

# Projekt hidrauličkog hibridnog sustava autobusa

---

Rešetar, Leon

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:146917>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-03**



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)



image not found or type unknown

ISTARSKO VELEUČILIŠTE –  
UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE APPLICATE

Leon Rešetar

**PROJEKT HIDRAULIČKOG HIBRIDNOG SUSTAVA AUTOBUSA**

Završni rad

JMBAG: 0248058942, redoviti student

Studijski smjer: MEHATRONIKA

Predmet: Pneumatika i hidraulika

Mentor: izv. prof. dr. sc. Goran Gregov

Pula, 2023.

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	3
<b>2. PRIMJENA HIDRAULIČNOG HIBRIDNOG SUSTAVA</b> .....	4
<b>2.2. Povijesni razvoj hibridnih vozila</b> .....	4
<b>2.3. Hibridna tehnologija</b> .....	8
<b>2.4. Vrste hibrida</b> .....	11
<b>2.5. Podjela pogona na vrste goriva</b> .....	15
<b>2.5. Hidraulični hibridni pogon</b> .....	21
<b>2.5.1. Princip rada hibridnog sustava</b> .....	<b>23</b>
<b>2.6. Povijesni razvoj hidrauličnih hibridnih vozila</b> .....	27
<b>2.7. Hidraulična hibridna tehnologija</b> .....	28
<b>2.8. Hidraulični hibridni pogon</b> .....	30
<b>3. ANALIZA PRIMJENE HIDRAULIČNOG HIBRIDNOG SUSTAVA U AUTOBUSIMA</b> .....	34
<b>3.1. Hibridni autobusi</b> .....	34
<b>3.1.1. Prednosti hibridnih autobusa</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1.2. Nedostatci hibridnih autobusa</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2. Hidraulični hibridni autobusi</b> .....	38
<b>3.3. Integrirano korištenje kinetičke energije u hibridnim autobusima</b> .....	39
<b>4. PRORAČUN PARALELNOG HIDRAULIČNOG HIBRIDNOG SUSTAVA</b> .....	41
<b>4.1. Određivanje dinamike vožnje gospodarskog vozila</b> .....	43
<b>4.2. Odabir hidromotora/pumpe</b> .....	49
<b>4.3. Proračun akumulatora</b> .....	50
<b>4.4. Proračun cijevi</b> .....	52
<b>4.6. Pad tlaka u cijevima</b> .....	54
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	56
<b>6. POPIS LITERATURE</b> .....	57
<b>SAŽETAK</b> .....	59
<b>SUMMARY</b> .....	60
<b>Popis slika</b> .....	61
<b>Popis grafova</b> .....	62

## 1. UVOD

Gradski prijevoz jedan je od najučestalijih i najintenzivniji prijevoza putnika budući da se on odvija bez prestanka, a u svrhu funkcioniranja grada i prigradskih naselja. Velika koncentracija stanovništva u gradovima zahtjeva gradski prijevoz koji se u većim gradovima odvija od 0 – 24 sata. Ovakav ritam vrlo je potreban jer grad nikada ne spava i konstantno se u njemu odvijaju aktivnosti. Kako ne bi bilo smetnji u tim aktivnostima organiziran je konstantni prijevoz putnika. Tijekom dana taj prijevoz je učestaliji i u špicama prometa vrlo gust, dok je u večernjim i noćnim satima sveden na minimum koliko je potrebno. Budući da se autobusi konstantno koriste oni troše određena benzinska i diesel goriva koja su u velikim količinama, a ujedno svojim izgaranjem uvelike štete prirodi i njenom zagađenju. Kako se društvo razvija i napreduje, tako se razvija i napreduje ljudska svijest o zagađenju i boljem korištenju energije. Tome su konkretne činjenice koje ukazuju kako se klima, vrijeme i priroda mijenjaju. Sve su učestalije kisele kiše, nevrijeme, cunamiji i druge vremenske nepogode koje su reakcija prirode na zagađenje i slabo očuvanje prirode. Sve te katastrofe, problemi, uništavanje prirode, učestale promjene vremena, oscilacije toplog i hladnog vremena kao i visoki troškovi goriva potaknuli su društvo da se okrene boljem očuvanju prirode, manjem zagađenju i uštedi energije. U tom smjeru već se godinama i desetljećima radi na kreiranju, pronalasku i patentiranju boljeg sustava korištenja energije, s manjim zagađenjem i većom iskoristivošću. U tom smjeru radi se na iskorištavanju solarne energije, korištenjem struje i baterije kao glavnog izvora, kombinacija motora s unutarnjim izgaranjem i elektromotora. Ovim spomenutim smjerom dolazi se do današnjih hibridnih hidrauličnih vozila koja se sve više koriste u prometu, a pogotovo hibridni hidraulički autobusi kod kojih se najviše može uštedjeti i iskoristiti energija, te i smanjiti zagađenje smanjenim izgaranjem. Kako se društvo razvija tako se razvija svijest i tehnologija, te i bolji način funkcioniranja, a u svrhu općeg boljitka i zaštite ljudi, prirode i životinja. Stoga je tema ovog rada „Projekt hidrauličkog hibridnog sustava autobusa“ budući da su autobusi najveći potrošači i veliki zagađivači, a koji se konstantno koriste. Njihovim razvojem i integriranjem hibridnih hidrauličnih sustava u pogon napravljen je veli preokret, te se u ovom radu opisu kako spomenuti sustav funkcionira, njegove prednosti i nedostatke, te i kako nailazi na primjenu i proračun. Rad je strukturiran kroz pet poglavlja u kojima će biti opisano sve od primjene

hidrauličnog hibridnog sustava, povijesni razvoj, vrste sustava, analize sustava u autobusima, rad, snaga motora, elektromotor i druge stvari, a sve u cilju poboljšanja i većeg iskorištavanja čišće energije.

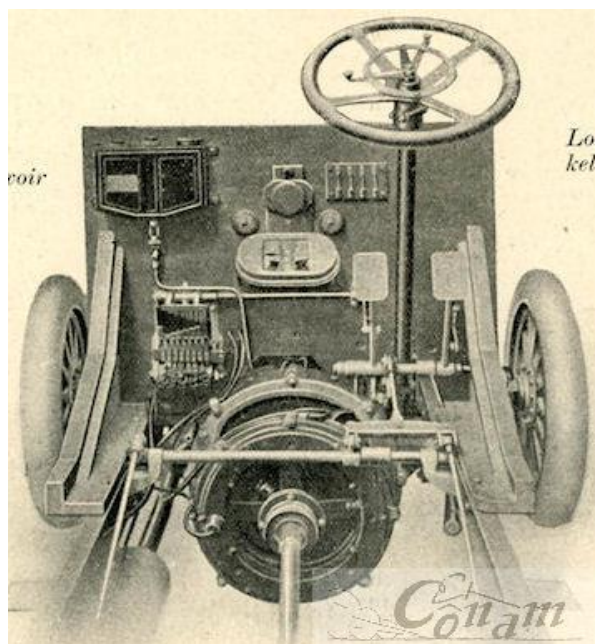
## **2. PRIMJENA HIDRAULIČNOG HIBRIDNOG SUSTAVA**

Od izuma kotača čovjekov napredak i razvoj znatno se brže kretao s obzirom na to da je kotač sve ubrzao. To znači da se od izuma kotača sve u čovjekovom životu brže odvijalo, razvijalo i unaprjeđivalo. Čovjek je lakše prenosio terete, lakše i brže je počeo putovati, te mu je život postao jednostavniji i daleko je više mogao napraviti i postići. Dobar primjer je razvoj prijevoznog sredstva od bicikla pa sve do aviona gdje je danas malo što neizvedivo, jasno u ljudskim granicama i prirodnim mogućnostima.

### **2.2. Povijesni razvoj hibridnih vozila**

Povijesni razvoj hibridnih vozila počinje još davne 1840. godine i vezano je za ime Henri Pieper.

Na slici 1. prikazan je „Auto-Mixte“ iz Herstala, Belgija.



Slika 1. Auto-Mixte, Herstal, Belgija

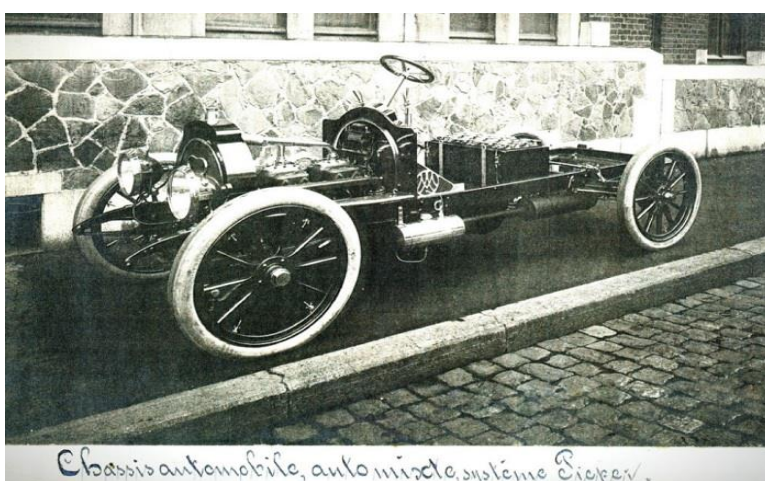
Izvor: <https://conam.info/vraag-a-aanbod/opgeloste-vragen/281-auto-mixte-uit-herstal-belgie>, pristupljeno 29.6.2023.

Henri Pieper (1840. – 1898.), izumitelj i tvorničar oružja njemačkih korijena iz Herstala u Belgiji već je 1895. počeo rad na hibridnom automobilu, kojeg će njegov sin Nicolas dovršiti 1899., dvije godine prije nego je to napravio Porsche! Proizvodnja marke Pieper ipak je ostala vjerna električnim i benzinskim modelima, no po Pieperovim patentima 1906. počinje rad nove marke, dosta zbunjujuće nazvane Auto-Mixte, premda nije imala veze s tvrtkom Lohner-Porsche također hibridnim modelom naziva Mixte (autoportal.hr, 2021).

. Od 1906. do 1911. vozila su se izrađivala pod ovim imenom. Naziv Auto-Mixte odnosi se na posebnu tehniku (hibrid): benzinski motor pokreće električni generator. Električni motori pokretali su kotače. Obično je dinamo punio baterije, kada je bila potrebna dodatna vučna snaga, dinamo je korišten kao 'dodatni' električni motor, napajan iz baterija. Godine 1909. predstavljene su šasije s kliznim moto-

rom Daimler-Knight. Od 1911. proizvodili su se samo kamioni. Od 1912. pod imenom “Pescatore”. Neposredno prije Prvog svjetskog rata tvrtka je nestala. Od 1919. u tvornici su se proizvodili poznati motocikli Gillet (Conam, 2023).

Na slici 2. prikazan je „Auto Mixte“ i prva tvornica koja je proizvodila isključivo hibridna vozila.

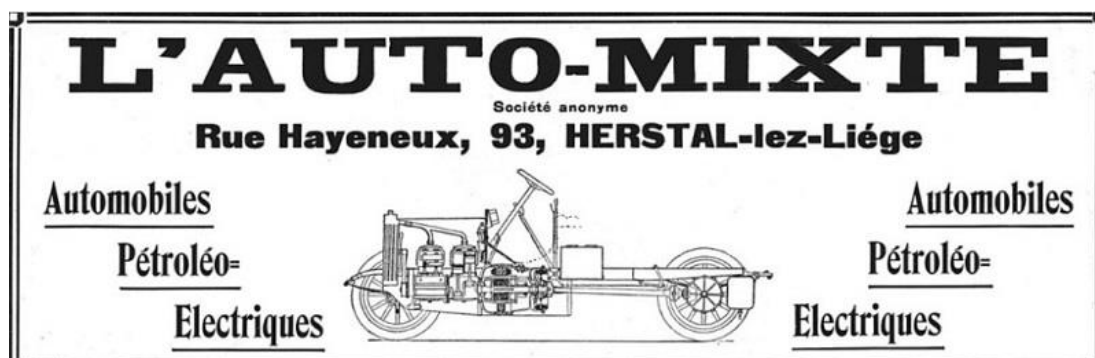


Slika 2. „Auto Mixte“ i prva tvornica

Izvor: <https://autoportal.hr/enciklopedija/auto-mixte-1906-1912-prva-tvornica-koja-je-radila-iskljucivo-hibride/>, pristupljeno 29.6.2023.

Hibridna tehnologija bila je prikladnija za kamione, koji su činili okosnicu produkcije (proizvodili su šasije s pogonom, za razne nadgradnje – slika), no do gašenja proizvodnje 1912. u ponudi su bili i osobni automobili. Proizvedeno ih je razmjerno malo, uz probleme s masom i cijenom, a od 1911. prodavani su pod brendom Pescatore, sve dok ih nije preuzela poznatija belgijska tvrtka Imperia (autoportal.hr, 2021).

Na slici 3. prikazan je reklamni letak za hibridni automobil „Auto Mixte“.



Slika 3. Reklamni letak

Izvor: <https://autoportal.hr/enciklopedija/auto-mixte-1906-1912-prva-tvornica-koja-je-radila-iskljucivo-hibride/>, pristupljeno 29.6.2023.

Na letku se mogu vidjeti sve karakteristike hibridnog automobila „Auto Mixte“ pa i sami nacrt, te i od kojih je sve elementa konstruiran. Na ovaj način svatko je imao uvid u to što se prezentira i što se može kupiti.

Porsche je 1900. godine konstruirao prvi automobil na hibridni pogon, kombinaciju električne struje i benzina, koji je dvije godine kasnije čak serijski proizvođen, 95 godina prije suvremenog hibridnog pogona. U međuvremenu su proizvođači odustali od električne energije kao pogonskog goriva, a Porsche je prešao k Daimleru u Njemačku, da bi kasnije po nalogu Hitlerove vlasti konstruirao prvi Volkswagen i osnovao tvornicu koju danas vodi njegov unuk Ferdinand Piech. Ferdinand Porsche konstruirao je 1949. prvi automobil koji nosi njegovo ime (ezadar.net, 2023).

Ozbiljnije studije o električno-hibridnim vozilima dostupne su već 70-ih godina prošlog stoljeća. Tada je Amerikanac Victor Wouk osobno vozilo tipa "Buick Skylark" preradio u hibridno vozilo (Bohme, 2007).

Prvi prototip 1982. godine pokazao je njemački proizvođač automobila koji ipak nije uspio ući u serijsku proizvodnju. Također su i Audi i Volkswagen godinama radili istraživanja hibridnih pogona. Godine 1997. s Toyotom počinje povijest uspjeha hibridnih automobila. Od tada je prodano 750.000 automobila modela "Prius" (Bohme, 2007).



Za 2010. godinu Toyota je procijenila prodaju od milijun primjeraka iste marke (autoholik.net, 2010).

Za mnoge stručnjake, hibridni pogon je tek jedno od rješenja na putu do vozila bez emisije štetnih plinova (Čevra, 2001).

Gorivo koje koriste benzinski i dizel motori, a koji se koriste u prijevozu ljudi i robe konstantno cjenovno rastu, te je prisutan i određeni pritisak na kupce koji taj porast najbolje osjete. Kako bi se svemu tome na određeni način doskočilo i olakšalo barem kupcima radi se na pronalasku i patentiranju novih tehnologija koje su već prisutne kroz hibridni način upogonjavanja vozila. Kako se sve razvija tako se i hibridni pogon razvija, a uz njega i drugi oblici.

Na slici 4. prikazan je današnji Porsche Panamera 4 E-Hybrid.



Slika 4. Današnji Porsche Panamera 4 E-Hybrid

Izvor: <https://tvautomagazin.hr/porsche-panamera-4-e-hybrid/>, pristupljeno 29.6.2023.

### **2.3. Hibridna tehnologija**

Hibridna tehnologija je tehnologija koja omogućuje više od jedne vrste pogona za vozila. Praktična je jer se može kombinirati minimum dvije vrste izvora koji pokreću vozilo.

Hibridni pogonski sustavi sastoje se iz kombinacije od najmanje dva različita pogona. Motor hibridnog vozila sastoji se od kombinacije konvencionalnog motora s unutrašnjim izgaranjem i

električnog motora s baterijskim sustavom što omogućuje optimalnije ubrzavanje, manju zagađenost okoliša štetnim plinovima i manju potrošnju goriva (Popović, Đogić, Rakić, 2011, 2).

Tako hibridna tehnologija daje veće mogućnosti, manje je zagađivanje okoliša i ekonomičnija je. Ukoliko se jedan sustav i način pogona potroši ostaje drugi, tako da daje više mogućnosti. Ovakav način korištenja hibridne tehnologije daje na izbor kojim će se primarno koristiti, a daje mogućnost korištenja malo jednog i malo drugog.

