuhalo uljem kako bi se spriječilo suho pokretanje koje može uzrokovati trenutnu štetu. Punjenje uljem vrši se ručno punjenjem crijeva za dovod ulja ili pokretanjem motora bez paljenja, motoru se pruža struja kojom pali sustave poput napajanja uljem bez da pokrećemo ostale sustave rada.

Kada je sustav spreman za pokretanje uključuje se vozilo te ga se ostavlja da radi bez dodavanja opterećenja. Dok motor radi prati se turbopuhalo da ne proizvodi neuobičajene zvukove, vibracije ili da ne dolazi do protjecanja ulja. Vrlo je važno obratiti pozornost na pritisak ulja kako bi osigurali da turbopuhalo dobiva dovoljno podmazivanja.

Nakon obavljenih inicijalna testiranja prelazi se na provjeru tlaka prednabijanja koristeći mjerače prednabijanja ili OBD-II dijagnostički alat. Prati se razina tlaka prednabijanja kako se povećava broj okretaja motora kao što je prikazano na slici 6.11.. Tlak bi se trebao jednolično povećavati sve dok ne dođe do određene granice gdje zadovoljava rad motora. Pazeći na tlak prednabijanja treba obratiti pozornost da turbopuhalo ne proizvodi preveliko ili premalo prednabijanje. U slučaju da je tlak prednabijanja visok može doći do oštećenja motora, u suprotnom ako je nizak to znači da postoji problem sa turbopuhalom ili kontrolnim sustavom.

Kao zadnje testiranje nakon ugradnje obavlja se testiranje na cesti koje se vrši u kontroliranim uvjetima postepenim opterećivanjem motora ubrzavajući kroz sve brzine vozila. Ovim testiranjem pratimo performanse turbopuhala pri različitim brojevima okretanja motora i opterećenja.



Slika 6.10. Podešavanje parametara rada turbopuhala



Slika 6.11. Praćenje parametara prilikom testiranja turbopuhala

Slika 6.11. prikazuje dijagnostičko praćenje parametara turbopuhala. S lijeve strane prikazan je zaslon koji prikazuje parametre rada motora, kao što su: brzina, okretni moment i broj okretaja motora. Na desnom zaslonu računala prikazani su parametri tlaka zraka pri prednabijanju koji opisuju rad turbopuhala.

7. NAPREDNE TEHNOLOGIJE PRI POPRAVCIMA TURBOPUHALA

Kako tehnologija napreduje tako napreduju i tehnike popravaka turbopuhala. Danas postoje mnoge napredne tehnologije koje omogućavaju brže i lakše dijagnoze kvarova, metode popravljivanja i načine kontrole turbopuhala. Neke od tih metoda su:

- Napredni dijagnostički alati
- 3D skeniranje
- ultrazvučno čišćenje
- 3D printanje
- krioterapija

7.1. Napredni dijagnostički alati :

Elektroničko kontrolirana dijagnostika prikazana na slici 7.1. sva moderna turbopuhala su električno pokretana sa varijabilnom geometrijom ili elektronički optočnim ventilom, stoga dijagnostički uređaji spajanjem na kompjuter automobila mogu očitati kodove grešaka i pratiti režime rada turbopuhala. [6].

Endoskopska kamera prikazana na slici 7.1.2. – kamera sa visokom rezolucijom sitnih dimenzija omogućava radniku da provjeri unutarnje dijelove bez da rastavlja turbopuhalo. Pomoću ovog uređaja olakšano je kontroliranje lopatica kompresora i turbine.



Slika 7.1. Elektronička dijagnostika.



Slika 7.2. Endoskopska kamera.

7.2. 3D skeniranje

Pomoću 3d skenera prikazanog na slici 7.3. može se generirati točne digitalne modele preko kojih se može pratiti znakove trošenja ili moguća oštećenja[7].

Ova tehnologija je pogodna za konstrukciju dijelova koji se više ne proizvode te za kontrolu kvalitete postupka reparacije.



