

# Analiza oštećenja pogonskog lanca motora s unutrašnjim izgaranjem

---

Pejić, Fran

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:158772>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-01**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Fran Pejić**

Zagreb, 2025. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Dr. sc. Dalibor Videršćak

Student:

Fran Pejić

Zagreb, 2025. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorima prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu i dr. sc. Daliboru Viderščaku, kao i mr.sc. Krunoslavu Ormužu na nesebičnoj pomoći, savjetima, uputama i motivaciji prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem i djelatnicima Laboratorija za precizna mjerenja dužine i Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale FSB-a na pruženoj pomoći i podršci prilikom laboratorijske analize.

Fran Pejić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Fran Pejić** JMBAG: **0035234243**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza oštećenja pogonskog lanca motora s unutrašnjim izgaranjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of timing chain damage of internal combustion engine**

Opis zadatka:

Pogonski lanac u motorima s unutrašnjim izgaranjem ključna je komponenta za prijenos snage između radilice i bregastog vratila, čime osigurava pravovremeno otvaranje i zatvaranje ventila. S obzirom na dinamička opterećenja i visoke temperaturne uvjete kojima je lanac izložen, može doći do različitih oblika oštećenja, kao što su trošenje, deformacije i lomovi.

U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati funkciju pogonskog lanca te navesti najčešće materijale od kojih se pogonski lanac izrađuje. Potrebno je navesti i zahtjeve koji se postavljaju na pogonski lanac tijekom dugotrajnog rada.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je napraviti laboratorijske analize materijala oštećenog pogonskog lanca. To uključuje analizu mikrostrukture te ispitivanje osnovnih mehaničkih svojstava. Na temelju rezultata ispitivanja potrebno je definirati ključne uzroke oštećenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauerl

dr. sc. Dalibor Viderščak

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.

2. rok: 10. i 11. 7. 2025.

3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.

2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.

3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	8
1.1. Uloga razvodnog mehanizma .....	8
2. TIPIČNE IZVEDBE RAZVODNOG MEHANIZMA S OBZIROM NA BROJ I POLŽAJ BREGASTOG VRATILA I VRSTE POGONA .....	9
2.1. Tipične izvedbe .....	9
2.2. Pogon razvodnog mehanizma .....	11
3. ZUPČASTI REMEN .....	12
3.1. Remen pogonjen u ulju .....	13
4. ....	14
ZUPČANICI (ČELNICI) .....	15
5. RAZVODNI LANAC .....	16
5.1. Materijali za izradu razvodnog lanca i njegova trajnost .....	17
5.2. Proračun razvodnog lanca .....	19
5.2.1. Potrebna udarna snaga[2] .....	20
5.2.2. Prijenosni odnos i duljina lanca[2] .....	21
5.2.3. Izračun broja članaka lanca[2] .....	21
5.2.4. Proračun sigurnosti .....	22
6. ISPITIVANJE PREKIDNE ČVRSTOĆE LANCA .....	26
6.1. Ispitivanje radi utvrđivanja sukladnosti .....	26
6.1.1. Stepenasti test .....	27
6.1.2. Proračun vijeka trajanja .....	27
7. LABORATORIJSKA ANALIZA OŠTEĆENOG POGONSKOG LANACA .....	30
7.1. Predmet laboratorijske analize .....	30
7.2. Mjerenje dimenzija elemenata lanca .....	30
7.3. Analiza materijala oštećenog pogonskog lanca .....	33
7.4. Analiza rezultata .....	34
8. ZAKLJUČAK .....	36
LITERATURA .....	37

**POPIS SLIKA**

Slika 1: Tipične izvedbe (konstrukcije) razvodnog mehanizma.....	10
Slika 2: Konstrukcijske izvedbe pogona razvodnog mehanizma.....	11
Slika 3: Set zupčastog remena.....	12
Slika 4: Prikaz ugradnje zupčastog remena s remenicama, ležajevima i natezačem.....	13
Slika 5: Prikaz izvedbe pogona razvodnog mehanizma sa čelnicima.....	15
Slika 6: Prikaz izvedbe pogona razvodnog mehanizma s lancem.....	16
Slika 7: Set lanaca i klizača.....	18
Slika 8: SOHC razvodni sustav s lancem.....	19
Slika 9: Dimenzije jednostrukog lanca prema standardu DIN 8187.....	22
Slika 10: Tipični primjeri učvršćenja lanaca pri ispitivanju prekidne čvrstoće, ISO 15654.....	26
Slika 11: Rabljeni lanac razvodnog mehanizma s prikazanim oštećenjima.....	31
Slika 12: Uspoređivanje dužine lanca.....	31
Slika 13: Prikaz mjernih rezultata iz mjernog sustava laboratorija.....	32
Slika 14: Uređaj za mjerenje tvrdoće materijala PMT-3Y4.2.....	33

**POPIS TABLICA**

Tablica 1: Specifikacija jednostrukih valjkastih lanaca prema standardu DIN 8187 .....	24
Tablica 2: Tehničke značajke automobila analiziranog pogonskog lanca razvoda.....	30
Tablica 3: Mjerni rezultati otvora spojnice članka lanca.....	32
Tablica 4: Rezultati mjerenja tvrdoće .....	34



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Mjerna Jedinica	Opis oznake
A	[cm <sup>2</sup> ]	površina zglobova (prema DIN 8187)
a'	[mm]	inicijalni razmak osi lančanika
a	[mm]	točan razmak osi
d		promjer diobene kružnice
d1	[mm]	promjer diobene kružnice pogonskog lančanik
d2	[mm]	promjer diobene kružnice gonjenog lančanika
f		proračunski faktor (prema DIN 8195)
F <sub>G</sub>	[N]	ukupna vučna sila tj. najveća vučna sila u lančanoj traci
F	[N]	izračunata vučna sila lanca proizašla iz snage koju treba prenijeti
Ff	[N]	izračunata centrifugalna sila u svakoj traci
FM	[kN]	lomna sila lanca (prema DIN 8187)
FR	[kN]	dopuštena vučna sila u traci lanca za valjke
k		faktor snage za faktor udara c (prema DIN 8195)
L	[mm]	duljina lanca
m		faktor nošenja lanca, kod jednostrukih lanaca je $m = 1$
$n_1$	[sek <sup>-1</sup> ]	broj okretaj pogonskog lančanika,
$n_2$	[sek <sup>-1</sup> ]	broj okretaj gonjenog lančanika
$n_z$		faktor broja zubi (prema DIN 8196)
OHV		Gornji razvod (engl. Overhead Valve)
SOHC		Gornji razvod(engl. <i>Single Overhead Camshaft</i> ) -
DOHC		Gornji razvod (engl. <i>Double Overhead Camshaft</i> )
CIH		Gornji razvod (engl. <i>Camshaft In Head</i> )
CE		Razvod bez bregaste osovine (engl. <i>Camless Engines</i> )
P	[kW]	snaga koju lancem treba prenijeti
P <sub>D</sub>	[kW]	udarna snaga reducirana na jednostruki lanac
p	[mm]	korak lanca (prema DIN 8187)
p <sub>v</sub>	[N/cm <sup>2</sup> ]	postojeći površinski tlak u zglobovima
SM		sigurnost spojnice protiv loma
tr		faktor vrste lanca (prema DIN 8195)

---

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna Jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
v	[m/s]	brzina lanca
X		broj članaka lanca koji se zaokružuje na cijeli broj
q	[kg/m]	masa lanca po metru duljine (prema DIN 8187)
y		značajka udara (prema DIN 8195)
$\lambda_r$		faktor vijeka trajanja za valjke prema željenom vijeku trajanja Lh (prema DIN 8195)

**SAŽETAK**

Motori s unutarnjim izgaranjem su izuzetno zastupljeni kao pogonski agregati različitih agregata, radnih strojeva, traktora, teretnih vozila, osobnih automobila, motocikla i sl.

Upravljanje izmjenom radnog medija je posebno zahtjevna zadaća koju treba obaviti za pouzdan, kvalitetan i efikasan rad svakog motora s unutarnjim izgaranjem. Upravo je razvodni mehanizam motora zadužen za obavljanje ove zadaće.

U ovom radu su ukratko opisane različite izvedbe razvodnog mehanizma motora s unutarnjim izgaranjem, način njihovih pogona, te materijale iz kojih se izvode pogonski članovi razvodnog mehanizma.

Detaljnije su obrađeni razvodni mehanizmi pogonjeni lancem, s fokusom upravo na lanac kao vrlo važan faktor pouzdanosti rada cijelog mehanizma.

U teorijskom dijelu su prikazane osnove za proračun i odabir lanaca, materijali iz kojih se oni proizvode te standardi bitni za ispitivanje konstrukcije lanaca.

U praktičnom (eksperimentalnom) dijelu je provedena detaljna laboratorijska analiza materijala oštećenog lanca. Također je obavljena usporedba geometrijskih značajki jednog novog lanca (lanac za pogon motora oznake: N47D20, proizvođač BMW) sa oštećenim lancem korištenim u automobilu koji je prešao put od 230 000 km. Utvrdilo se da trošenjem lanca tijekom rada dolazi do promjene njegovih geometrijskih značajki (produljenje lanca, povećanje zazora u njegovim člancima) što posredno ima utjecaj na ispravan i kvalitetan rad motora.

Promjenu geometrijskih karakteristika (do određene granice) kompenzira sustav za natezanje lanca, pa je njegova ispravnost izuzetno važna siguran i kvalitetan rad motora.

**Ključne riječi:**

razvodni mehanizam, lanac, zupčasti remen, zupčanici, prijenosni omjer, duljina lanca, broj zubaca, igla, valjak, čahura i spojka.

**SUMMARY**

Internal combustion engines are extremely common as power units of various aggregates, working machines, tractors, trucks, passenger cars, motorcycles, etc.

Controlling the change of the working medium is a particularly demanding task that needs to be performed for the reliable, high-quality and efficient operation of every internal combustion engine. It is the engine timing mechanism that is responsible for performing this task.

This paper briefly describes various designs of the timing mechanism of internal combustion engines, the method of their drives, and the materials from which the driving members of the timing mechanism are made.

Chain-driven timing mechanisms are discussed in more detail, with a focus on the chain as a very important factor in the reliability of the entire mechanism.

The theoretical part presents the basics for calculating and selecting chains, the materials from which they are made, and the standards important for testing the design of chains.

In the practical (experimental) part, a laboratory analysis of the material of the damaged chain is performed. A comparison of the geometric characteristics of a new chain (mortar drive chain, model: N47D20, manufacturer BMW) with a damaged chain used in a car that had traveled 230,000 km was also performed. It was clearly established that chain wear leads to a change in its geometric characteristics (lengthening of the chain, increasing the clearance in its links), which of course has an impact on the correct and high-quality operation of the engine.