Hibridna tehnologija se može učinkovito primijeniti za poboljšanje iskoristivosti raznih pogona, bez obzira na vrstu upotrijebljenog goriva (benzin, dizel gorivo, alternativna goriva ili gorive ćelije). Hibridna vozila ne samo da ispuštaju manje štetnih plinova i troše manje goriva, ona su i potpuno tiha u radu te imaju impresivne radne karakteristike (Selci, 2009, 5).

Što se tiče rada ono je tiše i manje šteti okolišu što je vrlo prihvatljivo. Jedino što kada se radi na pogonu baterije tada je vozilo iznimno tiho na što se mora naviknuti, a uz to i za okolinu je nečujno. Ponekad je ta nečujnost nezgodna pogotovo što takvo vozilo drugi sudionici u prometu ne čuju jer nema zvukova koji bi bili glasni. Tako da taj aspekt može biti kao jedna mana, a na kojoj se radi u samoj proizvodnji.

Revolucionarni napredak postignut hibridnom tehnologijom je inteligentno upravljanje energijom. Navedena energija dolazi iz dva različita izvora, tako da svaka dimenzija vožnje, bilo da je riječ o ubrzavanju na otvorenoj cesti, kočenju, zaustavljanju ili pokretanju, bude obavljena na najbolji mogući način. Oba izvora energije rade zajedno pod nadzorom sofisticiranog računala, koje upravlja energijom, pri čemu se postiže maksimalna učinkovitost u vožnji (Selci, 2009, 5).

Kada se radi o hibridnom sustavu pokretanja vozila ono je u prednosti u odnosu na klasično pokretanje jer može koristiti sustav i pogon u trenucima kada je on najefikasniji i kada se iz njega može izvući ono najbolje. Izbor je taj koji daje mogućnost korištenja u određenim situacijama najbolji za priliku koja se pojavi.

Kad konvencionalno vozilo počne kočiti, kinetička energija proizvedena kočenjem počne se pretvarati u toplinu koja se gubi u okolini. Ukupna količina izgubljene energije ovisi o tome koliko

često, jako i dugo vozilo koči. Spremanjem te energije u neke vrste akumulatora i njezinim naknadnim korištenjem kad je ona neophodna, dobivamo hibridno vozilo (Selci, 2009, 5).

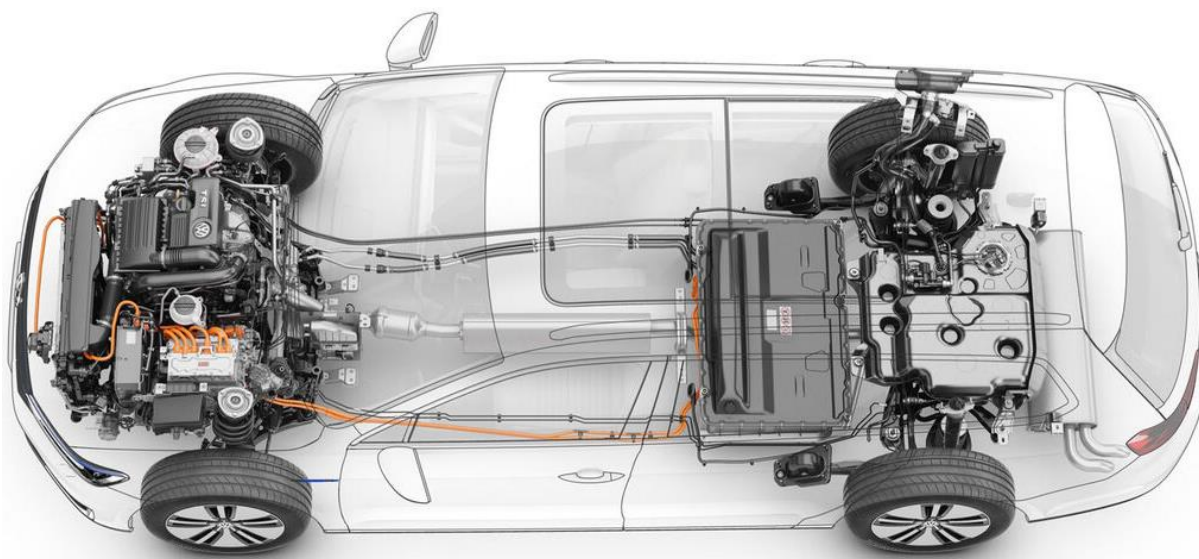
Kod vozila na klasični pogon kao što je benzin i dizel gorivo dolazi do određene energije koja se gubi u okoliš i koja postaje nepovratna, a što je obrnuto kod hibridnog vozila.

Plug-in hibridni pogon donosi kombinaciju elektromotora i benzinskog motora, objedinjujući prednosti obaju sustava, a što se može vidjeti kod Volkswagena modela Golf GTE. On se, između ostalog, sastoji od učinkovitog 1,4 l TSI motora, hibridnog modula s e-motorom i 6-stupanjskim automatiziranim mjenjačem s dvije spojke (DSG) te litij-ionske baterije. Učinkoviti TSI i elektromotor s komfornim dosegom u električnom pogonu za odgovornu mobilnost ([www.volkswagen.hr/hibridna-vozila-nova](http://www.volkswagen.hr/hibridna-vozila-nova)).

Ova kombinacija elektromotora i benzinskog motora uvelike zadovoljava sve korisnike jer je dio koji vodi u klimatski osviješteno razmišljanje i stavove. Na taj način ovakva tehnologija ima primjenu kod svih zahtjevnih korisnika koji brinu o okolišu kao i kod svih drugih koji će tek krenuti ovim smjerom. Kod ove tehnologije pozitivne karakteristike su te što je potrošnja u odnosu na klasično vozilo koje se kreće isključivo korištenjem benzina i dizela za 50% manja, a štedi se i posprema 50% energije što ovisi od modela vozila.

Elektromotor omogućuje gotovo nečujnu vožnju gradom bez lokalnih emisija, dok pri većim brzinama i na dugim dionicama kontrolu preuzima TSI benzinski motor. Vrstu pogona, primjerice kod Passata GTE i Passata GTE Variant, bir se jednostavno pritiskom na gumb. A ako se želi, jednako lako se spoji snaga obaju motora uz snažni GTE-Mode u takozvani "boost", koji će se pobrinuti za ubrzanje i tijekom kretanja. Čak je i punjenje struje gotovo jednako lako kao i punjenje smartphona. Naime, litij-ionska baterija može se potpuno puniti na utičnici, kućnom wallboxu ili javnoj stanici za punjenje ([www.volkswagen.hr/hibridna-vozila-nova](http://www.volkswagen.hr/hibridna-vozila-nova)).

Na slici 5. prikazana je Plug-in hibridna tehnologija.



Slika 5. Plug-in hibridna tehnologija

Izvor: <https://www.volkswagen.hr/hibridna-vozila-nova>, pristupljeno 30.6.2023.

## 2.4. Vrste hibrida

Hibridni pogoni koji se koriste u vozilima mogu se podijeliti na: **Električni hibridni pogon i Hidraulični hibridni pogon**

### a) **Električni hibridni pogon**

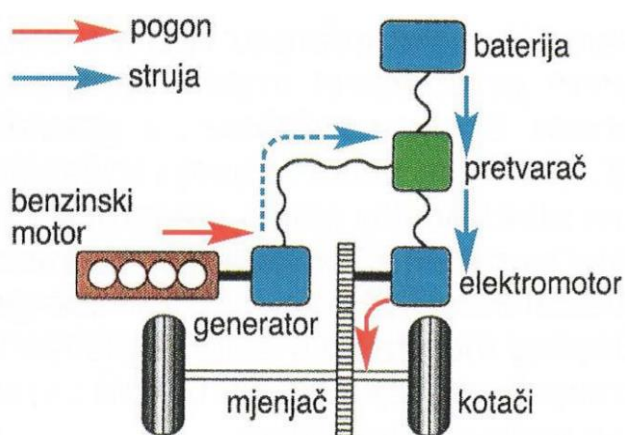
Električni hibridni pogon dijeli se:

- prema vrsti i to na:
  - serijske (potpune) hibride
  - paralelne (djelomične) hibride
- funkcijski obuhvaća:
  - start-stop
  - pomoć motoru
  - električnu vožnju
  - regenerativno kočenje
  - povećava izlaznu snagu

Poboljšanje ekonomičnosti potrošnje energije je za 10-40% ovisno o sistemu i periodu vožnje (Selci, 2009, 6).

### Serijski hibridni pogon

Na slici 6. prikazan je serijski hibridni pogon



Slika 6. Serijski hibridni pogon

Izvor: Dubić, K. (2010) Skladištenje električne energije kod hibridnih električnih vozila, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, pristupljeno 30.6.2023.

#### Prednosti serijskog hibridnog pogona su:

- Između motora i pogona kotača nema mehaničkih veza,
- Vlak pogona neće trebati prijenos sa više stupnjeva prijenosa jer električni motori imaju moment profil brzine koji je vrlo blizu idealnim za vuču,
- Zbog potpuno mehaničkog razdvajanja između motora i kotača strategija upravljanja pogona je jednostavnija, u odnosu na druge konfiguracije (Guadan, 2011).

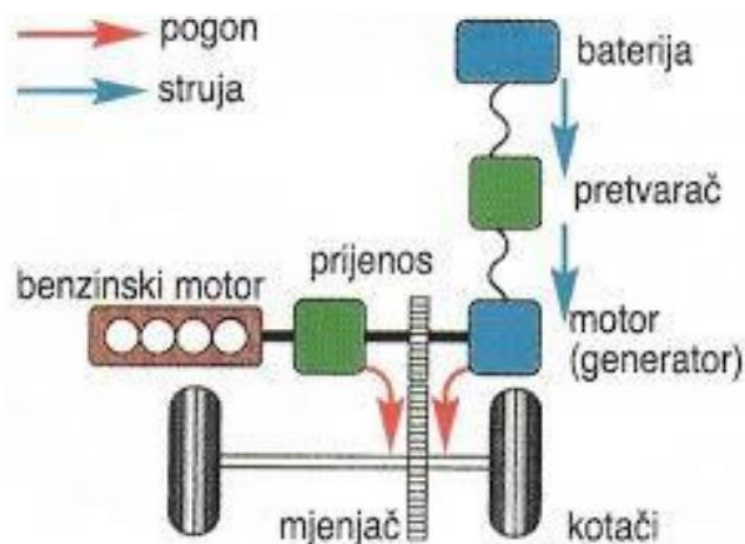
#### Nedostaci serijskog hibridnog pogona su:

- Energija iz motora mijenja svoj oblik gdje do pogonskih kotača mora doći dva puta (mehanička u električnu u generatoru i električna na mehaničku za vuču motora). Neučinkovitosti generatora i vučnih motora može prouzročiti značajne gubitke.
- Generator daje dodatnu masu i cijenu.

- c) Motor mora biti velik jer je jedini izvor pogona vozila kako bi proizveo dovoljno energije za optimalne karakteristike vozila u pogledu ubrzanja i promjenu stupnja prijenosa (Guadan, 2011).

### Paralelni hibridni pogon

Na slici 7. prikazan je paralelni hibridni pogon.



Slika 7. paralelni hibridni pogon.

Izvor: Dubić, K. (2010) Skladištenje električne energije kod hibridnih električnih vozila, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, pristupljeno 30.6.2023.

### Prednosti paralelnog hibridnog pogona su :

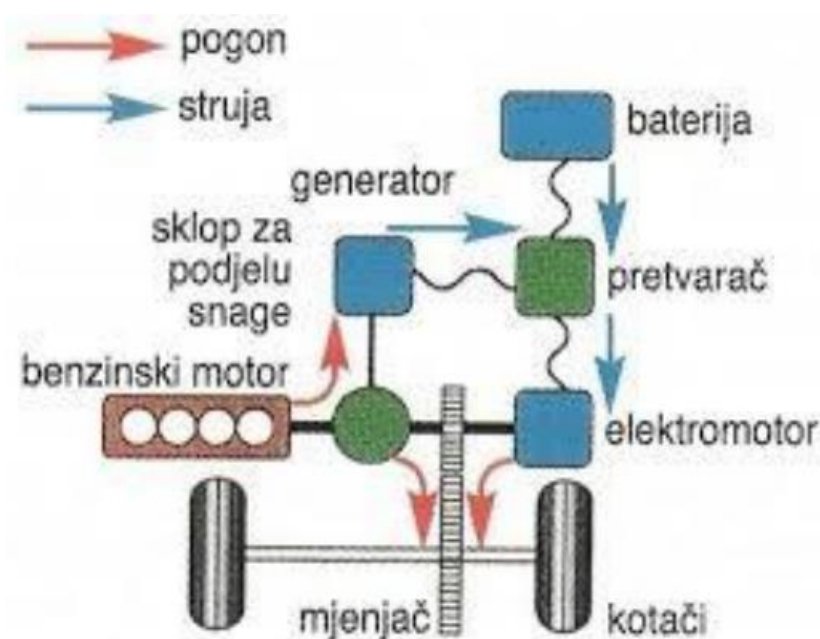
- Gubitak energije može biti manji jer motor i električni motor direktno omogućuju moment za pogon kotača i nema konvergencije oblika energije,
- Nema potrebe za ugradnjom dodatnog generatora i vučnog motora zato jer je sve manje i kompaktnije nego u serijskoj verziji (Guadan, 2011).

### Nedostaci paralelnog hibridnog pogona:

- a) Njegov glavni nedostatak je mehanička veza između motora i pogonskog kotača, jer tada operativni motor ne može biti fiksiran sa određenom brzinom i određenim momentom.
- b) Drugi nedostatak može biti složena struktura i kontrola. Općenito, mehanička spojka sastoji se od momenta spojke i brzine momenta. U spojki koja ima moment mehanička spojka dodaje moment od motora s unutrašnjim izgaranjem i motor zajedno donosi ukupni moment na pogon kotača (Guadan, 2011).

### Serijsko-paralelni hibridni pogon

Na slici 8. prikazan je serijsko-paralelni hibridni pogon.



Slika 8. Serijsko paralelni hibridni pogon

Izvor: Dubić, K. (2010) Skladištenje električne energije kod hibridnih električnih vozila, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, pristupljeno 30.6.2023.

Serijsko-paralelni hibridni pogon je kombinacija, serijskog i paralelnog pogona. Tim pogonom se postiže najveća učinkovitost zbog toga što oni objedinjuju prednosti i serijskog i paralelnog pogona.

Međutim, za razliku od paralelne konfiguracije, zahtjeva dodatni elektromotor te planetarni prijenosnik što ovu konfiguraciju čini kompliciranijom (Guadan, 2011).

Planetarni prijenosnik, koji se još naziva i djeliteľ snage, koristi se za odvajanje brzine motora s unutarnjim izgaranjem od brzine na kotačima vozila. Kod toga pogona elektromotor i benzinski motor istodobno vrte kotače. Generator puni bateriju i, po potrebi, spaja na pogon jednog ili drugog motora. Unatoč kompliciranosti zbog planetarnog prijenosnika, sve se više upotrebljava kod cestovnih vozila (Guadan, 2011).

Tako postoji podjela hibridnog pogona prema vrsti goriva koje se koristi, a ono je na četiri načina.

## **2.5. Podjela pogona na vrste goriva**

Hibridna vozila s obzirom na vrste goriva dijele se na slijedeće četiri vrste kao što je to:

- a) Benzinska hibridna vozila,
- b) Dizelska hibridna vozila,
- c) Hibridna vozila s alternativnim gorivima,
- d) Hibridna vozila s gorivnim člancima (Džambo, 2016, 12).

### **a) Benzinska hibridna vozila**

Benzinska hibridna vozila najčešće se koriste u prometu, a za izvor koriste elektromotor i benzinski motor s unutarnjim sagorijevanjem.

Na slici 9. Prikazano je benzinsko hibridno vozilo Across 2,5 E-CVT E-FOUR PHEV Elegance od tvrtke Suzuki.





Slika 9. Benzinsko hibridno vozilo Across 2,5 E-CVT E-FOUR PHEV Elegance od tvrtke Suzuki  
Izvor: [transportmagazin.hr/system/suzukijev-plug-in-hibrid-benzinsko-elektricna-lokomotiva/](https://transportmagazin.hr/system/suzukijev-plug-in-hibrid-benzinsko-elektricna-lokomotiva/),  
pristupljeno 30.6.2023.