Slika 7.3. 3D skeniranje turbopuhala.

7.3. Ultrazvučno čišćenje

Korištenjem uređaja kao na slici 7.4. koji radi pomoću valova visoke frekvencije kako bi se aktivirala otopina za čišćenje skidamo naslage ugljika, ulja ili drugih nakupina sa komponenti turopuhala[8]. Ova tehnologija je učinkovitija od tradicionalnog čišćenja jer osigurava temeljito skidanje naslaga bez mogućnosti da oštećenja dijelova.



Slika 7.4. Ultrazvučno čišćenje dijelova turbopuhala.

7.4. 3D printanje

Pomoću tehnologije 3D printanja dobiva se mogućnost izrade zamjenskih dijelova kao što je prikazano na slici 7.5., izrade dijelova za starije modele turbopuhala koji se više ne proizvode[7]. Osim izrade zamjenskih dijelova postoji mogućnost izrade dijelova visokih performansi te dijelova za specijalne upotrebe kao što su poboljšani usis zraka ili bolja izdržljivost materijala.



Slika 7.5. 3D printano kućište turbopuhala

7.5. Krioterapija

Pomoću postupka prikazanog na slici 7.6. dijelovi se postepeno hlade na vrlo niske temperature od $-185\text{ }^{\circ}\text{C}$ stupnjeva kako bi se pospješila čvrstoća i trajnost materijala[9]. Zahvaljujući ovoj obradi smanjuje se zaostala naprezanja i povećavamo otpornost materijala na trošenje dijelova poput vratila i ležajeva turbopuhala.



Slika 7.6. Postupak krioterapije.

8. TEHNIČKI OPIS MOTORA

Bmw-ov motor pod oznakom N47D20 prikazan na slici 8.1. je dvolitreni redni četverocilindrični turbo dizelski motor koji se koristio od 2007. do 2014. godine u modelima E87, E81, E60 u E90 te je proizvodio od 85 kW do 160 kW zavisno o varijanti motora[10].

Ključne značajke ovog motora su što koristi turbopuhalo s varijabilnom geometrijom, ubrizgavanje goriva po sustavu common rail visokog pritiska, opremljen je filterom čestica tj. DPF filterom, te razvodi lanac mu se nalazi sa stražnje strane motora.

N47 nastavak je na motor M47, te glavne razlike su materijal izrade i položaj pogonskog lanca. Motor N47 izrađen je od aluminija te mu se lanac nalazi sa stražnje strane dok motor M47 je izrađen od čelika te je lanac s prednje strane.

8.1. Tablica tehničkog opisa BMW E90 N47D20 motora.

BMW N47D20 motor		
Broj cilindara	4	/
Zapremnina	1995	ccm
Snaga	130	kW
Okretni moment	350	Nm



Slika 8.1. N47D20 motor.

9. ZADATAK

Četverotaktni dizelski motor sa 4 cilindra u liniji s prednabijanjem i hlađenjem zraka namijenjen je za pogon automobila ima promjer cilindra 84 mm i stapaj 90 mm i omjer kompresije 16.5:1[11]. Motor usisava zrak atmosferskog tlaka i temperature 30 °C, stupanj povećanja tlaka je 2,5 a stupanj povećanja volumena je 1,6. Plinska konstanta zraka iznosi 287 J/kgK, a eksponent adijabate je 1,4. Ogrjevna moć goriva je 43,5 MJ/kg.

Motor proizvodi snagu od 130 kW i okretni moment 350 Nm. Potrošnja goriva je 26 kg/h, protok rashladne vode $m_{rv} = 1$ kg/s pri promjeni temperature za $\Delta T_{rv} = 6$ °C.