The change in geometric characteristics (up to a certain limit) is compensated for by the chain tensioning system, so its correctness is extremely important for safe and high-quality engine operation.

Key words: timing mechanism, chain, timing belt, gears, gear ratio, chain length, number of teeth

## 1. UVOD

### 1.1. Uloga razvodnog mehanizma

Razvodni mehanizam ima ključnu ulogu u funkcioniranju motora s unutarnjim izgaranjem. Njegov zadatak je upravljanje otvaranjem i zatvaranjem ventila kako bi se pravodobno omogućio dotok goriva i zraka u cilindar te ispuštanje produkata izgaranja (plinova) van cilindra. Sastoji se od bregastog vratila, ventila, razvodnog lanca ili remena, klackalica ili podizača te opruga koje vraćaju ventile u zatvoren položaj. Osim mehaničkih dijelova, moderni sustavi uključuju i senzore te tehnologije poput varijabilnog upravljanja ventilima za optimalne performanse [1].

Precizna sinkronizacija rada ventila i klipova od ključne je važnosti jer omogućuje učinkovito izgaranje smjese goriva i zraka, povećava snagu motora i smanjuje emisiju štetnih plinova. Bez pravilno postavljenog razvodnog mehanizma motor ne bi mogao raditi, jer bi dolazilo do pogrešnog usisavanja i ispuštanja plinova [1].

Razvodni mehanizam dobiva pogon od koljenastog vratila preko zupčastog remena, lančanog prijenosa ili zupčanika na bregasto vratilo. Bregovi bregastog vratila (BV) preko prijenosnih članova, primjerice podizača, suprotstavljajući se silama opruga ventila otvaraju usisne i ispušne ventile. Sile opruga potom zatvaraju ventile. Radni proces u motoru s unutarnjim izgaranjem se odvija tijekom četiri takta, odnosno dva okreta koljenastog vratila, a ventili se pritom pokreću samo jednom, bregasto vratilo mora imati dvostruko manju brzinu vrtnje od koljenastog vratila. Zupčanik bregastog vratila, u odnosu na zupčanik koljenastog, mora imati dvostruko više zubi. Prijenosni omjer između koljenastog i bregastog vratila je 2 : 1 [2].

## 2. TIPIČNE IZVEDBE RAZVODNOG MEHANIZMA S OBZIROM NA BROJ I POLŽAJ BREGASTOG VRATILA I VRSTE POGONA

### 2.1. Tipične izvedbe

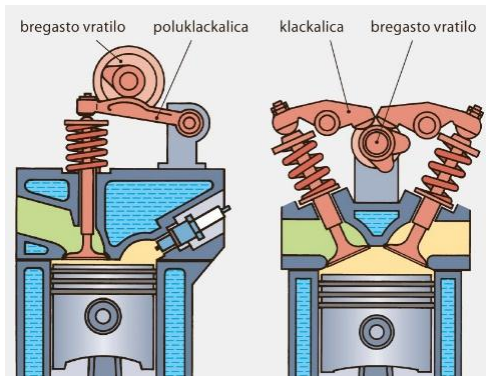
Tipične izvedbe razvodnog mehanizma su[3]:

1. **OHV (engl. *Overhead Valve*)** - Konfiguracija u kojoj su ventili smješteni iznad cilindra, a bregasto vratilo se nalazi unutar bloka motora. Ovakav smještaj bregastog vratila više se ne koristi, a posljednji motor na našem tržištu te konstrukcije bila je Škoda Fabija 1.4 MPI prve generacije koja se proizvodila do 2004. godine.
2. **SOHC (engl. *Single Overhead Camshaft*)** - Razvodni mehanizam s jednim bregastim vratilom smještenim iznad cilindra. Ovaj tip koristi jedno bregasto vratilo za kontrolu usisnih i ispušnih ventila. Ovdje će se najčešće koristiti dva ventila po cilindru, no postoje i varijante s tri i četiri.
3. **DOHC (engl. *Double Overhead Camshaft*)** - Dva bregasta vratila smještena iznad cilindra. Jedno vratilo kontrolira usisne, a drugo ispušne ventile. Ovakva konstrukcija omogućuje precizniju kontrolu ventila, veće brzine motora i bolju efikasnost. Ovdje će se pak najčešće pogoniti četiri ili čak pet ventila po cilindru.
4. **CIH (engl. *Camshaft In Head*)** – Bregasto vratilo je smješteno u glavi motora. Rijetka konstrukcija koju je svojedobno koristio Opel/Vauxhall.
5. **CE (engl. *Camless Engines*)** – U razvoju su i motori koji u potpunosti zamjenjuju bregasta vratila i oslanjaju se na elektroničko kontrolirane ventile za maksimalnu fleksibilnost i efikasnost, no takva izvedba još nije zaživjela u komercijalnoj uporabi.

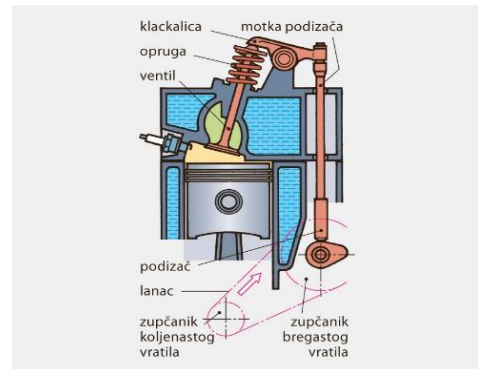
Na slici 1. prikazane su tipične izvedbe razvodnog mehanizma, od kojih su kod modernih automobila najčešće zastupljene izvedbe tzv. Gornjeg razvoda s dva bregasta vratila.

Izvedba tzv. Donjeg razvoda kod koje je bregasto vratilo smješteno u bloku motora a ventili su u glavi motora upotrebljava se kod radnih strojeva i starijih izvedbi motora teretnih automobila. Nedostatak ove izvedbe je pojava još jednog elementa u razvodnom sustavu, podizača, koji je dinamički vrlo opterećen.

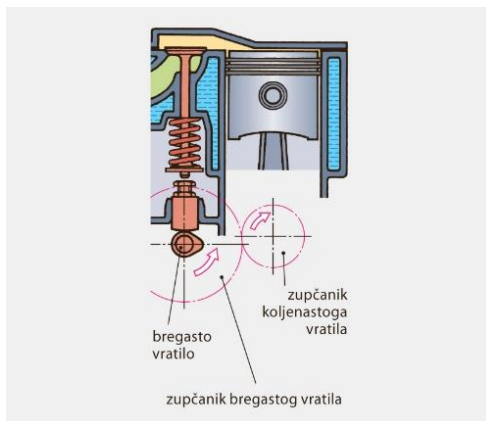
Treba napomenuti da se u nekih modernih automobila mogu naći izvedbe razvodnog mehanizma bez bregastog vratila, a kod koji se upravljanjem izmjenom radnog medija odvija putem elektronički pogonjenih ventila.



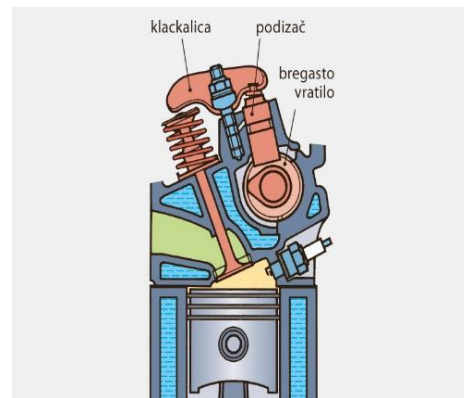
Gornji razvod, OHC-motor



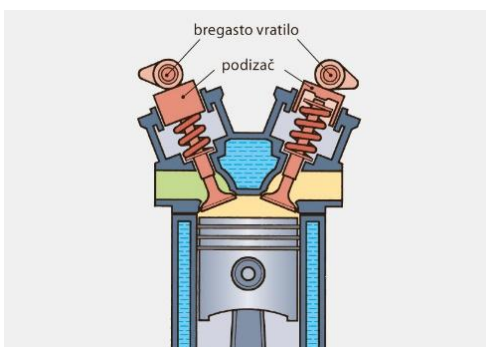
Donji razvod, OHV



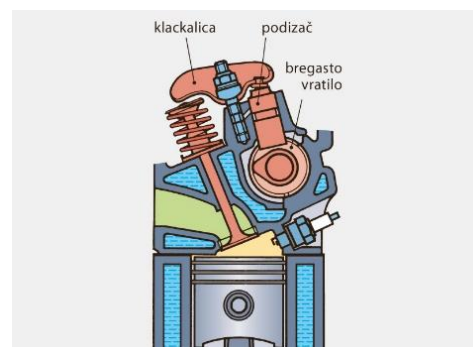
Donji razvod, SV



Donji razvod, OHV



Gornji razvod, DOHC

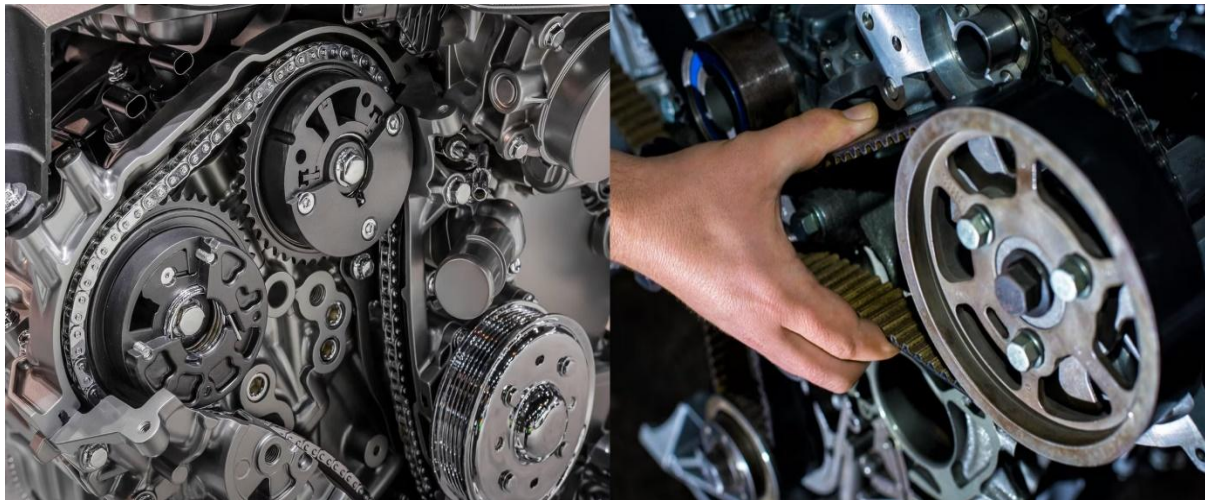


Gornji razvod, CIH

Slika 1. Tipične izvedbe (konstrukcije) razvodnog mehanizma [1]

## 2.2. Pogon razvodnog mehanizma

Na slici 2. su prikazane tipične izvedbe razvodnog mehanizma motora s pogonskim lancem i remenom.