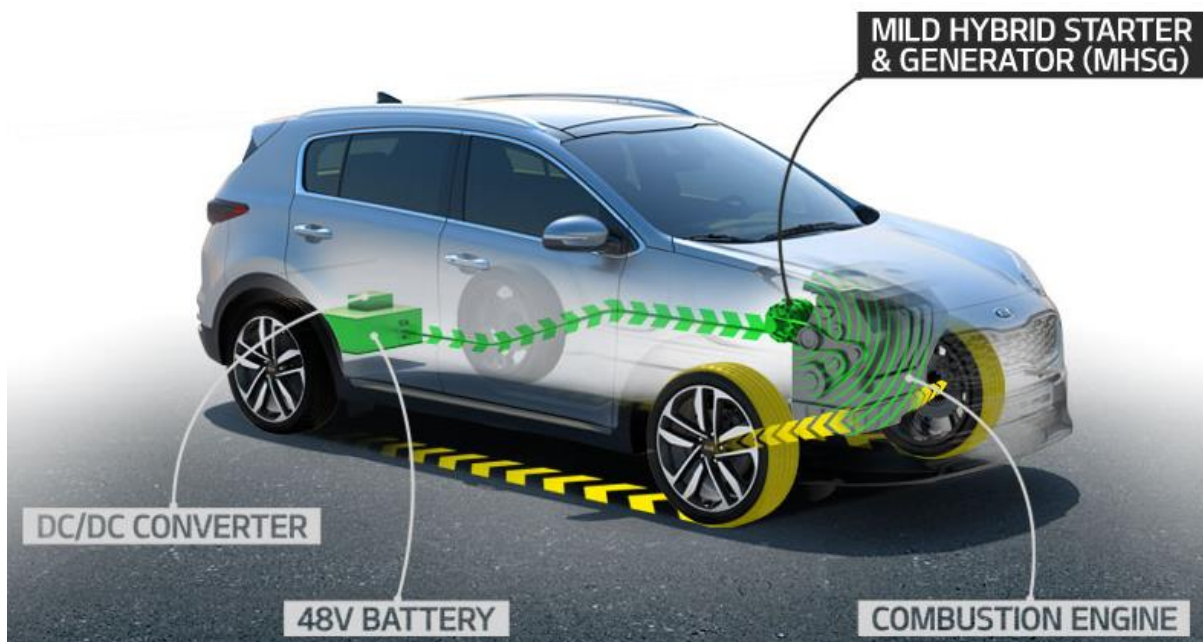
Ovaj model najviše je zastupljen kod osobnih vozila. Benzinska hibridna goriva koriste se u proizvodnji hibridnih vozila od strane Mercedes, Renaulta, Chevroleta, Hond, BMW-a, Forda, Suzuki-a i drugih kompanija.

#### **b) Dizelska hibridna vozila**

Dizelska hibridna vozila najveću primjenu imaju kod gospodarskih vozila, autobusa i teretnih vozila jer manje troše gorivo i smanjena je emisija ispušnih plinova. Kod ovih vozila kombinira se elektromotor i dizelski motor.

Smanjenje potrošnje postižu „manjim“ motorima, motorima s manjim volumenom sa značajno manjim masama i potrošnjom, a dodatnu snagu postižu elektromotorom. Značajnu primjenu pronašli su u željezničkom prometu gdje se koriste dizel-električne lokomotive (Džambo, 2016, 13).

Na slici 10. Prikazan je Kijin dizelski meki hibridni pogon od 48 Volti.



Slika 10. Kia dizelski meki hibridni pogon od 48 Volti

Izvor: <https://www.kia.hr/novosti/novost/na-jesen-stize-kijin-dizelski-meki-hibridni-pogon-od-48-volti-6466>, pristupljeno 4.7.2023.

### c) **Hibridna vozila s alternativnim gorivima**

Najčešća alternativna goriva su:

1. Biodizel,
2. Etanol i metanol,
3. Stlačeni prirodni plin (CNG),
4. Ukapljeni naftni plin (UNP) (Džambo, 2016, 13).

#### **1. Biodizel**

Biodizel je smjesa koja se proizvodi od elemenata životinjske mase i biljnih ulja. Ova smjesa se može koristiti miješanjem s dizelskim gorivom ili samostalno.

U koncentracijama mješavina do 20% biodizela koristi se u klasičnim dizelskim motorima bez ikakvih ili s vrlo malim preinakama na samom motoru. U većini visokotlačnih pumpi može se upotrebljavati, a kod najnovijih izvedbi s „common rail“ motorima koji rade s vrlo visokim tlakovima, mora se voditi briga da se upotrebljavaju u određenim omjerima mješavine prema točnim uputama proizvođača, najčešće do 20% biodizela. Zbog svojih kemijskih karakteristika koje su različite u odnosu na dizelsko gorivo, otapaju gumene brtve i crijeva od prirodnih materijala koja su se koristila kod starijih vozila (Dorotić, 2012).

## **2. Etanol i metanol**

Etanol i metanol ulaze kao alternativna goriva u auto industriju jer se mogu proizvoditi diljem svijeta s obzirom na to da se izvori nalaze diljem svijeta, a što nije s drugim izvorima kao što je to sirova nafta koje ima samo na određenim mjestima.

Također, sirovine su iz obnovljivih izvora, metanol se dobiva iz prirodnog plina i ugljena, a etanol fermentacijom poljoprivrednih proizvoda. Etanol se najčešće dobiva hidratacijom etilena ili fermentacijom biomase kao npr. šećer iz šećerne trske. Trenutno u svijetu najveću potrošnju etanola kao goriva ima Brazil. Proizvode ga fermentacijom šećerne trske, pa iako njegova proizvodnja nije jeftina koristi se jer se smanjuju troškovi uvoza sirove nafte, a izbjegava se i ovisnost o njenom uvozu. Gorivo koje se prodaje u Brazilu u sebi sadrži oko 5% vode te se može koristiti kao gorivo u većini novijih automobila koji se prodaju na brazilskom tržištu (Dorotić, 2012).

Na ovaj način otvaraju se nove mogućnosti koje će mnogima dati određenu neovisnost kada se govori o gorivima za pogon vozila.

## **3. Stlačeni prirodni plin**

Stlačeni prirodni plin je smjesa plinova u kojoj najveći udio ima metan s manjim udjelima etana, propana i butana, a osim ugljikovodika u njemu se nalaze i ugljikov dioksid, vodik, helij i druge pare. Koristi ga se kao gorivo pregradnjom vozila s klasičnim motorima s unutarnjim izgaranjem, a za sama

vozila koristi se često izraz „be-fuel“ vozila, odnosno vozila koja mogu koristiti dvije vrste goriva (Dorotić, 2012).

Nedostatak je što zahtjeva više prostora za pohranu plina nego kod klasičnih motora s unutarnjim izgaranjem pa kod pregradnji vozila obično zauzima dodatno mjesto u prtljažniku (Dorotić, 2012).

Svaki model i sustav ima svojih prednosti i nedostataka, a tako je i stlačenim prirodnim plinom. Kod ovog načina korištenja stlačenog plina kao goriva problem je u infrastrukturi koje još nema dovoljno što utječe na učestalost ugradnje. Bez obzira na ukazani nedostatak, u gradskom prijevozu Zagreba koriste se autobusi na prirodni plin, a ima ih više od devedeset što ukazuje na to da njihovo vrijeme tek dolazi.

Vozila novije generacije većim su dijelom niskopodna, zbog čega je javni gradski prijevoz pristupačan svim kategorijama, a primjenom suvremenih tehnologija i ekološki su prihvatljiva. Početkom 2022. godine, u voznom parku ZET-a je 91 autobus na pogon prirodnim stlačenim plinom. U pogonu su i suvremeni ZET-ove punione stlačenog prirodnog plina za autobuse, smještene u pogonu autobusa Podsused, te u Dubravi (ZET.hr).

Slika 11. Prikazuje autobus na pogon prirodnim stlačenim plinom.



Slika 11. Autobus na pogon prirodnim stlačenim plinom.

Izvor: <https://www.zet.hr/ekoloska-svijest-i-projekt-clean-fleets/autobusi-u-zelenom/336>, pristupljeno 4.7.2023.

#### **4. Ukapljeni naftni plin**

Prirodni plin i sirova nafta temelj su za proizvodnju ukapljenog plina. Nema mirisa niti boje i nije otrovan, te mu se dodaje miris kako bi ga se moglo detektirati kada je prisutan. U primjeni je kod motora s unutarnjim sagorijevanjem za pokretanje teretnih vozila, radnih strojeva i osobnih automobila i za drugo.

Sprema se u spremnicima pod radnim tlakovima od 4 do 7 bara, a ispitni tlak za spremnike je 30 bara (Dorotić, 2012).

Učestalo se koristi zajedno s benzinskim motorom, a kod dizelskih se motora koristi kao dodatak s obzirom na postojeće.

Prednost mu je što osim ugradnje plinske instalacije za dodatnu opskrbu benzinskog motora gorivom nije potrebna nikakva dodatna pregradnja postojećeg motora, a moguće je pokretati motor na plin ili na benzin (Dorotić, 2012).

##### **a) Hibridna vozila s gorivim ćelijama**

Hibridna vozila s gorivim ćelijama za izvor snage upotrebljavaju vodik koji elektrokemijskom reakcijom proizvodi energiju koja se koristi za pokretanje elektromotora koji pokreće vozilo. Poželjan je u auto industriji jer ima čist ispuh što auto industriju kao takvu svrstava u osviještenu industriju s obzirom na prirodu.

Među konvencionalne tehnologije proizvodnje vodika postoji proizvodnja vodika katalitička oksidacija ugljikovodika, proizvodnja iz rafinerijskih plinova i metanola, parcijalna oksidacija teških ugljikovodika i ugljena te elektroliza vode (Franković i dr.)

Predmet istraživanja je dobivanje vodika elektrolizom korištenjem obnovljivih izvora energije kao što su solarne i vjetroelektrane, koje bi uz male troškove osigurale energiju za razdvajanje vode na vodik i kisik (Dorotić, 2012).

No, pored toga, postoje problemi sa proizvodnjom i skladištenjem vodika koji su glavna prepreka njihove šire uporabe. Rezultat toga je i nerazvijena infrastruktura punilišta te manja ulaganja u razvoj tehnologije gorivih ćelija. Zbog svih tih problema, ulaganja u ovakvu vrstu vozila stagniraju jer se većina sredstava usmjerava u razvoj električnih vozila za masovnu proizvodnju (Džambo, 2016, 16).

## **2.5. Hidraulični hibridni pogon**

Automobilska industrija sve se češće okreće prema hibridnim vozilima jer ona nude više opcija i mogućnosti. To znači kada zatreba jedan način pogona on se koristi, a kada zatreba drugi tada se koristi drugi. Bez obzira radi li se o ekonomičnosti ili o nečem drugom.

Hibridno vozilo jednostavno je vozilo koje radi pomoću primarnog motora i sekundarnog uređaja za pohranu energije. Dok su električna hibridna vozila najpoznatija i komercijalno se proizvode, hidraulička hibridna tehnologija se istražuje kao bolja hibridna opcija (Klader i dr., 2011, 3).

Tako se hibridni sustavi mogu podijeliti na dva sustava koja su različita i to na:

- a) Serijski i
- b) Paralelni.

U paralelnom hidrauličkom hibridu, hidrauličke komponente povezane su s konvencionalnim prijenosom i pogonskim vratilom. Dok motor stalno radi i troši gorivo, hidraulički sustav može pomoći u ubrzanju kada motor radi najviše, čime se povećava učinkovitost goriva (Klader i dr., 2011, 3).

Niz hidraulički hibridni sustavi koriste iste osnovne principe kao i paralelni sustavi, ali ne koriste konvencionalni prijenos ili pogonsko vratilo. Hidraulički sustav svu snagu prenosi izravno na kotače (Klader i dr., 2011, 3).

Hidraulični hibridi praktičniji su i ekonomičniji od dosadašnjih sustava koji su koristili benzin ili dizel gorivo. Za manje uloženog dobije se više, a uštedi se i više energije što je ključna stavka.

Hidraulički hibrid nudi brojne prednosti u odnosu na električne hibride. Najveća od ovih prednosti je ta što sustav koristi manje pretvorbe energije, što dovodi do veće učinkovitosti. Električni hibrid pretvara kinetičku energiju u električnu energiju, a zatim u kemijsku energiju koja je pohranjena u bateriji. Hidraulički hibrid pretvara kinetičku energiju u energiju tlaka tekućine i na taj način se energija pohranjuje. To rezultira jednom pretvorbom oblika energije manje kako bi hidraulički hibrid postigao veću učinkovitost od drugih vrsta hibrida. (Klader i dr., 2011, 3).

### **Regenerativno kočenje**

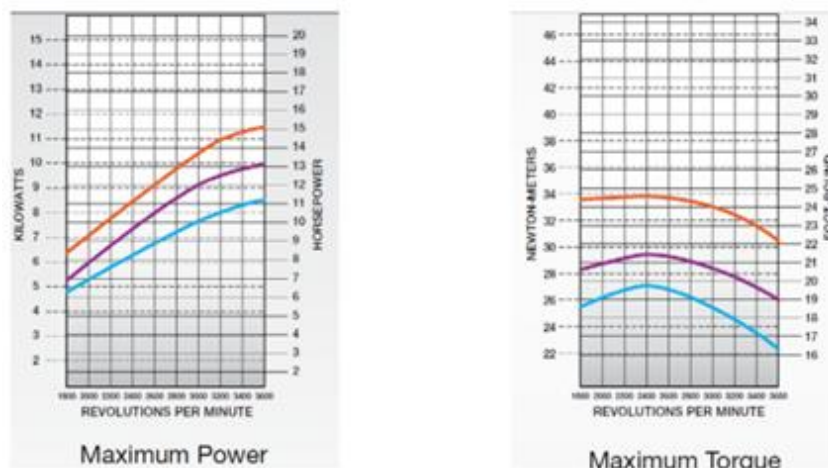
Regenerativno kočenje drugačije je kočenje od drugih kočenja kod drugih vozila, a najčešće dolazi do izražaja kada se radi o opetovanom i češćem kočenju. Naime kod standardnih vozila pri kočenju se sva kinetička energija gubi na toplinu i to nepovratno što kod hibrida nije tako.

Hibrid međutim hvata dio te energije putem regenerativnog kočenja kako bi se ponovno upotrijebio sljedeći put kada vozilo ubrza. Putem simulacija, procijenjeno je da bi se 40% kinetičke energije vozila recikliralo kroz regenerativno kočenje s hidrauličkim hibridnim sustavom (Klader i dr., 2011, 3).

### **Optimalna brzina motora**

Rad motora hibridnog vozila u njegovoj optimalnoj radnoj točki je vrijedan jer motor može generirati najveću snagu po protoku goriva. Od proizvođača su dobiveni sljedeći podaci: snaga motora u odnosu na brzinu motora, okretni moment motora u odnosu na brzinu motora i stopa potrošnje goriva motora u odnosu na brzinu motora. Ovi podatkovni grafikoni prikazani su u nastavku na grafikonu 1 i 1a. Motor korišten u ovom projektu predstavljen je narančastom

linijom. Iz toga je za svaku brzinu motora izračunat omjer snage motora ili okretnog momenta po volumetrijskom protoku goriva. To je zatim grafički prikazano kako bi se pronašla optimalna radna točka (Klader i dr., 2011, 3).



Grafikon 1 i 1a. Rad hibridnog motora

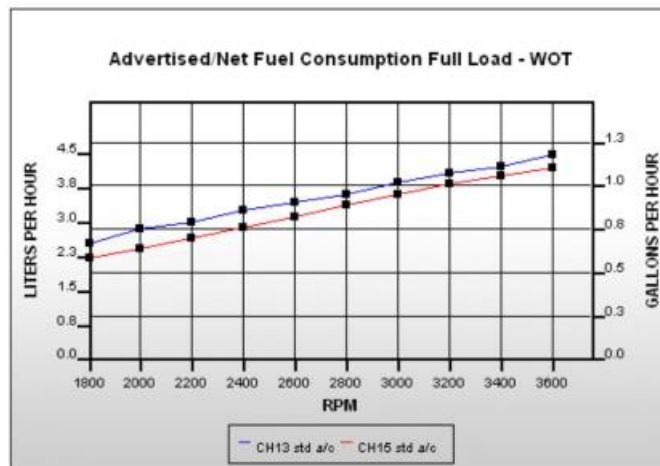
Izvor: Klader i dr., 2011, 4, pristupljeno 4.7.6.2023.

### 2.5.1. Princip rada hibridnog sustava

Kako bi se razumio princip rada hibridnog sustava potrebno je objasniti i razjasniti potrošnju goriva motora, okretni moment po protoku goriva u odnosu na brzinu motora i prikazati snagu po protoku goriva u odnosu na brzinu motora.