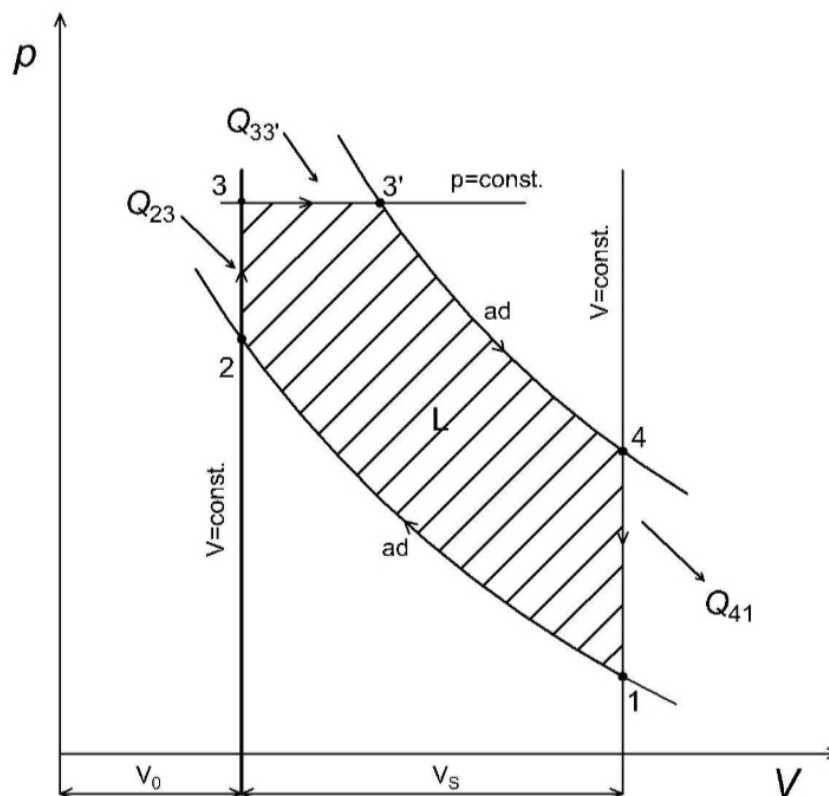
-protok zraka za izgaranje u motoru $m_z = 0,2$ kg/s

-zrak za izgaranje se nakon prednabijanja ohladi za $\Delta T_z = 8$ °C

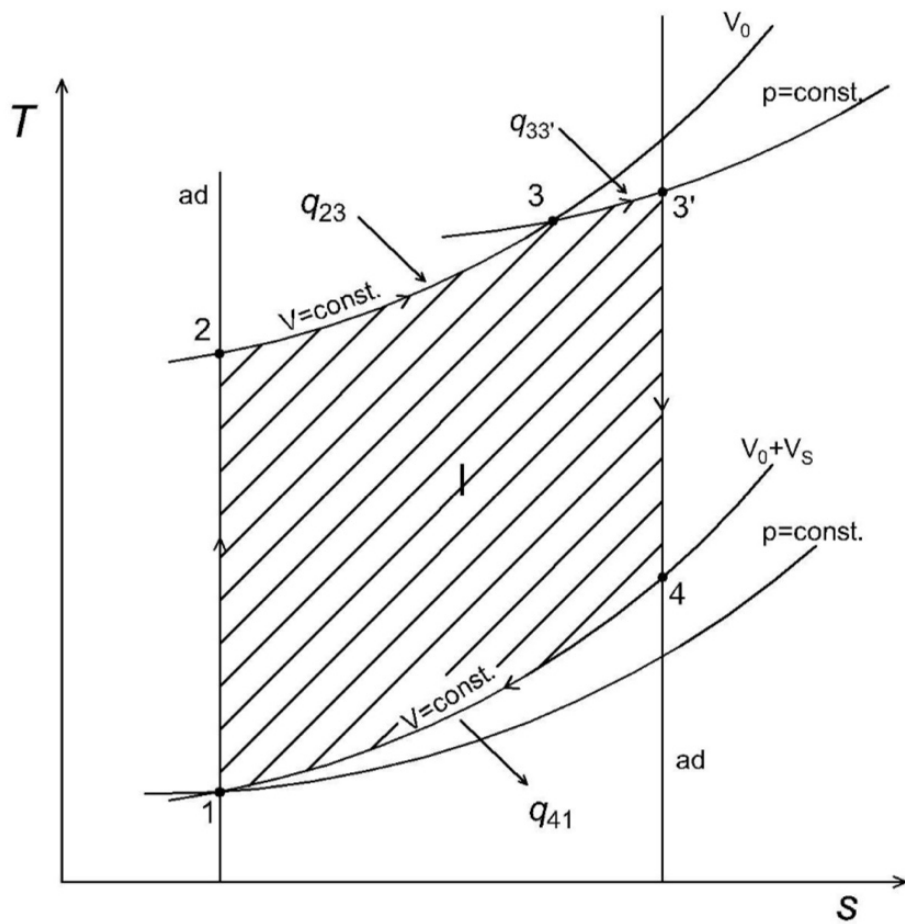
-temperatura ispušnih plinova na izlazu iz turbine turbopuhala iznose $\Delta T_z = 550$ °C