Slika 2. Konstrukcijske izvedbe pogona razvodnog mehanizma [4]

Pogon razvodnog mehanizma osigurava sinkronizaciju između koljenastog vratila (radilice) i bregastog vratila, omogućujući pravovremeno otvaranje i zatvaranje ventila. Ovisno o konstrukciji, osim bregastih vratila pogon razvodnog sustava također može pogoniti i pumpu za vodu, alternator, pumpu za ulje, servo pumpu ili kompresor klima uređaja.

Postoje tri glavne vrste pogona razvodnog mehanizma: zupčasti remen, zupčanici i razvodni lanac [5].



### 3. ZUPČASTI REMEN

Zupčasti remeni izrađuju se od kompozitnih materijala, a najčešće od kombinacije sintetičke gume, poput neoprena ili EPDM-a (etilen-propilen-dien monomer), za otpornost na toplinu i trošenje, te aramidnih ili staklenih vlakana za visoku čvrstoću i otpornost na istezanje. Površinski sloj remena često je obložen najlonskom tkaninom otpornom na trošenje kako bi se osigurala trajnost i pouzdan prijenos snage tijekom rada motora. U odnosu na lanac, lakši je, tiši i jeftiniji za proizvodnju, ali u pravilu ima kraći vijek trajanja i zahtijeva redovitu zamjenu, obično svakih 90.000 do 240.000 kilometara odnosno 5 do 10 godina, ovisno o motoru i preporukama proizvođača [6].

U nekim slučajevima treba na vlastitu inicijativu skratiti interval preporučen od proizvođača. Interval između zamjena zupčastog remena, koji određuje proizvođač automobila, pretpostavlja da remen radi u idealnim uvjetima. U slučaju rabljenih automobila koji su već prošli barem jednu zamjenu seta zupčastog remena, vrijedi taj interval skratiti – barem za 20%-30%. U krajnjim slučajevima čak i za polovicu[7].

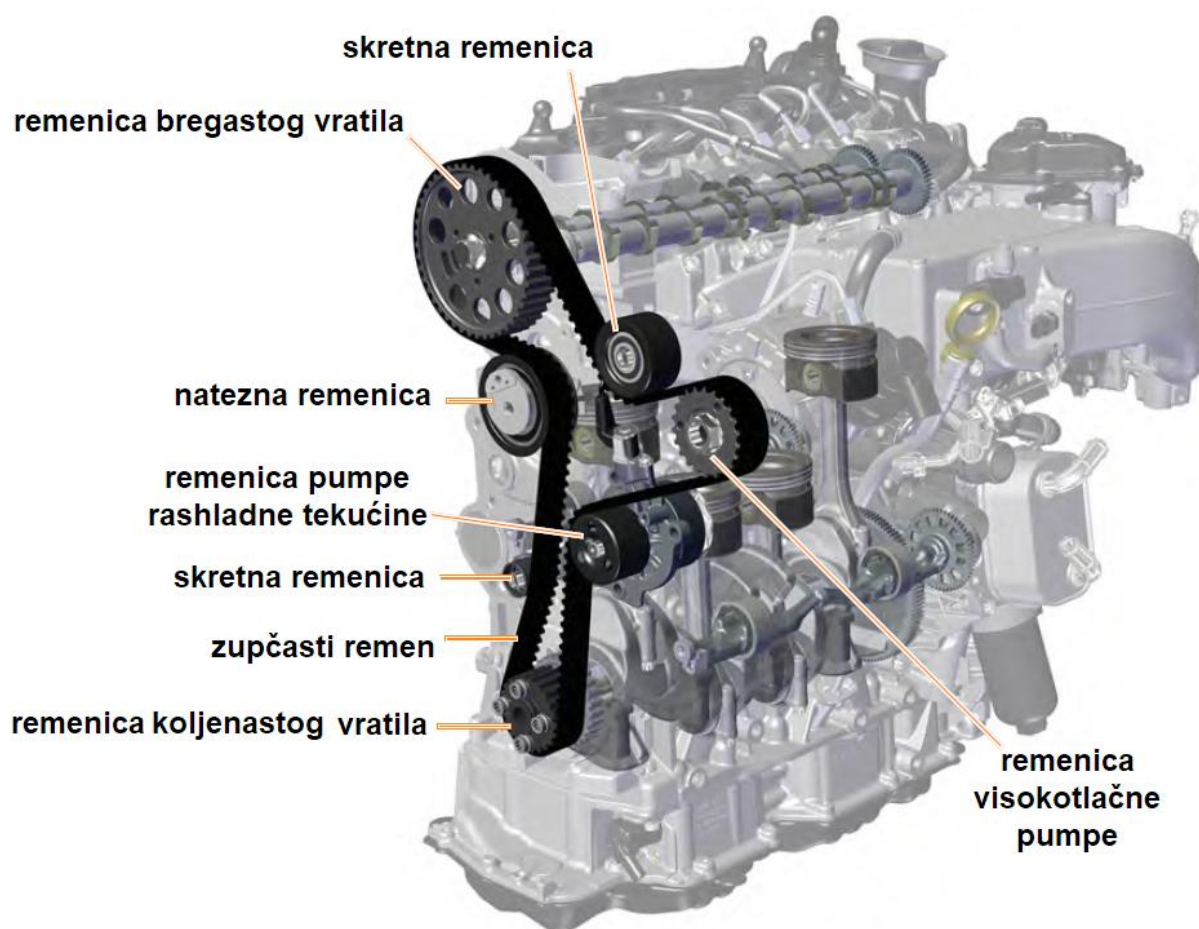
Evo najvažnijih faktora koji bi trebali motivirati korisnika vozila na zamjenu seta zupčastog remena prije roka:

- kupnja rabljenog vozila bez pouzdane servisne povijesti,
- motor pokazuje znakove trošenja,
- popravci koji zahtijevaju demontažu zupčastog remena,
- pregrijavanje motora,
- kvarovi pumpe rashladne tekućine,
- često pokretanje motora.



Slika 3. Set zupčastog remena [8]

Prednosti remena uključuju tihi rad i jednostavno održavanje jer ne zahtijeva podmazivanje. Međutim, osjetljiv je na vanjske utjecaje poput temperature, vlage i prljavštine, što može ubrzati njegovo trošenje. Kod zamjene remena često je potrebno zamijeniti i zatezače, remenice te pumpu vode ako je povezana s razvodnim sustavom. Iako kraćeg vijeka od lanca, moderni razvodni remeni izrađeni su od naprednijih materijala koji im povećavaju trajnost i pouzdanost. Pravilnim održavanjem remen može osigurati dugotrajan i pouzdan rad motora uz niže troškove u usporedbi s lancem.



Slika 4. Prikaz ugradnje zupčastog remena s remenicama, ležajevima i natezačem [9]

### 3.1. Remen pogonjen u ulju

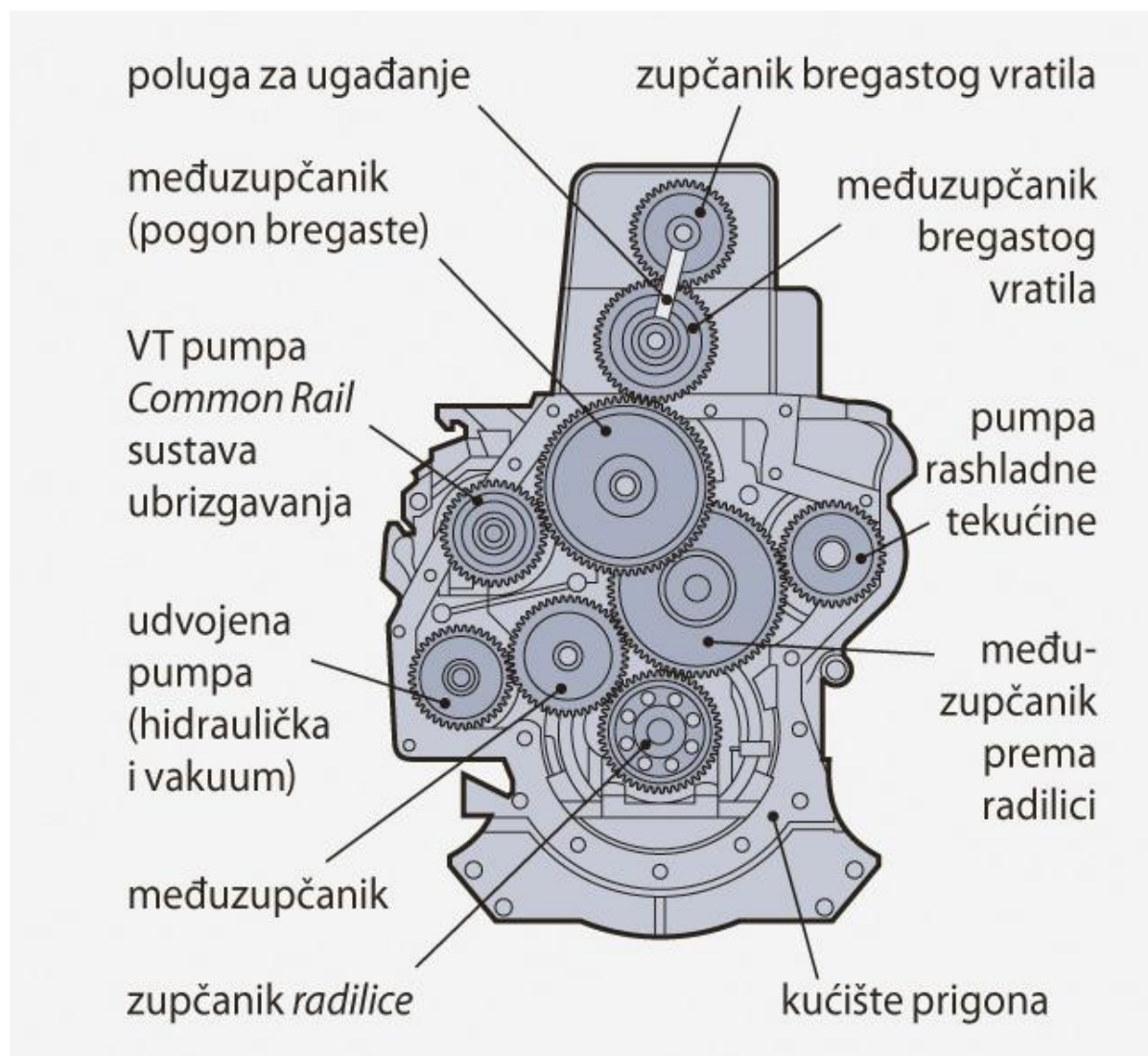
Naravno uvijek postoje i iznimke pa je tako Ford s 1.0 EcoBoost motorom 2012. godine uveo tehnologiju remena pogonjenog u ulju. Kasnije su tim smjerom krenuli i neki ostali proizvođači kao što je PSA grupacija i Honda.