Na grafikonu 2. prikazani su podatci o potrošnji goriva motora

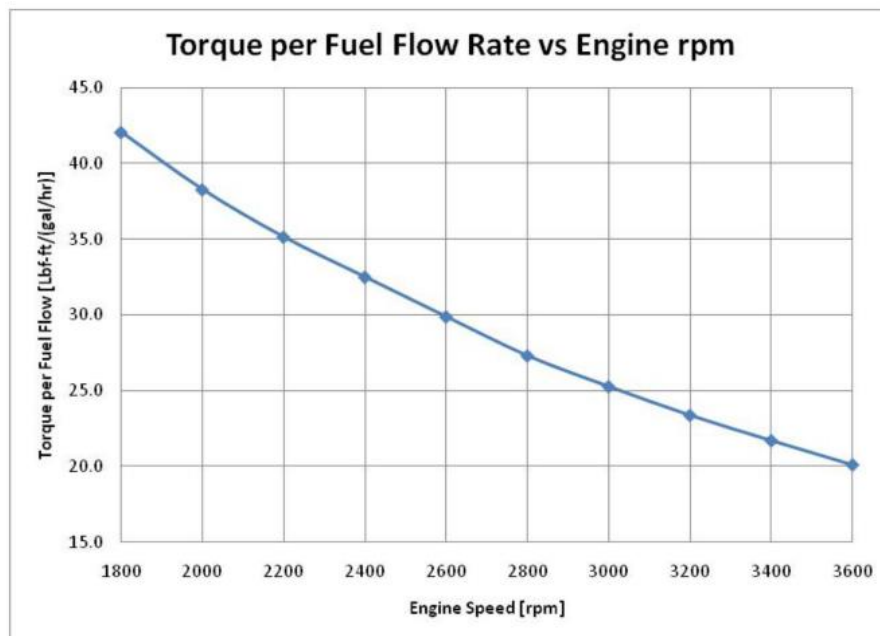




Grafikon 2. Podatci o potrošnji goriva motora

Izvor: Klader i dr., 2011, 5, pristupljeno 4.7.6.2023.

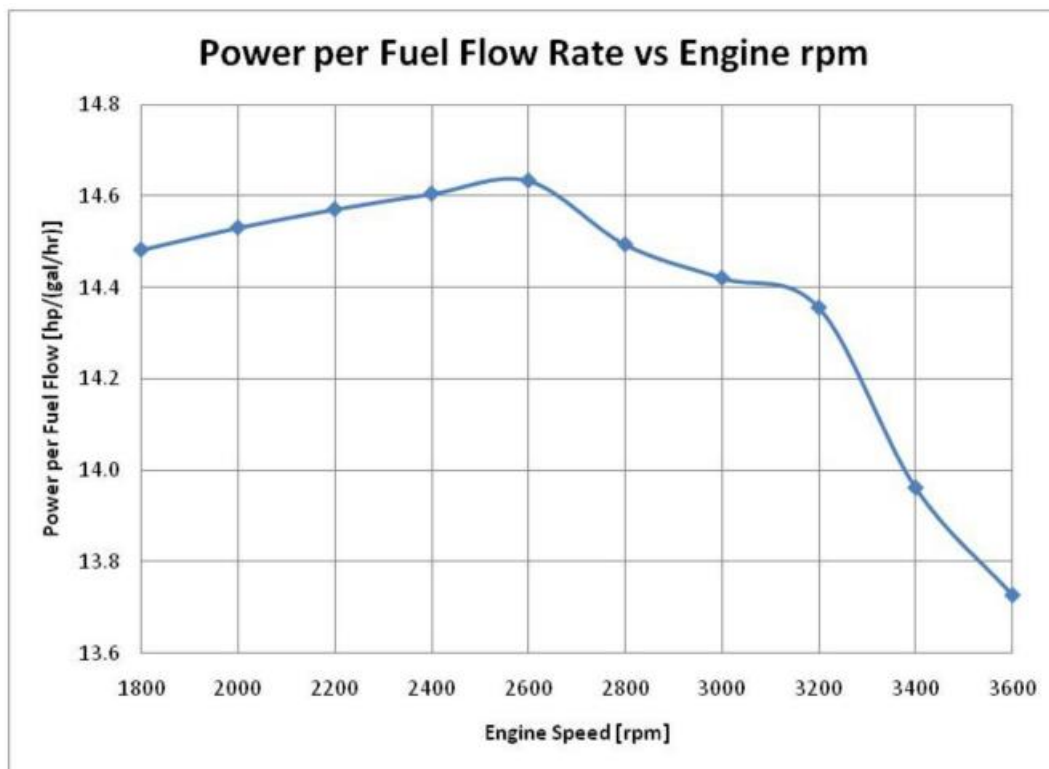
Na grafikonu 3. Prikazan je okretni moment po protoku goriva u odnosu na brzinu motora.



Grafikon 3. Okretni moment po protoku goriva u odnosu na brzinu motora.

Izvor: Klader i dr., 2011, 6, pristupljeno 5.7.2023.

Na grafikonu 4. Prikazana je snaga po protoku goriva u odnosu na brzinu motora.



Grafikon 4. Snaga po protoku goriva u odnosu na brzinu motora.

Izvor: Klader i dr., 2011, 7, pristupljeno 5.7.2023.

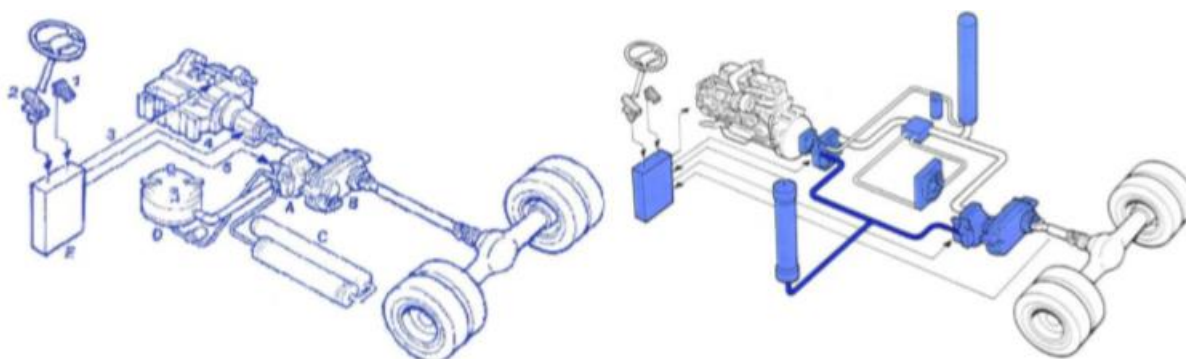
Iz grafikona 3 i 4 utvrđeno je da što sporije motor radi, to je okretni moment bolji po stopi potrošnje goriva. Međutim, grafikon snage pokazuje brzinu pri kojoj je motor maksimizirao količinu dobivene snage po protoku goriva. Iz ovih podataka, motor bi bio podešen da radi na oko 2200 o/min kada pumpa hidrauličku tekućinu. Ova brzina je blizu optimalne radne brzine za naš motor, čime se osigurava najbolja iskoristivost goriva koje troši motor (Klader i dr., 2011, 8).

## 2.6. Povijesni razvoj hidrauličnih hibridnih vozila

Hibridna tehnologija u novijoj povijesti proteže se zadnjih trideset godina, razvija se i danas, a tendencije su pokazane i za nastavak u budućnosti. Stoga je vrlo bitno da se pogleda i povijest razvoja hidrauličnih hibridnih vozila.

Jedan od prvih paralelnih hidrauličnih sustava lansiranih na tržište bio je „Cumulo Brake Drive“ tvrtke Parker Hannifin. Prototip sustava razvijen je 1982., a 1991. dolazi prva serija hibrida „Cumulo Hidrostatik Drive“ (Rydberg, 2009).

Na slici 12. prikazan je Cumulo CBED and CHD hidraulični hibridni sustavi za gradske autobuse, Parker Hannifin.



Slika 12. Cumulo CBED and CHD hidraulični hibridni sustavi za gradske autobuse, Parker Hannifin.

Izvor: Rydberg, 2009, 2, pristupljeno 5.7.2023.

Hidraulični hibridni sustavi koji su prikazani na slici 10. imaju akumulatore u koje se posprema energija koja se ponovno može koristiti kada je to potrebno. Ovaj sustav daje mogućnost iskorištavanja velike energije koja se gubila u klasičnim sustavima gdje je prisutno gorivo u obliku benzina i dizela.

Za paralelni hibrid potencijal uštede goriva bio je u rasponu od 10-25%, a za serijski hibrid 20-40%. U usporedbi s današnjim zahtjevima za pogonske linije, ove brojke su preniske (Rydberg, 2009, 2).

Gledajući razvoj hidrauličkih hibrida tijekom godina, može se prepoznati da novi sustavi iz Parkera, Eatona, Artemisa itd. još uvijek koriste iste koncepte kao u prijašnjim Cumulo mjenjačima. Ova činjenica potaknut će pitanje: Zašto niti jedan dobavljač nije uspio prije 20 godina? Odgovor je vjerojatno da tehnologija nije bila razvijena kao danas i da tržište nije bilo spremno za nove koncepte (Rydberg, 2009, 2).

## **2.7. Hidraulična hibridna tehnologija**

Hidraulični hibridni pogon interesantan je od samih početaka jer se je uvijek tražilo neko bolje rješenje od postojećeg. To znači da se nikada ne stane s postojećom tehnologijom, već se pokušava pronaći nešto bolje, efikasnije i ekonomičnije. Jednostavno je istraživanje i napredak utkan u temelje i razvoj društva. Tako su konkretna istraživanja hidrauličnog hibridnog pogona krenula sredinom 1990 godine i to u Sjedinjenim Američkim Državama.

S istraživanjima i razvojem počele su SAD-ove firme EPA (Environmental Protection Agency) u suradnji s Eaton Corporation, Parker-Hannifin i Ford Motor Company. Prijašnja EPA-ova istraživanja bazirana su na konstrukciji individualnih hidrauličkih hibridnih komponenata za vozila, koja služe prijevozu putnika, dok danas EPA sa svojim partnerima radi na izradi kompletnog hidrauličkog hibridnog pogona (Siminiati, 2009, 9).

To znači da se danas više ne proizvode samo osobna vozila na hidraulički hibridni pogon, već se proizvode i dostavna vozila, a što se potvrđuje i nagradama. Godine 2003. EPA je osvojila zlatnu medalju u kategoriji učinkovitosti goriva i srebrnu medalju u kategoriji performansi ubrzanja kada se govori o hidrauličkom hibridnom pogonu dostavnih vozila.

Kompletan rast i razvoj danas je vidljiv na proizvodnji potpunog hidrauličnog hibridnog pogona koji se stavlja u dostavna vozila kao što su kamioni, gdje se ujedno vodi računa o poboljšanju radnih svojstava i o smanjenju goriva.

Hidrauličko hibridno vozilo kao pogon koristi volumetričku varijabilnu pumpu, koja je mehaničkom vezom spojena s dizelskim motorom. Rotacionim gibanjem u motoru, kemijska energija

goriva se uz pomoć hidrauličke pumpe pretvara u energiju tlaka fluida. Prolazom kroz cjevovod i ulaskom u hidromotor, energija tlaka fluida ponovno se pretvara u rotacijsko gibanje, koje se najčešće putem planetarnog prijenosa prenosi na kotače vozila (Siminiati, 2009, 9).

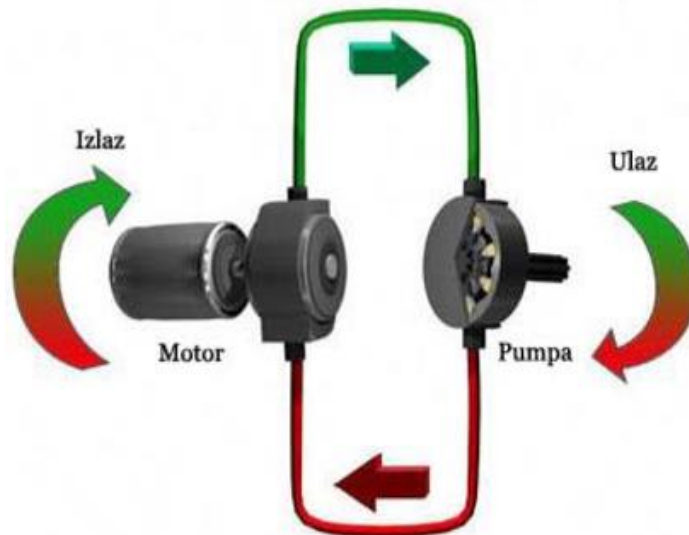
Prijenos o kojem se ovdje govori još se naziva kontinuirano promjenjivi mjenjač koji ima veliku ulogu uz regenerativno kočenje. Kada se uspoređuje s konvencionalnim vozilom ovdje nije potreban standardni stupnjeviti mjenjač.

Tako kontinuirano promjenjivi mjenjač ima određena poboljšanja i prednosti u odnosu na konvencionalna vozila koja imaju standardni stupnjeviti mjenjač. Ta razlika se može osjetiti pri upravljanju vozilom, manje korištenje energije, smanjena emisija štetnih plinova i ekonomičnost.

Glavne prednosti i beneficije kontinuiranih promjenjivih mjenjača su:

- konstantno, bez-stupnjevito ubrzanje od pokretanja vozila do jednolike kontinuirane vožnje (eliminacija udara prilikom promjena brzina
- glatki prijenos),
- rad motora se održava u optimalnom rasponu snage, bez obzira koliko se brzo vozilo giba (povećava se iskoristivost energije),
- bolja reakcija na promjene u uvjetima rada, promjene okretnog momenta i brzine,
- manji gubitak energije nego kod konvencionalnih stupnjevitih mjenjača (bolje ubrzanje vozila),
- ugradnja automatske mehaničke spojke (Siminiati, 2009, 9).

Na slici 13. Prikazan je hidraulički prijenos.



Slika 13. Hidraulički prijenos

Izvor: Siminiati, D. (2009) *Hidrostatski hibridni pogon za dostavno vozilo*, Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Studij strojarstva, pristupljeno 6.7.2023.

Kod novih tehnologija pogona razmotrit će se dvije vrste:

- blagi hidraulički hibridni pogon, sa opcijom motor upaljen (gdje je motor uvijek upaljen dok se ne ugasi) i motor ugašen (sa ciklusima motor ugašen/upaljen),
- potpuni hidraulički hibridni pogon, sa opcijom motor ili upaljen ili ugašen (Siminiati, 2009, 10).

## 2.8. Hidraulični hibridni pogon

Hidraulični hibridni pogon dijeli se prema konfiguraciji na:

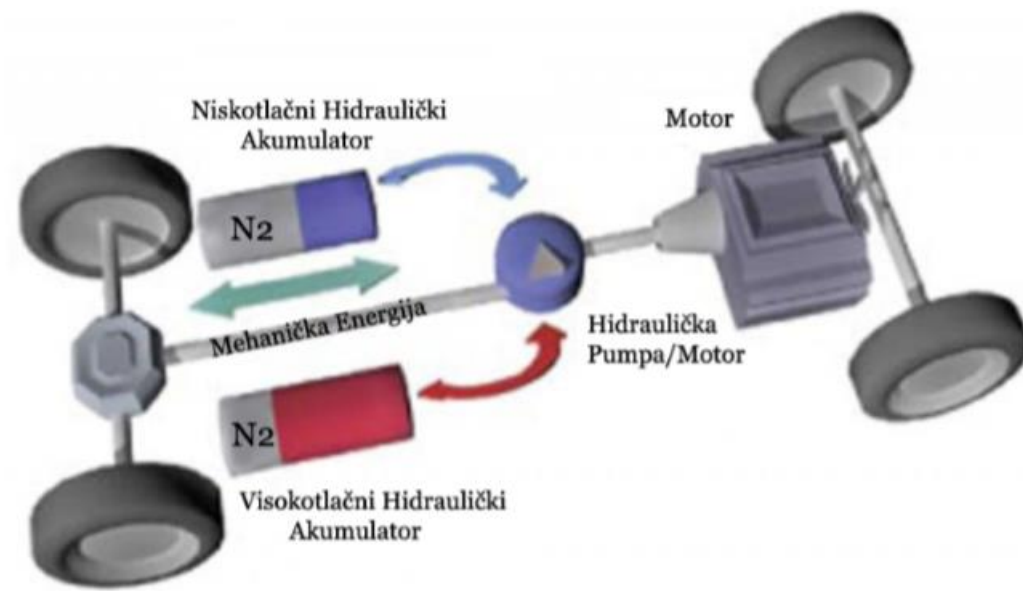
- a) paralelni i
- b) serijski.

### a) Paralelni hidraulički hibrid

- dopuna postojećim elementima pogonske grupe

- pohranjuje kinetičku energiju u akumulatore koja je u normalnom slučaju izgubljena tijekom kočenja
- koristi konvencionalne hidrauličke tehnologije
- poboljšanja u ekonomičnosti potrošnje i emisiji štetnih plinova (smanjenje 20-30%)
- vijek trajanja kočnica se povećava na 2-4 puta, a povrat uloženi sredstava je kroz 1 do 10 godina (Shiminiati, 2009, 7).

