

Modeliranje i analiza hibridnog hidrauličkog pogona šumskog zglobnog traktora pomoću računalnog programa Hopsan

Žarak, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:595093>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Žarak

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Mihael Cipek, dipl. ing.

Student:

Nikola Žarak

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Mihaelu Cipeku na strpljenju, velikoj pomoći i savjetima pri izradi ovoga rada.

Također se zahvaljujem svojim roditeljima i prijateljima na podršci tijekom razdoblja studiranja.

Nikola Žarak



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 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Žarak** JMBAG: **0035216993**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje i analiza hibridnog hidrauličkog pogona šumskog zglobnog traktora pomoću računalnog programa Hopsan**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modelling and analysis of a hybrid hydraulic powertrain for a forest skidder by using Hopsan computer program**

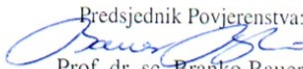
Opis zadatka:

U posljednje vrijeme su sve veći zahtjevi u smislu smanjenja troškova rada gospodarskih izvancestovnih vozila zajedno s regulatornim pritiscima za niže emisije ispušnih plinova i buke, što dovodi u pitanje budućnost konvencionalnih rješenja kod kojih se koristi motor s unutarnjim izgaranjem kao jedini pogonski izvor snage. S obzirom na to kako tijekom posljednja dva desetljeća raste trend uvođenja hibridnih pogona kod cestovnih vozila radi smanjenja potrošnje goriva i emisija stakleničkih plinova uz zadržavanje autonomije u pogledu dometa, očekivano je uvođenje hibridnih pogona za gospodarska izvancestovna vozila. Imajući to u vidu, ovaj zadatak predlaže zamišljenu konverziju postojećeg rješenja konvencionalnog pogona šumskog zglobnog traktora u njegovu hibridnu hidrauličku inačicu podjednake voznih karakteristika koristeći pri tom računalni program Hopsan.

U radu je potrebno:

- detaljno opisati hibridni pogon vozila te njegove inačice,
- dati pregled primjene različitih konfiguracija hibridnih pogona kod gospodarskih izvancestovnih vozila te opisati glavne karakteristike, prednosti i nedostatke,
- opisati konfiguraciju pogona šumskog zglobnog traktora (Skidder) i njegov radni ciklus,
- definirati zamjenski hidraulički hibridni pogon koji ima minimalne pogonske performanse jednake konvencionalnom,
- u računalnom programu Hopsan provesti simulaciju tog pogona,
- detaljno prokomentirati rezultate simulacije.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
30. 11. 2021.	1. rok: 24. 2. 2022. 2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022. 3. rok: 22. 9. 2022.	1. rok: 28. 2. - 4. 3. 2022. 2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022. 3. rok: 26. 9. - 30. 9. 2022.
Zadatak zadao:	Predsjednik Povjerenstva:	
Doc. dr. sc. Mihael Cipek	 Prof. dr. sc. Braňko Bauer	



SADRŽAJ

SADRŽAJ	2
POPIS TABLICA.....	5
POPIS OZNAKA	6
SAŽETAK.....	8
SUMMARY	9
1. UVOD.....	10
2. HIBRIDNI POGON VOZILA.....	11
2.1. Povijesni razvoj.....	11
2.2. Hibridni pogoni danas	13
2.2.1. Toyota	13
2.2.2. Lexus.....	14
2.2.3. Porsche.....	15
2.2.4. Chevrolet.....	16
2.2.5. Volvo.....	16
2.3. Osnovne konfiguracije hibridnih pogona.....	17
2.3.1. Serijska konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona.....	18
2.3.2. Paralelna konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona.....	19
2.3.3. Serijsko-paralelna konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona.....	20
3. RAZLIČITE KONFIGURACIJE HIBRIDNIH POGONA KOD GOSPODARSKIH IZVANCESTOVNIH VOZILA	22
3.1. Parker Hannifin hidraulički hibridni sustav	22
3.2. Bosch Rexroth hidraulički hibridni sustav	23
3.3. Eaton Corp hidraulički hibridni sustav	23
3.4. Auga Group hibridni električni/biometan sustav	24
4. KONFIGURACIJA POGONA ŠUMSKOG ZGLOBNOG TRAKTORA	25
4.1. Opis traktora EcoTrac 120V	25
4.2. Pogonski sklop traktora.....	27
4.2.1. Dizel motor	28
4.2.2. Vitlo	30
4.3. Radni ciklus traktora	31
5. ZAMJENSKI HIDRAULIČKI HIBRIDNI POGON	32
5.1. Hidromotor/pumpa.....	32
5.2. Hidraulička pumpa	34
5.3. Visokotlačni akumulator	35
5.4. Matematički model vozila.....	37
6. SIMULACIJA POGONA U PROGRAMSKOM ALATU HOPSAN	39
6.1. Uvodno o Hopsanu.....	39
6.2. Hidraulički model hibridnog vozila	42
6.3. Rezultati simulacije.....	44
7. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	52

POPIS SLIKA

Slika 2.1	Lohner-Porsche Semper Vivus hibrid [4]	11
Slika 2.2	Paralelna konfiguracija: a) „Cumulo brake Drive“ i serijska konfiguracija: b) „Cumulo Hydrostatic Drive“ [5]	12
Slika 2.3	„BER System“ [5]	12
Slika 2.4	Prius [6]	13
Slika 2.5	RAV4 Hibrid [7].....	14
Slika 2.6	Lexus GS 450h [6]	14
Slika 2.7	Cayenne [6]	15
Slika 2.8	911 GT3 R [6]	15
Slika 2.9	Chevrolet Volt [6]	16
Slika 2.10	Volvo S-Charge [8]	17
Slika 2.11	Općenita konfiguracija hibridnog pogona [9]	18
Slika 2.12	Serijska konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona [5].....	19
Slika 2.13	Paralelna konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona [5].....	20
Slika 2.14	Serijsko-paralelna konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona [5]	21
Slika 3.1	Princip rada Parker hibridnog sustava [11]	22
Slika 3.2	Princip rada Bosch Rexroth hibridnog sustava [12].....	23
Slika 3.3	Princip rada Eaton hibridnog sustava [5]	24
Slika 3.4	Auga traktor [14]	24
Slika 4.1	Šumski traktor EcoTrac 120V [16]	25
Slika 4.2	Bočne dimenzije [16]	26
Slika 4.3	Prednje dimenzije i zakret prednjeg mosta [16]	27
Slika 4.4	Shema pogonskog sklopa [16]	27
Slika 4.5	Krivulje momenta i snage motora [16].....	28
Slika 4.6	Ovisnost momenta motora o brzini vrtnje [16]	28
Slika 4.7	Mapa specifične potrošnje goriva [16]	29
Slika 4.8	Mapa trenutne potrošnje goriva [16]	29
Slika 4.9	Vitlo traktora EcoTrac 120V [17]	30
Slika 5.1	Reduktor [18]	32
Slika 5.2	Hidromotor [19]	33
Slika 5.3	Karakteristike hidromotora [19]	34
Slika 5.4	Pumpa [20]	35
Slika 5.5	Volumen pumpe [20].....	35
Slika 5.6	Kriteriji upotrebe hidrauličkih akumulatora [21]	36
Slika 6.1	Model regulacije tlaka	40
Slika 6.2	Model bačene loptice.....	40
Slika 6.3	Model senzora opterećenja	41
Slika 6.4	Model električnog vozila	41
Slika 6.5	Model hibridnog hidrauličkog vozila.....	42
Slika 6.6	Parametri vozila	43
Slika 6.7	Parametri pumpe	44
Slika 6.8	Različite veličine.....	45
Slika 6.9	Brzina vozila pri kočenju	46
Slika 6.10	Tlak plina u akumulatoru pri kočenju	47
Slika 6.11	Stanje napunjenosti „SoC“	47
Slika 6.12	Volumen plina u akumulatoru.....	48
Slika 6.13	Brzina vozila pri pokretanju s pumpom.....	49
Slika 6.14	Brzina vozila pri pokretanju s pumpom.....	49

Slika 6.15 Moment na hidromotoru 50

POPIS TABLICA

Tablica 4.1 Gabaritne dimenzije i masa [16] 26
Tablica 4.2 Različiti ciklusi vožnje [15] 31

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	čeaona površina vozila
c_d	-	koeficijent aerodinamičkog otpora
c_{fr}	-	faktor otpora kotrljanja
E_k	J	kinetička energija
E_{kor}	J	korisna kinetička energija
h	m	visinska razina
i	-	prijenosni omjer reduktora
i_{uk1}	-	ukupni prijenosni omjer prvog stupnja
l	m	prijeđena udaljenost
m	kg	masa vozila
m_v	kg	masa skiddera
n_m	min^{-1}	brzina vrtnje motora pri maksimalnom momentu
n_{max}	min^{-1}	maksimalna brzina vrtnje dizelskog motora
n_{nom}	min^{-1}	nominalna brzina vrtnje hidromotora
n_{stv}	min^{-1}	stvarna brzina vrtnje
p_0	bar	tlak punjenja
p_1	bar	minimalni radni tlak
p_2	bar	najveći radni tlak u sustavu
r	m	polumjer kotača
r_k	m	polumjer kotača skiddera
T	Nm	okretni moment pogona
T_h	Nm	stvarni moment na hidromotoru
T_m	Nm	maksimalni moment izvornog dizelskog motora
T_M	Nm	okretni moment hidromotora
T_{max}	Nm	maksimalni moment hidromotora
T_p	Nm	moment kojim se opterećen motor s unutarnjim izgaranjem
v	m/s	brzina vozila
V_g	m^3	stvarni volumen hidromotora
V_m	m^3	volumen hidromotora
v_{max}	m/s	maksimalna brzina vozila
v_o	m/s	brzina kada regenerativno kočenje gubi na značaju
V_p	m^3	volumen pumpe
V_0	m^3	preliminarni iznos volumena
W	J	ukupni energetska kapacitet
W_1	J	energetska kapacitet kada je akumulator prazan
W_2	J	energetska kapacitet kada je akumulator napunjen
η_m	-	ukupna iskoristivost hidromotora

η_p	-	volumetrička iskoristivost pumpe
ΔV	m^3	korisni volumen akumulatora
Δp	bar	odabrana maksimalna razlika tlakova visokotlačnog i niskotlačnog voda
κ	-	izentropski eksponent
ω	rad/s	kutna brzina pumpe

SAŽETAK

Tijekom posljednjeg desetljeća, sve više se koriste hibridni pogoni izvancestovnih gospodarskih vozila s ciljem postizanja značajne uštede goriva te smanjenje emisija štetnih plinova. S obzirom na to da se hibridne varijante pogona sastoje od dva ili više izvora energije te se mogu izvesti u različitim konfiguracijama, postoji mnogo pitanja što se tiče dizajna i upravljanja energijom pogonskog sklopa što može utjecati na troškove i isplativost hibridizacije ovakvog sustava. U ovom radu je prikazana jedna varijanta takvog hibridnog sustava na primjeru šumskog zglobnog traktora Skidder. Glavni kriterij kod projektiranja ovakvog sustava je održavanje podjednakih pogonskih karakteristika kao i u originalnoj izvedbi uz smanjenje troškova te štete na okoliš. Iz tog razloga je potrebno provesti i dodatne optimizacije što izlazi izvan okvira ovoga rada.

Ključne riječi: skidder, hibridni pogon, potrošnja goriva, šumski zglobni traktor

SUMMARY

Over the last decade, the use of hybrid drivetrains in off-road utility vehicles has been increased with the aim of achieving significant fuel savings and reduced gas emission. Since a hybrid drivetrain consists of two or more power sources and can be implemented in different configurations, there are many questions regarding the design and energy of the powertrain that can affect the cost-effectiveness of such a system. One variant of such a system is presented in this paper using an articulated forestry Skidder as an example. The main criteria when designing such a system is to maintain the same operating characteristics as the original version while reducing costs and environmental damage. For this reason, it is necessary to carry out additional optimizations that go beyond the scope of this paper.

Key words: skidder, hybrid drivetrain, fuel consumption, articulated forestry tractor

1. UVOD

Tijekom posljednja dva desetljeća sve veća pozornost se posvećuje razvoju čišćih i efikasnijih motora s unutarnjim izgaranjem kod cestovnih pa tako i izvancestovnih gospodarskih vozila. Razlog tomu je osviještenje o štetnim utjecajima ispušnih plinova na okoliš te sve većim zahtjevima u smislu smanjenja troškova rada izvancestovnih gospodarskih vozila zajedno sa zakonskim pritiscima za niže emisije ispušnih plinova i buke.

Jedan od načina postizanja navedenih zahtjeva je korištenje hibridne tehnologije koja kombinira više od jednog izvora energije u radnom ciklusu. Postoje više izvedbi u smislu vrste izvora energije no najčešće su električne te hidrauličke inačice.

Električna hibridna vozila koriste motor s unutarnjim izgaranjem kao primarni izvor energije te električnu bateriju kao sekundarni. Prednost takvih inačica je visoka gustoća energije baterija koje omogućuju pohranjivanje velikih količina energije u kompaktnim baterijama. Ovakav tip pogona se koristi najčešće kod automobila, ali i kod nekih gradskih autobusa [1].

Hidraulička hibridna vozila također koriste motor s unutarnjim izgaranjem kao primarni izvor energije dok kao sekundarni koriste hidrauličke akumulatore koji imaju veliku gustoću snage. Iz tog razloga su pogodni za pogon gospodarskih vozila, gradskih autobusa, traktora i sl. koji u svom radnom ciklusu imaju manje brzine vožnje te velik broj zaustavljanja. Navedena vozila imaju jako velike mase, ali male brzine stoga je kod takvih vozila regenerativno kočenje na bazi hidraulike efikasnije. Na taj način se kinetička energija kočenja skladišti u visokotlačnom akumulatoru te se koristi kod pokretanja vozila iz mirovanja čime se uštedi određeni dio energije koji se kod konvencionalnog vozila dobiva isključivo iz goriva. Samim time je omogućena ušteda goriva hibridnih pogona [2].

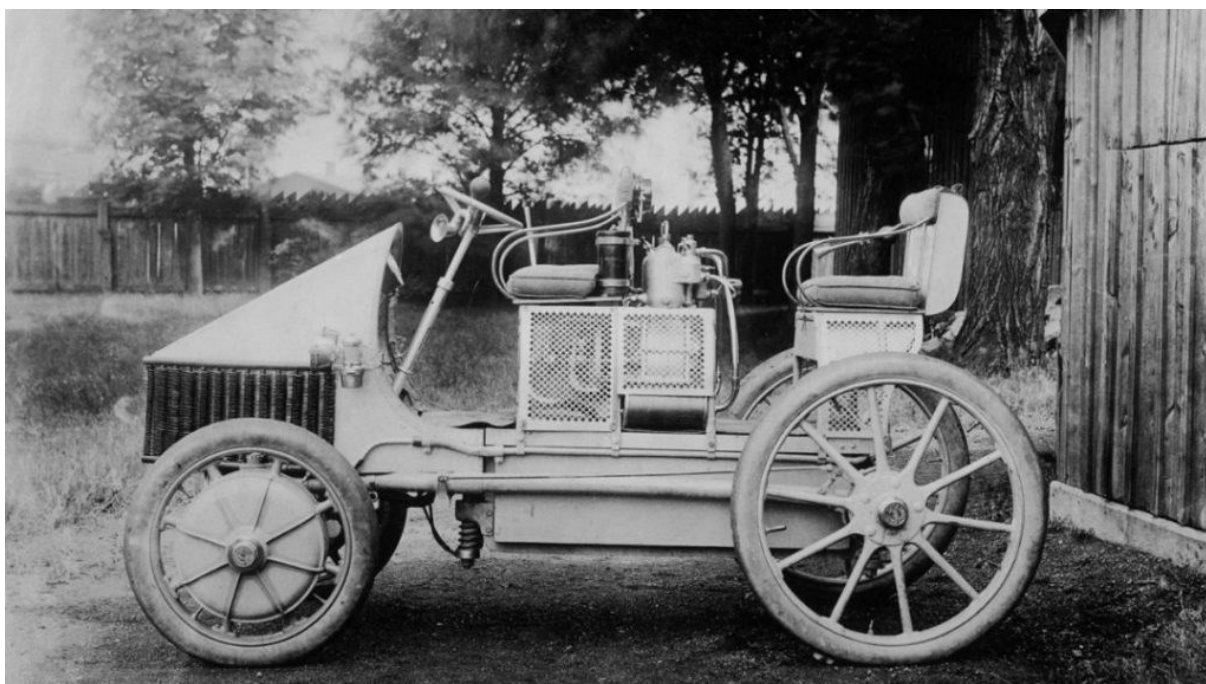
U ovom radu je detaljnije obrađen hibridni pogon šumskog zglobnog traktora, dan je pregled različitih konfiguracija hibridnih pogona, definiran je zamjenski hidraulički hibridni pogon za traktor te je u računalnom programu Hopsan provedena simulacija tog pogona.

