

Računalna simulacija hidrauličkog električnog hibridnog vozila

Šipek, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:911685>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

RAČUNALNA SIMULACIJA HIDRAULIČKOG
ELEKTRIČNOG HIBRIDNOG VOZILA

Rijeka, rujan 2022.

Matija Šipek

0069080141

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

RAČUNALNA SIMULACIJA HIDRAULIČKOG
ELEKTRIČNOG HIBRIDNOG VOZILA

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

Rijeka, rujan 2022.

Matija Šipek

0069080141

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom „Računalna simulacija hidrauličkog električnog hibridnog vozila“ izradio samostalno primjenjujući stečeno znanje tijekom studija i služeći se literaturom te izvorima navedenim na kraju rada, pod stručnim vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Gorana Gregova.

Matija Šipek

Mat. br. 0069080141

(potpis)

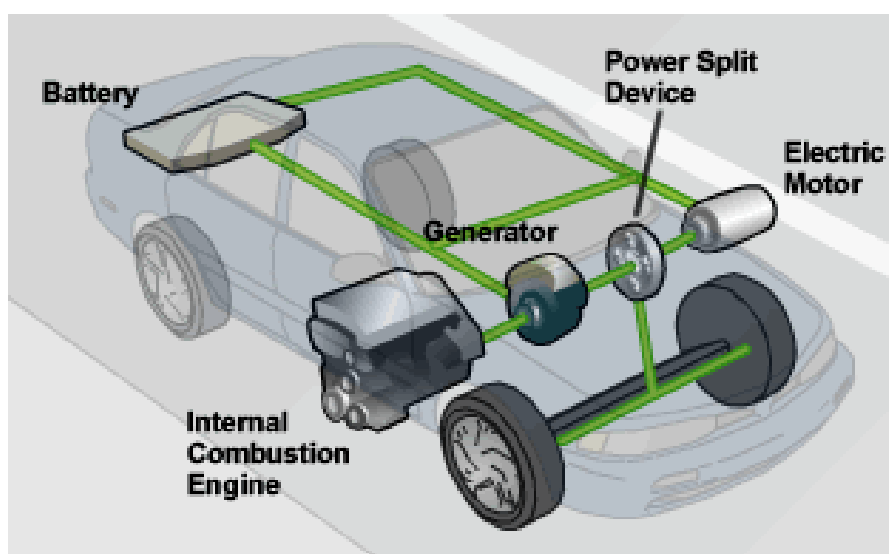
Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. PREGLED RAZVOJA HIBRIDNIH VOZILA | 4 |
| 3. RAZVOJ HIDRAULIČKIH HIBRIDNIH VOZILA..... | 7 |
| 4. PRINCIP RADA HIDRAULIČKOG ELEKTRIČNOG HIBRIDNOG VOZILA | 10 |
| 5. PRORAČUN HIDRAULIČKOG ELEKTRIČNOG HIBRIDNOG VOZILA | 18 |
| 5.1 Proračun vučne sile vozila..... | 19 |
| 5.2 Proračun pumpe/hidromotora..... | 20 |
| 5.3 Proračun hidrauličkog akumulatora | 22 |
| 5.4 Proračun hidrauličkih cijevi | 24 |
| 5.5 Proračun uštede energije za gradsku vožnju | 27 |
| 6. IZRADA SIMULACIJSKOG MODELA HIDRAULIČKOG ELEKTRIČNOG HIBRIDNOG VOZILA..... | 36 |
| 6.1 Simulacijski model vožnje korištenjem elektromotora..... | 36 |
| 6.2 Simulacijski model regenerativnog kočenja vozila..... | 42 |
| 6.3 Simulacijski model laganog ubrzavanja vozila | 47 |
| 6.4 Simulacijski model produženog ubrzavanja vozila..... | 52 |
| 6.5 Simulacijski model dvostrukog ubrzavanja vozila..... | 56 |
| 7. ANALIZA REZULTATA..... | 61 |
| 7.1 Usporedba rezultata s dizel-hidrauličkim hibridnim vozilom..... | 61 |
| 7.2 Prednosti korištenja hidrauličke transmisije kod električnih vozila..... | 67 |
| 8. ZAKLJUČAK | 76 |
| 9. LITERATURA..... | 78 |
| 10. POPIS OZNAKA | 81 |
| 11. POPIS SLIKA | 84 |
| 12. POPIS TABLICA..... | 87 |
| 13. SAŽETAK..... | 88 |
| 14. ABSTRACT..... | 89 |

1. UVOD

Hibridno vozilo je vozilo koje za pogon koristi dva ili više različitih izvora energije. Različiti motori unutar istog vozila rade na različitim uvjetima rada, npr. hibridno vozilo u kojem se nalaze elektromotor i motor s unutarnjim izgaranjem. Elektromotor je učinkovitiji kod stvaranja okretnog momenta, dok motor s unutarnjim izgaranjem služi za učinkovito održavanje velikih brzina vožnje. Motor s unutarnjim izgaranjem koji se ugrađuje u hibridni automobil može biti manji i slabiji od onog u klasičnom automobilu, ali i dalje dovoljno snažan za normalnu vožnju, zbog dodatnog sustava elektromotora. Prebacivanje s jednog pogona na drugi u pravim trenucima može pozitivno utjecati na upravljivost vozila te energetska učinkovitost. Glavne prednosti vozila s hibridnim pogonom su brzo stvaranje okretnog momenta, regenerativno kočenje, manje praznog hoda motora, dvostruki sustav napajanja, te automatsko pokretanje i isključivanje motora. Na taj se način smanjuje potrošnja goriva i emisija štetnih plinova [1].