Na slici 14. prikazana je konfiguracija paralelnog hidrauličkog hibrida.



Slika 14. Konfiguracija paralelnog hidrauličkog hibrida.

Izvor: Shiminiati, D. (2009) *Hidrostatski hibridni pogon za dostavno vozilo*, Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Studij strojarstva, pristupljeno 6.7.2023.

Dalje slijedi serijski hidraulički hibrid koji ima svoje karakteristike i različitost u odnosu na paralelni hidraulički hibrid.

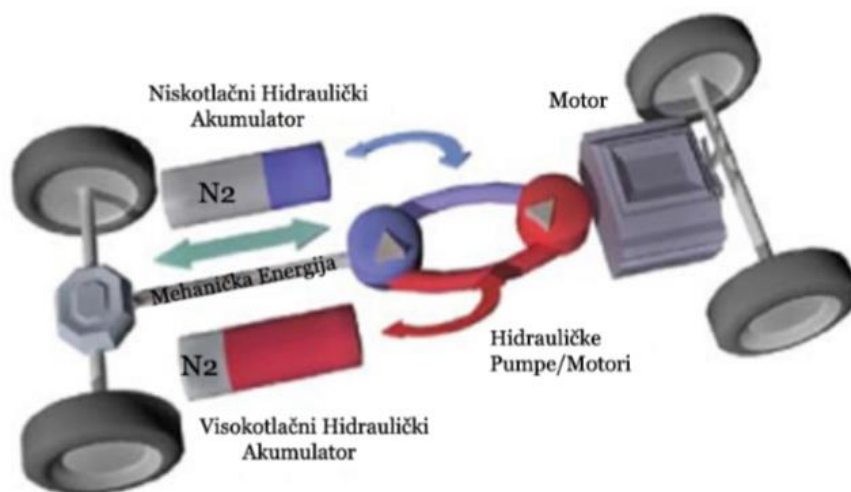
#### b) Serijski hidraulički hibrid

- zamjenjuje postojeće elemente pogonske grupe
- omogućava motoru rad u najefikasnijem području te gašenje dok je nepotreban



- olakšava pohranu energije u akumulatore
- fleksibilna konfiguracija omogućava dodatnu funkcionalnost (aktivnu kontrolu stabilnosti itd.)
- poboljšanja u ekonomičnosti potrošnje (u laboratorijskim uvjetima 60-70% a u praksi 45-50%), emisiji štetnih plinova (smanjenje do 40%)
- vijek trajanja kočnica se povećava na 2-4 puta te povrat uložениh sredstava kroz 1 do 10 godina (Shiminiati, 2009, 7).

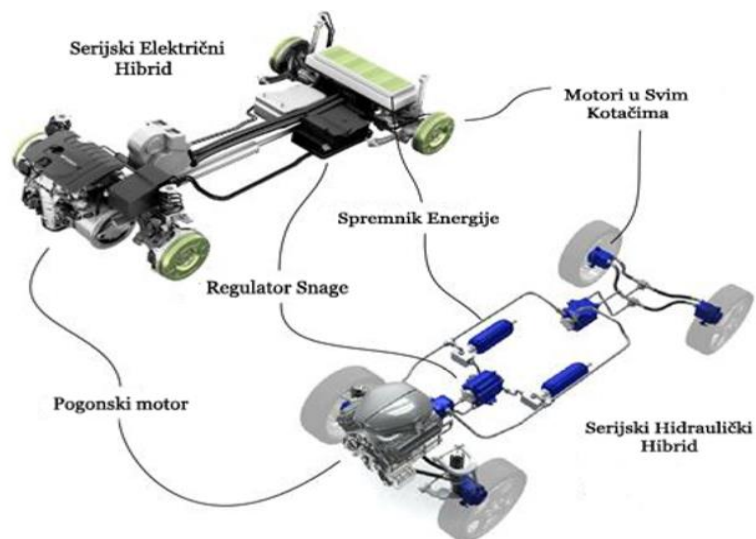
Na slici 15. prikazana je konfiguracija serijskog hidrauličkog hibrida.



Slika 15. Konfiguracija serijskog hidrauličkog hibrida.

Izvor: Shiminiati, D. (2009) *Hidrostatski hibridni pogon za dostavno vozilo*, Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Studij strojarstva, pristupljeno 6.7.2023.

Na slici 16. prikazana je usporedba električnog i hibridnog serijskog hibrida



Slika 16. Usporedba električnog i hibridnog serijskog hibrida

Izvor: Shiminiati, D. 2009, pristupljeno 6.7.2023.

### **3. ANALIZA PRIMJENE HIDRAULIČNOG HIBRIDNOG SUSTAVA U AUTOBUSIMA**

Tijekom vremena kako je hibridna tehnologija napredovala i to još u kombinaciji s hidrauličnom postala je izazov za gospodarska i teretna vozila. U ovu grupaciju ulaze i autobusi za gradsku, međugradsku i širu primjenu. Tako da se slobodno može reći kako hibridni autobusi nisu nikakva novost, već je tehnologija koja se koristi vrlo skupa, a onda i upitnost isplativosti. Jasno, gledano dugoročno dolazi se do zaključka da bi ova tehnologija mogla biti isplativa uz svjesnost boljitka za okoliš.

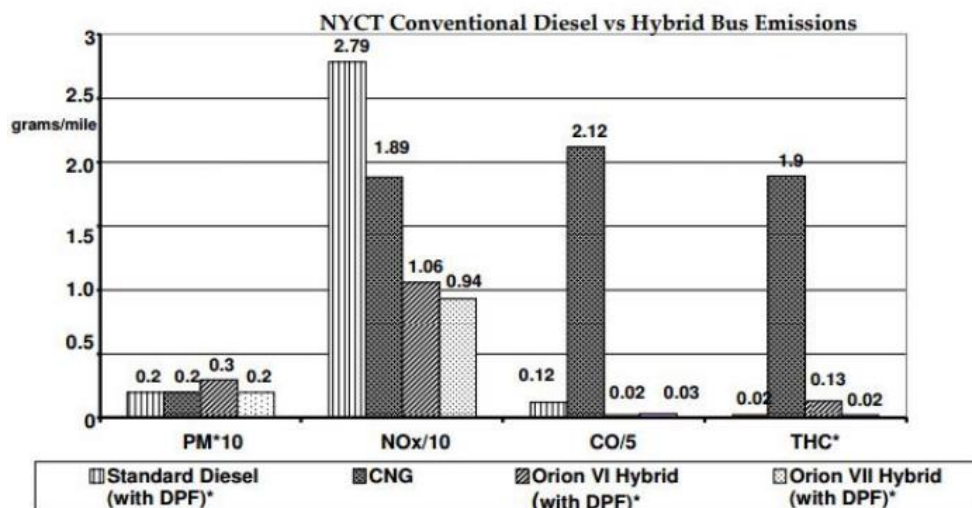
#### **3.1. Hibridni autobusi**

Hibridni autobusi su gradska ili prigradska vozila koja obično kombiniraju manji dizelski motor i elektromotor za pogon. Ovi hibridni autobusi imaju svojih prednosti i svojih nedostataka.

##### **3.1.1. Prednosti hibridnih autobusa**

Hibridni autobusi imaju višestruku prednost u odnosu na komercijalne autobuse koji se koriste na benzin i na dizel. Jedni od prednosti su: manji troškovi korištenja i održavanja, veća učinkovitost i manje emisije štetnih plinova.

Na grafikonu 5. prikazana je usporedba emisije štetnih plinova.



Grafikon 5. Usporedba emisije štetnih plinova

Izvor: EESI, Hybrid busses costs and benefits, [www.eesi.org/files/eesi\\_hybrid\\_bus\\_032007.pdf](http://www.eesi.org/files/eesi_hybrid_bus_032007.pdf),

Hibridni autobusi smanjuju emisije štetnih plinova za čak 75 % u odnosu na konvencionalni dizel autobus. Smanjenje emisije postiže se zahvaljujući električnom pogonu, i dizel motoru s niskom razinom sumpora (Brnić, 2015, 46).

Testiranja su pokazala da je emisija čestica kod hibridnih autobusa gotovo 90 % manja nego u konvencionalnih dizel autobusa, dok je emisija dušikovog oksida manja za 30 – 40 %, emisija uljikovog monoksida također je vidljivo niža u odnosu na dizel u CNG autobus (EESI).

Kod hibridnih autobusa prednost je ta što stvaraju znatno manju buku u odnosu na konvencionalne koji koriste samo benzin ili dizel gorivo. Hibridni autobusi ubrzavaju neprimjetnije, a kada se govori o vožnji ona je prema mišljenju putnika i vozača mnogo tiša pri promjeni brzina i samom startu.

Potrošnja goriva hibridnih autobusa manja je za 26 – 52 % u odnosu na dizelove autobuse. Velika razlika u variranju postotka proizlazi iz uvjeta eksploatacije autobusa. Ako je riječ o hibridnom autobusu s paralelnom konfiguracijom koji je na eksploataciji u gradu gdje su manje brzine vožnje i zahtjevnija konfiguracija terena te razlike će biti veće, dok u uvjetima gdje je prosječna brzina veća bolji

će se pokazati serijski hibrid. Tako da pri uvođenju hibridnih autobusa u neki grad treba analizirati niz faktora koji mogu pridonjeti smanjenju potrošnje goriva (Brnić, 2015, 47).

Na slici 17. prikazan je hibridni autobus.



Slika 17. Hibridni autobus

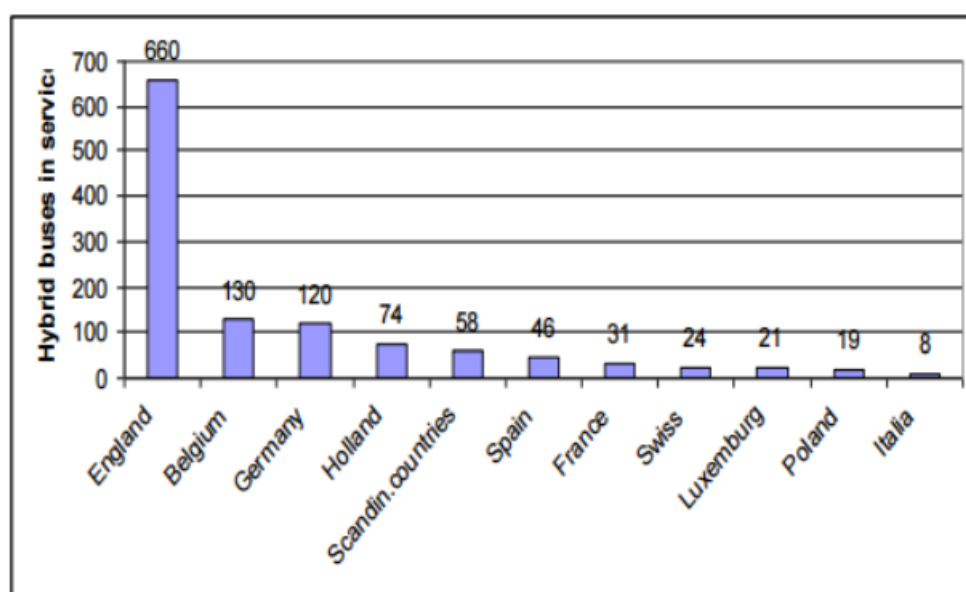
Izvor: <http://www.greenlaunches.com/transport/mercedesbenzs-hybrid-bus-citaro.php>, pristupljeno 6.7.2023.

Kada se govori o troškovima održavanja hibridnih autobusa oni imaju prednost ispred klasičnih autobusa na benzin i diesel jer su manji troškovi budući da hibridna vozila manje troše diesel tako da imaju manje agregate. Manji agregati troše manje maziva i ulja. Uz sve navedeno i uz diesel motor veliku ulogu ima i elektromotor koji svojim djelovanjem umanjuje opterećenost diesel motora, a time i štedi određenu snagu i gorivo.

Prvo pilot testiranje hibridnih autobusa u gradovima EU bilo je 2006 godine u gradovima: Paris, Barcelona, Dresden, Strasbourg, Nürnberg, Valonija i Flandrija regija u Belgiji i Luxemburg. London je već tada bio iznimka jer je ulicama Londona prometovalo 56 hibrudnih autobusa (Brnić, 2015, 48).

U razdoblju 2010-2011 / 12 godina postoji stalni trend rasta hibridnih autobusa u redovitom radu, na kraju 2010. godine u EU je 178 autobusa s hibridnim pogonom. Već sredinom 2012. godine, taj broj rapidno raste te je u službi je 1191 autobusa s hibridnim pogonom (Brnić, 2015, 49).

Na grafikonu 6. prikazan je broj hibridnih autobusa u EU, 2012. godina.



Grafikon 6. Broj hibridnih autobusa u EU, 2012. godina.

Izvor: <http://oaji.net/articles/2014/766-1420109084.pdf>, pristupljeno 6.7.2023.

### 3.1.2. Nedostatci hibridnih autobusa

Nedostatci hibridnih autobusa prije svega su razgranatost infrastrukture punjenja i visoki troškovi održavanja, a onda i dijelova. To su startni problemi koji se iz godine u godinu polako otklanjaju i umanjuju dok to sve ne dođe do točke profitabilnosti i isplativosti. Gledano dugoročno

stvari se mijenjaju na bolje. U svemu je u početku visoka cijena održavanja, infrastrukture i dijelova, a tijekom vremena sve se smanjuje i dovodi do isplativosti.

### 3.2. Hidraulični hibridni autobusi

Škotska kompanija Artemis to želi da promijeni. Njen digitalni sistem za napajanje energijom koristi hidrauliku na specifičan način. Artemis je prvo isprobao tu tehnologiju na specijalno adaptiranom BMV-u (Glasamerike.net).

Na slici 18. prikazan je digitalni hidraulični hibridni autobus tvrtke Artemis iz Škotske.



Slika 18 Digitalni hidraulični hibridni autobus tvrtke Artemis iz Škotske

Izvor: Glas Amerike, <https://www.glasamerike.net/a/uk-hybris-hydraulics/3048800.html>, pristupljeno 6.7.2023.

Klasični električni hibrid spaja snagu motora sa onom iz električnog motora ili električne baterije. Za razliku od toga, naš hidraulični hibrid spaja snagu motora sa hidrauličnim motorom i hidrauličnom baterijom, odnosno akumulatorom, koji skladišti energiju tako što razlaže vozilo u formi kompresovanog gasa”, (Najl Koldvel, direktor Artemisa).

Funkcioniranje hidrauličnih motora i pumpi za sobom je uvijek nosilo probleme, te je bilo potrebno pronaći rješenje za te probleme. Tome je doskočila tvrtka Artemis na način da je na motorima i pumpama s individualnim cilindrima postavila digitalne ventile koji se kontroliraju elektronski. Ova tehnologija pokazala se je vrlo dobrom tijekom testiranja.

Takva tehnologija se pokazala pouzdanom. Testovi na autobusima u Edinburgu su pokazali 27 od sto uštede na gorivu (Glasamerike.net).

“Pokušavamo napraviti hibridnu tehnologiju koja je jeftina. Ona je napravljena od uobičajenih materijala poput čelika, a ne egzotičnih i rijetkih materijala poput litija, tako da se može koristiti globalno za izradu hibridnih sustava koji se sami isplaćuju, bez subvencija. Smatramo da je to ključ kako bi svi svjetski autobusi postali hibridni”. Artemis još ističe da će njihova tehnologija promijeniti ne samo autobuse i vlakove s manjom emisijom ugljika, već i korištenje energije vjetra (Najl Koldvel, direktor Artemisa).

### **3.3. Integrirano korištenje kinetičke energije u hibridnim autobusima**

Hibridni autobusi vrlo su interesantni za korištenje u gradskom prometu jer se koriste konstantno i potrebna im je konstantna energija i gorivo. Stoga su veliki i konstantni potrošači. Kako bi se u konstantnom korištenju autobusa iskoristila svaka energija i snaga gradski autobusi vrlo su dobar primjer i podloga za uvođenje hibridnih sustava. Tvrtka Mercedes-Benz tako je krenula s izradom hibridnih autobusa jer mnogi gradovi i države u svijetu koriste njihova vozila. Razvojem i uvođenjem novih tehnologija ovakvi su potezi bili neminovni.

Na slici 19. prikazan je autobus Citaro hibrid tvrtke Mercedes-Benz.





Slika 19 Autobus Citaro hibrid tvrtke Mercedes-Benz

Izvor: [https://www.mercedes-benz-bus.com/hr\\_HR/models/citaro-hybrid/efficiency/hybrid-technology.html](https://www.mercedes-benz-bus.com/hr_HR/models/citaro-hybrid/efficiency/hybrid-technology.html).