-ogrijevna moć goriva iznosi 43,3 MJ/kg

Temperatura okolnog zraja je $T_0 = 30$ °C, specifična toplina zraka je 1 003,5 J/kgK, a ispušnih plinova na temperaturi ispuha 1 169 J/kgK



Slika 9.1. Sabatheov proces u p-V dijagramu.



9.2. Sabatheov proces u T-s dijagramu.

a) Karakteristični volumeni

Stapajni volumen:

$$V_s = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot s = \frac{0,084^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,09 = 4,99 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (9.1)$$

Kompresijski volumen:

$$V_c = \frac{V_s}{\varepsilon - 1} = \frac{4,99 \cdot 10^{-4}}{16,6 - 1} = 3,22 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (9.2)$$

b) Temperatura, tlak i volumen u karakterističnim točkama

Točka 1:

$$V_1 = V_{max} = V_s + V_c = 4,99 \cdot 10^{-4} + 3,22 \cdot 10^{-5} = 5,31 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (9.3)$$

iz $p_1 V_1 = m_1 R T_1$ dobijemo:

$$m_1 = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 5,31 \cdot 10^{-4}}{287 \cdot 303} = 6,11 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \quad (9.4)$$

Točka 2:

1-2: adijabatska promjena stanja

$$V_2 = V_c = 3,22 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (9.5)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\kappa$$

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\kappa = 1 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{5,31 \cdot 10^{-4}}{3,22 \cdot 10^{-5}}\right)^{1,4} = 50,6 \text{ bar} \quad (9.6)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} = 303 \cdot \left(\frac{5,31 \cdot 10^{-4}}{3,22 \cdot 10^{-5}}\right)^{1,4-1} = 929,7 \text{ K} \quad (9.6)$$

Točka 3:

2-3: izohorna promjena stanja

$$V_3 = V_2 = V_c = 3,22 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (9.7)$$

$$\frac{p_3}{p_2} = \psi = 2,5$$

$$p_3 = 2,5 \cdot p_2 = 2,5 \cdot 50,6 = 126,5 \text{ bar} \quad (9.8)$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2}$$

$$T_3 = T_2 \cdot \frac{p_3}{p_2} = 929,7 \cdot \frac{126,5}{50,6} = 2324,3 \text{ K} \quad (9.10)$$

Točka 3'

3-3' izobarna promjena stanja

$$p_3' = p_3 = 126,5 \text{ bar} \quad (9.11)$$

$$\frac{T_3'}{T_3} = \varphi = 1,6$$

$$T_3' = T_3 \cdot \varphi = 2324,3 \cdot 1,6 = 3718,8 \text{ K} \quad (9.12)$$

$$\frac{V_3'}{V_3} = \frac{T_3'}{T_3}$$

$$V_3' = V_3 \cdot \frac{T_3'}{T_3} = 3,22 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{3718,8}{2324,3} = 5,15 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (9.13)$$