Slika 1.1 prikazuje hibridni automobil kojem je glavni pogonski stroj motor s unutarnjim izgaranjem, a kao dodatni sustav je u automobil ugrađen elektromotor. Korisnik može prebaciti korišteni pogon po želji, a za svladavanje zahtjevnijih dionica moguće je istovremeno koristiti oba sustava. Također, moguće je koristiti princip regenerativnog kočenja. Kako automobil koči, predaje kinetičku energiju vozila generatoru koji ju pretvara u električnu energiju i puni bateriju elektromotora, čime se štedi energija i povećava se maksimalni domet vozila [2].



Slika 1.1 - Hibridno vozilo s elektromotorom i motorom s unutarnjim izgaranjem [2]

Osim kod osobnih vozila, hibridni pogon se može koristiti i kod teških radnih strojeva, željezničkih vozila, dizalica, brodova, zrakoplova, te kod terenskih vojnih vozila. Iako se najčešće primjenjuje kombinacija motora s unutarnjim izgaranjem i elektromotora (sustav elektromotor, generator, baterija), moguće je ugraditi i hidraulički sustav (pumpa, hidraulički akumulator, hidromotor) za učinkovitije ubrzavanje i kočenje [3].

Glavna mana hibridnog vozila je manja učinkovitost od konvencionalnog vozila zbog većih otpora pri vožnji, što uključuje veću masu cjelokupnog sustava motora i veći otpor trenja. Električni hibridni sustav kao prednost ima veliku gustoću energije pohranjenu u baterijama, čime se postiže velika brzina vožnje i ubrzanje, no gustoća snage nije na jednakoj razini, pa je potrebno koristiti dodatne komponente za prijenos snage od elektromotora do pogonskih kotača. Hidraulički hibridni sustav kao medij koristi hidrauličku tekućinu (ulje) koja ima visoku gustoću snage, te se pri pokretanju ostvaruje veća snaga i okretni moment. Korištenjem regenerativnog kočenja moguće je pohraniti veću količinu energije u odnosu na električne hibridne sustave. Kinetička energija kočenja koja bi se kod konvencionalnog vozila „bacala“ u okolinu u obliku topline se koristi za tlačenje radne tekućine i njeno spremanje u hidraulički akumulator. Uobičajeno se kod pokretanja vozila troši najviše goriva, a kod hidrauličkog hibridnog sustava, pokretanje vozila se odvija pomoću stlačene hidrauličke tekućine koja pogoni hidromotor, te konačno pogonske kotače [4].

Postoje tri tipa hibridnih sustava koji se koriste u vozilima. Kod serijskog tipa hibridnog vozila, primarni pogon služi za napajanje sekundarnog pogona, a pogonski kotači su vezani na sekundarni pogon. Npr. kod hibridnog vozila čiji je primarni pogon motor s unutarnjim izgaranjem, a sekundarni elektromotor; motor s unutarnjim izgaranjem pogoni generator koji stvara električnu energiju za pogon elektromotora, a elektromotor pogoni pogonske kotače vozila. Paralelni sustav hibridnog vozila radi na principu da sekundarni pogon vozila služi kao dodatni izvor snage za kretanje vozila, a može služiti i kao glavni pogon u kratkotrajnom režimu rada. Treći tip hibridnog sustav je kombinirani sustav koji koristi i serijski i paralelni sustav za postizanje maksimalne učinkovitosti [4].

Iako su električni automobili sve popularniji u posljednje vrijeme, hidraulička električna hibridna vozila nisu široko dostupna. Riječ je o tehnologiji koja je u fazi testiranja i analiziranja, za početak u slabijim i lakšim vozilima, kao što je primjerice *go-kart* [15] da bi se ispitali osnovni principi rada i glavne karakteristike korištenja pomoćnog hidrauličkog sustava u električnom vozilu. Ispitivanja ovakve vrste vozila se prvenstveno odvijaju u zemljama Azije, za korištenje tijekom vožnje u velikim gradovima gdje je potrebno često kočenje i kretanje vozila u prometu, a uvođenjem hidrauličkog električnog hibridnog vozila u promet bi se smanjila ukupna potrošnja električne energije i povećala iskoristivost samog vozila [5].