Osnovna funkcija modela Citaro hibrid vrlo je jednostavna: robusno konstruirani elektromotor u obliku diska integriran je između motora s unutarnjim izgaranjem i automatskog mjenjača. Elektromotor prilikom usporavanja autobusa, među ostalim, djeluje kao generator koji pretvara energiju potiska u struju – prilikom kočenja i otpuštanja gasa. Generirana struja pohranjuje se kao električna energija. Bez hibridne tehnologije ova bi energija, dobivena u fazi rekuperacije, bila izgubljena – Citaro hibrid koristi je i pritom štedi: čim autobus krene iz stanja mirovanja, elektromotor podržava dizelski agregat svojim okretnim momentom – to je tzv. faza potiska. Na taj način motor s unutarnjim izgaranjem mora prilikom kretanja privremeno raditi manjom snagom čime se štedi gorivo. Elektromotor usto podržava i prazni hod motora. Time se poboljšava stupanj učinkovitosti motora s unutarnjim izgaranjem što pridonosi znatno smanjenoj potrošnji goriva i smanjenju emisija (Mercedes-Benz.bus.com/hr).

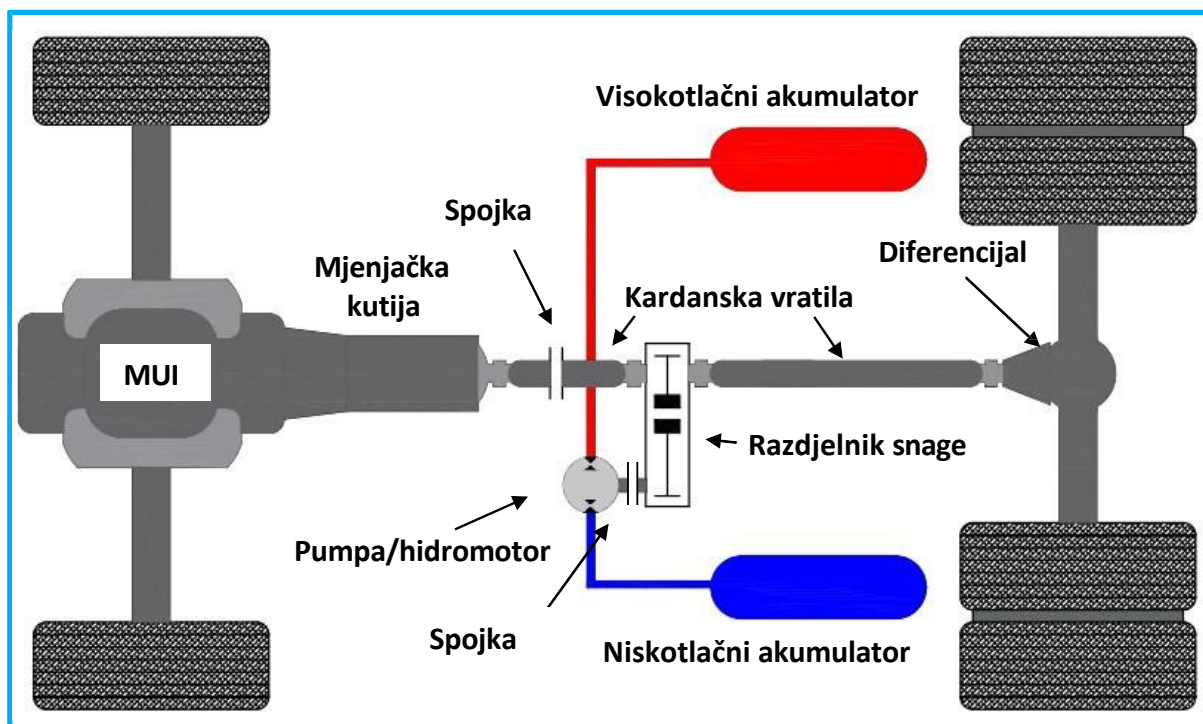
#### 4. PRORAČUN PARALELNOG HIDRAULIČKOG HIBRIDNOG SUSTAVA

Osnova za izradu paralelnog hidrauličkog hibridnog sustava je gospodarsko vozilo „Tourismo L“ proizvođača „Mercedes“ prikazano na slici 7.1. Konvencionalno vozilo s ručnim mjenjačem i stražnjim pogonom ima maksimalnu dopuštenu masu s teretom u iznosu od 24750 kg. Zbog čega se često koristi kao dostavno vozilo u gradovima, koje uključuje učestalo pokretanje i zaustavljanje vozila.



*Slika 20. Mercedes Tourismo L*

Skica paralelnog hidrauličkog hibridnog sustava za dostavno vozilo „Tourismo L“ prikazana je na slici 7.2. Hibridno dostavno vozilo sastojati će se od dva izvora energije. Primarni (osnovni) izvor energije je navedeni MUI, dok je sekundarni izvor energije, energija tlaka radne tekućine pohranjena u visokom akumulatoru.



Slika 21. Skica paralelnog hidrauličkog hibridnog sustava za vozilo Mercedes Tourismo L

Mjenjačka kutija, kardanska vratila (*driving shaft* i *propeller shaft*) i diferencijal ostaju isti kao kod konvencionalnog vozila. Dijelovi koji se dodatno ugrađuju u paralelni hidraulički hibridni sustav su razdjelnik snage, hidraulička pumpa/hidromotor, visokotlačni akumulator, niskotlačni akumulator i ostala potrebna oprema za funkcioniranje hidrauličkog sustava.

Energija se prikuplja pomoću aksijalne klipne pumpe/hidromotora s varijabilnim protokom. Hidromotor/pumpa je povezana s kardanskim vratilima uz pomoć razdjelnika snage (zupčastim prijenosnikom). U fazi kočenja radna tekućina struji iz niskotlačnog akumulatora prema visokotlačnom akumulatoru akumulirajući energiju. Prilikom pokretanja vozila ili dodatnog ubrzanja radna tekućina struji iz visokotlačnog akumulatora prema niskotlačnom akumulatoru te pogoni hidromotor koji daje snagu na kotačima gospodarskog vozila.

#### 4.1 Određivanje dinamike vožnje gospodarskog vozila

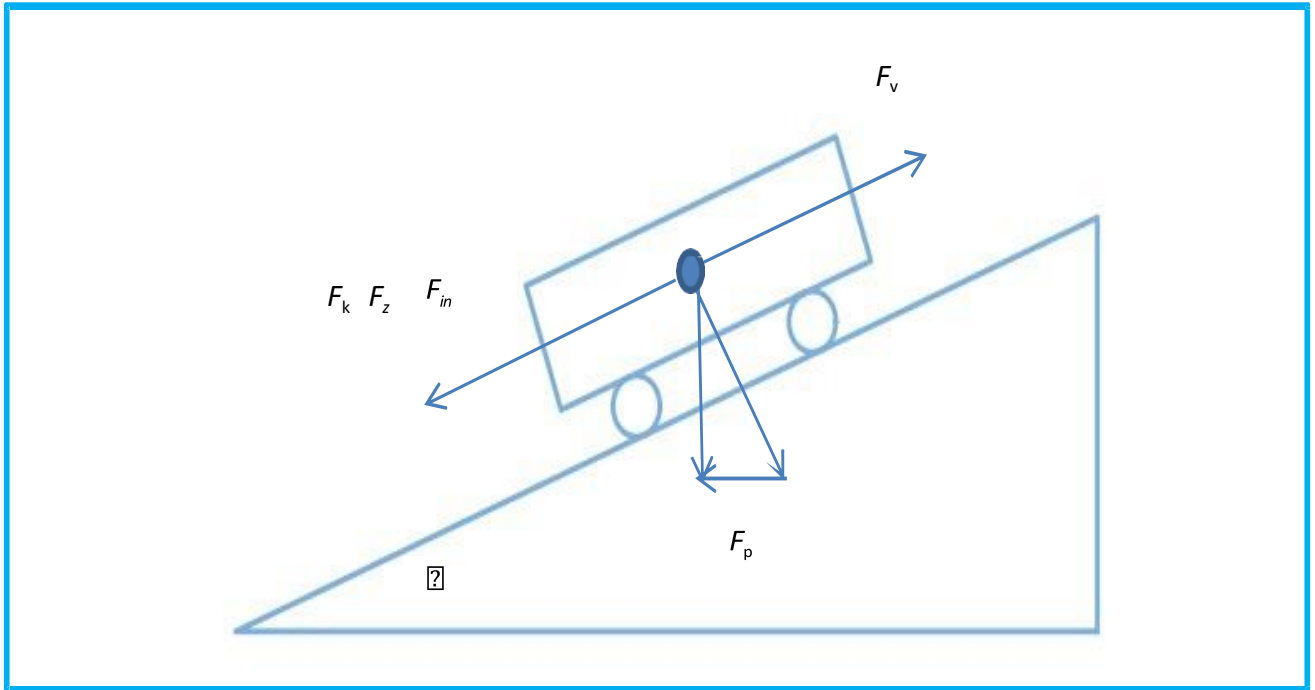
Određivanje dinamike vožnje gospodarskog vozila potrebno je da bi se odredio moment na kotačima vozila kojim se postiže vučna sila. Poznavanje maksimalnog momenta na kotaču gospodarskog vozila osnova je za proračun i odabir hidromotora/pumpe te razdjelnika snage (prijenosnika). Vučna sila potrebna za pokretanje vozila mora savladati otpore kretanja, a to su: otpor kotrljanja, aerodinamički otpor zraka, otpor penjanja i otpor ubrzanja.

Proračun dinamike vožnje gospodarskog vozila izvršiti će se za dva pogonska uvjeta prikazana u tablici 7.1. Na temelju odabranih pogonskih uvjeta izvršit će se proračun dinamike vožnje gospodarskog vozila. Pogonski uvjeti definirani su brzinom i opterećenjem gospodarskog vozila te usponom ceste. Prvim pogonskim uvjetom definiran je maksimalni moment na kotaču, dok je drugim pogonskim uvjetom definirana maksimalna brzina vrtnje pogonskih kotača.

Slika 22. Pogonski uvjeti

Pogonski uvjet	1	2
Uspón ceste	25%	0%
Brzina vozila	10 km/h	120 km/h
Opterećenje vozila	100%	0%

Kod prvog pogonskog uvjeta prikazanog na slici 7.3 gospodarsko vozilo s najvećom dopuštenom masom tereta mora biti u mogućnosti savladati uspon nagiba 25% minimalnom brzinom koja je određena minimalnim brojem okretaja motora s unutarnjim izgaranjem, te iznosi 10 km/h.



Slika 23. Sile koje djeluju na vozilo pri savladavanju uspona.

Na temelju slike 25. određuje se vučna sila koja je potrebna za savladavanje otpora vožnje:

$$F_v = F_k + F_z + F_{in} + F_p,$$

gdje je:

$F_k$  - otpor kotrljanja,

$F_z$  - aerodinamički otpor zraka,

$F_{in}$  - otpor ubrzanja,

$F_p$  - otpor penjanja.

Otpor kotrljanja ovisan je o deformaciji kotača, tlaku zraka u gumama, kvaliteti guma, brzini vožnje te titranju kotača zbog neravnina na cesti.

Iznosi:  $F_k = \mu_k \cdot m \cdot g$

gdje je:

$\mu_k$  - koeficijent otpora kotrljanja koji za asfalt iznosi  $\mu_k = 0,02$ ,

$m$  - maksimalna masa gospodarskog vozila s teretom ( $m = 24750$  kg),

$g$  - gravitacijska konstanta ( $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>).

Slijedi:

$$F_k = 0,02 \times 24750 \times 9,81 = 4855 \text{ N}.$$

Areodinamički otpor zraka uzrokovan je strujanjem na i oko gospodarskog vozila, te iznosi:

$$F_p = \frac{1}{2} \rho \cdot c \cdot A \cdot v^2$$

gdje je:

$\rho$  - gustoća zraka koja iznosi  $\rho = 1,13$  kg/m<sup>3</sup>,

$c$  - koeficijent areodinamičkog otpora zraka koji za gospodarsko vozilo iznosi  $c = 1$ .

$A$  - čeona površina vozila koja za širinu i visinu gospodarskog vozila iznosi

$$A = 13,9 \cdot 2,55 = 35,44 \text{ m}^2.$$

$v$  - brzina vozila koja prema pogonskom uvjetu iznosi  $v = 12,7$  km/h  $\approx 3,54$  m/s.

Slijedi:

$$F_p = 1/2 \cdot 1,13 \cdot 1 \cdot 35,44 \cdot 3,54^2 = 250,85 \text{ N}.$$

Prilikom ubrzanja ili usporenja vozila treba svađati sile inercije mase. Gospodarsko vozilo ubrzavam od 0 do 100 km/h za 20 sekundi, odnosno ubrzanje iznosi  $a=1,4 \text{ m/s}^2$ . Pritom otpor ubrzanja iznosi:

$$F_{in} = m \cdot a,$$

Slijedi:

$$F_{in} = 24750 \cdot 1,4 = 34\ 650 \text{ N}$$

Otpor penjanja treba svađati komponentu sile teže u smjeru padine te iznosi:

$$F_p = m \cdot g \cdot \sin\alpha$$

Gdje je :

$\alpha$  - kut uspona koji za nagib terena od 25% iznosi  $\alpha=14,03$ .

Slijedi:

$$F_p = 24\ 750 \cdot 9,81 \cdot \sin(14,03) = 58\ 853 \text{ N}$$

Vučna sila potreban za kretanje vozila iznosi :

$$F_v = 4855 + 250,85 + 34\ 650 + 58\ 853 = 98\ 608 \text{ N}$$

Temeljem vučne sile  $F_v$  moguće je odrediti maksimalan moment koji se javlja na kotačima.

Da bi se odredio maksimalni moment treba poznavati polumjer kotača. Prema katalogu proizvođača gospodarsko vozilo koristi gume 295/80 R22,5 iz čega proizlazi polumjer kotača koji iznosi  $r_k = 0,76 \text{ m}$ . Maksimalni moment na kotačima iznosi:

$$T_k = F_v r_k = 98\ 608 \cdot 0,76 = 84\ 802,88 \text{ Nm}.$$

Snaga potrebna za svađavanje momenta na kotačima iznosi:

$$P_k = T_k \cdot \omega = T \cdot 2\pi \cdot n_k$$

Gdje je:

$N_k$  – broj okretaja pogonskog kotača

Da bi se odredio broj okretaja pogonskog kotača potrebno je odrediti opseg pogonskog kotača koji iznosi :

$$O_k = 2 \cdot r_k \cdot \pi = 2 \cdot 0,76 \cdot \pi = 4,77 \text{ m.}$$

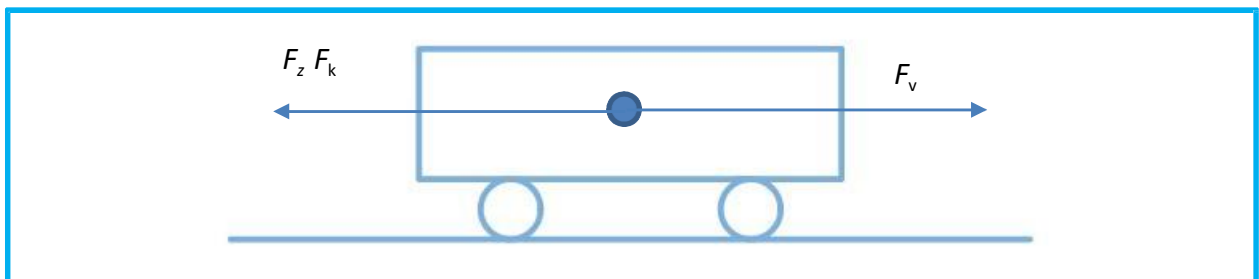
Broj okretaja pogonskog kotača iznosi:

$$n_k = \frac{v}{O_k} = \frac{3,54}{4,77} = 0,74 \text{ s}^{-1} = 44,52 \text{ min}^{-1}.$$

Slijedi:

$$P_k = 84\,802,88 \cdot 2 \pi \cdot 1,01 = 352\,017 = 352 \text{ kW}$$

Drugi pogonski uvjet koje vozilo mora savladati definiran je maksimalnom brzinom vozila, tj. mora biti u mogućnosti voziti konstantnom brzinom od 120 km/h na ravnom terenu ako je teretni prostor vozila prazan pri čemu se zanemaruje inercijska sila potrebna za ubrzavanje vozila do 120 km/h zbog toga jer se promatra samo vožnja konstantnom brzinom.