Tehnologija remena pogonjenog u ulju počinje se sve češće koristiti kod modernih motora jer omogućuje balans između performansi, trajnosti i ekonomičnosti, posebno kod motora manjih zapremina ili onih optimiziranih za nisku emisiju štetnih plinova. Korištenjem ove tehnologije proizvođači kombiniraju prednosti remena i lanca kako bi ponudili rješenje koje zadovoljava moderne standarde emisija i ekonomičnosti, no iako je ta tehnologija efikasna, zahtijeva specifično motorno ulje visoke kvalitete kako bi se osigurao optimalan rad i spriječilo nakupljanje taloga[10].

## 4. ZUPČANICI (ČELNICI)

Pogon razvodnog mehanizma zupčanicima se vrlo rijetko koristi, a može se naći u nekim trkaćim ili starijim motorima.

Ovaj sustav je iznimno izdržljiv i precizan te može prenijeti velik pogonski moment, ali je težak i glomazan te stvara najveću buku, zbog čega u pravilu ne koriste u modernim automobilima. Zupčanicima imaju koso ozubljenje upravo zbog prigušenja šumova tj. buke [1].

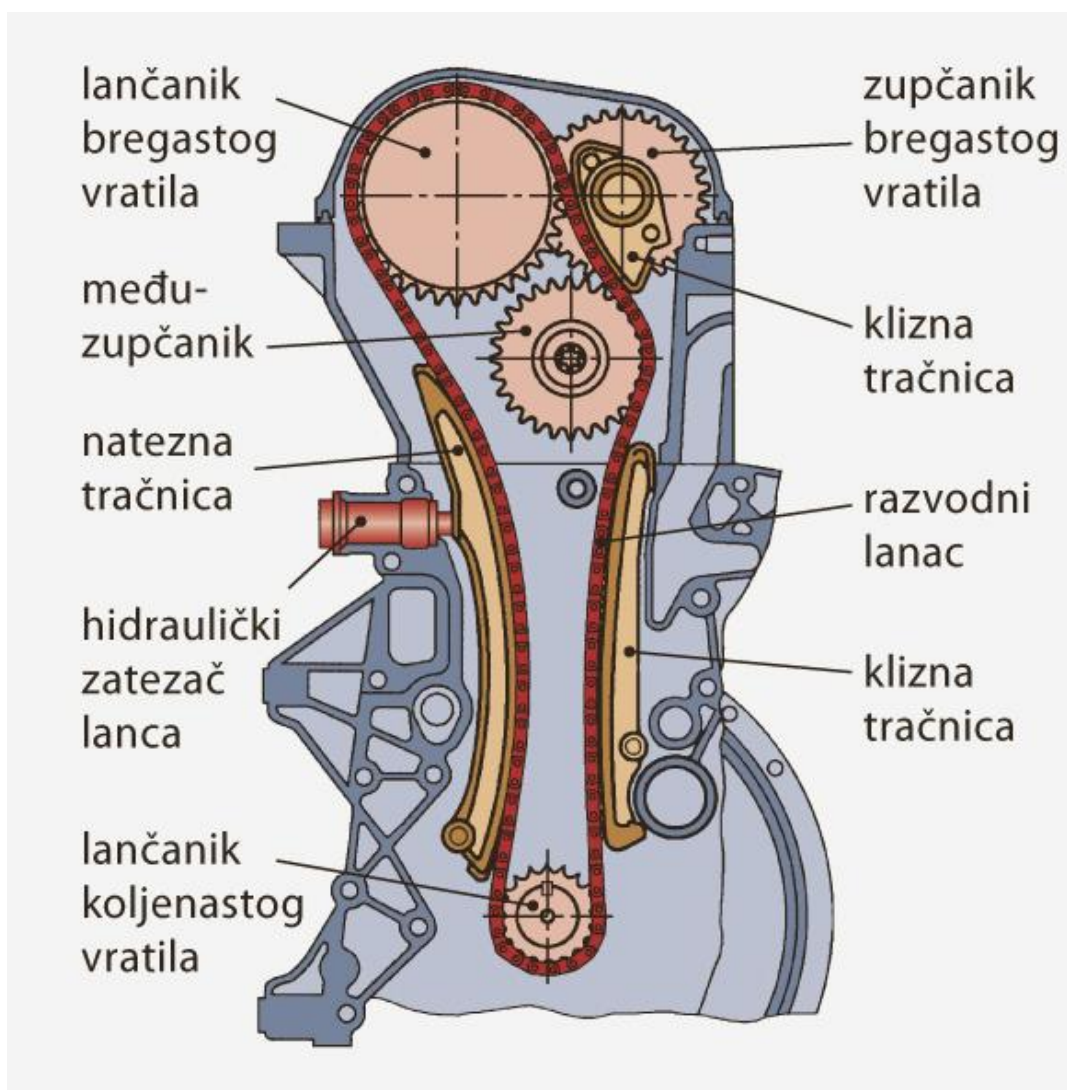


Slika 5. Prikaz izvedbe pogona razvodnog mehanizma sa čelnicima [1]

Svaki od navedenih pogonskih sustava ima svoje prednosti i nedostatke, a izbor ovisi o konstrukciji motora, njegovoj namjeni i preferencijama proizvođača.

## 5. RAZVODNI LANAC

Pogon razvodnog mehanizma lancem je dugotrajan i izdržljiv sustav, pogodan za motore s dugim vijekom trajanja. Lanac je izrađen od metala, što ga čini otpornim na trošenje, no bučniji je od remena. Zahtijeva manje održavanja, ali je osjetljiv na trošenje zatezača i vodilica. [2].



Slika 6. Prikaz izvedbe pogona razvodnog mehanizma s lancem [1]

Zbog činjenice da je konstrukcija motora vrlo kompleksna, što uzrokuje potrebu za specifičnim oblikovanjem putanje lanca, kao i činjenice da se tijekom uporabe mijenja dužina lanca vrlo je važno da se lanac uvijek drži u napetom položaju. Ovo se osigurava uz pomoć sustava za zatezanje lanca (natezna tračnica, klizna tračnica i hidraulički zatezač lanca) [11].

## 5.1. Materijali za izradu razvodnog lanca i njegova trajnost

Lanac razvodnog mehanizma je izložen velikim mehaničkim i toplinskim opterećenima.

Zbog ove činjenice lanci se najčešće izrađuju od legiranih čelika s dodatkom kroma, molibdena ili nikla, koji se termički obrađuju kaljenjem ili nitriranjem radi povećanja čvrstoće i otpornosti na trošenje, a često su obloženi teflonom ili grafitom za smanjenje trenja. Ova kombinacija materijala i obrade osigurava trajnost lanca te preciznu sinkronizaciju motora unatoč visokim naprezanjima i temperaturnim promjenama[12].

Legirani čelik je vrsta čelika u kojem odlučujući utjecaj na njegova svojstva imaju legirni elementi, tj. oni kemijski elementi koji se namjerno dodaju da bi se postigla određena svojstva. Nisko legirani čelici imaju do 5% dodanih elemenata, a visoko legirani više od 5%.

Dodatkom kroma povećava se otpornost na trošenje, dodavanjem molibdena povećava se prokaljivost i čvrstoća a dodavanjem nikla najviše se djeluje na žilavost čelika. Upravo su ova svojstva potreban za materijale lanaca razvodnog mehanizma[13].

Prema standardu DIN 8187, koji se odnosi na valjkaste lance, materijali za izradu dijelova lanaca biraju se prema njihovoj funkciji i zahtjevima opterećenja. Valjkasti lanci se najčešće izrađuju od čelika, uz toplinsku obradu za povećanje trajnosti[14].

Spojnice se tako najčešće izrađuju od nelegiranih čelika za poboljšanje C35 ili C45 (DIN 17200), valjci i čahure od legiranih ili nelegiranih čelika za cementiranje poput 16MnCr5 ili 20MnCr5, dok osovinice od legiranih čelika za poboljšanje 42CrMo4[15].

Ispravan odabira materijala lanca ima presudan utjecaj na pouzdanost i siguran rad motora.

Jednostruki (simplex) lanac, koji je tanji i lakši, češće se koristi u modernim motorima radi smanjenja mase i troškova, ali zbog toga ima kraći vijek trajanja i skloniji je problemima.

S druge strane, dvostruki (duplex) lanac znatno je izdržljiviji i otporniji na trošenje, no veće je mase i skuplji za proizvodnju. Također, postoje i lanci s tri reda (triplex) no oni su veoma rijetki zbog visokih troškova izrade i velike mase, ali su i najtrajniji među njima.

Trajnost lanca u velikoj mjeri ovisi o pravilnom podmazivanju i održavanju. Loše ulje, nepravilno održavanje ili zagađenja u uljnom krugu (npr. čestice plastike iz vodilica) mogu značajno smanjiti životni vijek lanca, što je čest problem kod jednostrukih lanaca ugrađivanih u neke moderne motore. U prosjeku, većina lanaca može trajati između 200.000 i 300.000 kilometara, a često su dizajnirani da izdrže vijek trajanja vozila uz pravilno održavanje[17].



U suvremenim motorima u skladu s načelima smanjenja radnog volumena, lanci razvoda su izloženi visokim brojevima okretaja, vibracijama, visokim mehaničkim i termičkim opterećenjima. Osim toga, smanjenjem obujma motora, smanjuje se i prostor za lanac i njegove dodatne dijelove, što dodatno otežava održavanje ili zamjenu. Na ubrzano trošenje lanca razvodnog mehanizma također utječe i način uporabe automobila – česta vožnja automobila na kratkim dionicama, povezana s upotrebom visoke snage motora (dinamična, agresivna vožnja) izaziva brzo trošenje tog sustava zajedno s popratnim dijelovima. Lanac razvoda motora sastavljen je od igala, valjaka, čahura i spojnice kako bi se formirala vrlo jaka ali fleksibilna konstrukcija. Konstruiran je da se odupre naprezanju i pritisku uzrokovanim radom ventila motora i radilice tijekom četverotaktnog ciklusa[5].



Slika 7. Set lanaca i klizača [17]

## 5.2. Proračun razvodnog lanca

U nastavku je prikazan pojednostavljeni proračun jednostrukog valjkastog lanca koji se najčešće koristi u vozilima. Radi jednostavnosti, sljedećim primjerom je prikazan proračun lanca s dva lančanika, pogonski koji je vezan za koljenasto vratilo i jedan gonjeni lančanik koji je vezan za bregasto vratilo (SOHC razvod).