Cilj ovog rada je proračun, odabir komponenti i računalna simulacija paralelnog hidrauličkog električnog hibridnog vozila. Za postojeće dostavno vozilo na električni pogon se proračunavaju varijable njegovog rada koje služe za odabir hidrauličkih komponenti koje bi se u njega ugradile, za postizanje boljih karakteristika vozila, kao što su regenerativno kočenje, štednja energije i povećanje radnog dometa vozila. Računalni model i simulacija se izrađuju pomoću softverskog paketa *SimulationX*, a rezultati se uspoređuju s rezultatima dobivenim simulacijom paralelnog hidrauličkog hibridnog dostavnog vozila čiji je primarni pogon motor s unutarnjim izgaranjem [4].

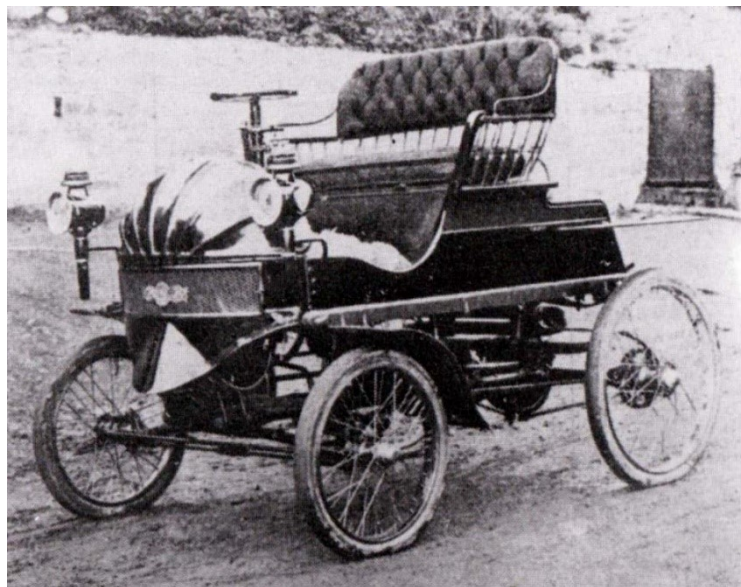
2. PREGLED RAZVOJA HIBRIDNIH VOZILA

Iako hibridna vozila stječu popularnost sredinom 60-tih godina 20. stoljeća, prvi automobil s hibridnim pogonom konstruirao je još 1899. godine belgijski inženjer Henri Pieper, a 1901. je svoj koncept predstavila njemačka tvrtka *Porsche*. Hibridni pogon sastojao se od benzinskog motora i elektromotora. Tijekom vožnje, benzinski je motor, preko generatora i magneta, služio za punjenje baterija koje su pokretale elektromotore. Elektromotori su se kod *Porscheovog* koncepta nalazili u pogonskim kotačima (slika 2.1). Ukupno je proizvedeno 65 primjeraka *Porscheovog* hibridnog automobila [6].



Slika 2.1 - Porsche hibridni automobil s elektromotorima u kotačima [7]

Kod Pieperovog automobila elektromotor se je nalazio ispod sjedala (slika 2.2). Ovakav automobil je mogao proći do 40 km koristeći samo elektromotorni pogon. Pri velikom opterećenju ili uzbrdici, automobil bi za pogon koristio oba motora [6].



Slika 2.2 - Prvi hibridni automobil koji je konstruirao Henri Pieper 1899. [8]

Glavni problem kod ranih hibridnih automobila je bila baterija velike mase koja je negativno utjecala na performanse u vožnji. Stoga su se nakon izrade koncepata hibridnih vozila tvrtke *Pieper* i *Porsche* posvetile proizvodnji autobusa i kamiona, a *Porsche* je čak razvio i trkači automobil s hibridnim pogonom (mase 2 tone). Tvrtka *Pieper* je postala *Auto-Mixte* te je proizvodila kamione i automobile s hibridnim pogonom do 1912. godine, a tvrtka je zatvorena 1914. izbijanjem Prvog svjetskog rata. Istovremeno su se razvijali hibridni automobili u SAD-u. Tvrtka *Woods motor vehicle company* je proizvela automobil naziva *Woods dual power*, hibridni automobil koji je do brzine od 24 km/h vozio na elektromotor, a iznad te brzine se uključivao benzinski motor. Tvrtka *Owen magnetic* je između 1915. i 1922. proizvela oko 700 primjeraka luksuznih automobila s hibridnim pogonom (slika 2.3). Iako inovativni i korisni, ovi su se automobili ubrzo prestali proizvoditi zbog vrlo visoke cijene i kompliciranog održavanja [8].