Slika 24. Sile koje djeluju na vozilo na ravnom terenu

Na temelju slike 24. određuje se vučna sila  $F_v$  koja je potrebna za savladavanje otpora vožnje:

$$F_v = F_k + F_z$$

Sila otpora kotrljanja  $F_k$  jednaka je kao kod prvog pogonskog uvijeta, dok se je kod sile aerodinamičkog otpora zraka  $F_z$  promijenila veličina brzine koja sad iznosi  $v = 120 \text{ km/h}$  približno  $33,34 \text{ m/s}$ . Sila aerodinamičkog otpora zraka  $F_z$  iznosi:

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot 1,33 \cdot 1 \cdot 3,45 \cdot 33,34^2 = 2167,85 \text{ N}$$

Vučna sila kod drugog pogonskog uvijeta iznosi:



$$F_v = 686,7 + 2167,85 = 2583,59 \text{ N}$$

Maksimalni moment na kotačima iznosi:

$$T_k = F_v \cdot r_k = 2583,59 \cdot 0,56 = 1444,62 \text{ Nm}$$

Snaga potrebna za savladavanje momenta na kotačima iznosi:

$$P_k = T_k \cdot \omega = T \cdot 2 \pi \cdot n_k$$

Broj okretaja pogonskog kotača iznosi:

$$n_k = \frac{v}{O_k} = \frac{33,34}{3,51} = 9,49 \text{ s}^{-1} = 569,4 \text{ min}^{-1}$$

Slijedi :

$$P_k = 1444,62 \cdot 2 \pi \cdot 9,49 = 86119,67 \text{ W} \approx 86,2 \text{ kW}$$

Dobiveni rezultati nakon provedenog proračuna za oba pogonska uvjeta prikazana su u tablici (slika 26.)

*Slika 27. Rezultati proračuna za oba pogonska uvjeta*

Pogonski uvjet	$F_v$ [N]	$T_k$ [Nm]	$n$ [ $s^{-1}$ ] k	$P_k$ [kW]
1	98608	75710	44,52	352
2	2583,59	1444,62	9,49	86,2

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da su pogonski uvjeti ispravno odabrani što je vidljivo iz dobivenih vrijednosti.

Ispravnost najvećeg momenta na kotačima možemo provjeriti pomoću proračuna maksimalnog teorijskog momenta definiranog mehaničkom transmisijom.

Teorijski najveći moment na kotačima se javlja prilikom pokretanja vozila a iznosi:

$$T_{kmax} = T_{mot} \cdot i_1 \cdot i_d \cdot h_{meh}$$

Gdje je:

$T_{\text{mot}}$  – moment na motoru gospodarskog vozila

$i_1$  – prijenosni omjer prve brzine gospodarskog vozila

$i_d$  – prijenosni omjer diferencijala

$h_{\text{meh}}$  – iskoristivost mehaničke transmisije ( $h_{\text{meh}} = 0,9$ )

Tehnički podaci vozila potrebni za proračun teorijskog maksimalnog momenta su uzeti iz kataloga proizvođača i prikazani su u tablici 27.

Slika 25. Tehnički podaci vozila *Tourismo L*

<i>Tourismo L Mercedes</i>		
Maksimalni moment (pri 1100 min <sup>-1</sup> )	$T_{\text{mot}}$	1900 Nm
Prijenos: ručni: 6 stupanjski		
Prijenosni omjer: 1 brzina	$i_1$	5,06:1
Prijenosni omjer: 2 brzina	$i_2$	2,61:1
Prijenosni omjer: 3 brzina	$i_3$	1,52:1
Prijenosni omjer: 4 brzina	$i_4$	1,00:1
Prijenosni omjer: 5 brzina	$i_5$	0,79:1
Prijenosni omjer: 6 brzina	$i_6$	0,68:1
Prijenosni omjer: nazad	$i_r$	4,72:1
Prijenosni omjer: diferencijal	$i_d$	3,923:1

Teorijski najveći moment na kotačima koji iznosi :

$$T_k \text{ max} = 1900 \cdot 5,06 \cdot 3,923 \cdot 0,9 = 33\,944,1 \text{ Nm}$$

Vidljivo je da su rezultati jednog i drugog proračuna približno jednaki te će se kao osnova za odabir hidromotora/pumpe koristiti najveći moment na kotačima koji iznosi:

$$T_{k \max} = 33\,944,1 \text{ Nm.}$$

## 4.2. Odabir hidromotora/pumpe

Nakon što se odredio maksimalni moment na kotaču autobusa, moguće je provesti proračun i odabir hidromotora/pumpe te razdjelnika snage.

Iz pogonskih uvjeta određuje se najveća i najmanja brzina vrtnje pogonskih kotača koja iznosi  $n_{min}^k = 1,01 \text{ s}^{-1}$  i  $n_{max}^k = 9,49 \text{ s}^{-1}$ . Odabire se razdjelnik snage s prienosnim omjerom  $i_{rs} = 2$ .

Nakon toga je moguće odrediti maksimalni potrebni broj okretaja hidromotora:

$$n_{max}^{HM} = n_{max}^k \cdot i_d \cdot i_{rs} = 9,49 \cdot 3,923 \cdot 2 \cdot 60 = 4467 \text{ min}^{-1}$$

te minimalni potrebni broj okretaja hidromotora:

$$n_{min}^{HM} = n_{min}^k \cdot i_d \cdot i_{rs} = 1,01 \cdot 3,923 \cdot 2 \cdot 60 = 476 \text{ min}^{-1}$$

Maksimalni moment koji hidromotor mora ostvariti za savladavanje momenta na kotačima iznosi:

$$T_{max}^{HM} = \frac{T_{k \max}}{i_d \cdot i_{rs}} = \frac{7805}{3,923 \cdot 2} = 994,77 \text{ Nm}$$

Usporedbom s sličnim PHH sustavom pretpostavit će se pad tlaka na hidromotoru  $\Delta p^{HM} \approx 400$  bara i ukupni stupanj iskoristivosti hidromotora  $\eta_t^{HM} = 0,98$ . Sada se može odrediti potrebni specifični protok hidromotora:

$$Q_1^{HM} = \frac{T_{max}^{HM}}{\Delta p \cdot \eta_t^{HM}} = \frac{994,77 \cdot 2\pi}{400 \cdot \pi} = 159,44 \text{ cm}^2$$

Poznavanjem maksimalnog momenta, specifičnog protoka te maksimalne brzine vrtnje prema katalogu proizvođača odabiremo hidromotor:

Slika 26. Tehničke karakteristike hidromotora/pumpe

Hidromotor A6VM 170		
Maksimalni specifični protok	$Q_{1\max}$	171,8 cm <sup>3</sup>
Maksimalni moment	$T_{\max}$	1230 Nm
Maksimalni radni tlak	$p_{\max}$	450 bar
Maksimalni protok	$Q_{\max}$	533 l/min

Brzina vrtnje pri maksimalnom specifičnom protoku	$n_{\max 1}$	3100 min <sup>-1</sup>
Brzina vrtnje pri minimalnom specifičnom protoku	$n_{\max 2}$	5750 min <sup>-1</sup>

### 4.3. Proračun akumulatora

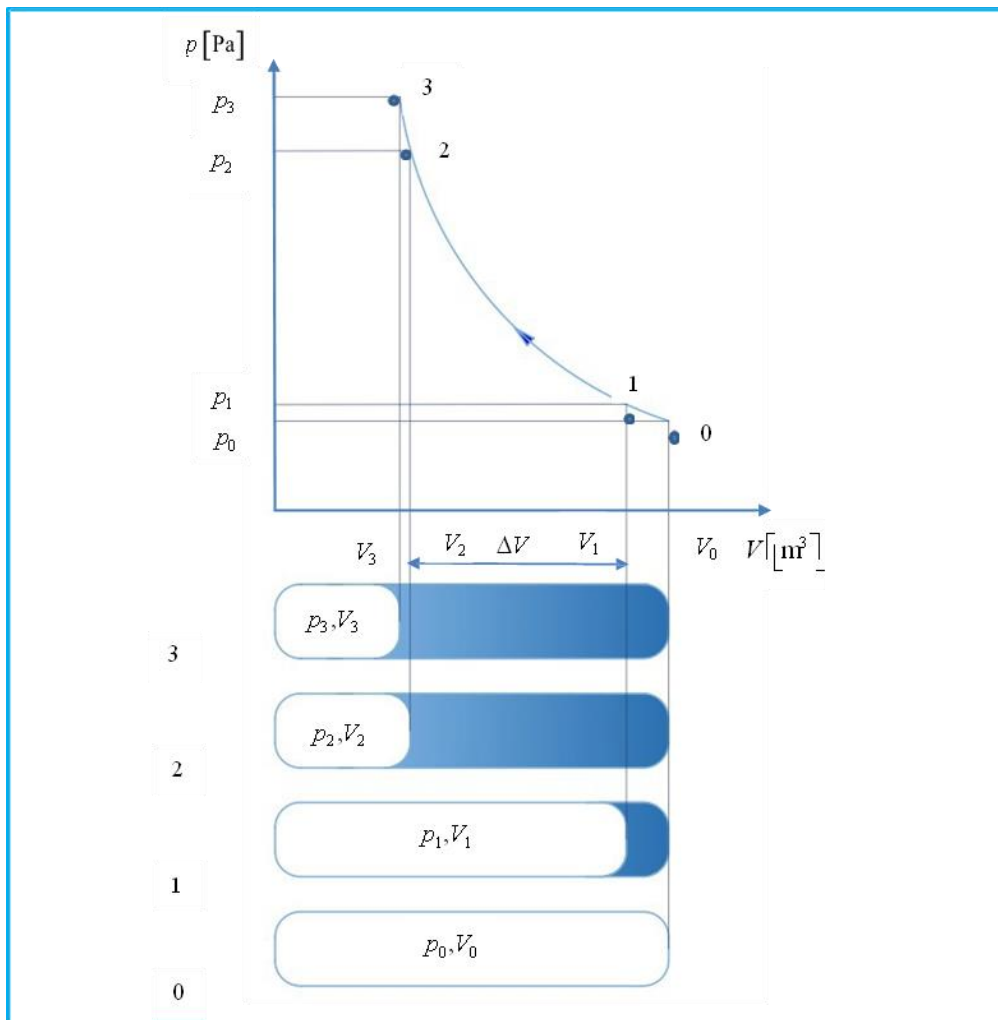
U paralelni hidraulički hibridni sustav ugraditi će se hidropneumatski akumulator/i tvrtke „Bosch Rexorth“. Odabir i proračun akumulatora temelji se na tome da je u mogućnosti apsorbirati dovoljnu količinu kinetičke energije dobivenu regenerativnim kočenjem. Pretpostavlja se da se akumulator u potpunosti napuni tijekom regenerativnog kočenja gospodarskog vozila s  $v_2 = 70$  km/h na  $v_1 = 10$  km/h. Kada gospodarsko vozilo uspori na 10 km/h hidraulički sustav se u potpunosti gasi, te se uključuju glavne tarne kočnice koje u potpunosti zaustavljaju vozilo. Maksimalna kinetička energija koju je moguće iskoristiti tijekom navedenog procesa iznosi:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) = E_k = \frac{1}{2} \cdot 24750 \cdot (19,44^2 - 2,78^2) = 4581101 \text{ J}$$

Logično je da se neće cijela kinetička energija iskoristiti za punjenje akumulatora. Dio nje će se iskoristiti da se svlada razlika tlakova između visokotlačnog i niskotlačnog akumulatora, dok se drugi dio izgubi zbog samog prijenosa snage. Na temelju poglavlja 5 pretpostavlja se da se ukupno 60% rekuperirane energije može spremi u visokotlačnom akumulatoru, odnosno:

$$E_{k i} = 0,6 \cdot E_k = 0,6 \cdot 4581101 = 2748660 \text{ J}$$

Da bi se mogla odrediti akumulacijska energija akumulatora potrebno je odrediti karakteristične vrijednosti akumulatora. Sva razmatranja vezana za hidropneumatski akumulator vezana su za sliku 29.



Slika 27.  $p, V$ -dijagram hidropneumatskog akumulatora

Preliminarno se odabire akumulator volumena plina  $V_0 = 50$  l koji ispunjava cijeli prostor.

Prilikom stavljanja u pogon akumulator je opterećen tlakom punjenja  $p_0$  koji iznosi  $p_0 = 0,9p_1$

gdje je  $p_1$  minimalni radni tlak koji pretpostavljeno iznosi  $p_1 = 200$  bar . Temeljem toga tlak punjenja iznosi:

$$p_0 = 0,9 \cdot 200 = 180 \text{ bar}$$

Najviši radni tlak iznosi  $p_2 = 400$  bar . Dok je tlak  $p_3$  definiran ventilom za ograničenje tlaka te

iznosi  $p_2 \leq 0,9p_3$  . Pretpostavlja se da je punjenje i pražnjenje akumulatora brzi proces, pa jedva

da postoji izmjena topline između plina i okoline, pa se računa s adijabatskim procesom. Korisni

volumen akumulatora  $\Delta V$  predstavlja maksimalnu količinu radne tekućine koju akumulator može primiti, te iznosi:

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{K}} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{K}}\right] = 50 \cdot \left(\frac{180}{200}\right)^{\frac{1}{1,4}} \cdot \left[1 - \left(\frac{180}{200}\right)^{\frac{1}{1,4}}\right] = 26,8 \text{ l}$$

Maksimalni energetska kapacitet u slučaju kada je akumulator prazan iznosi:

$$W_1 = p_0 \cdot V_0 = 180 \cdot 10^5 \cdot 0,05 = 535897 \text{ J}$$

Maksimalni energetska kapacitet u slučaju kada je akumulator u potpunosti ispunjen radnom tekućinom iznosi:

$$W_2 = p_2 (V_0 - V) = 400 \cdot 10^5 (0,05 - 0,027) = 928208 \text{ J}$$

Ukupna akumulacijska energija iznosi :

$$W = W_2 - W_1 = 928208 - 535897 = 392311 \text{ J}$$

Potreban broj akumulatora jednak je omjeru iskoristive kinetičke energije dobivene regenerativnim kočenjem te ukupne akumulacijske energije:

$$N = \frac{E_{ki}}{W} = \frac{388889}{392311} = 0,99$$

Da bi se tijekom regenerativnog kočenja vozila s  $v_2 = 70 \text{ km/h}$  na  $v_1 = 10 \text{ km/h}$  akumulirala ukupna količina kinetičke energije potrebno je ugraditi visokotlačni akumulator nazivnog volumena plina od 50l.

#### 4.4. Proračun cijevi

Cjevovodima se vrši prijenos energije u hidrauličkom hibridnom sustavu između visokotlačnog akumulatora i pumpe/hidromotora. Te između niskotlačnog akumulatora i pumpe/hidromotora. Cijevi moraju sigurno bez popuštanja prenositi radnu tekućinu. Kod hidrauličkog hibridnog sustava koriste se krute cijevi.

Proračun cijevi temelji se na određivanju unutarnjeg promjera cijevi koji ovisi o protoku radne tekućine, brzini strujanja, viskoznosti i dozvoljenim gubicima tlaka.

Unutarnji promjer cijevi određuje se na temelju veličine protoka  $Q_{\max}$  i brzine strujanja prema izrazu

$$d_u = \sqrt{\frac{4Q_{\max}}{\pi v_s}}$$

gdje je:

$d_u$  – unutarnji promjer cijevi,

$Q_{\max}$  – maksimalan protok kroz cijev,

$V_s$  – srednja dopuštena brzina strujanja radne tekućine

Maksimalni protok kroz cijev definiran je maksimalnim protokom pumpe/hidromotora. Za odabranu jedinicu A6VM 170 maksimalni protok iznosi  $Q_{\max} = 533 \text{ l/min} \approx 8,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Srednja dopuštena brzina strujanja radne tekućine  $v_s$  za tlačni vod i maksimalan tlak u sustavu  $p_2 = 400 \text{ bar}$  iznosi:

$$V_s = 9 \text{ m/s.}$$

Unutarnji promjer cijevi iznosi:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 8,88 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 9}} = 0,03544 \text{ m} = 35,44 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke krute cijevi iznosi:

$$s_{\text{pr}} = \frac{d_u p_2}{20 \frac{K}{S} \vartheta - 2p},$$

gdje je:

$s_{\text{pr}}$  – proračunska debljina stijenka cijevi,

$K$  – karakteristična vrijednost za čvrstoću materijala

$S$  – faktor sigurnosti

$\vartheta$  – faktor kvalitete zavar

Karakteristične vrijednosti za čvrstoću materijala  $K$  za odabrani materijal St 52 iznosi:

$$K = 353 \text{ N/mm}^2.$$

Faktor kvalitete zavara  $\vartheta$  za bešave cijevi iznosi;

$$\vartheta = 1.$$

Temeljem navedenih vrijednosti proračunska debljina stijenki iznosi:

$$s_{pr} = \frac{35,44 \cdot 400}{20 \cdot \frac{353}{1,7} \cdot 1 - 2 \cdot 400} = 4,23 \text{ mm.}$$

Usvojena je prva veća standardna debljina stijenki koja iznosi  $s_{od} = 4,5 \text{ mm}$ .