Točka 4

3'-4 abijabatska promjena stanja

$$V_4 = V_{max} = V_1 = 5,31 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (9.14)$$

$$\frac{p_4}{p_3'} = \left(\frac{V_3'}{V_4} \right)^\kappa$$

$$p_4 = p_3' \cdot \left(\frac{V_3'}{V_4} \right)^\kappa = 126,5 \cdot \left(\frac{5,15 \cdot 10^{-5}}{5,31 \cdot 10^{-4}} \right)^{1,4} = 4,8 \text{ bar} \quad (9.15)$$

$$\frac{T_4}{T_3'} = \left(\frac{V_3'}{V_4} \right)^{\kappa-1}$$

$$T_4 = T_3' \cdot \left(\frac{V_3'}{V_4} \right)^{\kappa-1} = 3718,8 \cdot \left(\frac{5,15 \cdot 10^{-5}}{5,31 \cdot 10^{-4}} \right)^{1,4-1} = 49,75 \text{ K} \quad (9.16)$$

c) Termodinamički stupanj djelovanja

$$\begin{aligned} \eta_{T,Sabathe} &= 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\psi \cdot \varphi^\kappa - 1}{(\psi - 1) + \psi \cdot \kappa \cdot (\varphi - 1)} \quad (9.17) \\ &= 1 - \frac{1}{16,5^{1,4-1}} \cdot \frac{2,5 \cdot 1,6^{1,4} - 1}{(2,5 - 1) + 2,5 \cdot 1,4 \cdot (1,6 - 1)} = 0,6536 \end{aligned}$$

Gdje su:

$\eta_{T,Sabathe}$ – stupanj djelovanja Sabatheovog procesa

ε - stupanj kompresije

κ - eksponent adijabate

ψ - stupanj povećanja tlaka

φ - stupanj povećanja volumena

d) Efektivni stupanj djelovanja

$$\eta_{ef} / \eta_{T,Sabathe} = 0,65 \quad (9.18)$$

$$\eta_{ef} = 0,65 \cdot \eta_{T,Sabathe} = 0,65 \cdot 0,6536 = 0,4248$$

Gdje su:

η_{ef} – efektivni stupanj djelovanja

$\eta_{T,Sabathe}$ – stupanj djelovanja Sabatheovog procesa

e) Potrošnja goriva

$$\dot{m}_g = \frac{m_g}{3600} = \frac{26}{3600} = 7,22 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (9.19)$$

Gdje je:

\dot{m}_g – potrošnja goriva u kg/s

m_g – potrošnja goriva u kg/h

f) Specifična potrošnja goriva:

$$BSFC = \frac{\dot{m}_g \cdot 3600}{P_{ef}} = \frac{7,22 \cdot 10^{-3}}{130} = 0,1999 \text{ kg/kWh} \quad (9.20)$$

gdje je:

BSFC – specifična potrošnja goriva

\dot{m}_g – masa goriva u kg/s,

P_{ef} – efektivna snaga motora.

g) Toplinski tok doveden gorivom

$$\begin{aligned} \dot{Q}_g &= \dot{m}_g \cdot H_d = 7,22 \cdot 10^{-3} \cdot 43,5 \cdot 10^6 \\ &= 314166,67 \text{ W} = 314,17 \text{ kW} \end{aligned} \quad (9.21)$$

gdje je:

\dot{Q}_g - Specifični toplinski tok doveden gorivom,

\dot{m}_g - masa goriva u kg/s,

H_d – ogrjevna moć sadržana u gorivu.

h) Toplinski tok predan rashladnoj vodi

$$\dot{Q}_{rv} = \dot{m}_{rv} \cdot c_p \cdot \Delta T_{rv} = 1 \cdot 4187 \cdot 6 = 25122 \text{ W} = 25,12 \text{ kW} \quad (9.22)$$

gdje je:

\dot{Q}_{rv} - toplinski tok predan rashladnoj vodi,

\dot{m}_{rv} – maseni maseni protok rashladne vode,

c_p - specifična toplina zraka,

ΔT_{rv} - promjena temperature rashladne vode,

i) Toplinski tok odveden zraku za izgaranje nakon prednabijanja (intercooler)

$$\dot{Q}_z = \dot{m}_z \cdot c_p \cdot \Delta T_z = 0,2 \cdot 1003,5 \cdot 80 = 16056 \text{ W} = 16,05 \text{ kW} \quad (9.23)$$

gdje je:

Q_z - toplinski tok odveden u zrak,

m_z - maseni protok zraka za izgaranje,

c_p – specifična toplina zraka,

ΔT_z – promjena temperature zraka nakon prednabijanja,

j) Toplinski tok odveden ispušnim plinovima

$$\dot{m}_{isp} = \dot{m}_g + \dot{m}_z = 7,22 \cdot 10^{-3} + 0,2 = 0,207 \text{ kg/s} \quad (9.24)$$

gdje je :

m_{isp} - toplinski protok odveden ispušnim plinovima,

m_z - maseni protok zraka za izgaranje,

m_g – maseni protok goriva,

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{isp} &= \dot{m}_{isp} \cdot c_{p,isp} \cdot (T_{isp} - T_0) \\ &= 0,207 \cdot 1160 \cdot (550 - 30) = 124862,4 \text{ W} = 124,86 \text{ kW} \end{aligned} \quad (9.25)$$

gdje je:

Q_{isp} - toplinski tok odveden ispušnim plinovima,

m_{isp} – maseni protok ispušnih plinova,

$c_{p,isp}$ – specifična toplina ispušnih plinova,

T_{isp} – temperatura ispušnih plinova na izlazu iz turbine turbopuhala,

T_0 – temperatura okoline.

k) Preostali toplinski tok predan okolnom zraku:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ostalo} &= \dot{Q}_g - (\dot{Q}_{rv} + \dot{Q}_z + \dot{Q}_{isp} + P_{ef}) \\ &= 314,17 - (25,12 + 16,05 + 124,86 + 130) = 18,12 \text{ kW} \end{aligned} \quad (9.26)$$

gdje je:

Q_{ostalo} – preostali toplinski gubitci,

Q_g – specifični toplinski protok doveden gorivom,

Q_{rv} – toplinski tok predan rashladnoj vodi,

Q_z – Toplinski protok odveden zraku nakon prednabijanja,

Q_{isp} – toplinski protok odveden ispušnim plinovima,

P_{ef} – efektivna snaga motora.

10. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog završnog rada bio je opisati sustav prednabijanja automobilskog motora i navesti njegove komponente. Sustav turbopuhala radi pri ekstremnim uvjetima kao što su velike brzine vrtnje i razvijene temperature unutar samog sustava. Zbog tih uvjeta rada i vanjskih utjecaja dolazi do kvara sustava. U ovom završnom radu upoznali smo se sa razlozima kvarova turbopuhala te razradili proces reparacije. Reparacija turbopuhala ima ekonomski povoljan utjecaj, jer sama zamjena i popravci dijelova turbopuhala su znatno jeftinija nego zamjena cijelog sustava. Ne smijemo zanemariti ni ekološki utjecaj reparacije turbopuhala, jer popravljanjem dijelova turbopuhala znatno smanjujemo suvišno odlaganje starih dijelova.