Slika 2.3 - Hibridni automobil tvrtke Owen magnetic iz 1917. [9]

Tijekom 20-tih godina 20. stoljeća proizvodnja hibridnih vozila stagnira zbog Fordovog *Modela T*, koji se pokazao kao puno jeftinija i prihvatljivija alternativa. Tijekom ovog razdoblja se uglavnom razvijaju prototipovi, a interes za hibridnim vozilima se ponovo javlja nakon Drugog svjetskog rata. Sredinom 60-tih i tijekom 70-tih godina 20. stoljeća u proizvodnju hibridnih vozila se upuštaju velike tvrtke poput *General motors*-a i *Volkswagen*-a. Razvijen je koncept regenerativnog kočenja, gdje se kinetička energija kočenja pretvara u drugi oblik energije koji se može iskoristiti tijekom daljnje vožnje. Također, dodatni razlog razvoja hibridnih vozila tijekom 70-tih godina 20. stoljeća je naftna kriza i povećanje cijene goriva. I dalje se kao glavni problemi javljaju velika masa i veličina samih vozila. No hibridni automobili se počinju komercijalizirati tek 1997. godine kada svoje koncepte predstavljaju tvrtke *Audi* i *Toyota* (slika 2.4). Hibridni automobil *Toyota Prius* ostvario je dobre rezultate i prodao se u preko milijun primjeraka [8].

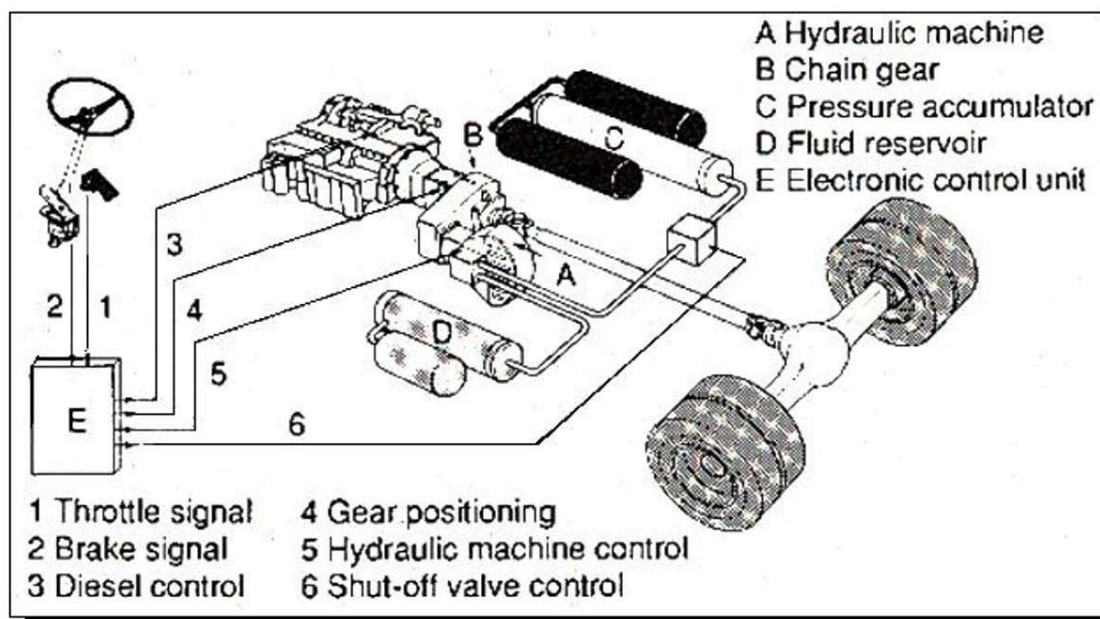


Slika 2.4 - Toyota Prius iz 1997. s hibridnim pogonom [8]

Danas većina velikih proizvođača automobila ima u ponudi i automobile s hibridnim pogonom, iako sami hibridni automobili čine relativno malen dio tržišta, prvenstveno iz razloga što problem velike cijene i mase nije u potpunosti riješen [8].

3. RAZVOJ HIDRAULIČKIH HIBRIDNIH VOZILA

Prvi prototip paralelnog hibridnog hidrauličkog sustava je izrađen 1982. od strane tvrtke *Parker Hannifin*, te je nosio naziv *Cumulo brake drive* (slika 3.1). Radi se o hidrauličkom sustavu koji se naknadno može ugraditi u vozilo gdje je glavni pogon ostvaren motorom s unutarnjim izgaranjem. Tvrtka *Volvo* je krajem 80-tih godina počela ugrađivati *Cumulo brake drive* u autobuse, prvenstveno iz razloga očuvanja energije prilikom kočenja i smanjenje emisije ispušnih plinova. Pritiskanjem papučice gasa upravljačka jedinica pokreće ventil pri čemu se klip otpušta. Hidraulička tekućina protječe kroz hidromotor, pokrećući pogonsko vratilo i kotače vozila. Kada se energija tlaka radne tekućine potrebna za pokretanje vozila potroši, uključuje se spojka i aktivira se dizelski motor koji je tijekom ubrzanja radio u praznom hodu. Prilikom kočenja, pogonski kotači koji usporavaju pogone hidrauličku pumpu i energija se pohranjuje u hidrauličkom akumulatoru, te se ponovo iskorištava pri pokretanju vozila [11].