Za precizno odrađivanje potrebne debljine stijenke potrebno je uzeti u obzir:

$c_1$  – dodatak zbog netočnosti izrade cijevi

$$c_1 = 0,1s_{od} = 0,1 \cdot 4,5 = 0,45 \text{ mm,}$$

$c_2$  – dodatak na istrošenost zbog korozije koji iznosi 1mm

Konačni izraz za minimalnu debljinu stijenki je:

$$s_{min} = s_{pr} + c_1 + c_2 = 4,23 + 0,45 + 1 = 5,68 \text{ mm.}$$

Odabire se standardna debljina stijenke cijevi:

$$s = 6 \text{ mm.}$$

Prema DIN 2391 odabire se hladno vučena i hladno kovana bešavna čelična cijev 48x6.

Odabire se mineralno ulje za primjenu u mobilnoj hidraulici ISO VG 68. Temeljem odabrane viskoznosti odabire se visokokvalitetno mineralno ulje „INA Hidraoli DVC“ s paketom aditiva koji osiguravaju odlična svojstva protiv trošenja, dobru termičku, oksidacijsku, korozijsku i hidrolitičku stabilnost.

#### 4.6. Pad tlaka u cijevima

Kod strujanja radne tekućine pojavljuju se gubici zbog trenja u samoj radnoj tekućini te između stijenke cijevi i radne tekućine koji se izražavaju u obliku pada tlaka. Pad tlaka u cijevi od niskotlačnog akumulatora do pumpe/hidromotora jednak je padu tlaka u cijevi od



pumpe/hidromotora do visokotlačnog akumulatora zbog toga jer je dužina cijevi sa obje strane jednaka te pretpostavljeno iznosi 1 0,5 m . U daljnjem tekstu koristi se izraz pad tlaka, a pritom se misli pojedinačno na pad tlaka u oba dvije cijevi. Pad tlaka u cijevi p iznosi:

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho_1 v_1^2}{2} \cdot \frac{l}{d_u},$$

gdje je:

$\lambda$  – faktor trenja,

$\rho_1$  -gustoća radne tekućine,

$v_1$  – brzina strujanja radne tekućine,

$d_u$  – unutarnji promjer cijevi,

$l$  - duljina cijevi.

Pretpostavlja se da je strujanje u cijevima laminarno. Za okrugle glatke cijevi pretpostavlja se da je kritična vrijednost Reynoldsove značajke kada laminarno strujanje prelazi u turbulentno  $Re$  2300 . Faktor trenja tada iznosi:

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{2300} = 0,0278.7$$

Brzina strujanja radne tekućine pri maksimalnom protoku  $Q_{max}$  i usvojenom unutarnjem promjeru cijevi  $d_u = 36$  mm iznosi :

$$v_1 = \frac{Q_{max}}{\frac{d_u^2 \pi}{4}} = \frac{8,83 \cdot 10^{-3}}{\frac{0,036^2 \cdot \pi}{4}} = 8,67 \text{ m/s.}$$

Gustoća radne tekućine za mineralno ulje „INA Hidraoli DVC“ iznosi  $\rho_t = 881 \text{ kg/m}^3$ .

Pad tlaka iznosi:

$$\Delta p = 0,0278 \frac{881 \cdot 8,67^2}{2} \cdot \frac{0,5}{0,036} = 12785 \text{ Pa} \approx 0,13 \text{ bar}$$

Iz proračuna je vidljivo da je pad tlaka u cijevi od niskotlačnog akumulatora do pumpe/hidromotora i pad tlaka u cijevi od pumpe/hidromotora do visokotlačnog akumulatora zanemarivo mali te se ne uzima u obzir u daljnjem radu.

## 5. ZAKLJUČAK

Čovjekov napredak i razvoj uvelike ovisi o njegovom vlastitom trudu i radu, te se tijekom vremena taj rad i trud može vidjeti kroz razne izume, patente i proizvode koji se od samih početaka tijekom vremena razvijaju na svoj način. Najbolji je primjer gledano kroz povijest koja je vrlo upečatljiva od izuma kotača. Od tada je sve išlo daleko brže, bolje i kvalitetnije. Što se neke stvari, alati, strojevi, mašine i računala više razvijaju to sve brže napreduje, jer se već postojeće koristi za daljnji razvoj. Takva je situacija bila i još uvijek je u prijevozu. To znači da se do izuma kotača za prijevoz koristila vlastita snaga i snaga životinja što je imalo svoju draž, čišću prirodu, manju buku i gotovo neznatnu zagađenost prirode. Od izuma kotača sve se mijenja jer se ubrzanim tempom radi na prvim biciklima, motociklima, automobilima, kamionima pa sve do aviona. Sva prijevozna sredstva imaju zajednički element, a to je kotač. Razvojem društva i tehnologije do današnjih dana tehnologija je toliko napredovala da je to vrlo bitno i postala je dio društva. Takva je situacija i u današnjem gradskom prijevozu. Kako su se mjesta, sela i gradovi razvijali, te kako su pogotovo gradovi postojali sve veći nastala je potreba za organiziranim gradskim prijevozom. Od vruće tramvaja konjima pa sve do danas gdje se koristi struja, benzin i diesel, a u najnovije vrijeme i hibridni hidraulički sustavi u autobusima. S vremenom korištenja motora na izgaranje neminovno je bilo da se zagađenost povećava i da se spomenuto gorivo troši dok će ga biti. Nije niti ono nepresušno. Kako se tijekom vremena sve više autobusa koristi, oni sve više zagađuju okoliš, sve više financijski koštaju bilo je neminovno da se potaknu istraživanja o novim sustavima pokretanja kao što su to elektromotori koji će se integrirati u autobuse. Ovakav vid istraživanja i početak implementacije počeo je još u prošlom stoljeću, te se na određene mahove razvijao sve do danas. Povijesni razvoj hibridnih vozila počinje još davne 1840. godine i vezano je za ime Henri Pieper s poznatim „Auto-Mixte“ iz Herstala, Belgija, pa sve do danas kada Mercedes-Benz proizvodi autobuse na hibridni hidraulički pogon. To pokazuje kako je čovjek evaluirao i puno toga napravio. Ovakav hidraulični hibridni pogon troši manje energije, više iskorištava spomenutu energiju, gotovo je smanjena dvostruka količina zagađenosti okoliša, manje je bučno, nije ovisnost samo o jednom izvoru goriva i drugo. Što se tiče drugih otežavajućih elemenata oni su najviše kroz financijsku liniju što znači da je početna investicija pozamašna jer se moraju izgraditi mnoge linije, infrastruktura, servisi održavanje i drugo. Tijekom vremena

ovakvi izdatci se smanjuju i sve postaje povoljnije, a sve u cilju razvoja, razvitka, očuvanja prirode i veće iskoristivosti čiste energije.

## 6. POPIS LITERATURE

Autoholik.net (2010) *Toyota slavi: U Europi prodano više od 200.000 Priusa!*, <http://autoholik.net/car-biz/toyota-slavi-u-europi-prodano-vise-od-200000-prius> (26.12.2010.)

Autoportal.hr (2021) <https://autoportal.hr/enciklopedija/auto-mixte-1906-1912-prva-tvornica-koja-je-radila-iskljucivo-hibride/> (29.6.2023).

Böhme, H. 2007, *Hibridni motor za manju potrošnju*, pogledano: 22.12.2010.  
online: <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,2553721,00.html> (29.6.2023).

Brnić, D. (2015) *Primjena zamjenskih goriva i hibridnog pogona autobusa u gradsko-prigradskom transportu*, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti.

Conam (2023) „*Auto-Mixte*” iz *Herstala, Belgija*, <https://conam.info/vraag-a-aanbod/opgeloste-vragen/281-auto-mixte-uit-herstal-belgie> (29.6.2023).

Čevra A. (2001) *Motori i motorna vozila 1*, Školska knjiga Zagreb, Zagreb (29.6.2023).

Dorotić, I (2012) *Hibridna vozila*, Centar za vozila Hrvatske.

Dubić, K. (2010) *Skladištenje električne energije kod hibridnih električnih vozila*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu.

Diplomski rad, D.Brčić (2006) *Projekt hidrauličkog hibridnog sustava za gospodarsko vozilo*

Džambo, A. (2016) *Analiza eksploatacijskih značajki cestovnih vozila na hibridni pogon*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti.

EESI, *Hybrid busses costs and benefits*, [www.eesi.org/files/eesi\\_hybrid\\_bus\\_032007.pdf](http://www.eesi.org/files/eesi_hybrid_bus_032007.pdf), pristupljeno 6.7.2023.

Mercedes benz, [www.mercedes-benz-bus.com/hr\\_HR/models/tourismo-rhd/facts/technical-data.html](http://www.mercedes-benz-bus.com/hr_HR/models/tourismo-rhd/facts/technical-data.html) , pristupljeno 6.7.2023.

Franković B., Jedriško C., Lenić K., Trp A. *Istraživanja i razvoj tehnologije vodika*, Rijeka: Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci.

- Glas Amerike (2015) *Jeftinija tehnologija za hibridne autobuse*, <https://www.glasamerike.net/a/uk-hybris-hydraulics/3048800.html>, pristupljeno 6.7.2023.
- Gudan, J (2011) Analiza eksploatacijskih karakteristika hibridnih cestovnih vozila, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu.
- Klader Liz, Prince Jay, Talen Zach, Bangma Tim, Mulder Jon (2011) Izvješće o hidrauličnom hibridu, Calvin Koledž Inženjering.
- Mercedes\_Benz (2023) [www.mercedes-benz-bus.com/hr\\_HR/models/citaro-hybrid/efficiency/hybrid-technology.html](http://www.mercedes-benz-bus.com/hr_HR/models/citaro-hybrid/efficiency/hybrid-technology.html), pristupljeno 10.7.2023.
- Popović, B., Đogić J., Rakić S. (2011) *Hibridna tehnologija*, Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet.
- Rydberg Karl-Erik (2009) Energy Efficient Hydraulic Hybrid Drives, Sweden: Department of Management and Engineering, Linköping University, Linköping, The 11:th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'09.
- Selci, D. (2009) *Hidrostatski hibridni pogon za dostavno vozilo*, Rijeka: Sveučilišni studij strojarstva, Tehnički fakultet.
- Siminiati, D. (2009) *Hidrostatski hibridni pogon za dostavno vozilo*, Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Studij strojarstva.
- Volkswagen (2023) [www.volkswagen.hr/hibridna-vozila-nova](http://www.volkswagen.hr/hibridna-vozila-nova).
- ZET, [www.zet.hr/ekoloska-svijest-i-projekt-clean-fleets/autobusi-u-zelenom/336](http://www.zet.hr/ekoloska-svijest-i-projekt-clean-fleets/autobusi-u-zelenom/336), pristupljeno 4.7.2023.

## SAŽETAK

Čovjekovo putovanje i prijevoz prisutno je od samih početaka ljudske vrste jer je u čovjeku prisutan onaj element znatiželje, upoznavanja, istraživanja i čovjekovog razvoja. Stoga su svi povijesni razvoji vezani za prijevoz i vožnju. Od pojave prvog stroja, prevoznog sredstva pa sve do danas postignut je veliki razvoj. Ono s čim čovjek u samim počecima nije računao, a to je potrošnja energije i zagađenost, a o čemu u današnje vrije vodi sve više brigu. Tako se dolazi od motora na benzinski diesel pogon sve do hibridnih vozila, a što je počelo još u prošlom stoljeću. Povijesni razvoj hibridnih vozila počinje još davne 1840. godine i vezano je za ime Henri Pieper s poznatim „Auto-Mixte“ iz Herstala, Belgija, pa sve do danas kada Mercedes-Benz proizvodi autobuse na hibridni hidraulički pogon. Ovakav razvoj tijekom vremena čovjeka je potaknulo, s obzirom na to da ima veliki utjecaj na promjene u prirodi koje se manifestiraju kroz zagađenost koja potiče promjene klime i vremena, pa sve do utjecaja i na hranu. Kako bi se to smanjilo i kako bi se iskoristila veća postojeća energija radi se na patentiranju, implementaciji elektromotora u kombinaciji s elektromotorom, a u svrhu očuvanja prirode, manjim troškovima u budućnosti i iskorištavanju veće energije. Do pojave hibridnih sustava trošila se je veća energija i više se je zagađivao okoliš, te je bila i veća buka. Pojavom hibridnih hidrauličkih sustava sve je svedeno na minimum, a povećana je iskoristivost energije koja do tada nije bila u tolikoj mjeri korištena, već se dobar dio energije gubio.

**Ključne riječi:** hibridni, snaga, hidraulični, sustav, autobus.

## **SUMMARY**

Man's journey and transportation has been present since the very beginning of the human species because the element of curiosity, acquaintance, research and human development is present in man. Therefore, all historical developments are related to transportation and driving. From the appearance of the first machine, a means of transport until today, great development has been achieved. What man did not take into account in the very beginnings, namely energy consumption and pollution, and about which he takes more and more care today. That's how you get from gasoline-diesel engines to hybrid vehicles, which started back in the last century. The historical development of hybrid vehicles begins as far back as 1840 and is linked to the name of Henri Pieper with the famous "Auto-Mixte" from Herstal, Belgium, until today when Mercedes-Benz produces buses with hybrid hydraulic drive. This kind of development over time has been encouraged by man, considering that it has a great influence on changes in nature that are manifested through pollution that encourages changes in climate and weather, up to the impact on food. In order to reduce this and to use more existing energy, we are working on patenting, the implementation of an electric motor in combination with an electric motor, and for the purpose of preserving nature, lower costs in the future and using more energy. Until the advent of hybrid systems, more energy was consumed and the environment was more polluted, and there was also more noise. With the appearance of hybrid hydraulic systems, everything was reduced to a minimum, and the use of energy increased, which until then was not used to such an extent, but a good part of the energy was wasted.

**Key words:** hybrid, power, hydraulic, system, bus.

## Popis slika

Slika 1. Auto-Mixte, Herstal, Belgija.....	2
Slika 2. „Auto Mixte“ i prva tvornica.....	3
Slika 3. Reklamni letak .....	4
Slika 4. Današnji Porsche Panamera 4 E-Hybrid.....	5
Slika 5. Plug-in hibridna tehnologija.....	7
Slika 6. Serijski hibridni pogon.....	8
Slika 7. paralelni hibridni pogon.....	9
Slika 8. Serijsko paralelni hibridni pogon.....	10
Slika 9. Benzinsko hibridno vozilo Across 2,5 E-CVT E-FOUR PHEV Elegance od tvrtke Suzuki.....	11
Slika 10. Kija dizelski meki hibridni pogon od 48 Volti .....	12
Slika 11. Autobus na pogon prirodnim stlačenim plinom.....	14
Slika 12. Cumulo CBED and CHD hidraulični hibridni sustavi za gradske autobuse, Parker Hannifin.....	20
Slika 13. Hidraulički prijenos.....	22
Slika 14. Konfiguracija paralelnog hidrauličkog hibrida.....	23
Slika 15. Konfiguracija serijskog hidrauličkog hibrida.....	24
Slika 16. Usporedba električnog i hibridnog serijskog hibrida.....	24
Slika 17. Hibridni autobus.....	26
Slika 18 Digitalni hidraulični hibridni autobus tvrtke Artemis iz Škotske .....	28
Slika 19 Autobus Turismo L hibrid tvrtke Mercedes-Benz .....	29
Slika 20. Elektromotor koji se koristi u hibridnom autobusu .....	30
Slika 21. Skica paralelnog hidrauličkog hibridnog sustava za vozilo Mercedes Turismo L..	41
Slika 22. Tablica sa pogonskim uvjetima.....	42
Slika 23. Sile koje djeluju na vozilo pri savladavanju uspona.....	43
Slika 24. Sile koje djeluju na vozilo na ravnom terenu.....	46
Slika 25. Rezultati proračuna za oba pogonska uvijeta.....	47
Slika 26. Tehnički podaci vozila „Turismo L“ .....	47

Slika 27. Tehničke karakteristike hidromotora/pumpe.....	49
Slika 29. P/V dijagram hidropneumatskog akumulatora.....	50

## **Popis grafova**

Grafikon 1 i 1a. Rad hibridnog motora .....	17
Grafikon 2. Podatci o potrošnji goriva motora.....	18
Grafikon 3. Okretni moment po protoku goriva u odnosu na brzinu motora.....	18
Grafikon 4. Snaga po protoku goriva u odnosu na brzinu motora. ....	19
Grafikon 5. Usporedba emisije štetnih plinova.....	25
Grafikon 6. Broj hibridnih autobusa u EU, 2012. godina. ....	27