Slika 8. SOHC razvodni sustav pogonjen lancem [17]

Kada je lanac postavljen vertikalno, kao u ovom slučaju (pogonski zupčanik je dolje, a gonjeni gore) obavezni su zatezni lančanici ili klizači (kao u prikazanoj izvedbi), zbog nepovoljnog položaja i lošeg zahvata na donjem lančaniku te efekta provjesa lanca.



Pogon razvodnog mehanizma modernog motora s unutarnjim izgaranjem obično zahtijeva između 1 kW i 3 kW snage pri srednjoj brzini vrtnje, ovisno o konstrukciji motora. To u pravilu čini oko 1% do 3% ukupne snage motora pri nominalnim uvjetima, dok se taj udio može povećati na nižim brzinama vrtnje motora zbog manje ukupno isporučene snage. Pri višim brzinama vrtnje motora (npr. 5000 min<sup>-1</sup> ili više), trenje i otpor sustava mogu povećati potrebnu snagu i na 5 kW do 10 kW kod sportskih ili složenijih motora.

Za potrebe ovakvog proračuna treba koristiti sljedeće ulazne parametre

- **prijenosni omjer:**

$i = 2$  (omjer gonjenog i pogonskog lančanika, bregasto vratilo vrti se dvostruko sporije od koljenastog),

- **očekivana brzina vrtnje:**

$n_1 = 4000 \text{ min}^{-1}$  (najčešći broj okretaja dizelskog motora kada on isporučuje najveću nominalnu snagu),

- **očekivana prenesena snaga lanca:**

$P = 2 \text{ kW}$  (približna snaga potrebna za pogon razvodnog mehanizma),

- **inicijalni razmak osi lančanika:**

$a' = 350 \text{ mm}$  (razmak osi koljenastog i bregastog vratila).

### 5.2.1. Potrebna udarna snaga[18]

$$P_D = \frac{P}{m \cdot k}$$

gdje je:

$P_D$	[kW]	udarna snaga reducirana na jednostruki lanac,
$P$	[kW]	snaga koju lancem treba prenijeti,
$m$		faktor nošenja lanca, kod jednostrukih lanaca je $m = 1$ ,
$k$		faktor snage za faktor udara $c$ (prema DIN 8195).

Uz izračunatu udarnu snagu, a prema standardu DIN 8187, odabire se pogodan lanac čije se dimenzije i karakteristike koriste za daljnji proračun.

### 5.2.2. Prijenosni odnos i duljina lanca[18]

Odnos brzine vrtnje malog lančanika prema brzini vrtnje velikog lančanika daje:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

gdje je:

$n_1$	[min-1]	brzina vrtnje malog lančanika,
$n_2$	[min-1]	brzina vrtnje velikog lančanika,
$z_1$		broj zubi malog (pogonskog) lančanika,
$z_2$		broj zubi velikog (gonjenog) lančanika.

Ako se pretpostavi broj zuba pogonskog lančanika  $z_1 = 21$ , zbog prijenosnog omjera, koji mora biti 2, proizlazi broj zuba gonjenog zupčanika  $z_2 = 42$ .

### 5.2.3. Izračun broja članaka lanca[18]

$$X = 2 \cdot \frac{a'}{p} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \left( \frac{z_2 - z_1}{2\pi} \right)^2 \cdot \frac{p}{a'}$$

gdje je:

$X$		broj članaka lanca koji se zaokružuje na cijeli broj,
$p$	[mm]	korak lanca (prema DIN 8187),
$a'$	[mm]	inicijalni razmak osi lančanika.

Nakon izračunatog broja članaka  $X$  uz odabrani korak lanca  $p$ , duljina lanca tada iznosi:

$$L = p \cdot X$$

gdje je:

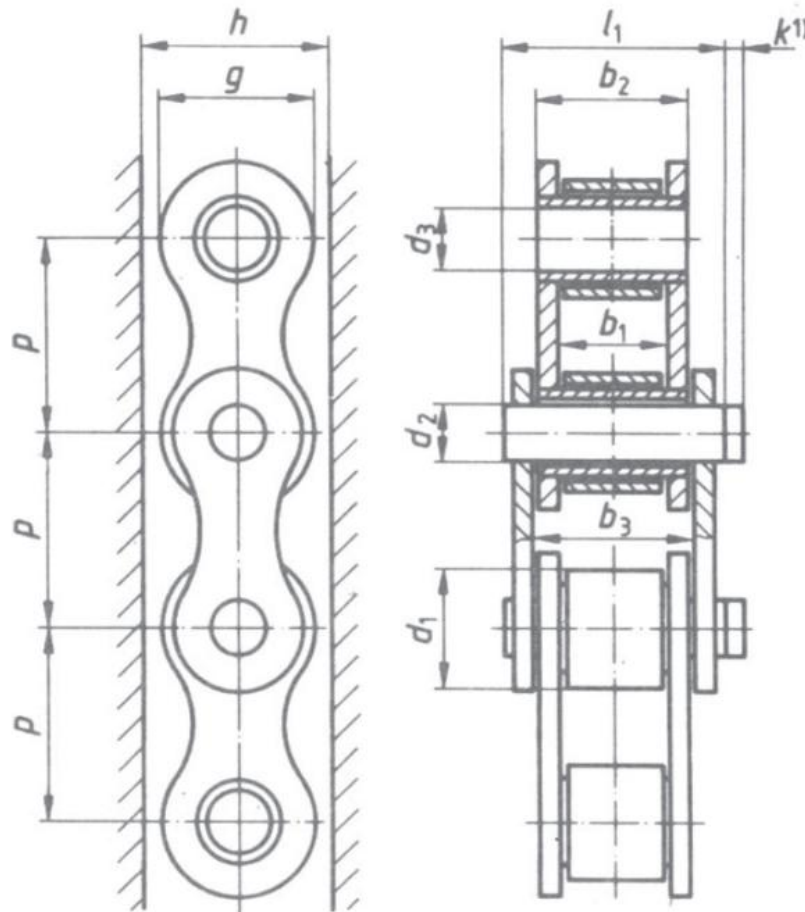
$L$	[mm]	duljina lanca.
-----	------	----------------

Točan razmak osi sada glasi:

$$a = \frac{p}{8} \left( 2X - z_1 - z_2 + \sqrt{(2X - z_1 - z_2)^2 - f(z_2 - z_1)^2} \right)$$

gdje je:

- a [mm] točan razmak osi,  
 f proračunski faktor (prema DIN 8195).



Slika 9. Dimenzije jednostrukog lanca prema standardu DIN 8187, odnosno ISO 15654[19]

#### 5.2.4. Proračun sigurnosti

Izabrani lanac treba računski kontrolirati na vremensku izdržljivost, tj. na vijek trajanja u satima spojnice, valjaka i zglobova. Kako bi to izračunali potrebni su sljedeći koraci[19].

Prvo, potreban je izračun promjera diobenih kružnica pojedinog lančanika:

$$d = p \cdot n_z$$

gdje je:

- $d$  promjer diobene kružnice,  
 $n_z$  faktor broja zubi (prema DIN 8196)

Kad se znaju promjeri diobnih kružnica, brzinu lanca iznosi:

$$v = \frac{d_1 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{d_2 \cdot \pi \cdot n_2}{60}$$

gdje je:

$v$ [m/s]	brzina lanca,
$d_1$ [mm]	promjer diobene kružnice pogonskog lančanika,
$d_2$ [mm]	promjer diobene kružnice gonjenog lančanika,
$n_1$ [sek <sup>-1</sup> ]	broj okretaj pogonskog lančanika,
$n_2$ [sek <sup>-1</sup> ]	broj okretaj gonjenog lančanika.

Nakon izračunate brzine lanca može se izračunati vučna sila lanca:

$$F = \frac{P}{v}$$

gdje je:

$F$ [N]	vučna sila lanca tj. obodna sila lančanika,
$P$ [W]	zadana snaga koja se prenosi,

S obzirom na to da za vrijeme rada pojedini članci lanaca rade kružno gibanje preko lančanika, te su stoga dodatno opterećeni i centrifugalnom silom  $F_f$ :

$$F_f = q \cdot v^2$$

gdje je:

$F_f$ [N]	centrifugalna sila koja dodatno opterećuje trake lanca,
$q$ [kg/m]	masa lanca po metru duljine (prema DIN 8187).

Nakon izračunate vučne i centrifugalne sile, može se izračunati ukupna vučna sila:

$$F_G = F + F_f$$

gdje je:

$F_G$ [N]	ukupna vučna sila tj. najveća vučna sila u lančanoj traci,
$F$ [N]	izračunata vučna sila lanca proizašla iz snage koju treba prenijeti,
$F_f$ [N]	izračunata centrifugalna sila u svakoj traci.

Tablica 1. Specifikacija jednostrukih valjkastih lanaca prema standardu DIN 8187 [19]