2. HIBRIDNI POGON VOZILA

Kao što je prethodno spomenuto, hibridni pogon se uobičajeno sastoji od 2 ili više izvora energije. Kod osobnih automobila, to je najčešće benzinski ili dizelski motor te elektromotor napajan električnom energijom iz akumulatora. Zajedničkim djelovanjem oba sustava postiže se znatno niža potrošnja goriva i smanjena emisija štetnih plinova. Glavna prednost takvih pogona se odražava regenerativnim kočenjem pri kojem se, u ovom slučaju, dio kinetičke energije akumulira te se upotrebljava u slučajevima visoke opterećenosti kao što su pokretanje ili snažno ubrzavanje vozila [3].

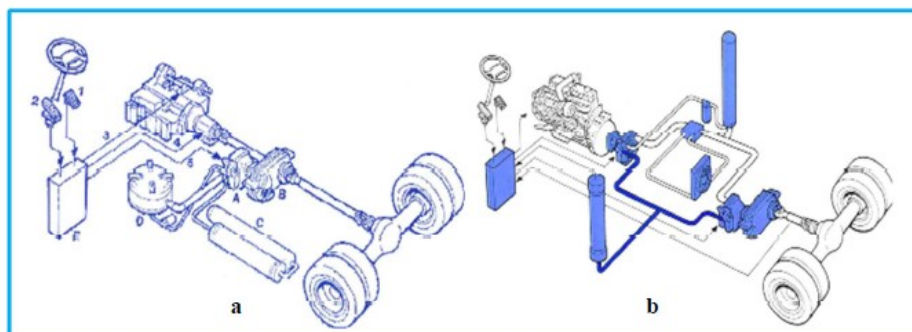
2.1. Povijesni razvoj

Razvoj hibridnih vozila je započeo prije više od 100 godina. Prvo zabilježeno hibridno električno vozilo je djelo dr. Ferdinanda Porschea još 1899. godine. Nazvao ga je „*System Lohner-Porsche Mixte*“ te je koristilo motor s unutarnjim izgaranjem umjesto baterije, koji je pogonio dva električna motora koji su pogonili prednje kotače. Kako je vozilo bilo dobro prihvaćeno od strane građana, proizveo je oko 300 primjeraka iako nije dugo opstalo na tržištu [4].



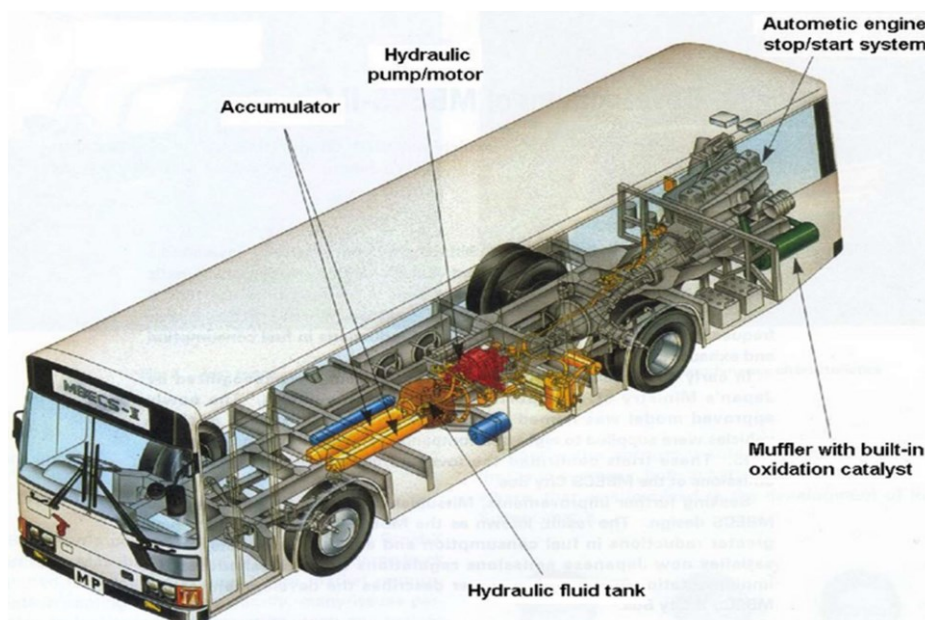
Slika 2.1 Lohner-Porsche Semper Vivus hibrid [4].

Razvoj hidrauličkih hibrida započeo je tijekom 1980-ih godina. Prvi paralelni hidraulički hibrid je nastao 1982. godine s nazivom „Cumulo Brake Drive“ od strane tvrtke Parker Hannifin [5]. Prvi serijski hidraulički hibrid je proizveden 1991. godine od strane iste tvrtke pod nazivom „Cumulo Hydrostatic Drive“. Obe konfiguracije su prikazane na slici 2.2



Slika 2.2 Paralelna konfiguracija: a) „Cumulo brake Drive“ i serijska konfiguracija: b) „Cumulo Hydrostatic Drive“ [5].

Tvrtka „Mitsubishi Motors Japan“ je 1987. godine razvila „BER System“ koji su ugradili u gradske autobuse. „BER System“ je tip paralelnog hidrauličkog hibridnog sustava snage 125 kW do 160 kW te je vrlo uspješno integriran u navedene autobuse [5]. U idućim poglavljima su detaljnije obrađene spomenute izvedbe hidrauličkih hibridnih sustava.



Slika 2.3 „BER System“ [5].

2.2. Hibridni pogoni danas

U današnje vrijeme, zbog porasta cijene goriva te sve većem osviještenju o očuvanju okoliša, hibridni pogoni dobivaju sve više pažnje. Statistika dokazuje da se hibridna vozila nalaze na uzlaznoj putanji [6] pa su se i najveći skeptici među proizvođačima pridružili ovom novom valu u autoindustriji. U nastavku su opisane neke tendencije razvoja pojedinih hibridnih vozila te njihovih proizvođača.

2.2.1. Toyota

Kada je riječ o Toyoti, najpoznatiji model hibridnog vozila je Prius. Prius kao pogon koristi kombinaciju dva motora, benzinskog i električnog. Toyota od 1997. godine nudi hibridni pogon u serijskoj prodaji te je i danas u širokoj upotrebi. Dobitnik je mnogobrojnih priznanja [6] te se smatra začetnikom hibridnih vozila u svakodnevnom životu. Originalni Prius je prikazan na slici 2.4.



Slika 2.4 Prius [6]

Jedan noviji model RAV4 električni hibrid proizveden 2022. godine je prikazan na slici 2.5. Motor s unutarnjim izgaranjem je 4-cilindrični redni benzinski (2AR-FXE) [7] postavljen naprijed poprečno s maksimalnom snagom iznosa 112 kW (152 KS) pri 5200 o/min te maksimalnim momentom iznosa 206 Nm između 4400 i 4800 o/min. Električni motori su sinkroni s permanentnim magnetima, prednji snage iznosa 105 kW i okretnog momenta iznosa 270 Nm te stražnji snage iznosa 50 kW i okretnog momenta iznosa 139 Nm. Baterija je NiMH s 204 ćelije smještena ispod stražnjih sjedala kapaciteta 1,59 kWh. U kombinaciji najveća snaga iznosi 145 kW (197 KS) pri 5700 o/min.



Slika 2.5 RAV4 Hybrid [7]

2.2.2. Lexus

Lexus već godinama razvija vozila na hibridni pogon. Sportska limuzina Lexus GS 450h je dio konstantnog napretka na polju tehnologije hibridnog pogona. GS 450h je prvo hibridno vozilo sa agregatima naprijed te pogonom na zadnje kotače. Osnovu pogona predstavlja benzinski V6 motor od 3,5 l, a maksimalna snaga iznosi 218 kW (296 KS) [6]. Lexus je prikazan na slici 2.6.



Slika 2.6 Lexus GS 450h [6]

2.2.3. Porsche

Porsche je 2011. godine predstavio svoju inačicu hibridnog električnog vozila Cayenne. Snaga vozila je 300 KS, ali za razliku od tradicionalnih vozila, Porsche je preradio svoj benzinski V6 motor i kombinirao ga sa elektromotorom, što omogućuje ekološki čišću vožnju u gradu, ali i dodatnih 100 KS u slučaju potrebe za većom snagom [6]. Vrijedi spomenuti i Porsche 911 GT3 R hibrid koji je temeljen na osnovama modela 911 GT3 R, trkačkog stroja homologiranog prema specifikacijama FIA GT3 prvenstva. Za pogon ovog bolida se brine boxer motor sa šest cilindara, obujma 4 l te 480 KS. Cayenne i 911 GT3 R su prikazani na slikama 2.7 te 2.8.



Slika 2.7 Cayenne [6]



Slika 2.8 911 GT3 R [6]

2.2.4. Chevrolet

Chevrolet je razvio svoju prvu varijantu hibridnog vozila pod imenom Volt 2012. godine. Chevrolet Volt je plug-in hibrid razvijen od strane proizvođača General Motors. Prednje kotače pokreće elektromotor snage 120 kW koji se pokreće iz paketa litij-ionskih baterija. Domet s jednim punjenjem je 65 km. Uređaj se puni iz kućne mreže u vremenu od pet sati. Ugrađen je trocilindarski benzinski motor s turbopunjačem. Napaja se bioetanolom ili gorivom E85. Kada se struja dobiva isključivo iz generatora, prosječna potrošnja je 4,7 l. S punim kapacitetima može proći 1030 km [6]. Pogonski elektromotor prilikom kočenja prelazi na generatorski režim rada te kinetičku energiju pretvara u električnu i dopunjuje akumulator. Chevrolet Volt je prikazan na slici 2.9.



Slika 2.9 Chevrolet Volt [6]

2.2.5. Volvo

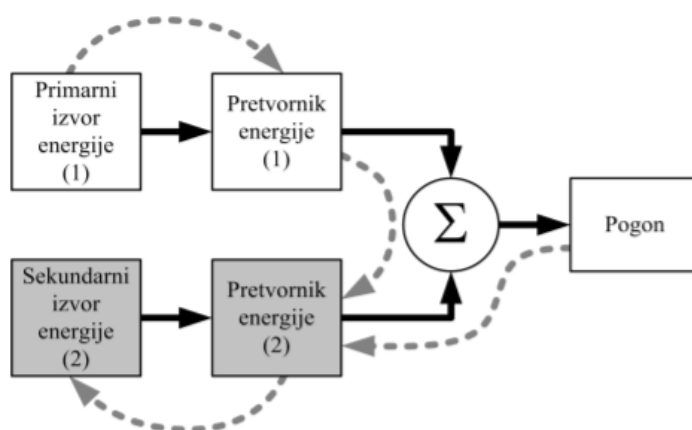
Švedski proizvođač Volvo je 2020. godine izbacio novu liniju hibridnih električnih autobusa Volvo S-Charge. S poboljšanim dometom i smanjenom razinom buke može prijeći dosada najveće udaljenosti (do 1 km samo na električnom pogonu) [8]. Za ovaj novi model, električni pogon se može koristiti do brzine 50 km/h za razliku od starog modela gdje je električni pogon podržavao brzine do 20 km/h te su baterije punjene pomoću energije akumulirane regenerativnim kočenjem. Ovo unaprjeđenje nudi poboljšanu povezanost te sustav „Volvo Zone Management“ koji omogućava automatsku promjenu na električni režim rada unutar određenih područja bez potrebe intervencije od strane vozača. Također jedna od prednosti ovog sustava je ta da nema potrebe za infrastrukturom punjenja. Ovaj model se može pustiti u pogon na bilo kojoj ruti, što omogućava brzu implementaciju te poboljšanu efikasnost za korisnike. Volvo S-Charge je prikazan na slici 2.10.



Slika 2.10 Volvo S-Charge [8]

2.3. Osnovne konfiguracije hibridnih pogona

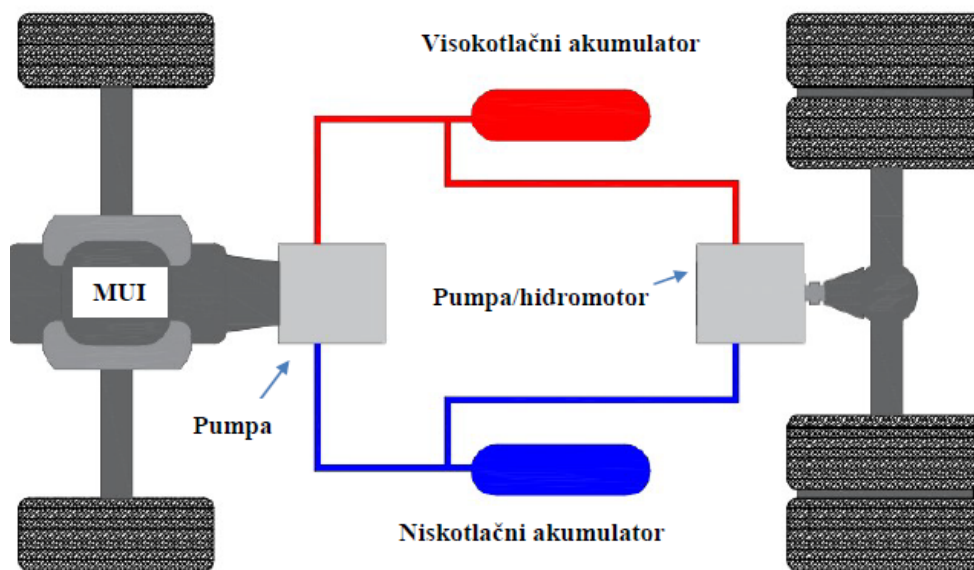
Opća konfiguracija hibridnog pogona je prikazana na slici 2.11. Hibridna vozila po definiciji sadrže barem dva izvora energije od kojih je jedan tzv. primarni izvor, a drugi tzv. sekundarni izvor. Tok energije iz primarnog izvora vodi prema pretvorniku energije gdje se kemijska energija goriva pretvara u mehanički oblik pomoću motora s unutarnjim izgaranjem. Tok energije iz sekundarnog izvora ponovo preko pretvornika prelazi u mehanički oblik te zajedno s primarnim izvorom pogoni vozilo. Postoje još dva moguća energetska toka (crtkane strelice). Jedan puni sekundarni izvor direktno iz primarnog izvora, dok drugi tok puni sekundarni izvor iz pogona za vrijeme regenerativnog kočenja. Vidljivo je da je moguće konstruirati mnogo različitih varijanti za pogon hibridnog vozila te iz toga proizlazi nekoliko osnovnih konfiguracija: paralelna, serijska, serijsko-paralelna i slično [9].



Slika 2.11 Općenita konfiguracija hibridnog pogona [9].