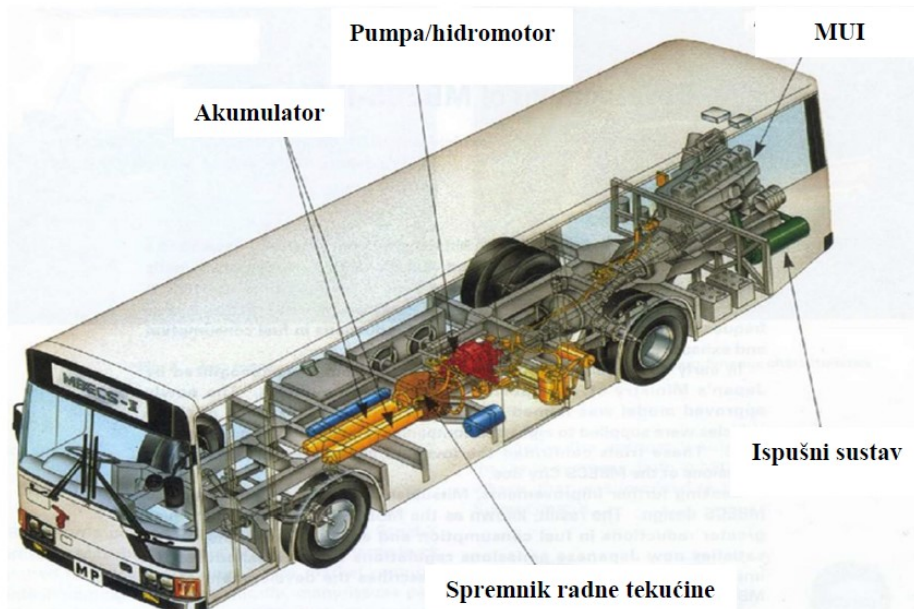


Cumulo transfers power lost in braking to starting up

Slika 3.1 – Konstrukcija *Cumulo brake drive-a* u vozilu [11]

Tvrtka *Parker Hannifin* 1991. godine razvija *Cumulo hydrostatic drive*, koji dodatno povećava iskoristivost energije, smanjuje ukupnu potrošnju goriva (između 20 i 40 %), te smanjuje emisiju ugljičnog dioksida do 40% u usporedbi s konvencionalnim vozilom. Sveukupni se sustav regulira preko mikroprocesora. Sličan princip predstavlja japanska tvrtka *Mitsubishi* koja je 1987. razvila

hibridni hidraulički sustav zvan *BER System*. To je paralelni sustav čija je glavna primjena regenerativno kočenje i pomoć vozilu pri pokretanju. Ovakav sustav je instaliran 1996. u gradske autobuse diljem Japana (slika 3.2). Kako se gradska vožnja često bazira na principu stani-kreni, zbog gustoće prometa i semafora, ovakav sustav omogućuje uštedu energije i do 30% [4].



Slika 3.2 – Autobus s hidrauličkim hibridnim pogonom *BER System* iz 1996. [21]

Kako su *Cumulo drive* i *BER System* razvijani kao dodatak za postojeća vozila, bilo je samo pitanje vremena kada će se pojaviti vozilo koje je potpuno koristilo razvijene principe hidrauličkih hibrida. Prvo vozilo koje je razvijano s hidrauličkim hibridnim pogonom je bio kamion za dostavu tvrtke UPS iz 2006. godine (slika 3.3). Iako je primarni sustav pogona bio dizelski motor, integracija s hidrauličkim sustavom kočenja i kretanja pokazala se isplativom [12].



Slika 3.3 – UPS kamion za dostavu, dizel-hidraulički hibrid iz 2006. godine [13]

Od 70-tih godina 20. stoljeća se također javlja povećan interes za električnim automobilima, potaknuti smanjivanjem potrošnje fosilnih goriva i štetnih ispušnih plinova. Tehnologija električnih automobila je postojala još krajem 19. stoljeća, no razvojem elektroničkih komponenti i mehatroničkog upravljanja, električni automobili današnjice imaju poboljšane performanse i upravljivost. Kako se tijekom 90-tih godina 20. stoljeća sve više ugrađuju hidraulički sustavi u konvencionalna vozila, tako su se počela javljati i hibridna vozila s elektro-hidrauličkim pogonom. Elektromotor se koristi kao glavni sustav pogona, dok hidraulički sustav pomaže pri kočenju i kretanju, odnosno energiju pohranjenu za kočenje iskorištava za pokretanje vozila. Na ovaj se način štedi energija, te baterija elektromotora može imati dulji radni vijek [13].

Električna dostavna vozila su sve više zastupljena u današnjem svijetu. Prethodno spominjani UPS ima u planu do kraja 2023. nabaviti oko 10000 električnih dostavnih vozila, za upotrebu širom Europe i SAD-a. Sa baterijom energije 75 kWh, ovakav dostavni kamion može proći oko 250 km s jednim punjenjem baterije. Slična rješenja električnih dostavnih vozila razvijaju i tvrtke *Hyundai* i *Volkswagen*. Naravno, kako je ovakav tip dostave jako zastupljen u velikim gradovima u kojima je često režim vožnje stani-kreni, biti će korisno u bližoj budućnosti u ovakve kamione ugrađivati hidraulički hibridni sustav, zbog uštede električne energije i snage. [14].