Chain number	$p$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$g$	$h$	$k$ 1)	$l_1$	Minimum breaking force, in N	Measuring force, in N	Bearing area, in cm <sup>2</sup>	Approx. mass, in kg/m
		min.	max.	min.	max.	h9	H11	max.	min.	max.	max.				
03	5	2,5	4,15	4,25	3,2	1,49	1,52	4,1	4,3	2,5	7,4	2 200	22	0,06	0,08
04	6	2,8	4,1	4,2	4	1,85	1,88	5	5,2	2,9	7,4	3 000	30	0,08	0,12
05 B - 1	8	3	4,77	4,9	5	2,31	2,36	7,1	7,4	3,1	8,6	5 000	50	0,11	0,18
06 B - 1	9,525	5,72	8,53	8,66	6,35	3,28	3,33	8,2	8,6	3,3	13,5	9 000	90	0,28	0,41
081	12,7	3,3	5,8	5,93	7,75	3,66	3,71	9,9	10,2	1,5	10,2	8 200	82	0,21	0,28
082	12,7	2,38	4,6	4,73	7,75	3,66	3,71	9,9	10,2	—	8,2	10 000	100	0,17	0,26
083	12,7	4,88	7,9	8,03	7,75	4,09	4,14	10,3	10,6	1,5	12,9	12 000	120	0,32	0,42
084	12,7	4,88	8,8	8,93	7,75	4,09	4,14	11,1	11,5	1,5	14,8	16 000	160	0,36	0,59
085	12,7	6,38	9,07	9,2	7,77	3,58	3,63	9,9	10,2	2	14	6 800	68	0,32	0,38
08 B - 1	12,7	7,75	11,3	11,43	8,51	4,45	4,5	11,8	12,1	3,9	17	18 000	180	0,5	0,70
10 B - 1	15,875	9,65	13,28	13,41	10,16	5,08	5,13	14,7	15	4,1	19,6	22 400	224	0,67	0,95
12 B - 1	19,05	11,68	15,62	15,75	12,07	5,72	5,77	16,1	16,4	4,6	22,7	29 000	290	0,89	1,25
16 B - 1	25,4	17,02	25,4	25,6	15,88	8,28	8,34	21	21,4	5,4	36,1	60 000	600	2,1	2,7
20 B - 1	31,75	19,56	29	29,2	19,05	10,19	10,26	26,4	26,7	6,1	43,2	95 000	950	2,96	3,6
24 B - 1	38,1	25,4	37,9	38,2	25,4	14,63	14,71	33,4	33,8	6,6	53,4	160 000	1 600	5,54	6,7
28 B - 1	44,45	30,99	46,5	46,8	27,94	15,9	15,98	37,0	37,5	7,4	65,1	200 000	2 000	7,39	8,3
32 B - 1	50,8	30,99	45,5	45,8	29,21	17,81	17,9	42,2	42,8	7,9	67,4	250 000	2 500	8,1	10,5
40 B - 1	63,5	38,1	55,7	56	39,37	22,89	23	52,9	53,5	10	82,6	355 000	3 550	12,75	16
48 B - 1	76,2	45,72	70,5	71	48,26	29,24	29,35	63,8	64,6	10	99,1	560 000	5 600	20,61	25
56 B - 1	88,9	53,34	81,3	82	53,98	34,32	34,43	77,8	78,7	11	114	850 000	8 500	27,9	35
64 B - 1	101,6	60,96	92	92,7	63,5	39,4	39,6	90,1	91,1	13	130	1 120 000	11 200	36,25	60
72 B - 1	114,3	68,58	103,8	104,5	72,39	44,5	44,7	103,6	104,7	14	147	1 400 000	14 000	46,19	80

1) Pin projecting length for connecting link.

Ako se uzmu u obzir udare uzrokovane vrstom pogona, isključujući utjecaj centrifugalne sile, tada se može odrediti sigurnost spojnice protiv loma:

$$S_M = \frac{F_M}{F} \cdot y$$

gdje je:

- $S_M$  sigurnost spojnice protiv loma,  
 $F_M$  [kN] lomna sila lanca (prema DIN 8187),  
 $F$  [kN] izračunata vučna sila lanca,  
 $y$  značajka udara (prema DIN 8195).

Daljnji proračun nije potreban ako je zadovoljen uvjet faktora sigurnosti  $S_M \geq S_D$ , gdje je  $S_D$  potreban faktor sigurnosti prema DIN 8195 s obzirom na brzinu vrtnje malog lančanika  $n_l$  i koraka lanca  $p$ .

Ako pak uvjet nije zadovoljen i  $S_M < S_D$  tada treba izračunati odnos sigurnosti  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{S_M}{S_D}$$

Izračunati odnos sigurnosti tada treba usporediti s faktorom vijeka trajanja  $\lambda_D$  (prema DIN 8195).

Ako je  $\lambda/\lambda_D = 1$  ili više, tada je zadovoljen uvjet od referentnog vijeka trajanja  $L_h = 15.000$  sati koji se može očekivati pri besprijekornom podmazivanju. Maksimalna prekidna sila lanca je najveća sila koju lanac može izdržati prije nego što dođe do mehaničkog otkazivanja.

Prema standardu DIN 8187 ona je definirana s obzirom na odabir lanca, a prikazuje se kao minimalna prekidna sila lanca  $F_M$  (tablica 1).

Kako bi se osigurala dovoljnu zaštitu od lomne lanca, potrebno je kontrolirati statičku i dinamičku sigurnost od loma.

Sigurnost na statički lom:

$$S_{stat} = \frac{F_M}{F} \geq 7$$

Sigurnost na dinamički lom:

$$S_{din} = \frac{F_M}{F_G} \geq 5$$

gdje je:

$F_M$ [kN]	lomna sila lanca (prema DIN 8187),
$F$ [kN]	vučna sila lanca,
$F_G$ [kN]	ukupna vučna sila lanca u lančanoj traci.

## 6. ISPITIVANJE PREKIDNE ČVRSTOĆE LANCA

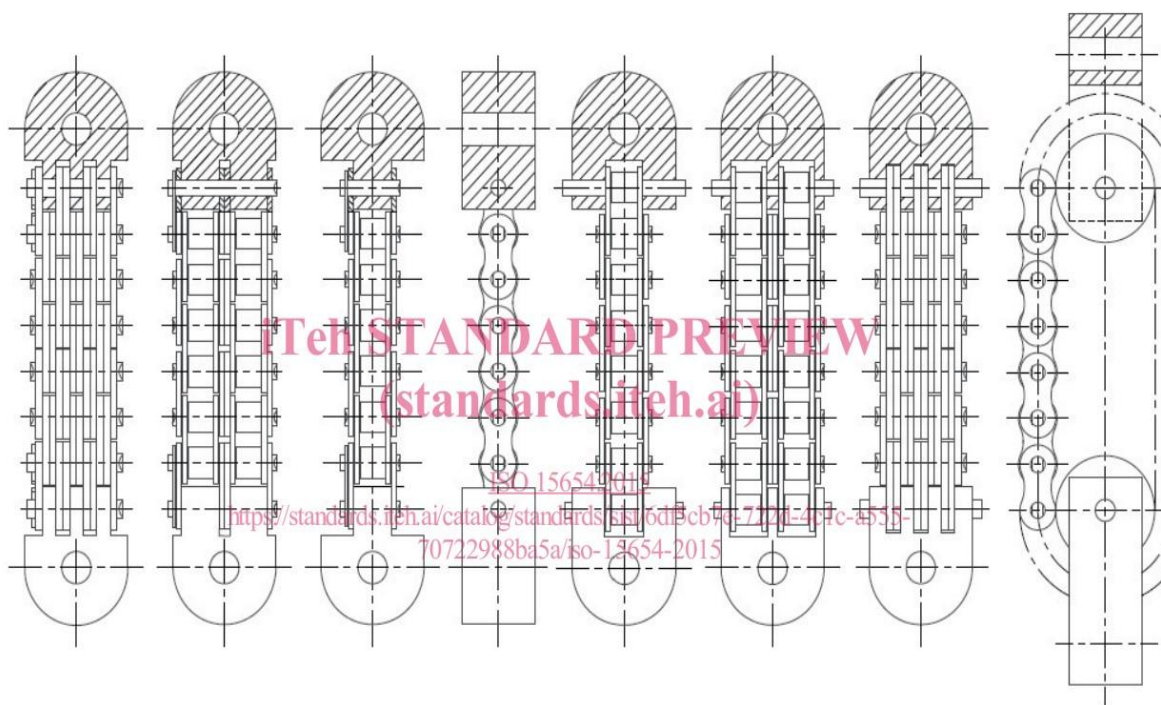
### 6.1. Ispitivanje radi utvrđivanja sukladnosti[20].

Ovim testom izdržljivosti određuje se jel predmetni lanac zadovoljava zahtjeve za dinamičku čvrstoću koji su propisani u normama ISO 606, ISO 10190 ili ISO 4347.

Ovo ispitivanje provodi se tako da klinovi za pričvršćenje spojnice (vanjskih ploča) ili čahura moraju biti pričvršćeni na najmanje pet duljina koraka lanca ( $5 \times p$ ) kako bi se omogućilo slobodno kretanje i spriječilo bilo kakvo naprezanje na savijanje.

Također, propisani su načini učvršćivanja ispitivanih segmenata lanaca kako bi se osiguralo slobodno kretanje dijelova lanaca u uzdužnoj i poprečnoj ravnini ovješnja lanca.

Tipični oblici učvršćenja lanaca prikazani su na slici 9.



**Slika 10.** Tipični primjeri učvršćenja lanaca pri ispitivanju prekidne čvrstoće , ISO 15654 [19]

Na ovako učvršćen uzorak primjenjuje se uzdužna vlačna sila koja sinusno varira između minimalne ispitne sile koja mora biti najmanje 1 %, ali ne više od 5 % minimalne vlačne čvrstoće koja je definirana normama za predmetni lanac u ISO 606, ISO 10190 ili ISO 4347, i najveće ispitne sile koja je definirana izračunom koji je propisan samom normom ISO 15654. Na ovaj se način testiraju tri uzorka, gdje svaki uzorak mora izdržati  $3 \times 10^6$  ciklusa.

### 6.1.1. Stepenasti test

Ovo je također još jedna vrsta testiranja koja je opisana normom ISO 15654, a kojim se utvrđuje granica dinamičke izdržljivosti materijala predmetnog lanca.

Uvjeti izrade uzoraka i njihovog prihvata isti su kao kod ispitivanja radi utvrđivanja sukladnosti osim što se opterećenje na uzorke povećava u skladu sa unaprijed određenim razinama nametnutih sila.

S obzirom na to da se radi o složenijem ispitivanju, a s obzirom da nadilazi ograničenja ovog rada, njegov opis ovdje neće biti iznesen.

### 6.1.2. Proračun vijeka trajanja

Vijek trajanja valjaka ovisi o broju promjena opterećenja u toku očekivanog vijeka trajanja  $L_h$  što ovisi o broju obilazaka lanca za vrijeme vijeka trajanja. Za to prvo treba izračunati vučnu silu na valjke [21]:

$$F_R = F_r \cdot \lambda_r \cdot t_r$$

gdje je:

$F_R$ [kN]	dopuštena vučna sila u traci lanca za valjke,
$F_r$ [kN]	nazivna vrijednost vučne sile u ovisnosti o broju zubi $z_l$ i brzini vrtnje $n_l$ (prema DIN 8195),
$\lambda_r$	faktor vijeka trajanja za valjke prema željenom vijeku trajanja $L_h$ (prema DIN 8195),
$t_r$	faktor vrste lanca (prema DIN 8195).

Ako se tako izračunata dopuštena vučna sila za valjke usporedi s ranijem izračunatom vučnom silom lanca  $F$  i značajkom udara  $y$ :

$$\frac{F}{y} \leq F_R$$

pri besprijekornom podmazivanju može se postići željeni vijek trajanja. Uz loše podmazivanje tada se koristi sljedeće:

$$\frac{F}{y} \leq 0.4 \cdot F_R$$



Uz vijek trajanja valjaka također je potrebno predvidjeti i vijek trajanja zglobova. Za to je potrebno izračunati površinski tlak u zglobovima:

$$p_v = \frac{F_G}{A \cdot y}$$

gdje je:

$p_v$ [N/cm <sup>2</sup> ]	postojeći površinski tlak u zglobovima,
$F_G$ [N]	izračunata ukupna vučna sila,
$A$ [cm <sup>2</sup> ]	površina zglobova (prema DIN 8187),
$y$	značajka udara (prema DIN 8195).