2.3.1. Serijska konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona

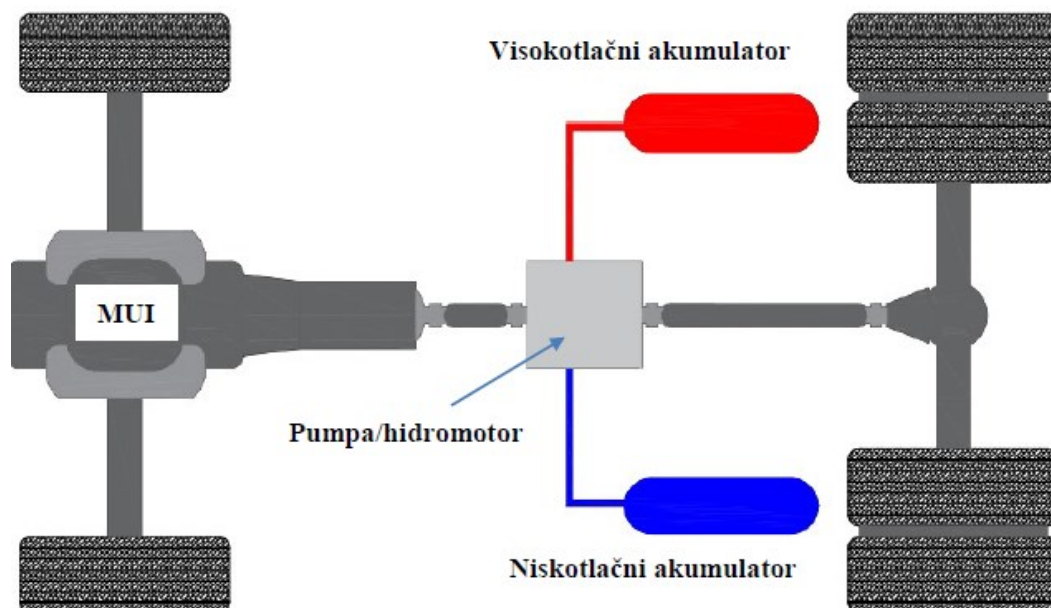
Kod serijske konfiguracije motor s unutarnjim izgaranjem nije mehanički vezan s kotačima. Snaga se od hidrauličke pumpe preko cijevi prenosi na hidromotor spojen na pogonsko vratilo ili direktno na kotače. Kod ovakvih konfiguracija nema klasičnog pogona već je on ostvaren pomoću hidrostatske transmisije. Serijske konfiguracije se najčešće ugrađuju u vozila koja već posjeduju hidrostatsku transmisiju poput viličara i slično. Da bi se ostvarila ovakva konfiguracija potrebno je imati pumpu s varijabilnim volumenom spojenu na motor s unutarnjim izgaranjem te hidromotor/pumpu koja je spojena na pogonsko vratilo ili na kotače. Motor s unutarnjim izgaranjem pokreće pumpu koja pogoni hidromotor, te u ovom slučaju predstavlja klasičnu hidrostatsku transmisiju. Pri kočenju hidromotor/pumpa radi kao pumpa koja tlači ulje iz niskotlačnog akumulatora u visokotlačni pri čemu se skladišti energija. Pri kretanju tlak plina u visokotlačnom akumulatoru tlači radni fluid prema niskotlačnom pri čemu se stvara moment na hidromotoru koji pogoni vozilo. Kada se iskoristi uskladištena energija u visokotlačnom akumulatoru, motor s unutarnjim izgaranjem počinje pogoniti pumpu te se prijenos snage ponovno ostvaruje hidrostatskom transmisijom. Shematski prikaz serijske konfiguracije je prikazan na slici 2.12 [5].



Slika 2.12 Serijska konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona [5].

2.3.2. Paralelna konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona

Kod paralelne konfiguracije, hibridna vozila koriste hidromotor/pumpu koja je vezana na pogonsko vratilo i dva hidraulička akumulatora. Ovakvu konfiguraciju je lakše implementirati te se ugrađuje na vozila koja uglavnom rade u režimu stani-kreni, gdje se kao pogon koristi motor s unutarnjim izgaranjem zajedno s hidrauličkim pogonom. U svakom trenutku vozilo može pogoniti samo motor s unutarnjim izgaranjem ili samo hidraulički pogon. Za pokretanje se koristi hidraulička energija pohranjena u visokotlačnom akumulatoru, a kada se istroši spojkom se uključuje motor s unutarnjim izgaranjem koji pogoni vozilo. Kod kočenja motor s unutarnjim izgaranjem se odvaja od pogonskog dijela te se uključuje druga spojka koja povezuje razdjelnik snage s hidromotorom/pumpom. Hidromotor/pumpa tlači radni fluid iz niskotlačnog akumulatora u visokotlačni pri čemu povećava tlak plina u visokotlačnom akumulatoru te vozilo usporava. Kod pokretanja vozila radni fluid se iz visokotlačnog akumulatora preusmjerava prema niskotlačnom tako da hidromotor/pumpa radi kao hidromotor. Tlak plina u visokotlačnom akumulatoru tlači radnu tekućinu prema niskotlačnom pri čemu se stvara moment na hidromotoru koji se koristi za pokretanje vozila. Kada se pohranjena energija istroši, hidromotor/pumpa se isključi a motor s unutarnjim izgaranjem uključuje preko spojke. Shematski prikaz paralelne konfiguracije je prikazan na slici 2.13 [5].



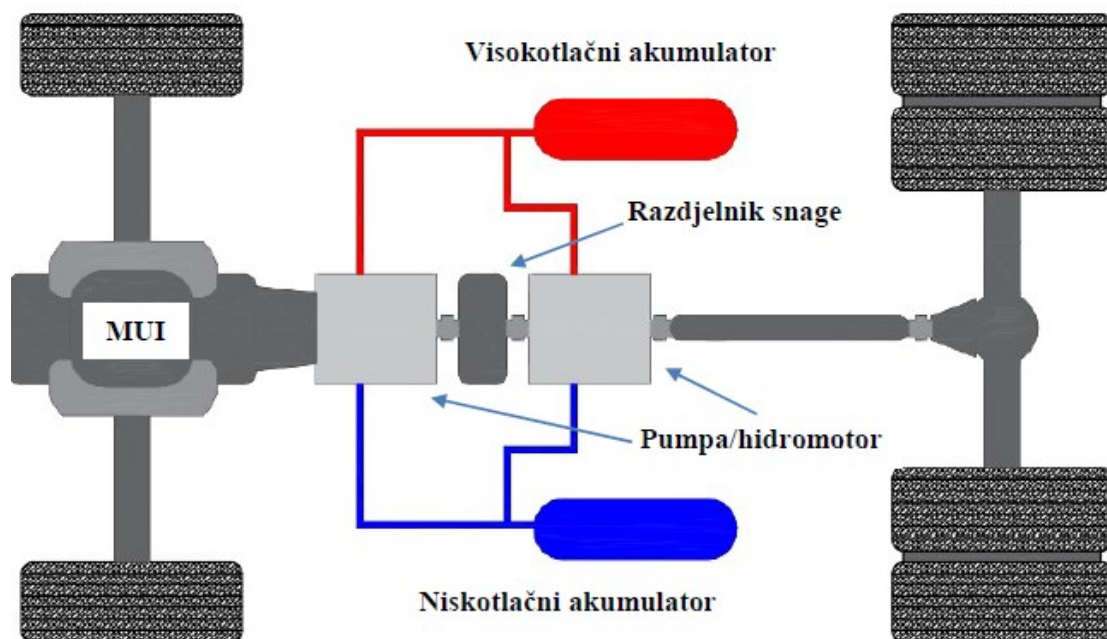
Slika 2.13 Paralelna konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona [5].

2.3.3. Serijsko-paralelna konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona

Serijsko-paralelna konfiguracija se sastoji od kombinacije serijskog i paralelnog hibridnog sustava. Mogu raditi kao: serijsko hibridno vozilo, paralelno hibridno vozilo te mehanički pokretano vozilo.

Složeno hibridno vozilo djeluje kao serijsko hibridno vozilo pri malim brzinama prijenosa. Kada su potrebne velike brzine tada radi kao mehanički pokretano vozilo a kada je potrebno pokrenuti vozilo ili dodatna snaga, tada radi kao paralelno vozilo.

Ovakva kombinacija rada rezultira optimalnim izlaznim parametrima što se tiče potrošnje goriva te emisije ispušnih plinova. Shematski prikaz serijsko-paralelne konfiguracije je prikazan na slici 2.14 [5].



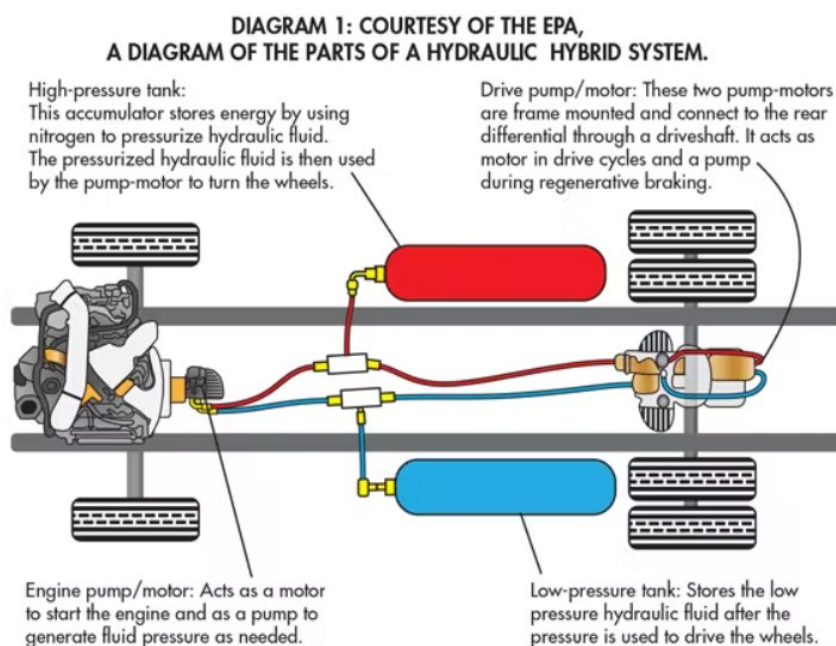
Slika 2.14 Serijsko-paralelna konfiguracija hidrauličkog hibridnog pogona [5].

3. RAZLIČITE KONFIGURACIJE HIBRIDNIH POGONA KOD GOSPODARSKIH IZVANCESTOVNIH VOZILA

U ovom poglavlju dan je pregled različitih komercijalnih konfiguracija hibridnih pogona razvijenih od strane poznatih proizvođača hidrauličkih komponenti i drugih.

3.1. Parker Hannifin hidraulički hibridni sustav

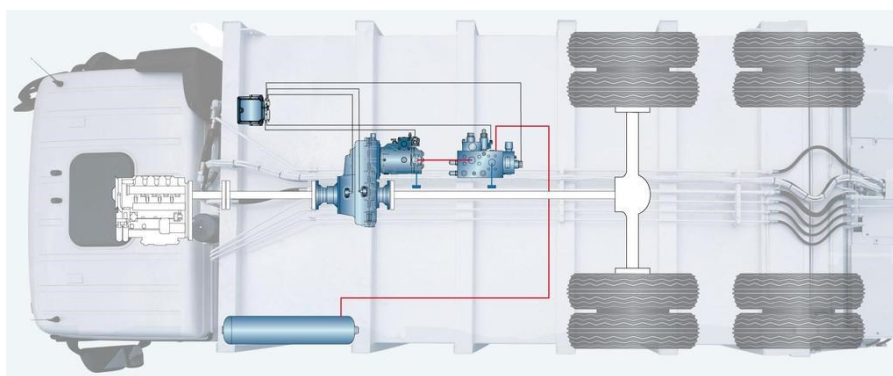
Tvrtka Parker Hannifin razvila je serijski hidraulički hibridni sustav „RunWise“ 2005. godine. „RunWise“ zamjenjuje konvencionalni mehanički pogon sa serijskim hibridnim pogonom koji objedinjuje hidrostatski prijenos sa mehaničkim prijenosom. Zajedno sa regenerativnim kočenjem, ovaj sustav koristi pohranjenu energiju za pokretanje vozila. Sustav se sastoji od motora s unutarnjim izgaranjem, glavne pumpe, dodatne pogonske pumpe/motora, akumulatora te Parker jedinicom za upravljanje snagom. Tvrtka Parker razvija ovakve sustave za dostavna vozila, kamione te poneke traktore. Terenska ispitivanja pokazuju smanjenu potrošnju goriva između 30% i 50% te umanjenu emisiju štetnih plinova [10]. Princip rada ovakvog sustava je prikazan na slici 3.1.



Slika 3.1 Princip rada Parker hibridnog sustava [11].

3.2. Bosch Rexroth hidraulički hibridni sustav

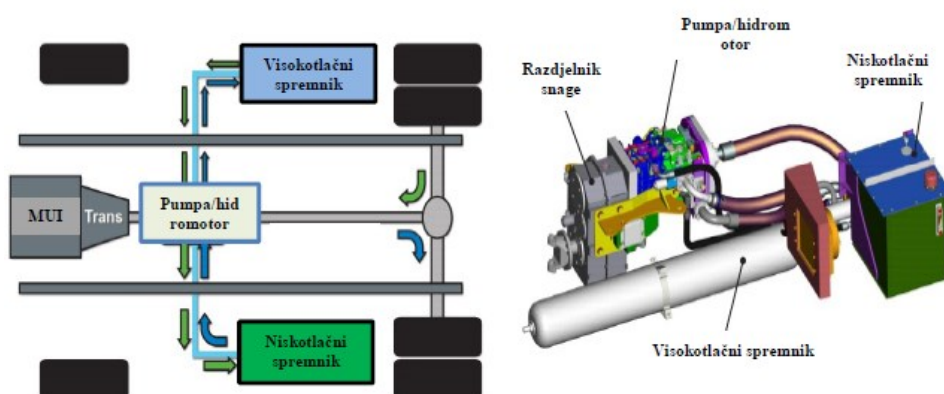
Tvrtka Bosch Rexroth je razvila paralelni hidraulički hibridni sustav pod imenom „*HRB (Hydrostatic Regenerative Braking)*“ 2009. godine. Ovaj sustav koristi hidrauličku pumpu/motor povezanu na pogonsko vratilo kako bi iskoristila kinetičku energiju tijekom kočenja. U procesu kočenja, pumpa/motor se ponaša kao pumpa tako da iskorištava energiju vozila za visokotlačni akumulator napunjen inertnim plinom (obično dušikom). Tijekom pokretanja, stlačeni plin gura radni fluid iz akumulatora tako da se pumpa/motor ponaša kao motor te pomaže motoru s unutarnjim izgaranjem i smanjuje potrošnju goriva do 25% [12]. Ovakav sustav se koristi te integrira u autobuse te dostavna vozila.



Slika 3.2 Princip rada Bosch Rexroth hibridnog sustava [12].

3.3. Eaton Corp hidraulički hibridni sustav

Tvrtka Eaton razvila je paralelni hibridni sustav pod nazivom „*HLA (Hydraulic Launch Assist)*“. Najviše se koristi za vozila koja rade u kreni-stani ciklusima kao što su autobusi, kamioni za odvoz smeća i slično. Sastoji se od dva dijela: regeneracija te pomoć pri kretanju. Pri kočenju, kinetička energija vozila pogoni pumpu/motor koja se ponaša kao pumpa što prenosi radni fluid iz niskotlačnog akumulatora u visokotlačni. Regenerativno kočenje obuhvaća oko 70% kinetičke energije pri kočenju [13]. Kod pokretanja, fluid u visokotlačnom akumulatoru pogoni pumpu/motor koja se ponaša kao motor. Sustav pokreće vozilo prenoseći moment na pogonsko vratilo. Sustav također nudi dva režima rada: „economy mode“ te „performance mode“. HLA smanjuje potrošnju goriva između 15-30% te smanjuje emisiju štetnih plinova. Princip rada je prikazan na slici 3.3 [5].



Slika 3.3 Princip rada Eaton hibridnog sustava [5].

3.4. Auga Group hibridni električni/biometan sustav

Tvrtka Auga Group razvila je prvi hibridni traktor koji objedinjuje električni izvor energije s biometanom 2021. godine pod nazivom „Auga MI“. Dok je traktor u pogonu, motor s unutarnjim izgaranjem koristeći biometan razvija moment koji se prenosi na kotače. Pri normalnim uvjetima rada koji ne zahtijevaju veliku snagu, traktor pohranjuje energiju u baterije. Ovakav sustav koristi relativno malen, ali efikasan motor te je sposoban dati veliku snagu kada je to potrebno [14].



Slika 3.4 Auga traktor [14].

4. KONFIGURACIJA POGONA ŠUMSKOG ZGLOBNOG TRAKTORA

U ovom poglavlju je opisan postojeći skidder, njegove glavne karakteristike te je prikazan primjer jednog voznog ciklusa [15].

4.1. Opis traktora EcoTrac 120V

Skidder Hittner EcoTrac 120V je šumski zglobni traktor s pogonom na sve kotače. Proizvod je Bjelovarske tvrtke „Hittner“ koja se bavi proizvodnjom traktora i svih vrsta dijelova za njih. Traktor služi za privlačenje porušenih stabala te prijevoz do krajnjeg odredišta po nepovoljnom terenu. Snaga se od motora prenosi preko mjenjača i razvodnika pogona na pogonske mostove te na kotače. Razvodnik pogona je vertikalni reduktor s mogućnošću uključivanja dva različita stupnja prijenosa. Mostovi kotača su fiksni, a upravljanje omogućuje zglob oko kojeg se traktor lomi na dva dijela oko vertikalne osi. Lom je ograničen stupnjem nagiba kardanskih vratila za prijenos snage na mostove.

Kod privlačenja tereta, traktor je obično stabiliziran i zakočen na mjestu. Kako bi se omogućila stabilizacija, služe tzv. „ploče“ koje se oslone o tlo, te parkirna kočnica. Parkirna kočnica je disk-kočnica i nalazi se na izlaznom vratilu razvodnika pogona.