4. PRINCIP RADA HIDRAULIČKOG ELEKTRIČNOG HIBRIDNOG VOZILA

Hidraulička električna hibridna vozila su tema koja je sve više zastupljena posljednjih desetak godina. Znanstvenici na Sveučilištu u Chicagu su 2013. uvidjeli prednosti korištenja hidrauličkog električnog vozila. Vozilo koje kao primarni pogon koristi elektromotor, čime je smanjeno zagađenje tijekom rada ima ugrađen sustav hidrostatske transmisije čime se regenerira energija i povećava iskoristivost i trajanje baterije. Na ovaj način se mogu iskoristiti prednosti oba sustava. Električne baterije mogu pohraniti veliku gustoću energije, ali im treba duže vremena da se napune, dok hidraulički akumulator može pohraniti veliku količinu snage u kratkom vremenskom razdoblju, čime se maksimizira povrat energije. Testiranja su provedena na električnom *go-kart* vozilu u kojeg je ugrađen hidraulički hibridni sustav (slika 4.1) [15].

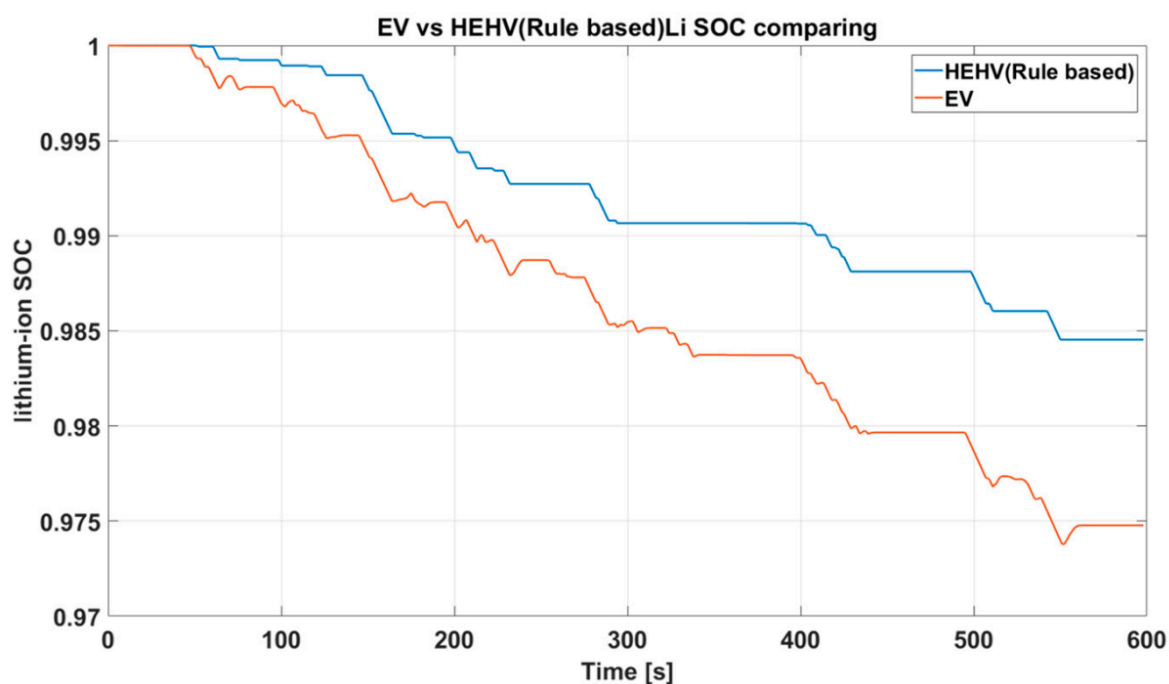


Slika 4.1 – Testno *go-kart* hidrauličko električno hibridno vozilo [15]

Vozilo zajedno s vozačem ima ukupnu masu 200 kg, elektromotor snage 4,5 kW razvija moment od 13 Nm, uz maksimalnu brzinu od 65 km/h pri 3000 okr/min. U vozilo su ugrađene pumpa, hidromotor i hidraulički akumulator. Pumpa ima specifični protok od $10 \text{ cm}^3/\text{okr}$ i razvija moment od 15 Nm pri 1800 okr/min. Hidromotor ima specifični protok od $32 \text{ cm}^3/\text{okr}$ i razvija moment od 40 Nm pri 600 okr/min. Hidraulički akumulator ima kapacitet od 0,95 l, a maksimalni tlak iznosi 207 bar. Eksperiment je obavljen kada vozilo usporava od brzine 36 km/h do zaustavljanja kroz 5,5 s. Za ovo vrijeme pumpa tlači radni fluid i sprema ga u hidraulički akumulator. Tijekom

kočenja pohrani se 5332 J energije, koja će se iskoristi za ubrzavanje vozila do brzine od 20,5 km/h kroz 8,6 s. Vozilo je za to vrijeme prošlo put od 31 m. Nakon pražnjenja hidrauličkog akumulatora, pogon vozila se prebacuje na elektromotor za daljnju vožnju. Pokusno je dokazano da ovakav sustav može bez problema ubrzati vozilo i bez dodatnog utroška energije, što ga čini povoljnim za vozila predviđena za gradsku vožnju kao što su, gradski autobusi, kamioni za odvoz smeća i dostavna vozila [15].