Nakon izračunatog površinskog tlaka u zglobovima može se odrediti značajka vijeka trajanja:

$$w_D = t_v \cdot \lambda_v$$

gdje je:

$w_D$	značajka zgloba za vijek trajanja $L_h = 15.000$ sati,
$t_v$	faktor brzine koraka lanca (prema DIN 8195),
$\lambda_v$	faktor puta trenja (prema DIN 8195).

Prema DIN 8195 uspoređujući značajku vijeka trajanja prema načinu podmazivanja  $w$  s izračunatom značajkom zgloba  $w_D$  dobiva se očekivana vrijednost vijeka trajanja. Ako je  $w/w_D = 1$  ili manje, tada je zadovoljen uvjet od referentnog vijeka trajanja  $L_h = 15.000$  sati koji se može očekivati pri dobrom podmazivanju.

Ako se vrijednosti vijeka trajanja spojnice, valjak i zglobova podudaraju, tada je lanac dobro optimiran. Koristi li se referentni vijek trajanja lanca od 15.000 sati i uzme li se za prosječnu brzinu vozila tijekom njegovog vijeka trajanja od 40 km/h, može se doći do izračuna udaljenosti, odnosno puta kojeg vozilo može prevaliti:

$$Udaljenost (put) = 40 \text{ km/h} \times 15,000 \text{ sati} = 600.000 \text{ km}$$

Ovo je teorijski put koji bi vozilo moglo prevaliti bez puknuća lanca.

Uzme li se u obzir da se prosječno osobno vozilo u pravilu projektira na put od 300.000 km, u ovom smislu može se zaključiti da bi se i vijek trajanja lanca mogao projektirati na dvostruko manje radnih sati. Na kraju treba naglasiti da dobro podmazivanje lanca ima ključnu ulogu u njegovoj dugovječnosti. Proračun lanca uvelike ovisi o točno definiranim uvjetima rada, poput opterećenja, brzine, uvjeta okoline i intervala održavanja. Osnovi nedostaci lančanog prijenosa

o kojima treba voditi računa prilikom konstruiranja su habanje lanca, lom uslijed umora lanca i neravnomjernost brzine okretaja radnog lančanika.

Precizno određivanje parametara ključno je za optimalan odabir materijala, dimenzija i tipa lanca, čime se osigurava pouzdanost i dugotrajnost sustava.

Uz to, pravilno održavanje i redovita kontrola također značajno doprinose smanjenju rizika od prijevremenog trošenja i u konačnici pucanja lanca, ali i ostalih vezanih dijelova.

## 7. LABORATORIJSKA ANALIZA OŠTEĆENOG POGONSKOG LANACA

### 7.1. Predmet laboratorijske analize

Za potrebe eksperimentalnog dijela ovog rada obavljena je analiza i laboratorijsko ispitivanje pogonskog lanca razvodnog mehanizma osobnog automobila slijedećih specifikacija:

**Tablica 2.** Tehničke značajke automobila analiziranog pogonskog lanca razvoda[22]

Marka vozila	BMW
Tip vozila	SERIJA 3
Tvornička oznaka tipa	F30
Oznaka motora	320d
Tip motora	N47D20
Vrsta Mjenjača	Manualni
Broj brzina mjenjača	6
Vrsta Pogona	Stražnji
Godina proizvodnje	2014
Vrsta Motora	Diesel
Raspored Cilindara ID	Redni
Broj cilindara	4
Radni obujam motora [cm <sup>3</sup> ]	1995
Snaga motora pri broju okretaja [KW] / [min-1]	135/4000
Okretni moment pri broju okretaja [KNm] / [min-1]	380/1750

Za pogon razvodnog mehanizma kod ovog tipa motora koristi se sustav lančanika i lanaca oznake BMW 1352 7797905-01 IWIS.

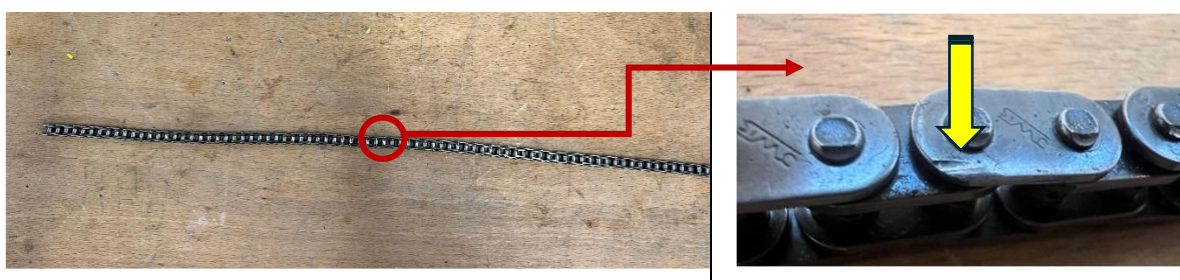
### 7.2. Mjerenje dimenzija elemenata lanca

Na ovom automobilu su zapaženi slijedeći simptomi koji su upućivali na oštećenje lanca razvodnog mehanizma:

- Glasan rad razvoda prilikom pokretanju hladnog motora. Zvuk je podsjećao na metalno udaranje ili zveckanje novčića. Nakon što se motor zagrije ovi zvukovi bi nestali.

- Sličan zvuk (kratkotrajno zveckanje) se ponekad pojavljivao tijekom vožnje. To je upućivalo i na mogućnost kvara na natezaču lanaca ili probleme u sustavu podmazivanja koji ne osigurav dovoljnu količinu ulja u razvodnom mehanizmu.
- Povremeno se osjećala pojava gubitka snage i lošije izgaranje, odnosno zacrtnjeni ispušni plinovi, što je upućivalo na mogućnost da je došlo do istegnuća lanca i djelomičnog gubitka sinkronizacije između rada radilice i bregaste osovine.

U svrhu analize stanja pogonskog lanaca, a što je tema ovog rada, pristupilo se demontaži razvodnog mehanizam i izuzimanju upravo pogonskog lanaca razvoda.



**Slika 11.** Rabljeni lanac razvodnog mehanizma oznake BMW 1352 7797905-01 IWIS s prikazanim oštećenjima

Prilikom demontaže se uočila povećana zračnost u dosjedu lanca i lančanika. Nakon demontaže uočena su manja fizička oštećenja na samom lancu (naznačeno na slici 11.).

Ove činjenice su upućivale na povećanu istrošenost elemenata lanaca, kao i proširenje dosljednih površina između spojnice i osovine članaka lanca.

Radi lakše analize deformacija i istrošenosti lanca pribavljen je novi lanac istog tipa i proizvođača.

Nakon što se utvrdilo da se radi o istom lancu, pristupilo se usporedbi ukupne dužine lanca i vizualnoj usporedbi samih lanaca. U tu svrhu su rastavljena oba lanca na način da se izgradio po jedan cijeli članak.



**Slika 12.** Uspoređivanje dužine lanaca

Vizualno i mjerenjem se može zaključiti da je zbog deformacija i istrošenosti članaka rabljenog lanca došlo do povećanja njegove dužine za približno 6 mm, što je bio uzrok nepravilnog rada motora.

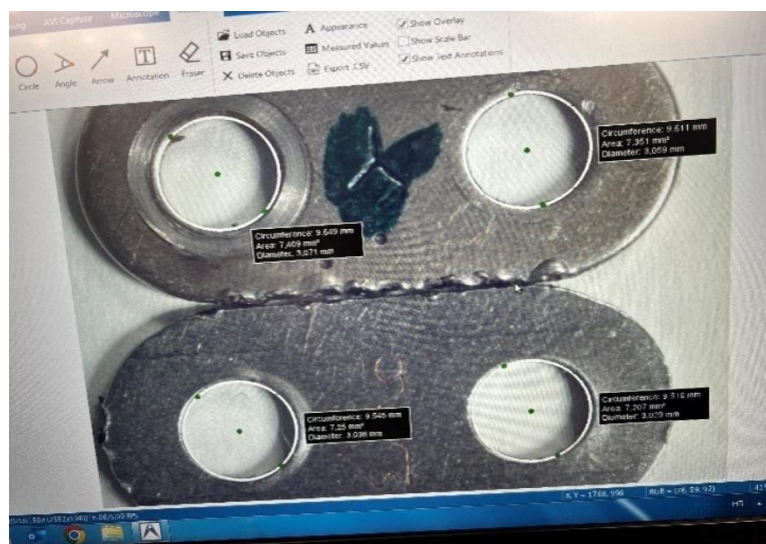
Za potrebe daljnje analize obavljeno je precizno mjerenje deformacija na elementima jednog članka rabljenog lanca.

Mjerenje je obavljeno u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, na ultrazvučnom mjernom uređaju.

Mjerenjem otvora na spojnici lanca dobiveni su slijedeći rezultati:

Tablica 3. Mjerni rezultati otvora spojnice članka lanca

Prvi otvor:		Rabljeni lanac	Novi lanac
	Promjer	3,071 mm	3,038 mm
	Opseg	9,649 mm	9,545 mm
	Površina	7,409 mm <sup>2</sup>	7,25 mm <sup>2</sup>
Drugi otvor:			
	Promjer	3,059 mm	3,029 mm
	Opseg	9,611 mm	9,516 mm
	Površina	7,351 mm <sup>2</sup>	7,207 mm <sup>2</sup>



Slika 13. Prikaz mjernih rezultata iz mjernog sustava laboratorija

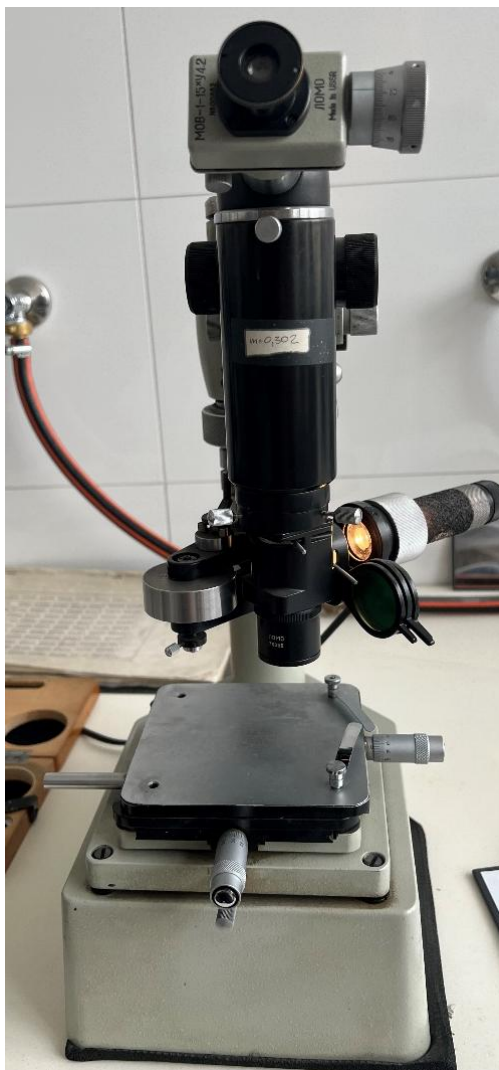
Iz analiziranih rezultata je razvidno da je na rabljenom lancu došlo do povećanja promjera na oba otvora spojnice članka lanca. Ovo je imalo za posljedicu povećanje opsega i površine

provrtu. Ova promjena geometrijskih karakteristika članka lanca ima za posljedicu povećanje ukupne dužine lanca što se izravno odražava na ispravan rad razvodnog mehanizma, odnosno motora automobila.