Traktor je opremljen hidrauličkim sustavom napajanim pomoću tri hidrostatske pumpe pogonjene izravno od motora traktora. Pumpe uslužuju servo-upravljač, pogon prednje odzivne i stražnje naletne ploče te hidromotor za pogon vitla i hidrauličkog otkočnog cilindra pojasne kočnice vitla. Prednja odzivna ploča služi kod probijanja traktorom kroz šumu te grupiranja trupaca prije transporta. Stražnja naletna daska je zaštitna daska od udara trupaca u traktor prilikom kočenja. Traktor je prikazan na slici 4.1 [16].



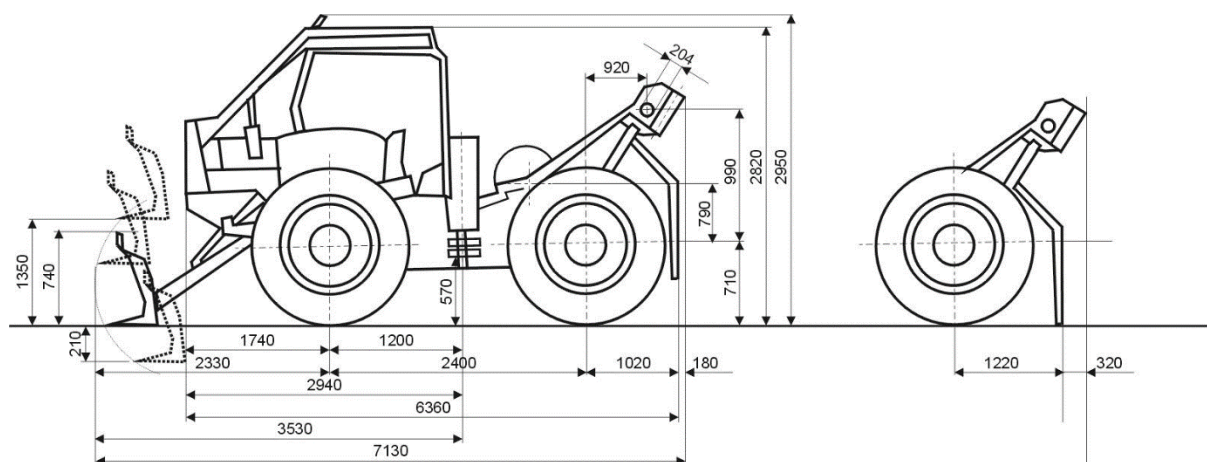
Slika 4.1 Šumski traktor EcoTrac 120V [16]

Gabaritne dimenzije te dodatni podatci prikazani su u tablici 4.1.

Tablica 4.1 Gabaritne dimenzije i masa [16]

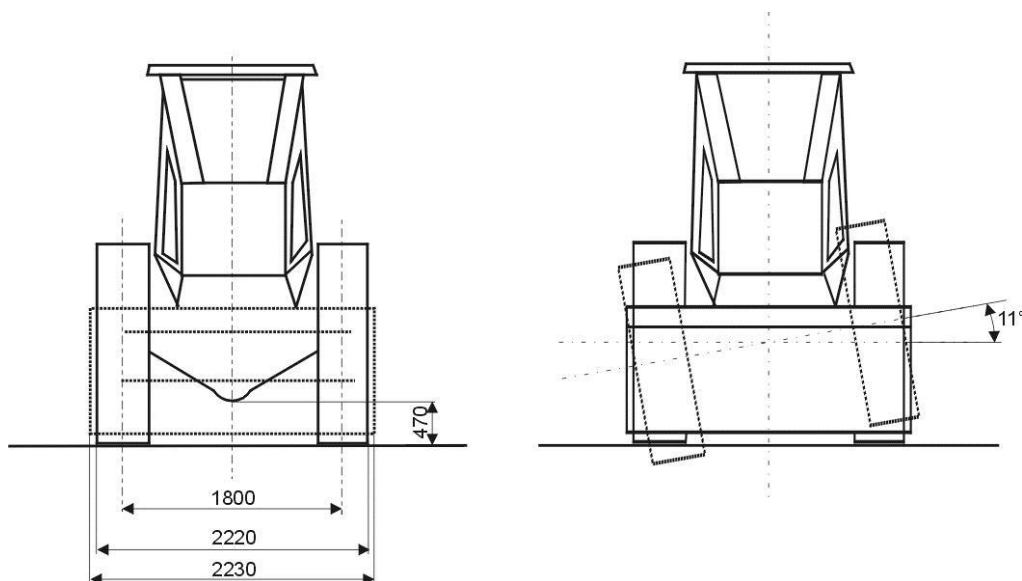
Dužina	7130 mm
Širina	2200 mm
Visina	2950 mm
Prohodnost	570 mm
Ukupna masa m_v	7200 kg
Polumjer kotača r_k	0,71 m
Raspored opterećenja prednji-zadnji most	59:41

Osnovne dimenzije vidljive u bokocrtu te veličine prilikom spuštanja prednje i stražnje zaštitne daske su vidljive na slici 4.2.



Slika 4.2 Bočne dimenzije [16]

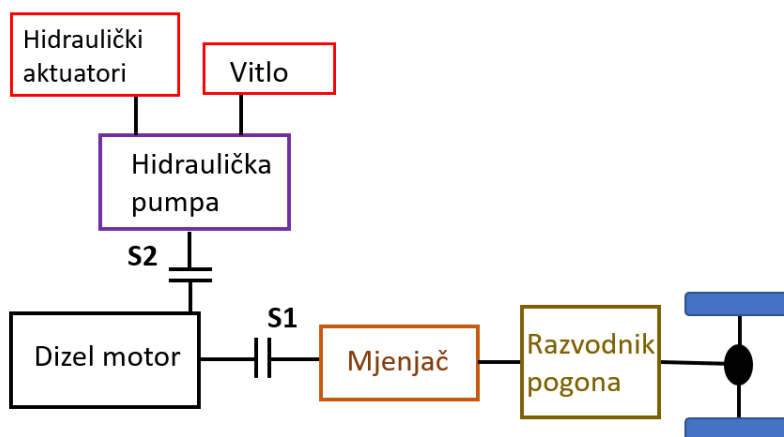
Osnovne dimenzije vidljive s prednje strane te maksimalni zakret prednjeg mosta je prikazan na slici 4.3.



Slika 4.3 Prednje dimenzije i zakret prednjeg mosta [16]

4.2. Pogonski sklop traktora

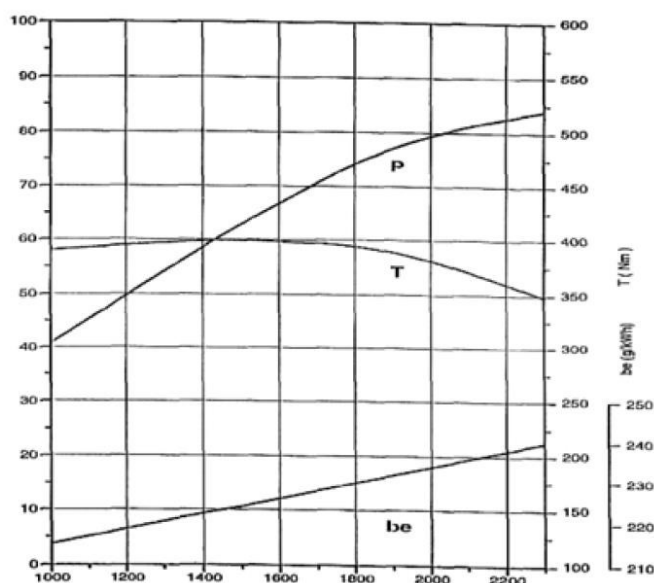
Shema pogonskog sklopa traktora prikazana je na slici 4.4. Motor s unutarnjim izgaranjem služi za pokretanje vozila i pogon hidrauličkih pumpi. Od mjenjača je odvojen spojkom S1. Izlazno vratilo iz mjenjačke kutije ulazi u razvodnik pogona koji raspodjeljuje snagu na prednji i stražnji most traktora. Hidraulička pumpa pokreće vitlo i hidrauličke aktuatore pod koje spadaju cilindri za zakret vozila te pogon prednje i stražnje odzivne daske.



Slika 4.4 Shema pogonskog sklopa [16]

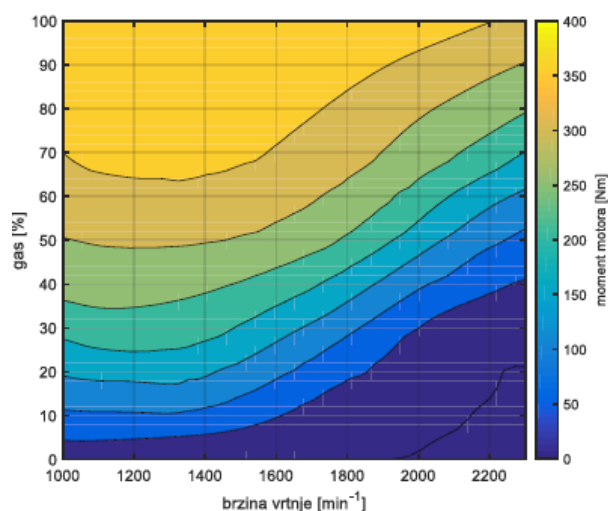
4.2.1. Dizel motor

Skider je pogonjen dizelskim motorom Deutz F6L-914. Obujam motora iznosi 6472 cm³ te se sastoji od šest cilindara. Maksimalna snaga iznosi 84 kW pri 2300 min⁻¹, a maksimalni moment iznosi 400 Nm pri 1500 min⁻¹ [16]. Na slici 4.5 prikazana je momentna karakteristika te krivulja snage.



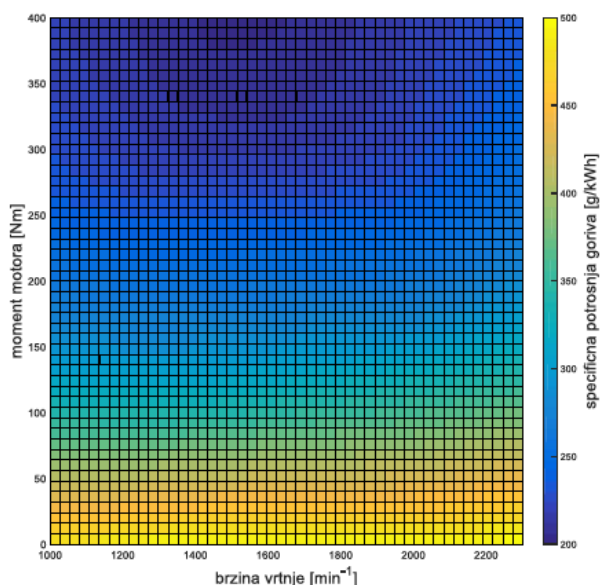
Slika 4.5 Krivulje momenta i snage motora [16]

Za navedeni motor koristeći podatke iz literature [16], moguće je izraditi momentnu karakteristiku odnosno mapu za razne brzine vrtnje i položaj papučice gasa. Takva mapa je prikazana na slici 4.6.



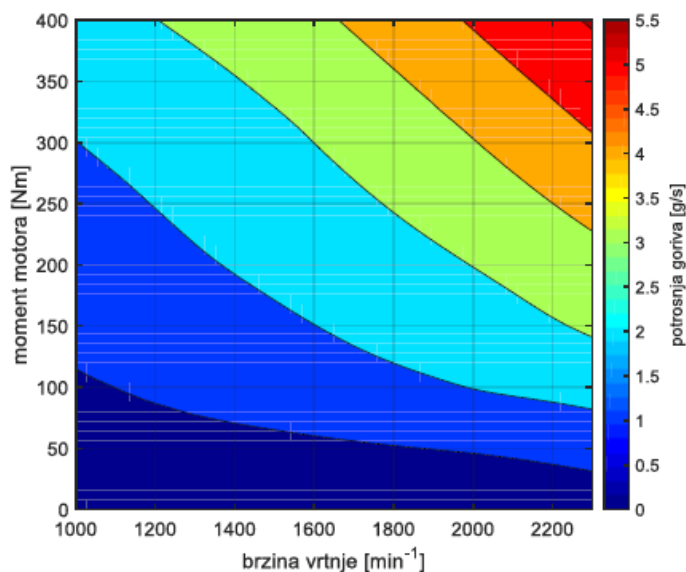
Slika 4.6 Ovisnost momenta motora o brzini vrtnje [16]

Mapa specifične potrošnje goriva za ovaj konkretan traktor nije dostupna pa je izrađena na temelju mapa motora sličnih karakteristika dostupne iz drugih izvora [16]. Takva mapa je prikazana na slici 4.7.



Slika 4.7 Mapa specifične potrošnje goriva [16]

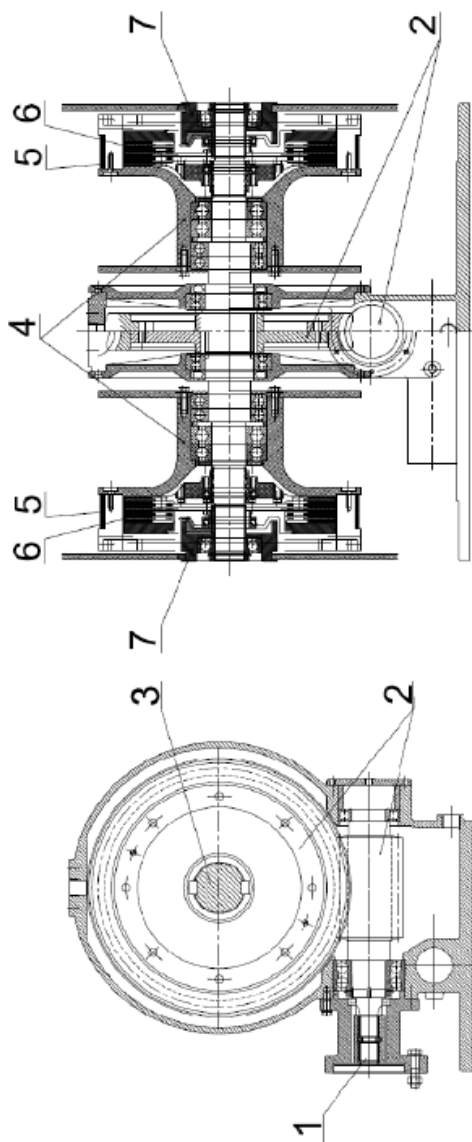
Optimalno područje rada motora je od 1300 do 1800 min^{-1} pri vrijednosti momenta od 360 Nm. Specifična potrošnja goriva u tom području iznosi između 200 i 214 g/kWh. Mapa trenutne potrošnje goriva se dobije množenjem vrijednosti specifične potrošnje goriva s trenutnom snagom te je takva mapa prikazana na slici 4.8.



Slika 4.8 Mapa trenutne potrošnje goriva [16]

4.2.2. Vitlo

Skider je opremljen dvobubanjским vitlom, čija je maksimalna duljina izvlačenja 70 m, a brzina privlačenja 1.26 m/s [16]. Na slici 4.9 je prikazano vitlo u dvije projekcije.



Slika 4.9 Vitlo traktora EcoTrac 120V [17]

Vitlo dobiva pogon hidrostatskim prijenosom od pogonskog motora traktora. Hidromotor je priključen na ulaznu prirubnicu pužnog vijka (1). Preko pužnog reduktora (2), snaga se prenosi na glavno vratilo vitla (3) uležišteno u kućištu. Bubnjevi (4) su uležišteni na tom vratilu, ali u stacionarnom stanju nisu povezani s pogonom, tako da u slučaju uključenja hidrostatskog pogona ostaju neaktivni. Na bubnjeve su namotana užad te okretanjem bubnja užde se namata i povlači teret sa sobom. Pojasna kočnica (5) sprječava odmatanje užeta i slobodno okretanje bubnjeva. Na vratilu je glavina sa setom višelamelnih tarnih spojki (6) i ona se nalazi s vanjske strane bubnja. Spojku aktivira klip hidrauličkog linearnog motora (7) pritišćući lamele glavine

na lamele bubnja dovodeći spojku u radni položaj. Istodobnim aktiviranjem spojke i deaktiviranjem pojasne kočnice se pokreće bubanj.

4.3. Radni ciklus traktora

Standardizirani radni ciklusi za skiddere nisu definirani kao što je to napravljeno za cestovna vozila. Radni ciklus skiddera se može podijeliti na faze kretanja po šumskim stazama i vlakama, kretanje pod opterećenjem i bez njega, operacije poput namatanja, vitlanja i slično. Na temelju terenskog ispitivanja i prikupljanja podataka [15], generirano je nekoliko radnih ciklusa koji se sastoje samo od kretanja po šumskim stazama, vitlanja te poznatih pogonskih parametara iz literature. U tablici 4.2 prikazani su scenariji kod tri različita opterećenja: 0 t, 3 t i 6 t zajedno sa vožnjom uzbrdo (uphill) te vožnjom nizbrdo (downhill). Veličine navedene u tablici su: l – prijeđena udaljenost, h – visinska razina, te brzine v pri 0, 3 i 6 t.