Provedeno je i simulacijsko istraživanje na temu hidrauličkih električnih hibridnih vozila na sveučilištu Taipei, Tajvan 2020. Korištenjem genetskog algoritma i softverskog sučelja za simulaciju *Matlab Simulink*, obavljena je simulacija uštede energije i iskoristivosti hidrauličkog električnog hibridnog vozila u usporedbi s konvencionalnim električnim vozilom. Kao baza je uzet autobus na električni pogon koji zajedno s 20 putnika ima ukupnu masu od 8800 kg. Rad vozila je simuliran prema standardnom testu za gradsku vožnju New Yorkom, kakvu zagovara Agencija za zaštitu okoliša SAD-a. Vožnja se odvija na ravnom terenu, a traje 599 s, od čega je oko 200 s predviđeno za kočenje i zaustavljanje vozila. Maksimalna brzina vozila iznosi 45 km/h, a prosječna 12 km/h. Prvo se simulirao rad testnog vozila kao konvencionalnog električnog vozila, a zatim kao hidrauličkog električnog hibrida. Slika 4.2 prikazuje graf ovisnosti potrošnje energije baterije kod korištenja konvencionalnog električnog vozila i korištenjem hidrauličkog električnog hibrida. Korištenjem hidrauličkog hibridnog sustava, na kraju vožnje uštedilo se oko 36% energije baterije [16].



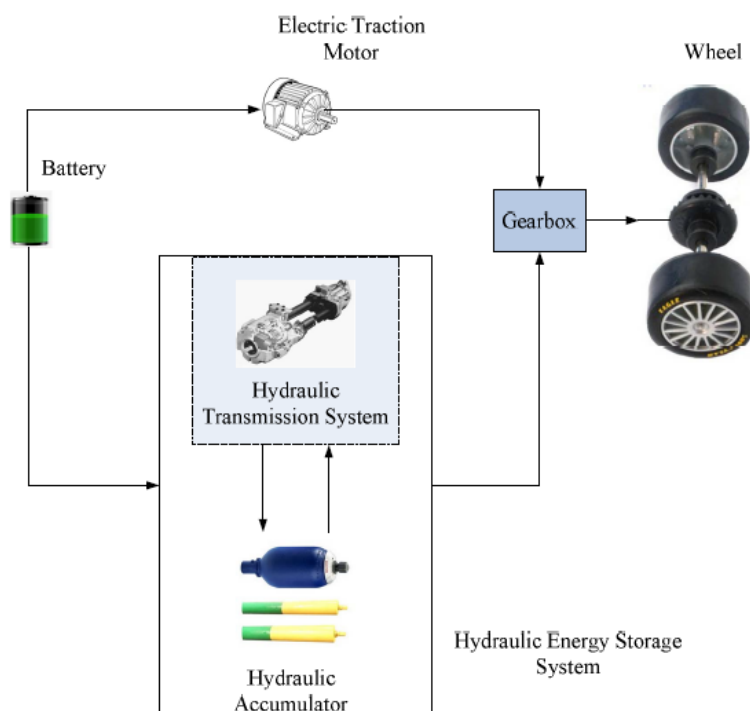
Slika 4.2 – Odnos napunjenosti baterije kod električnog vozila i hidrauličkog električnog hibridnog vozila [16]

Kako električna hibridna vozila nisu namijenjena za režim vožnje u kojem je često kočenje i kretanje, zbog manje gustoće skladištene energije, kao što je već rečeno razvija se ideja korištenja hidrauličkog hibrida. Električni hibridni pogon se ne preporuča na većim i težim vozilima. Tip vozila koje će se analizirati kao primarni pogon koristi elektromotor, na kojeg je paralelno spojen hidraulički sustav. Električni pogon osigurava ekološki prihvatljivu vožnju i tih pogon, dok hidraulički sustav ostvaruje regeneraciju kinetičke energije usporavanja vozila u kratkom vremenskom periodu. Osim toga, korištenjem regenerativnog kočenja kod hidrauličkog hibrida se energija koristi za pogon vozila, a ne samo za punjenje baterije preko generatora, čime se štedi energija i povećava domet vožnje bez punjenja baterija. [4].