### 7.3. Analiza materijala oštećenog pogonskog lanca

Laboratorijska analiza materijala pogonskog lanca razvodnog mehanizma obavljena je u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale FSB-a. Mjerenje imalo je za cilj utvrditi tvrdoću materijala spojne pločice elementa članka oštećenog i novog lanaca, kako bi se moglo utvrditi je li tijekom uporabe došlo do promjene ove karakteristike materijala lanca.

Za svaku spojnu pločicu obavljeno je po 5 mjerenja, na uređaju za mjerenje tvrdoće (tvrdomjeru), PMT-3Y4.2.



Slika 14. Uređaj za mjerenje tvrdoće materijala PMT-3Y4.2.

Očitani su slijedeći mjereni rezultati :

**Tablica 4.** Rezultati mjerenja tvrdoće

Pločica novog lanaca		Pločica rabljenog lanca	
Lijeva strana - L	Desna strana - D	Lijeva strana	Desna strana
398	508	350	440
391	494	352	437
397	490	348	434
388	491	349	434
388	489	352	436

Tvrdoća po Vikarsku se dobije na slijedeći način:

1. Izračun faktora  $HV = (D-L) \cdot m$
2. Očitanje iz tablice Uređaja

gdje je:

$m = 0,302$  faktor mjernog uređaja

L – izmjerena vrijednost na lijevoj strani mjerne točke

D – izmjerena vrijednost na desnoj strani mjerne točke

Nakon izračuna i očitavanja iz tablice uređaja dobiveni su slijedeći rezultati za tvrdoću:

Broj mjerenja	Pločica novog lanaca, HV0,2	Pločica rabljenog lanca, HV0,2
1	339	505
2	386	553
3	473	553
4	383	566
5	399	579
Srednja vrijednost	396	551
Standardna devijacija	49	27

Iz dobivenih rezultata je vidljivo da se uporabom lanca mijenja (povećava) tvrdoća njegovih spojnih pločica. Ova promjena smanjuje otpornost lanca na dinamička opterećenja.

#### 7.4. Analiza rezultata

Laboratorijskim ispitivanjima utvrđeno je produljenje upotrjebljavanog pogonskog lanca u odnosu na novi pogonski lanac za 6 mm. Rezultati ispitivanja pokazuju da dolazi do značajnih promjena u geometrijskim i mehaničkim svojstvima razvodnog lanca tijekom eksploatacije. Primijećeno je produljenje lanca zbog trošenja spojnih elemenata, što dovodi do gubitka preciznosti u radu razvodnog mehanizma. Također, mikrotvrdoća spojnih pločica lanca

povećala se kod rabljenog uzorka, što upućuje na očvršćivanje materijala uslijed dugotrajnog izlaganja opterećenjima i cikličkim napreznjima.

Analiza dimenzija otvora spojnih pločica pokazala je povećanje promjera, opsega i površine otvora na rabljenom lancu, što sugerira povećano trošenje i nastajanje zazora između osovinica i pločica. Ova promjena izravno utječe na povećanje ukupne dužine lanca, što uzrokuje probleme u preciznosti rada ventila i može dovesti do pogrešaka u faziranju motora.

Osim toga, primijećeno je da veća tvrdoća spojnih pločica kod rabljenog lanca može smanjiti otpornost na dinamička opterećenja, što dugoročno može dovesti do zamora materijala i mogućeg loma lanca. Takve promjene su posebno kritične u suvremenim motorima koji rade pri visokim okretajima i opterećenjima.



## 8. ZAKLJUČAK

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da trošenje razvodnog lanca ima utjecaj na njegovu geometrijsku stabilnost i mehanička svojstva. Došlo je do produljenja lanca, povećanja zazora između osovinica i pločica te povećanja tvrdoće, što upućuje na potrebu za pažljivim nadzorom i redovitom zamjenom kako bi se osigurao ispravan rad motora.

Osim toga, povećana tvrdoća spojnih pločica može dovesti do smanjenja otpornosti na umor i potencijalnog prijevremenog loma, što dodatno naglašava važnost pravilnog održavanja i podmazivanja lanca. U usporedbi s novim lancem, rabljeni lanac pokazuje znakove trošenja koji mogu utjecati na pouzdanost i performanse motora. Stoga je od presudne važnosti koristiti kvalitetne materijale i optimalne metode toplinske obrade kako bi se povećala trajnost lanca.

Za razumijevanje promjena koje nastaju tijekom eksploatacije razvodnog lanca, predlažu se sljedeća buduća ispitivanja:

- Ispitivanje umora materijala – kako bi se procijenila otpornost na ciklička opterećenja i predvidio vijek trajanja lanca.
- Usporedba različitih toplinskih obrada – kako bi se utvrdio optimalan proces za povećanje trajnosti.
- Testiranje različitih vrsta maziva i podmazivanja – s ciljem smanjenja trenja i produljenja radnog vijeka lanca.
- Numerička simulacija trošenja – kako bi se unaprijed predvidjeli kritični parametri koji dovode do otkazivanja lanca.

Ova ispitivanja omogućila bi daljnje optimizacije materijala i konstrukcije razvodnih lanaca, čime bi se povećala njihova pouzdanost i sigurnost u radu motora.

**LITERATURA**

- [1] Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik (2013) Tehnika motornih vozila. 30. izd. Berlin: Europa-Lehrmittel.
- [2] Stone, R. (2012) Introduction to Internal Combustion Engines. 4. izd. Basingstoke: Palgrave Macmillan.
- [3] Heywood, J. B. (2018). Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education.
- [4] SKF, Timing belt vs. timing chain. Dostupno na: <https://vehicleaftermarket.skf.com/mt/en/blog/skf-mechanic/timing-belt-vs-timing-chain> (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [5] Ferguson, C. R. & Kirkpatrick, A. T. (2015). Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences. 3rd ed. Hoboken: Wiley.
- [6] Bosch (2024) MKE DB Poster Wasserpumpe. Dostupno na: [https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/country\\_specific/za/news\\_9/download\\_tasers/belts\\_1/mke\\_db\\_poster\\_wasserpumpe\\_en\\_68334.pdf](https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/country_specific/za/news_9/download_tasers/belts_1/mke_db_poster_wasserpumpe_en_68334.pdf) (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [7] MotoFocus.eu, Skraćivanje intervala između zamjena zupčastog remena – kada je najbolje to učiniti?. Dostupno na: <https://www.motofocus.eu> (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [8] Bosch (2024) MKE DB Poster Wasserpumpe. Dostupno na: <https://assets.aa.rb.mam.bosch.tech/assets/api/2971708/Screen> (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [9] Centar za vozila Hrvatske (2024) Stručni bilten 181. Zagreb: CVH.
- [10] Continental (2024) Timing belt change recommendation. Dostupno na: <https://www.continental-engineparts.com/eu/hr-hr/aftermarket/news/news/09-04-2024-timing-belt-change> (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [11] Jutarnji.hr (2023) Lanac razvodnog mehanizma – ubijaju ga kratke relacije i loše ulje. Evo koliko stoji zamjena za BMW, Mercedes. Dostupno na: <https://www.jutarnji.hr/autoklub/servis/lanac-razvodnog-mehanizma-ubijaju-ga-kratke-relacije-i-lose-ulje-evo-koliko-stoji-zamjena-za-bmw-mercedes-15481221> (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [12] Wippermann, Roller chains – industrial applications. Dostupno na: <https://www.wippermann.com/en/products/industrial-chains/chain-types/roller-chains> (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [13] Wikipedia, Legirani čelik. Dostupno na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Lagirani\\_%C4%8Delik](https://hr.wikipedia.org/wiki/Lagirani_%C4%8Delik) (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).

- [14] DIN 8187 (2013) Standard valjkastih lanaca. Dostupno na:  
<https://www.newfastener.com/wp-content/uploads/2013/03/DIN-8187.pdf>  
(Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [15] Fushun Special Steel (2015) DIN 17200 – Steels for Quenching and Tempering. Dostupno na: <https://www.fushunspecialsteel.com/wp-content/uploads/2015/09/DIN17200-Steels-for-Quenching-and-Tempering.pdf>  
(Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [16] SKF, SKF Timing Brochure Hyper Rev1. Dostupno na:  
[https://cdn.daparto.de/docs/0050/SKF\\_TIMING\\_BROCHURE\\_HYPER\\_REV1.PDF](https://cdn.daparto.de/docs/0050/SKF_TIMING_BROCHURE_HYPER_REV1.PDF)  
(Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [17] Maxpeedingrods (n.d.) BMW N47D20 Timing Chain Kit. Dostupno na:  
<https://www.maxpeedingrods.com/product/for-bmw-n47d20a-n47d20b-n47d20c-n47c20a-n47-upper-lower-rails-timing-chain-kit.html> (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [18] Decker, K.-H. (2018) Elementi strojeva. 15. izd. Berlin: Springer.
- [19] ISO 15654 (2015) Metode ispitivanja valjkastih lanaca pod umorom. Dostupno na:  
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/50842/c9bee557ee854b20b8cf49889a951eed/ISO-15654-2015.pdf> (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [20] MCC Chains (2023) Fatigue test method for roller chain. Dostupno na:  
<https://blog.mccchains.com/2023/02/22/fatigue-test-method-for-roller-chain>  
(Pristupljeno: 16. veljače 2025.).
- [21] Decker, K.-H. (1975) Elementi strojeva. Berlin: Springer.
- [22] Centar za vozila Hrvatske (2024) Jomologija – katalog tehničkih značajki vozila. Zagreb: CVH.
- [23] ISO 606 (2015) Kratkopitchni prijenosni precizni valjkasti lanci, dodaci i pridruženi lančani zupčanici. Ženeva: Međunarodna organizacija za standardizaciju.
- [24] MCC Chains (2021) Tensile test method for roller chain. Dostupno na:  
<https://blog.mccchains.com/2021/01/18/tensile-test> (Pristupljeno: 16. veljače 2025.).