Tablica 4.2 Različiti ciklusi vožnje [15]

l (m)	h (m)	Uphill Drive			Downhill Drive			
		v_{ref0} (km/h)	v_{ref3} (km/h)	v_{ref6} (km/h)	h (m)	v_{ref0} (km/h)	v_{ref3} (km/h)	v_{ref6} (km/h)
0	477.3	5.48	3.31	1.8	615.2	13.22	5.48	3.31
45.5	493.55	5.48	3.31	1.8	618.86	13.22	5.48	3.31
91	495.06	8.71	5.48	3.31	616.85	8.71	5.48	3.31
136.5	491.69	13.22	8.71	5.48	609.81	5.48	3.31	3.31
182	491.98	13.22	5.48	5.48	598.65	5.48	3.31	3.31
227.5	494.23	13.22	5.48	5.48	589.15	5.48	3.31	3.31
273	498.23	8.71	5.48	3.31	579.85	5.48	3.31	3.31
318.5	502.89	8.71	5.48	3.31	570.63	5.48	3.31	3.31
364	509.23	8.71	5.48	3.31	564.99	8.71	5.48	3.31
409.5	517.5	5.48	3.31	3.31	559.35	8.71	5.48	3.31
455	528.26	5.48	3.31	3.31	553.55	8.71	5.48	3.31
500.5	538.17	5.48	3.31	3.31	547.76	8.71	5.48	3.31
546	543.63	13.22	5.48	5.48	544.02	13.22	5.48	5.48
591.5	547.47	8.71	3.31	3.31	538.65	5.48	3.31	1.8
637	555.94	8.71	5.48	3.31	523.81	5.48	3.31	1.8
682.5	565.37	5.48	3.31	1.8	508.79	5.48	3.31	1.8
728	585.46	3.31	1.8	1.8	495.4	5.48	3.31	1.8
773.5	600.11	5.48	3.31	1.8	491.86	13.22	8.71	5.48
819	613.58	5.48	3.31	1.8	491.63	13.22	8.71	5.48
864.5	619.35	8.71	5.48	3.31	497.95	8.71	5.48	3.31
910	615.2	8.71	5.48	3.31	477.3	3.31	1.8	1.8

5. ZAMJENSKI HIDRAULIČKI HIBRIDNI POGON

Za ovaj rad odabran je hidraulički hibridni pogon serijske strukture na temelju zahtijevanih parametara traktora. Kako je već spomenuto u drugom poglavlju, serijska struktura hibridnog vozila se sastoji od hidrauličke pumpe varijabilnog volumena sa potisnom pločom, visokotlačnog i niskotlačnog akumulatora te hidromotora/pumpe fiksnog volumena spojene direktno na diferencijal pogonskog dijela vozila. U su dimenzionirane navedene komponente te je opisan matematički model vozila kako bi se u potpunosti definirao zamjenski pogon.

5.1. Hidromotor/pumpa

Maksimalni moment izvornog dizelskog motora iznosi 400 Nm [15]. Hidromotor mora moći prenijeti vršnu vrijednost momenta nakon prvog stupnja prijenosa. Poznavajući prijenosni omjer za prvi stupanj [16], moment koji hidromotor mora pokriti se računa prema izrazu:

$$T_{\max} = T_m \cdot i_{uk1} \quad (1)$$

te iznosi $T_{\max} = 85200$ Nm. S obzirom da je dobiveni moment vrlo velik, potreban je reduktor kako bi se postigao željeni moment na izlazu. Odabire se reduktor Rositeh RT250 s prijenosnim omjerom $i = 21,1$ [18]. Reduktor je prikazan na slici 5.1.



Slika 5.1 Reduktor [18]

Slijedi stvarni moment na hidromotoru prema izrazu:

$$T_h = \frac{T_{\max}}{i} \quad (2)$$

te iznosi $T_h = 4037,91$ Nm.

Potrebni volumen hidromotora se računa prema izrazu:

$$V_m = \frac{T_h \cdot 2 \cdot \pi}{\Delta p \cdot \eta_m} \quad (3)$$

gdje je odabrana razlika tlakova $\Delta p = 300$ bar i ukupna iskoristivost hidromotora $\eta_m = 0.92$. Za stvarni potrebni moment $T_h = 4037,91$ Nm dobije se potrebni volumen hidromotora $V_m = 919,23$ cm³.

Također hidromotor mora moći pokriti maksimalnu brzinu vrtnje koju će vozilo postići, a ona se računa prema izrazu:

$$n_{\max} = \frac{v_{\max}}{2 \cdot r \cdot \pi} \quad (4)$$

gdje je v_{\max} maksimalna brzina vozila. Za maksimalnu brzinu vozila iz [16] motor se vrti brzinom $n_{\max} = 78,82$ o/min.

Hidromotor se odabire iz kataloga Bosch Rexroth prema slici 5.2. te slici 5.3.

Axial piston fixed motor A2FM series 6x



- ▶ All-purpose high pressure motor
- ▶ Size 5 ... 1000
- ▶ Nominal pressure up to 400 bar
- ▶ Maximum pressure up to 450 bar
- ▶ Open and closed circuits
- ▶ Metric version

Slika 5.2 Hidromotor [19]

Size			200	250	355	500	710	1000
Displacement geometric, per revolution	V_g	cm^3	200	250	355	500	710	1000
Nominal pressure	p_{nom}	bar	400	350	350	350	350	350
Maximum pressure	p_{max}	bar	450	400	400	400	400	400
Maximum speed	$n_{nom}^{1)}$	rpm	2750	2700	2240	2000	1600	1800
	$n_{max}^{2)}$	rpm	3000					
Inlet flow ³⁾ at n_{nom}	q_v	l/min	550	675	795	1000	1136	1600
Torque ⁴⁾ at p_{nom}	M	Nm	1273	1393	1978	2785	3955	5570
Rotary stiffness	c	kNm/rad	57.3	73.1	96.1	144	270	324
Moment of inertia for rotary group	J_{TW}	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.0353	0.061	0.102	0.178	0.55	0.55
Maximum angular acceleration	α	rad/s^2	11000	10000	8300	5500	4300	4500
Case volume	V	l	2.7	2.5	3.5	4.2	8	8
Weight (approx.)	m	kg	66	73	110	155	325	336

Slika 5.3 Karakteristike hidromotora [19]

Budući da je $V_g > V_m$, hidromotor zadovoljava po pitanju potrebnog volumena. Nominalna brzina vrtnje iznosi $n_{nom} = 1800$ o/min. Stvarna brzina vrtnje na izlazu se računa prema izrazu:

$$n_{stv} = \frac{n_{nom}}{i} \quad (5)$$

te iznosi $n_{stv} = 85,3$ o/min što je veće od maksimalne brzine vrtnje vozila pa zadovoljava i s te strane.

5.2. Hidraulička pumpa

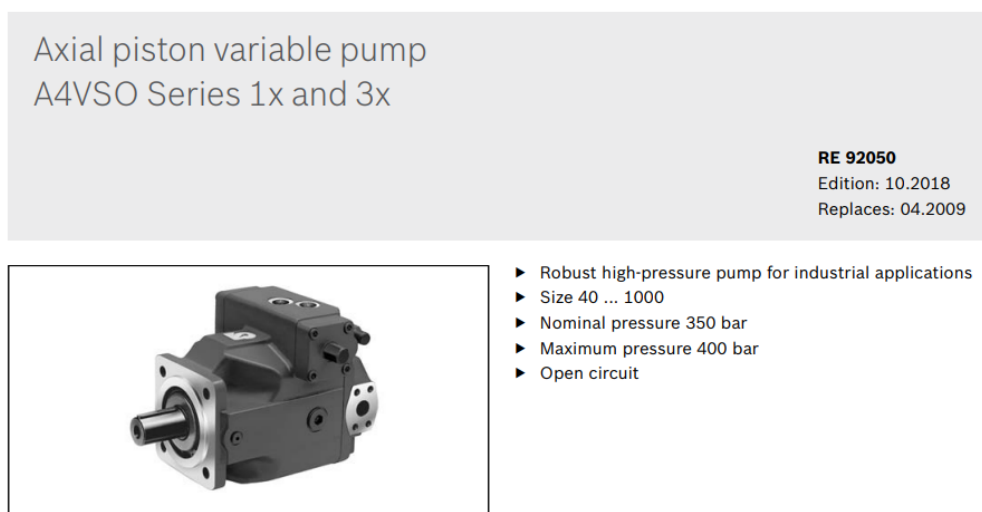
Odabire se hidraulička pumpa varijabilnog volumena s potisnom pločom. Nominalna brzina vrtnje hidromotora iznosi 1800 min^{-1} . Maksimalna brzina vrtnje dizelskog motora iznosi 2300 min^{-1} [16]. Protok koji pumpa daje mora biti jednak onome kroz hidromotor kako bi postigli tražene parametre. Potreban volumen pumpe se računa prema izrazu:

$$V_p = \frac{V_g \cdot n_{nom}}{n_{max} \cdot \eta_p} \quad (6)$$

gdje je volumetrička iskoristivost pumpe $\eta_p = 0,95$. Potreban volumen pumpe iznosi $V_p = 823,79 \text{ cm}^3$.

Također pumpa mora moći pokriti maksimalnu brzinu vrtnje motora s unutarnjim izgaranjem kako bi u potpunosti pokrila područje rada motora.

Odabire se pumpa iz kataloga Bosch Rexroth [20] prema slici 5.4 i 5.5.



Slika 5.4 Pumpa [20]

Standard rotary group version

Size	NG	40	71	125	180	250	355	500	750	750 ⁵⁾	1000
Geometric displacement per revolution	$V_{g \max}$ cm ³	40	71	125	180	250	355	500	750	750	1000

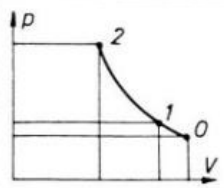
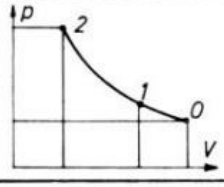
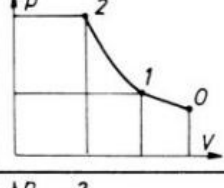
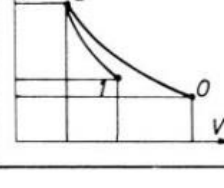
Slika 5.5 Volumen pumpe[20]

5.3. Visokotlačni akumulator

Volumen visokotlačnog akumulatora odrediti će se prema potrebnoj akumulaciji kinetičke energije pri kočenju. Maksimalna brzina skiddera iz [16] iznosi $v_{\max} = 21,1 \frac{km}{h}$. Izračunat će se maksimalna kinetička energija koju je moguće iskoristiti u procesu kočenja od maksimalne brzine do brzine kada regenerativno kočenje gubi na značaju [5] iznosa $v_0 = 10 \frac{km}{h}$ prema izrazu:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_{\max}^2 - v_0^2) \quad (7)$$

Uz poznatu masu vozila $m = 7200$ kg, kinetička energija iznosi $E_k = 96000$ J. Dio kinetičke energije će se iskoristiti za savladavanje razlike tlakova između akumulatora dok će dio se izgubiti u prijenosu snage. Prema [5], 60% ukupne energije se može iskoristiti za pohranu u visokotlačnom akumulatoru pa korisna kinetička energija iznosi $E_{kor} = 57600$ J. Dalje je potrebno odrediti ukupni energetska kapacitet akumulatora pomoću termodinamičkih zakona. Na slici 5.6 su prikazani p,V dijagrami za različite upotrebe akumulatora.

	Proces	Kriterij upotrebe
	0→1 adiabatsko punjenje 1↔2 adiabatski proces	Kod akumuliranja energije $p_0 = 0,9 p_1$ $p_2 = 2 p_1$ $\Delta V = 0,362 V_0$
	0→1↔2 izotermički proces	Kompensacija izgubljenog ulja $p_0 = 0,9 p_1$ $p_2 = 2 p_1$ $\Delta V = 0,45 V_0$
	0→1 izotermički punjenje 1↔2 adiabatski proces	Opružni sistem kod vozila $p_0 = 0,9 p_1$ $p_2 = 2 p_1$ $\Delta V = 0,351 V_0$
	0→1 izotermički proces 2→1 adiabatski proces	Sigurnosna funkcija $p_0 = 0,9 p_1$ $p_2 = 2 p_1$ $\Delta V = 0,288 V_0$

Slika 5.6 Kriteriji upotrebe hidrauličkih akumulatora [21]

Korisni volumen akumulatora ΔV predstavlja maksimalnu količinu radne tekućine koju akumulator može primiti te se računa prema izrazu [21]:

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (8)$$

Prema slici 5.3 za slučaj akumuliranja energije, tlak punjenja se računa prema izrazu:

$$p_0 = 0,9 \cdot p_1 \quad (9)$$

Uzimajući u obzir minimalni radni tlak iznosa $p_1 = 100$ bar, tlak punjenja iznosi $p_0 = 90$ bar. Najveći radni tlak u sustavu iznosi $p_2 = 300$ bar, a preliminarno se odabire maksimalni volumen iznosa $V_0 = 25$ l. S obzirom da je punjenje i pražnjenje akumulatora brz proces, nema vremena za izmjenu topline između plina i okoline pa se pretpostavlja adijabatski proces. Izentropski eksponent za dušik iznosi $\kappa = 1,398$ [22].

Konačno, korisni volumen akumulatora iznosi $\Delta V = 13,38$ l.

Energetski kapacitet u slučaju kada je akumulator prazan se računa prema izrazu:

$$W_1 = p_0 \cdot V_0 \quad (10)$$

te iznosi $W_1 = 225000$ J.

Energetski kapacitet u slučaju kada je akumulator u potpunosti napunjen se računa prema izrazu:

$$W_2 = p_2 \cdot (V_0 - \Delta V) \quad (11)$$

te iznosi $W_2 = 348600$ J.

Ukupni energetski kapacitet akumulatora se računa prema izrazu:

$$W = W_2 - W_1 \quad (12)$$

te iznosi $W = 123600$ J.

S obzirom da je energetski kapacitet akumulatora veći od korisne kinetičke energije, može pohraniti tu energiju te se uzima konačni volumen akumulatora iznosa $V_0 = 25$ l.

5.4. Matematički model vozila

Brzina vrtnje hidromotora definira se sljedećim izrazom:

$$\omega = \frac{v \cdot i}{r} \quad (13)$$

gdje je v brzina vozila, r polumjer kotača te i prijenosni omjer reduktora.

Okretni moment pogona se određuje iz voznog ciklusa na temelju poznatih parametara te se računa prema sljedećem izrazu [23] :

$$T = r \cdot \left(m \cdot \dot{v} + 9.81 \cdot m \cdot c_{fr} + c_d \cdot A \cdot \frac{v}{2} \right) \quad (14)$$

gdje je m ukupna masa vozila, v trenutna brzina vozila, c_{fr} faktor otpora kotrljanja a $c_d \cdot A$ efektivna čeona površina vozila.

Okretni moment hidromotora T_M ovisi o specifičnom volumenu hidromotora V_m , o razlici tlakova visokotlačnog i niskotlačnog voda, stupnju djelovanja η_m te se računa prema sljedećem izrazu:

$$T_M = \frac{V_m \cdot \Delta p \cdot \eta_m}{2 \cdot \pi} \quad (15)$$

Potrebna razlika tlaka Δp u sustavu koju pumpa mora stvoriti se računa prema izrazu:

$$\Delta p = \frac{T_M \cdot 2 \cdot \pi}{V_m \cdot \eta_m} \quad (16)$$

Poznavajući razliku tlakova, moment T_p koji pogoni pumpu te opterećuje motor s unutarnjim izgaranjem se računa prema izrazu:

$$T_p = \frac{V_p \cdot \Delta p}{2 \cdot \pi \cdot \eta_p} \quad (17)$$

6. SIMULACIJA POGONA U PROGRAMSKOM ALATU HOPSAN

U ovom poglavlju dan je kratak opis programskog alata Hopsan te je simuliran pogon definiran u prethodnom poglavlju.