LITERATURA

- [1] Ivanauto: „Povjest turbokompresora“ s interneta <https://turbo-servis.ba/povijest/> 23. kolovoz 2024.
- [2] Medica V. knjiga: „Motori“, predavanje 10. 23.kolovoz 2024.
- [3] Martan, A. : Sustav prednabijanja motora s unutarnjim izgaranjem 23. kolovoz 2024.
- [4] Phessio: „The 5 most common causes of turbocharger fails“ s interneta <https://www.phessio.com/turbocharger-faults/> 23. kolovoz 2024.
- [5] Espino J.: „Step by step: Rebuild a turbo“ s interneta <https://www.motortrend.com/how-to/step-by-step-rebuild-a-turbo/> 23. kolovoz 2024.
- [6] Turboclinic, s interneta <https://turboclinic.com/portfolio/turboscope/> 23. kolovoz 2024
- [7] Marsh: „Koengsegg 3D-printing for production vehicles“ s interneta <https://hackaday.com/2014/05/10/koenigsegg-3d-printing-for-production-vehicles/> 23. kolovoz 2024.
- [8] Turbo wash s interneta: <https://turbowash.ie/ultrasonic-turbocharger-cleaning/> 23.kolovoz 2024.
- [9] Nitro Freeze s interneta: <https://www.nitrofreeze.com/cryogenic-treatment-for-turbochargers/> 23. kolovoz 2024.
- [10] El Guardiola, s interneta <https://mymotorlist.com/engines/bmw/n47d20/> 23. kolovoz 2024.
- [11] Senčić, T. Zbirka zadataka „Toplinski strojevi i uređaji“ 23. kolovoz 2024.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Chevrolet Corvair Monza.....	10.
Slika 3.1. Shema izvedbe mehaničkog turbopuhala.....	12.
Slika 3.2. Shema klipnog motora s prednabijanjem turbopuhalom i hladnjakom zraka.....	13.
Slika 3.3. Podjela sustava prednabijanja turbopuhalom.....	13.
Slika 3.4. Turbopuhalo sa optočnim ventilom.....	15.
Slika 4.1. Turbopuhalo pogonjeno električnim sustavom.....	17.
Slika 4.2. PowerPulse tehnologija na motoru.....	18.
Slika 4.3. Dvostruko punjenje turbopuhala.....	19.
Slika 4.5. Podesive lopatice geometrijski varijabilnog turbopuhala.....	20.
Slika 5.1. Modra boja na vratilu turbopuhala.....	21.
Slika 5.2. Prljavština unutar ulja.....	22.
Slika 5.3. Oštećenje lopatica turbopuhala.....	23.
Slika 6.1. Proces rastavljanja turbopuhala sa motora automobila.....	26.
Slika 6.2. Označavanje položaja dijelova turbopuhala.....	26.
Slika 6.3. Dijelovi turbopuhala.....	27.
Slika 6.4. Brtva i ležaj turbopuhala.....	28.
Slika 6.5. Puknuće lopatica rotora turbopuhala.....	29.
Slika 6.6. Proces čišćenja pomoću jednostavno pneumatskog uređaja za skidanje slojeva.....	30.
Slika 6.7. Stroj za balansiranje vratila i rotora turbine i kompresora.....	31.
Slika 6.8. Uređaj za testiranje okretanja dijelova koji radi po principu niskih brzina.....	32.
Slika 6.9. Priprema površine nalijeganja turbopuhala na motor.....	33.
Slika 6.10. Podešavanje parametara rada turbopuhala.....	34.
Slika 6.11. Praćenje parametara prilikom testiranja turbopuhala.....	34.

Slika 7.1. Elektronička dijagnostika.....	35.
Slika 7.2. Endoskopska kamera.....	36.
Slika 7.3. 3D skeniranje turbopuhala.....	36.
Slika 7.4. Ultrazvučno čišćenje dijelova turbopuhala.....	37.
Slika 7.5. 3D printano kućište turbopuhala.....	37.
Slika 7.6. Postupak krioterapije.....	30.
Slika 8.1. N47D20 motor.....	39.
Slika 9.1. Sabatheov proces u p-V dijagramu.....	40.
Slika 9.2. Sabatheov proces u T-s dijagramu.....	41.