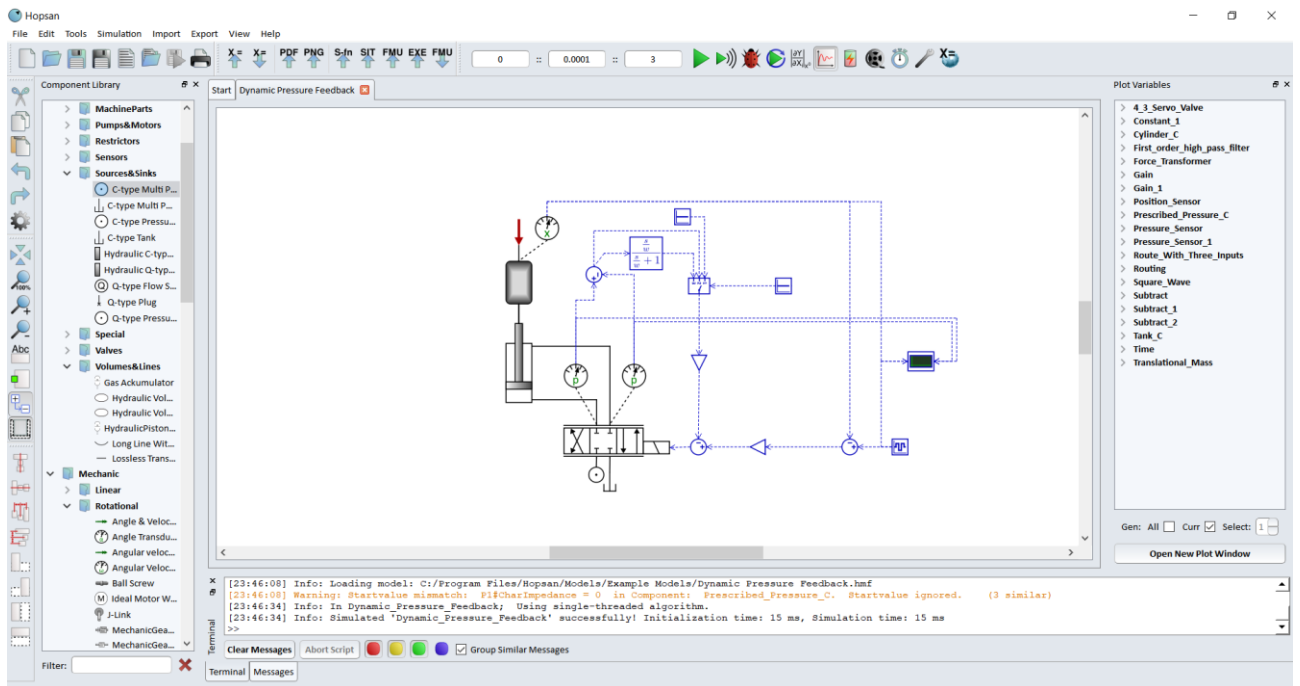
6.1. Uvodno o Hopsanu

Hopsan je višedomenski simulacijski alat otvorenog koda razvijen na Zavodu za mehatroničke i fluidne sustave na Sveučilištu u Linköpingu u Švedskoj. Razvoj je započeo kasnih 1970 – ih te je dosada odigrao važnu ulogu u obrazovanju i istraživačkim projektima. Hopsan je prvi simulacijski alat s podrškom za višejezgrenu simulaciju te jedini koji koristi „*transmission line modelling*“ (TLM) metodu. Uz ovu metodu, svaki dio modela se može tretirati nezavisno kroz svaki vremenski korak. Ovakav način poboljšava učinak, robusnost, brzinu te nudi prirodan mehanizam za paralelne simulacije [23, 24, 25].

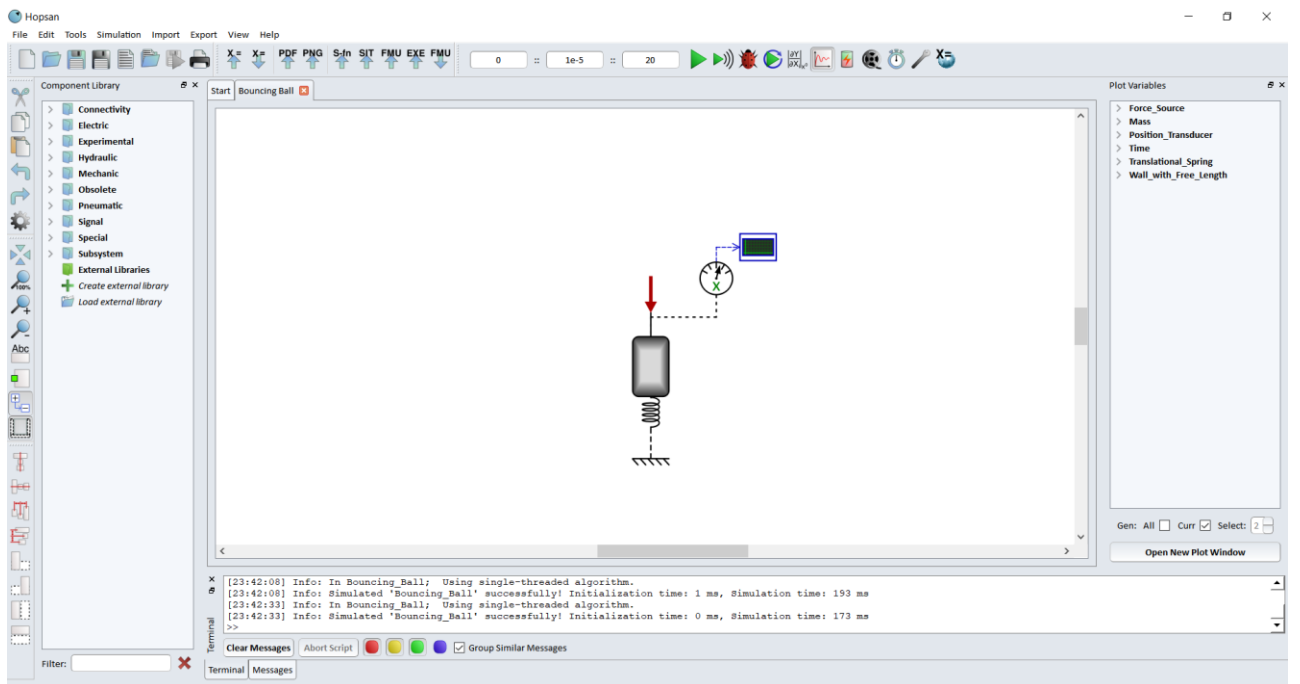
Neke značajke su:

- Višejezrena podrška za brže izvođenje simulacija
- Jednostavno prevođenje modela u Matlab/Simulink sučelje
- Izvoz podataka iz dijagrama
- Interaktivne animacije modela
- Numerička optimizacija
- Analiza osjetljivosti sustava
- Analiza u frekvencijskoj domeni
- Izračuni energijskih gubitaka

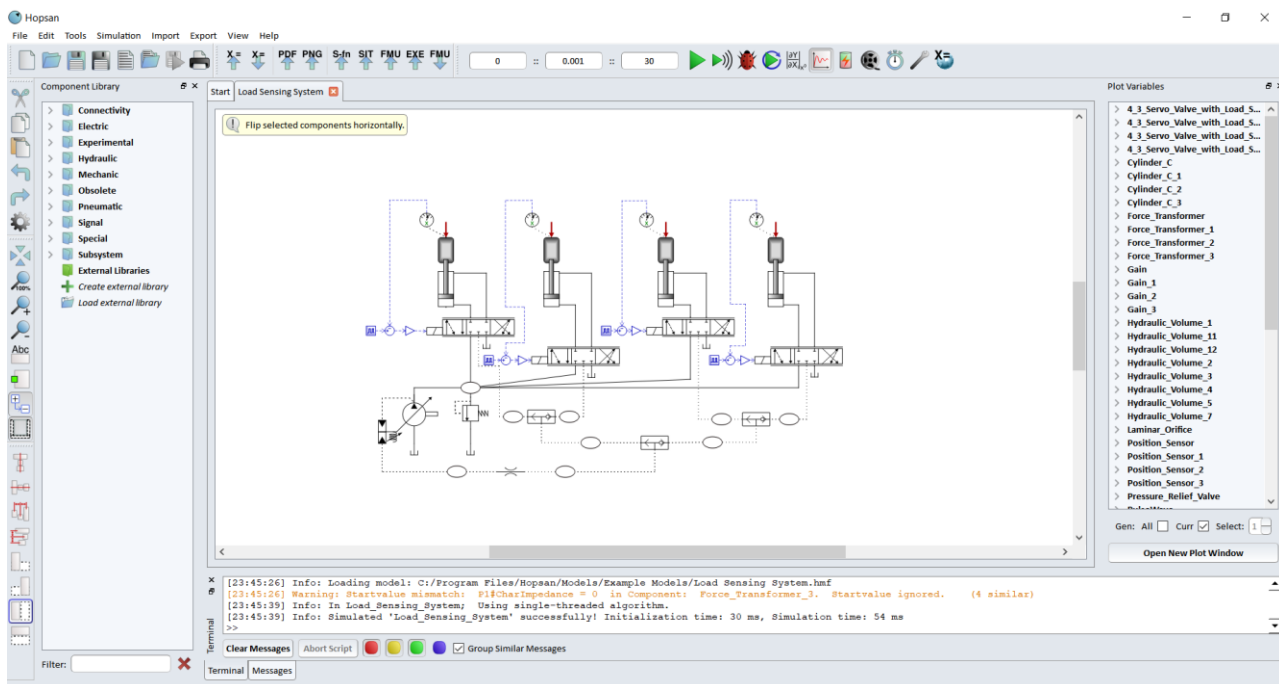
Grafičko sučelje Hopsana te nekoliko primjera hidrauličkih sustava su prikazani na sljedećim slikama.



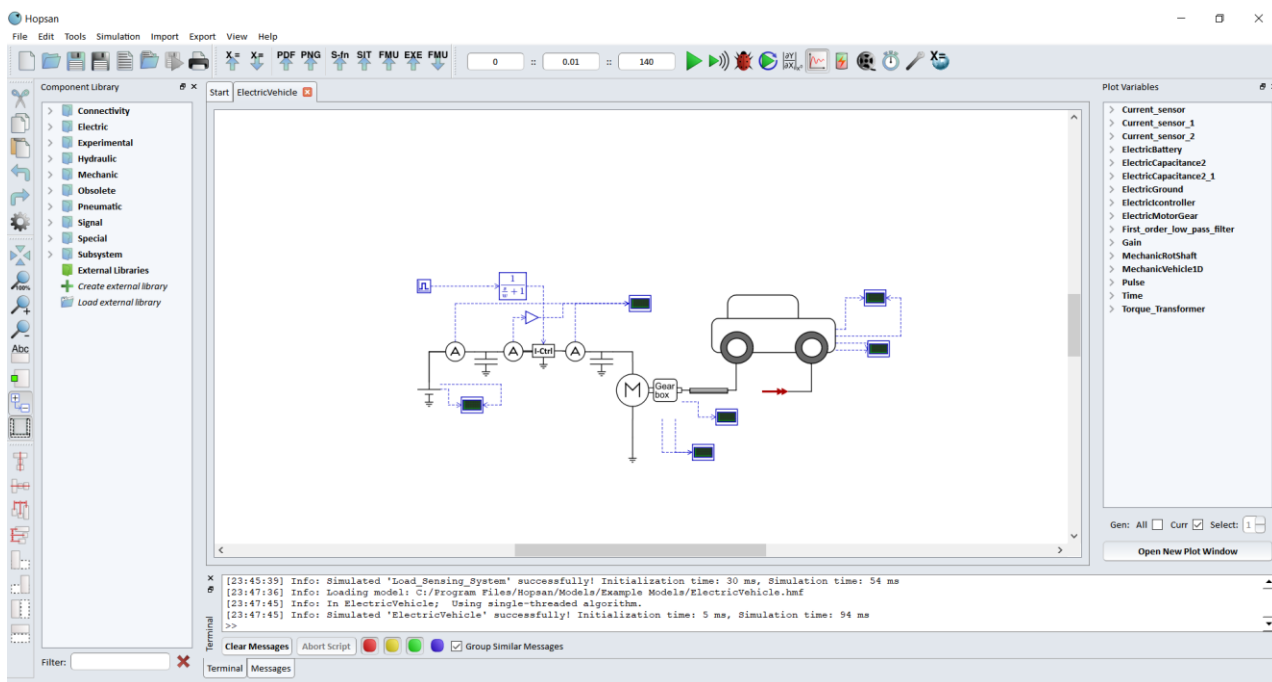
Slika 6.1 Model regulacije tlaka



Slika 6.2 Model bačene loptice



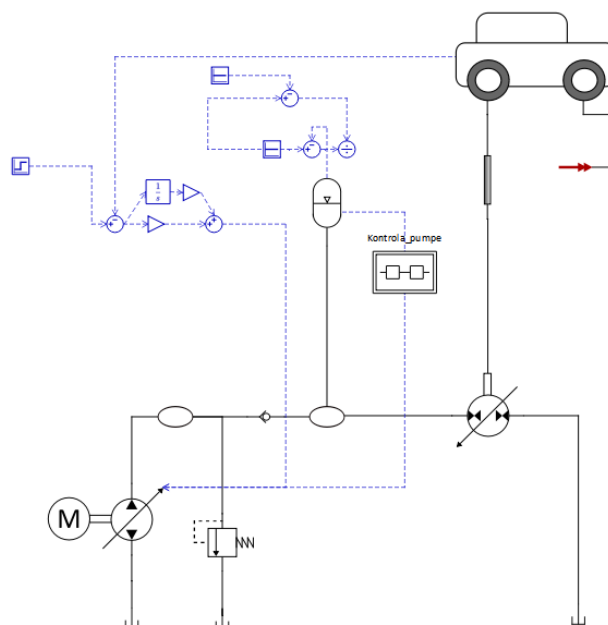
Slika 6.3 Model senzora opterećenja



Slika 6.4 Model električnog vozila

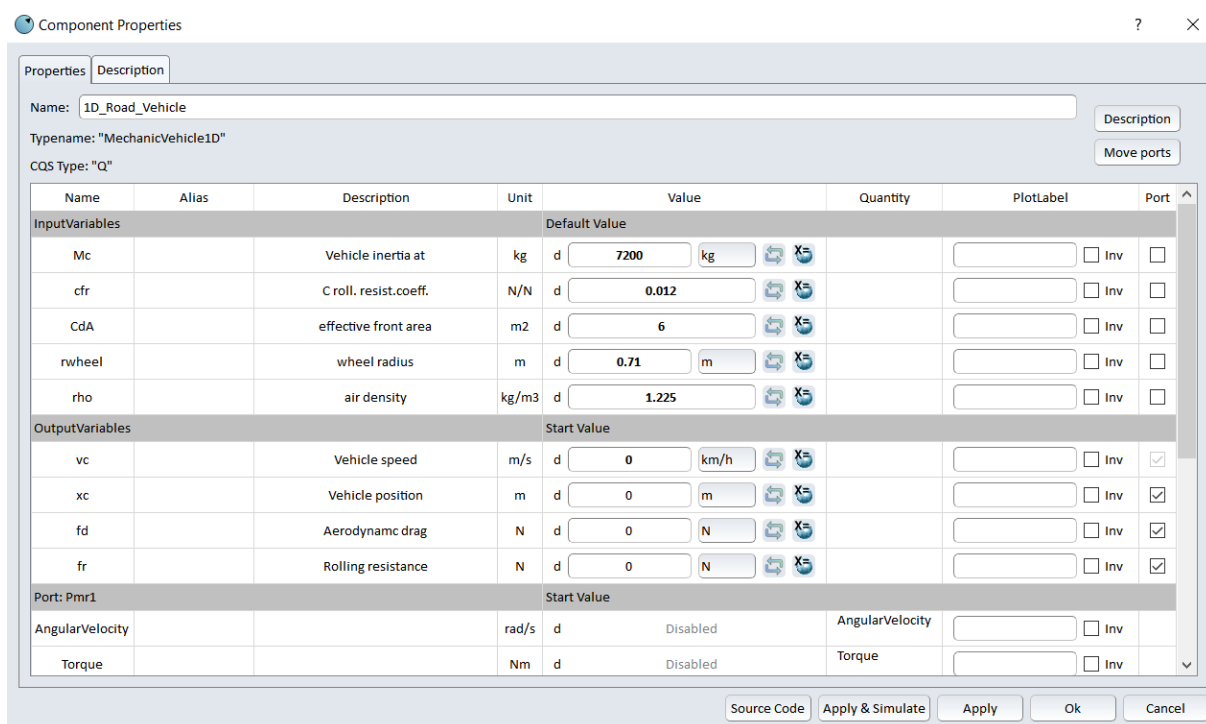
6.2. Hidraulički model hibridnog vozila

Model je prikazan na slici 6.5. U modelu, plave crtkane linije označuju tok signala, a crne pune linije označuju energijski tok. Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, korištena je pumpa s varijabilnim volumenom te hidromotor/pumpa fiksne volumena. U programu je ponuđen samo hidromotor/pumpa varijabilnog volumena, ali to ne utječe na simulaciju jer se ni na koji način ne aktivira signal za promjenjivi volumen kao što je to slučaj kod pumpe. Također zbog dodatnih ograničenja, postavljena su dva hidraulička spremnika kako bi se uspostavio tok fluida kroz elemente. Za potrebe simulacije, iskorišten je PI regulator s povratnom vezom na pumpi kako bi se dobila željena brzina vozila dok visokotlačni akumulator nije napunjen. Uveden je podsustav „Kontrola pumpe“ koji očitava volumen plina u akumulatoru. Ako trenutno stanje napunjenosti „state of charge (SoC)“, padne ispod neke definirane vrijednosti, tada se šalje signal na pumpu da počne davati potreban protok. U trenutku kada stanje napunjenosti dostigne neku vršnu definiranu vrijednost, pumpa se isključuje kako bi se osigurao kapacitet za regenerativno kočenje. Kod ovakvog modela, stanje napunjenosti se može izraziti na dva načina. Prvi način je kao funkcija trenutnog volumena plina, a drugi je preko trenutnog tlaka plina u akumulatoru. Jasno je da su volumen i tlak plina obrnuto proporcionalni tj. kako se smanjuje volumen plina u akumulatoru tako raste njegov tlak i obrnuto.



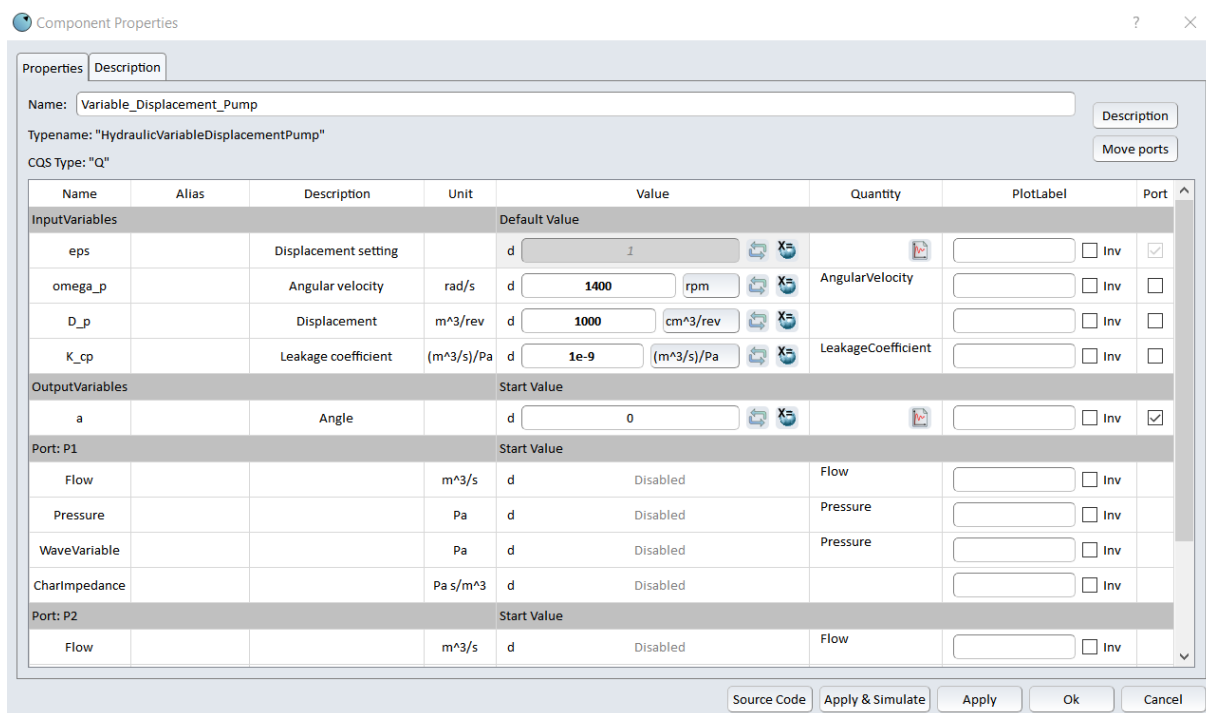
Slika 6.5 Model hibridnog hidrauličkog vozila

Na slici 6.6 je prikazan izbornik gdje se unose varijable vezane za samo vozilo. U dijelu „InputVariables“ mogu se definirati veličine kao što su masa vozila, polumjer kotača, gustoća zraka i druge. To su ulazne varijable koje utječu na same rezultate simulacije. Prednost kod Hopsana je ta što te vrijednosti nisu ograničene ni na koji način za razliku od drugih simulacijskih alata gdje je moguće npr. samo u određenom intervalu mijenjati iznos tih varijabli te je vrlo jednostavno omogućena promjena jedinica samih veličina. U dijelu „OutputVariables“ je moguće zadati početne uvjete za neke veličine kao što su brzina vozila te prijedeni put. Također je sve izlazne varijable moguće predočiti u dijagramu promjene s vremenom što daje točniji prikaz ponašanja samoga sustava.



Slika 6.6 Parametri vozila

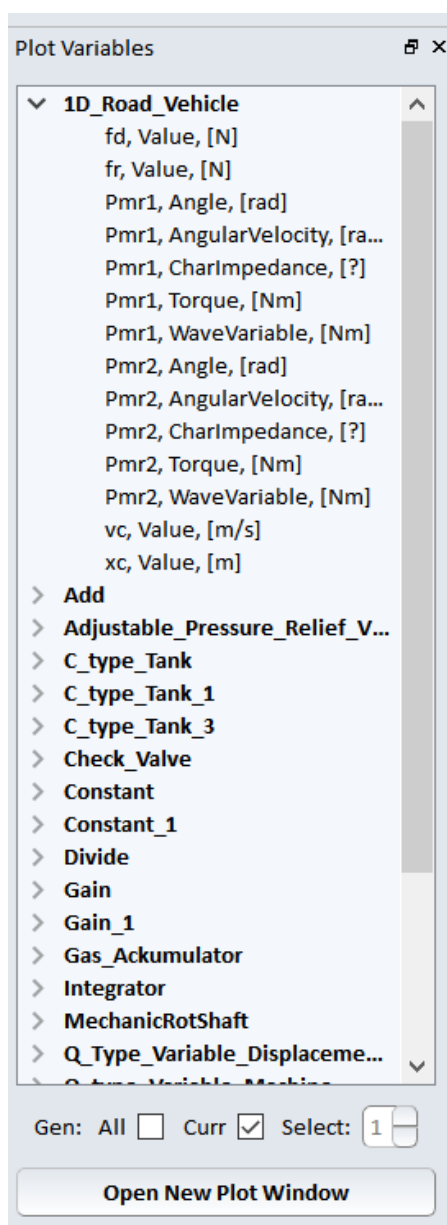
Za svaki element u modelu moguće je podesiti parametre na ovaj način što je prikazano na primjeru pumpe tj. na slici 6.7. Kod pumpe, moguće je podesiti veličine kao što su kutna brzina, specifični volumen te koeficijent curenja. U slučaju pumpe s varijabilnim volumenom, postavka „eps“ ima ulogu da regulira iznos volumena na temelju signala dovedenog u samom modelu. Potrebno je definirati maksimalnu vrijednost volumena u postavci „Displacement“, pa se uzima samo potrebni udio volumena kako bi se postigle željene vrijednosti dovedene preko signala. Signalom se mogu regulirati željene veličine vozila kao što su postignuta brzina, prijedeni put i slično pa pumpa daje onoliko protoka koliko je potrebno na temelju zahtijevane vrijednosti. U slučaju pumpe sa fiksnim volumenom, jednostavno se definira specifični volumen pumpe te je on konstantan u svakom trenutku vremena.



Slika 6.7 Parametri pumpe

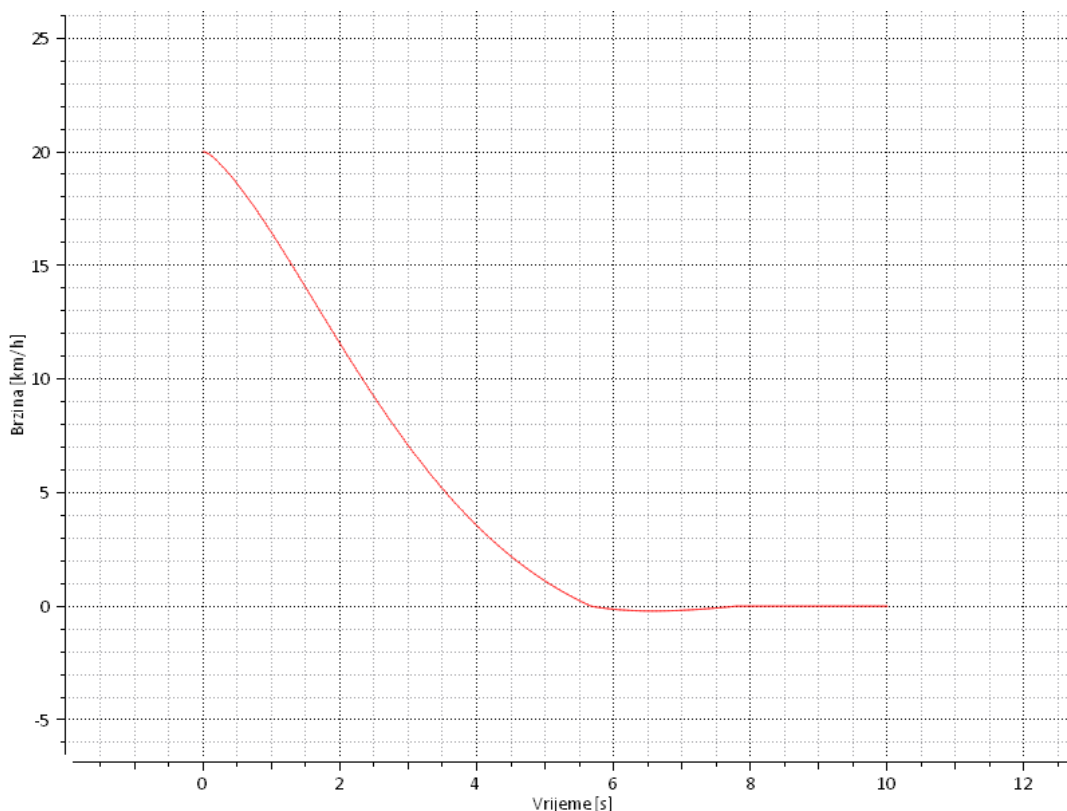
6.3. Rezultati simulacije

U simulaciji je moguće dijagramski prikazati veličine vezane za svaki element u modelu. Jasno je da nisu sve interesantni za proučavanje, ali je vrlo korisno za detaljnu analizu cijelog sustava. Veličine koje je moguće prikazati se vide na slici 6.8. Što se tiče samog vozila, moguće je prikazati veličine kao što su moment na pojedinom kotaču, kutna brzina kotača, brzina vozila, prijeđeni put i dr. Za akumulator se može prikazati volumen plina, protok, tlak plina i dr. Slične veličine se također mogu prikazati za pumpu, hidromotor te različite ventile. U nastavku su prikazane veličine pri nekim karakterističnim slučajevima vozila kao što su pokretanje, kočenje te pokretanje samo pomoću pohranjene energije u akumulatoru.



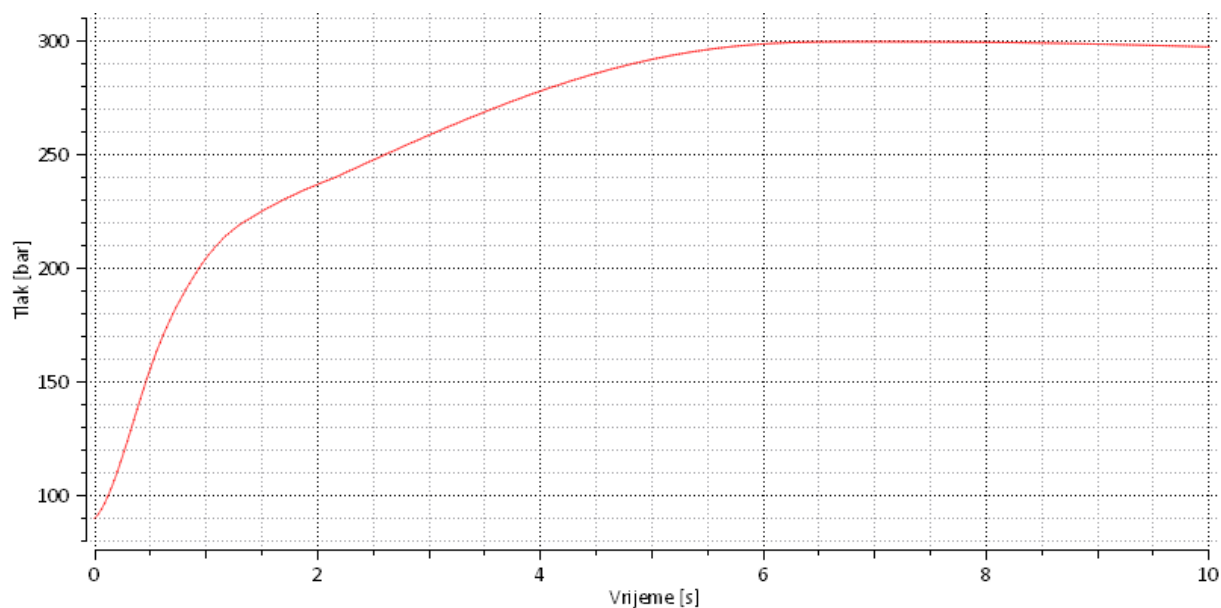
Slika 6.8 Različite veličine

Brzina vozila te tlak u akumulatoru pri regenerativnom kočenju su prikazani na slikama 6.9 i 6.10. Postavljena je početna brzina vozila na 20 km/h te je isključena pumpa, a akumulator se puni koristeći kinetičku energiju vozila. Vidljivo je da vozilo u potpunosti zakoči nakon 6 sekundi te je u tom periodu akumulator pohranio određenu količinu energije. Na sljedećem dijagramu promjene tlaka u vremenu, vidljivo je da se maksimalni tlak dostigne također nakon 6 sekundi, što odgovara rezultatima dobivenim o brzini vozila.



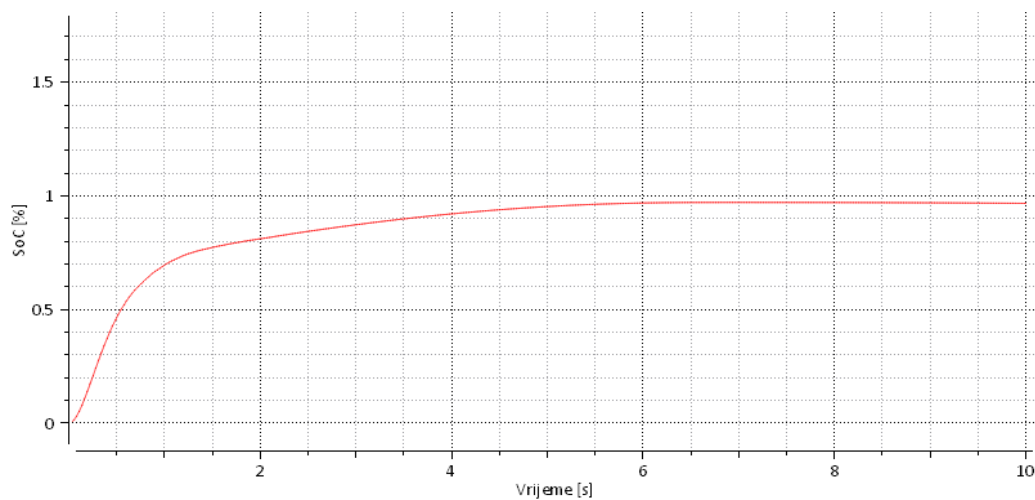
Slika 6.9 Brzina vozila pri kočenju

U početnom trenutku uzima se da je visokotlačni akumulator prazan te je tlak definiran tlakom punjenja u iznosu od 90 bar. Kočenjem vozila hidromotor koji u ovom slučaju radi kao pumpa tlači radni fluid u akumulator pri čemu se povećava tlak u akumulatoru. Oko 6. sekunde tlak dostiže maksimalnu vrijednost u iznosu od 300 bar što pokazuje da se akumulator prestao puniti.