POPIS OZNAKA

Oznaka	Naziv	Jedinica
P_{ef}	Efektivna snaga motora	kW
\dot{m}_z	Maseni protok zraka za izgaranje	kg/s
\dot{m}_g	Specifična masa goriva	kg/s
H_d	Ogrjevna moć goriva	MJ/kg
η_{ef}	Efektivni stupanj djelovanja	%
\dot{m}_{rv}	Maseni protok rashladne vode	kg/s
c_p	Specifična toplina zraka	kJ/kgK
ΔT_{rv}	Promjena temperature rashladne vode	°C
Q_{rv}	Toplinski tok predan rashladnoj vodi	kW
Q_z	Toplinski tok odveden u zrak	kW
Q_{isp}	Toplinski tok odveden ispušnim plinovima	kW
T_{isp}	Temperatura ispušnih plinova na izlazu iz turbine turbopuhala	°C
T_0	Temperatura okolnog zraka	°C
Q_{ostalo}	Preostali toplinski gubitci	kW
$BSFC$	Specifična potrošnja goriva	kg/kWh
D	Promjer cilindra	mm
s	Stapaj	mm
V_s	Stapajni volumen	m ³
V_c	Kompresijski volumen	m ³

Oznaka	Naziv	Jedinica
R	Plinska konstanta zraka	J/kgK
ψ	Stupanj povećanja tlaka	
φ	Stupanj povećanja volumena	
ε	Stupanj kompresije	
κ	Eksponent adijabate	
p	Tlak	bar
$\eta_{T,Sabathe}$	Stupanj djelovanja Sabatheovog procesa	%

SAŽETAK

Zadatak ovog rada bio je opisati proces reparacije turbopuhala automobilskog motora. Opisan je sustav prednabijanja motora i navedene trenutne tehnike poboljšanja tog sustava. Kako je ovaj sustav komplicirane i precizne izvedbe, važno nam je osigurati ispravan rad turbopuhala. Postoje razni razlozi koji dovode do kvarova turbopuhala, a mogu se svesti na četiri glavna uzročnika. Opisan je detaljan pristup u reparaciji turbopuhala koji nas vodi kroz svaki korak, kako reparacija bila uspješna i ispravna. Također navedene su i napredne tehnologije u pristupu reparacije turbopuhala koje nam daju u uvid koliko tehnologija napreduje i osigurava nam brži i kvalitetniji proces reparacije turbopuhala. Za kraj prikazan je proračun BMW-ovog motora sa sustavom prednabijanja koji nam pokazuje dovedene i odvedene topline te stupan djelovanja od 42 %.

Ključne riječi: sustav prednabijanja, turbopuhalo, reparacija.

SUMMARY

The purpose of this work was to describe the process of repairing a turbocharger in a car engine. The engine's turbocharging system is described, along with current techniques for improving this system. Given that this system is complex and requires precise execution, it is crucial to ensure the proper functioning of the turbocharger. There are various reasons that can lead to turbocharger failures, which can be categorized into four main causes. A detailed approach to turbocharger repair is outlined, guiding us through each step to ensure the repair is successful and correct. Additionally, advanced technologies in turbocharger repair are mentioned, providing insight into how technology is advancing and ensuring a faster and higher-quality repair process. Finally, a calculation for a BMW engine with a turbocharging system is presented, showing the input and output heat and an efficiency rate of 42%.

Keywords: turbocharging system, turbocharger, repair.

PRILOZI

Tablica 8.1. Tehnički opis BMW E90 N47D20 motora.....37.

Sklopni crtež turbopuhala

Radionički crtež kućišta kompresora

Radionički crtež kućišta ležaja

Radionički crtež kućišta turbine

Radionički crtež rotora kompresora

Radionički crtež brtve

Radionički crtež vratila i rotora turbine

Radionički crtež spojnice

Radionički crtež zaštitnog poklopca