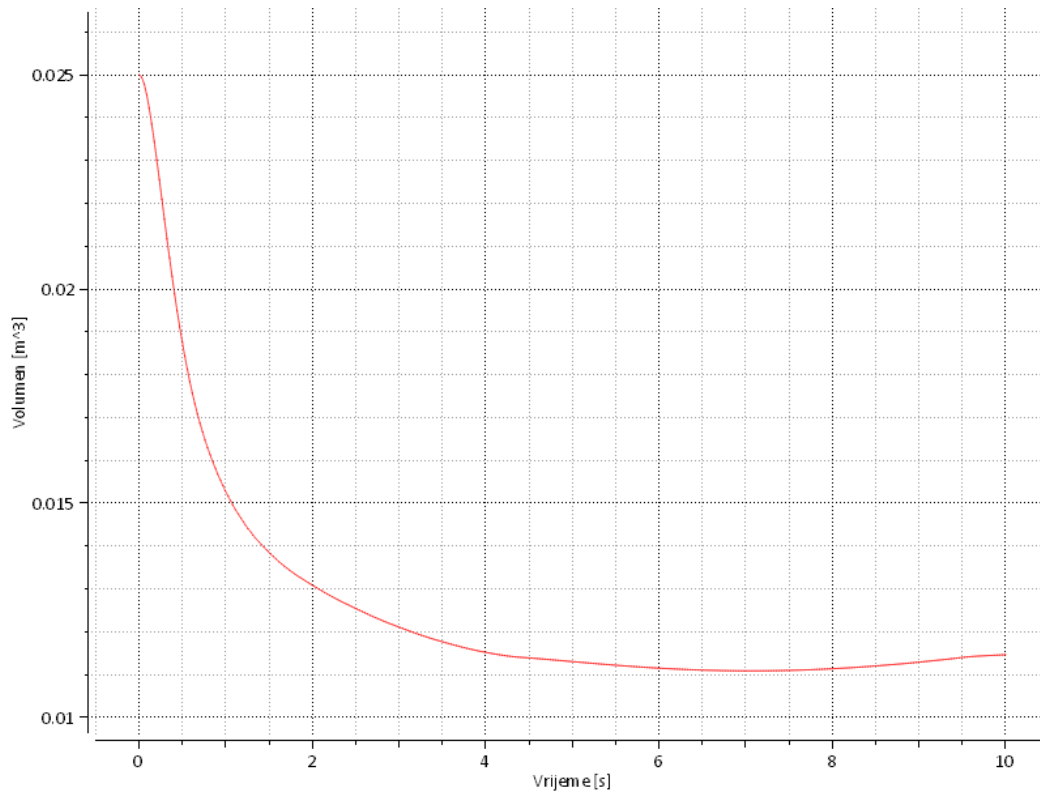
Slika 6.10 Tlak plina u akumulatoru pri kočenju

Na slici 6.11 je prikazano stanje napunjenosti „SoC“ akumulatora. U početnom trenutku je potpuno prazan te dostigne skoro maksimalnu vrijednost u 6. sekundi. Nagli porast te sporo punjenje s vremenom se objašnjava na način da se učinkovitost regenerativnog kočenja najviše odražava pri većim brzinama te kako se brzina vozila smanjuje tako se sve manje energije može akumulirati pa se i akumulator sporije puni.



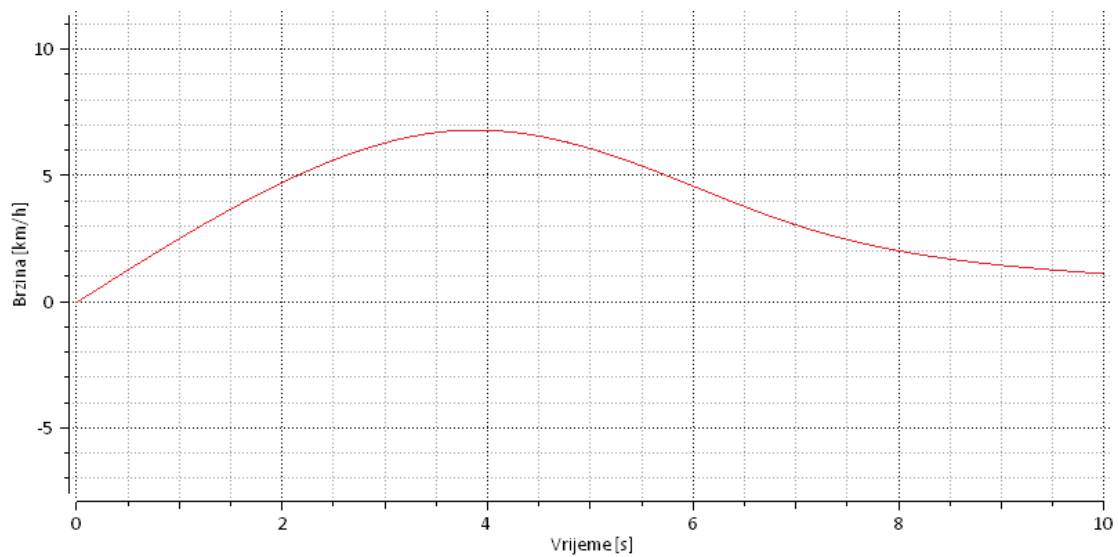
Slika 6.11 Stanje napunjenosti „SoC“

Na slici 6.12 je prikazano punjenje akumulatora tj. smanjenje volumena plina iz potpuno praznog početnog stanja. U početnom trenutku volumen plina iznosi 0.025 m^3 tj. 25 l kao što je definirano u prethodnom poglavlju. Na grafu se vidi blagi porast volumena nakon 8 sekundi što označava početak korištenja skladištenog fluida kao glavni pogon.



Slika 6.12 Volumen plina u akumulatoru

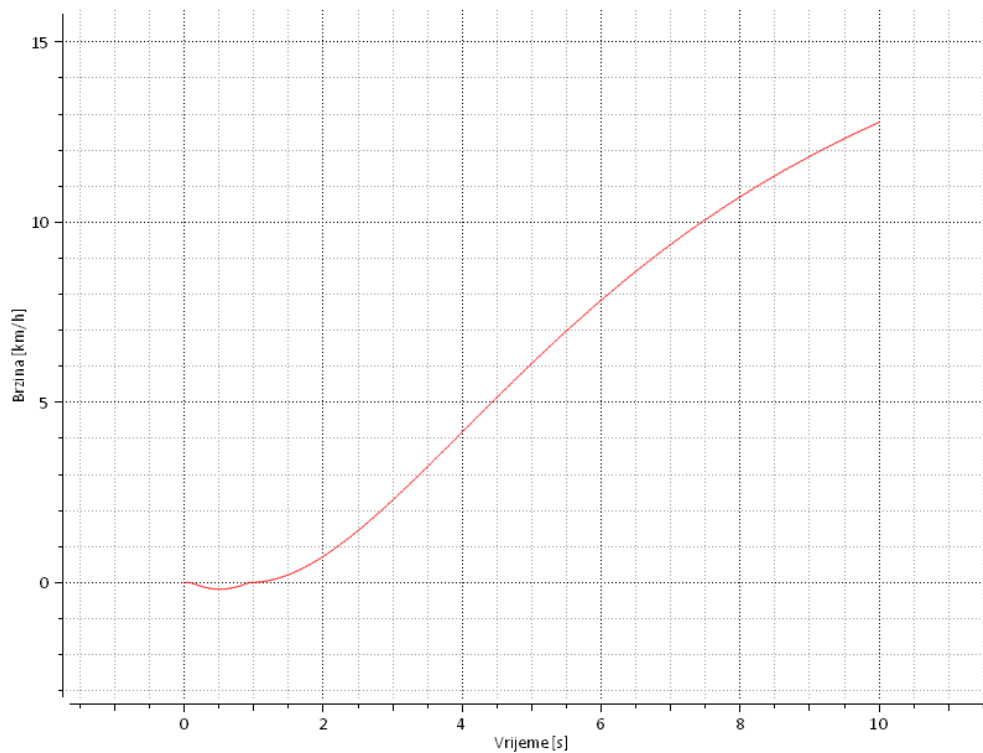
Na slici 6.13 je prikazana brzina vozila pri pokretanju samo na hidrauličkoj energiji pohranjenoj u akumulatoru bez pomoći pumpe. Energija pohranjena u akumulatoru je bila dovoljna za pokretanje vozila do brzine 7 km/h. Nakon toga se energija istrošila te se vozilo postepeno zaustavlja radi otpora zraka, trenja i drugih gubitaka.



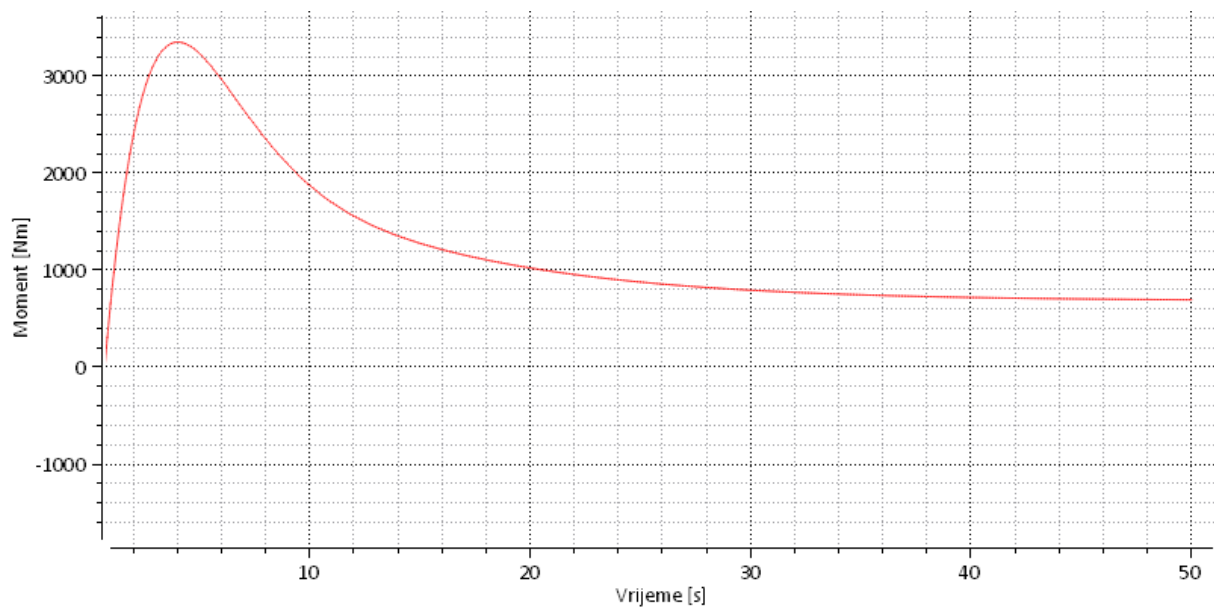
Slika 6.13 Brzina vozila pri pokretanju bez pumpe

Na slici 6.14 je prikazano pokretanje vozila preko klasične hidrostatske transmisije. Vozilo postepeno ubrzava dok ne ubrza na željenu vrijednost te se dalje giba konstantnom brzinom.

Na slici 6.15 je prikazana promjena momenta hidromotora pri istom slučaju pokretanja vozila. Maksimalni moment se postiže u prvih par sekundi gdje je potrebno pokrenuti vozilo iz mirovanja, pa se smanjuje kako dostiže željenu brzinu.



Slika 6.14 Brzina vozila pri pokretanju s pumpom



Slika 6.15 Moment na hidromotoru

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu je detaljnije obrađen hibridni pogon, dan je pregled različitih konfiguracija hibridnih pogona od strane poznatih proizvođača, opisana je konfiguracija postojećeg šumskog zglobnog traktora prema literaturi, definiran je zamjenski hidraulički hibridni pogon za taj traktor te je u računalnom programu Hopsan provedena simulacija tog pogona u par jednostavnih slučajeva. Na temelju rezultata dobivenih simulacijom vidi se kako se hidraulički akumulator može koristiti za pohranu energije kočenja koja se naknadno može koristiti za ubrzavanje. Time se može ostvariti veća učinkovitost pogona, smanjenje potrošnje goriva i emisije štetnih plinova. Kako bi se detaljnije ispitala učinkovitost ovakvog sustava, potrebno je provesti dodatne simulacije na realnim voznim ciklusima te sa realnim opterećenjima u radu. Prema dosadašnjim primjerima hibridnih pogona kod gospodarskih izvancestovnih vozila, uočavaju se vrlo dobri rezultati te je za očekivati sve veću primjenu takvih sustava u svakodnevnici.

LITERATURA

- [1] <https://www.mitsubishi-motors.com/en/corporate/pressrelease/corporate/detail876.html>, 22.2.2022.
- [2] <https://learn.eartheasy.com/guides/fuel-efficient-driving/>, 22.2.2022.
- [3] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=67919>, 21.2.2022.
- [4] <https://www.motorbiscuit.com/when-was-the-first-hybrid-car-built/>, 15.12.2021.
- [5] Brnčić D.: Projekt hidrauličkog hibridnog sustava za gospodarsko vozilo, diplomski rad, Tehnički fakultet, Rijeka, 2016.
- [6] Popović B., Đogić J., Rakić S.: Hibridna tehnologija, seminarski rad, Pomorski fakultet u Rijeci, 2011.
- [7] <https://www.autonet.hr/aktualno/premijere/toyota-rav4-hybrid/detalji/tehnicki-podaci>, 22.2.2022.
- [8] <https://www.sustainable-bus.com/news/volvo-s-charge-the-improved-hybrid-bus-range-can-reach-electrically-50-km-h/>, 22.2.2022.
- [9] Cipek M.: Modeliranje, analiza i optimalno upravljanje pogonima hibridnih električnih vozila, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [10] <https://www.trailer-bodybuilders.com/archive/article/21728183/parker-runwise-advanced-series-hybrid-drive-designed-for-class-8-refuse-vehicles>, 7.1.2022.
- [11] <https://www.powermotiontech.com/technologies/hydraulic-pumps-motors/article/21884576/hydraulic-drives-on-the-move>, 7.1.2022.
- [12] <https://docplayer.org/114159518-Hrb-hydrostatic-regenerative-braking-system-the-hydraulic-hybrid-drive-from-bosch-rexroth-and-hydrostatic-fan-drive-in-vehicles.html>, 7.1.2022.
- [13] <https://www.eaton.com/SEAsia/ProductsSolutions/Hydraulics/ProductsServices/HydraulicLaunchAssist/index.htm>, 7.1.2022.
- [14] <https://www.ivtinternational.com/news/hybrid-electric-vehicles/world-first-hybrid-biomethane-electric-tractor-developed-by-auga-food-group.html>, 7.1.2022.
- [15] Karlušić J., Cipek M., Pavković D., Šitum Ž., Benić J., Šušnjar M.: Benefit Assessment of Skidder Powertrain Hybridization Utilizing a Novel Cascade Optimization Algorithm, 2020.
- [16] Karlušić J.: Procjena isplativosti hibridizacije pogona šumskog zglobnog traktora, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.

- [17] Knežević I.: Rekonstrukcija šumskog zglobnog traktora, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [18] <https://www.rositeh.hr/reductor---multiplier-rt250-for-hydraulic-motor-mp/mr/ms-gear-ratio-21,1-1>, 22.2.2022.
- [19] https://www.boschrexroth.com/documents/12605/25209234/re91001_2019-09-17.pdf/dd0e31bc-86ce-9561-4063-bc4c099f046a, 22.2.2022.
- [20] https://www.boschrexroth.com/documents/12605/25209043/re92050_2018-10.pdf/6a40aab7-db1c-d2bc-67be-f32a6c39e3a3, 22.2.2022.
- [21] Biškup D.: Projektiranje hidrauličnog cjepača za ogrjevno drvo, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [22] https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/Toplinske_tablice_IZVADAK.pdf, 21.2.2022.
- [23] Baer K., Ericson L., Krus P.: Modeling of a Series Hybrid Hydraulic Drivetrain for a Light-Duty Vehicle in Hopsan, Linkoping University, Sweden, 2013.
- [24] <https://liu.se/en/research/hopsan>, 14.2.2022.
- [25] Baer K.: Simulation-Based Optimization of a Series Hydraulic Hybrid Vehicle, Dissertation, Linkoping University, Sweden, 2018.
- [26] Prekrat F.: Modeliranje i analiza hibridnog pogona šumskog zglobnog traktora, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [27] Žgela D.: Upravljanje električnim i hibridnim vozilima, seminarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.