Prednosti korištenja hidrauličkog električnog hibridnog vozila su čist pogon, kako hidrauličke komponente i ulje uglavnom ne predstavljaju rizik za okoliš, velika iskoristivost (oko 70% energije tijekom kočenja se nadoknadi, dok se kod električnog hibrida nadoknađuje do 55% energije), hidrauličke komponente su lagane, jednostavne konstrukcije i ne zahtijevaju mnogo održavanja, čime se dodatno smanjuju troškovi. Također omjer cijene hidrauličkih komponenti i njihove snage i proizvedenog okretnog momenta je vrlo povoljan. Kod režima vožnje gdje se vozilo često zaustavlja i ponovo pokreće, kao što je dostava robe u urbanom okruženju, moguće je pogon vozila dobivati isključivo preko hidrauličkog sustava. Na taj način vozilo se kreće bez potrošnje energije, čime se dodatno naglašava ekološka prihvatljivost električnog hidrauličkog hibrida, te mogućnost štednje energije. Kod regenerativnog kočenja spremanje energije za njeno ponovno korištenje je brže nego kod električnog hibrida [17]. Nedostatak hidrauličkog hibridnog sustava naprama električnom hibridu je instalacija i ugradnja sustava u vozilo koja može biti složena, potrebno je ugraditi više komponenata nego kod električnog hibrida. Hidraulički akumulatori mogu zauzimati mnogo prostora, ovisno o njihovom volumenu i tipu vozila koje se koristi. Paralelni hidraulički hibridni sustav može uštedjeti manje energije od serijskog sustava, dok serijski ne može razviti okretni moment kao kod paralelnog sustava. Kod vozila manje snage i mase hidraulički hibridni sustav ne nudi jednaku uštedu energije kao kod električnog hibrida, no kod ugradnje u teža i jača vozila, povećava se iskoristivost sustava i ušteda energije. Konačno, hidraulički hibridi su puno manje zastupljeni na tržištu, što bi se moglo promijeniti težnjom za što čistijim pogonom gradskih dostavnih vozila u budućnosti [18].

Osnovni dijelovi hidrauličkog električnog hibridnog vozila su: baterija koja energijom opskrbljuje elektromotor povezan s pogonskim kotačima, te hidrostatski pogon koji je također vezan na

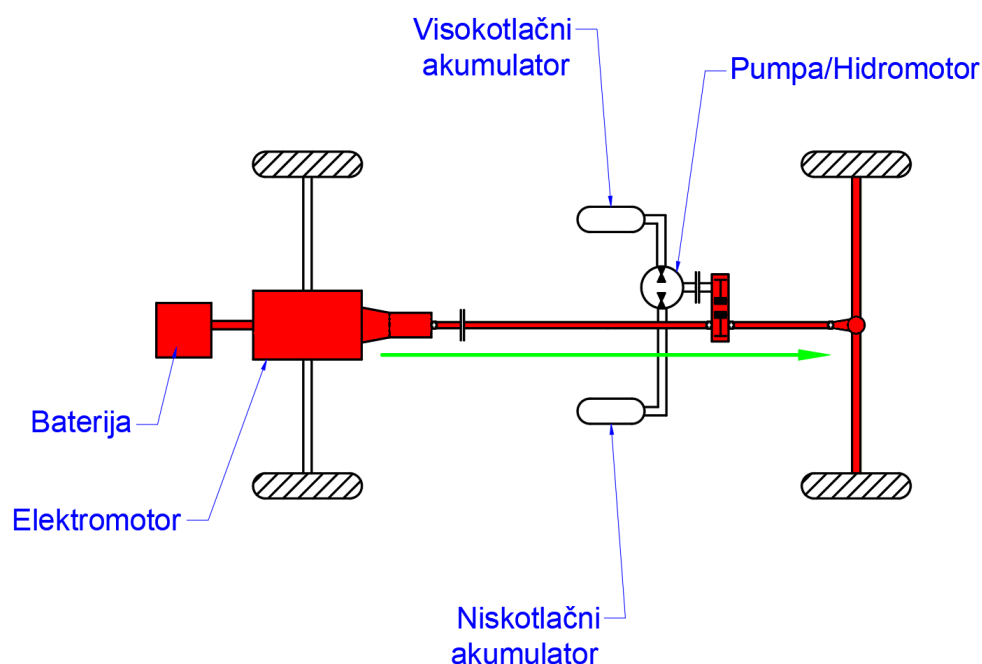
pogonske kotače a sastoji se od pumpe/hidromotora, spremnika radne tekućine i hidrauličkog akumulatora. Također, u hidrostatski pogon spadaju i cijevi, ventili i razvodnici koji su spojeni u zatvoreni sustav protoka radne tekućine. Pri vožnji se kao pogon vozila koristi elektromotor, dok se za kočenje i ubrzavanje koristi hidrostatski pogon. Na slici 4.3 je shematski prikazan hidraulički električni hibridni sustav [19].



Slika 4.3 – Shematski prikaz hidrauličkog električnog hibridnog vozila [19]

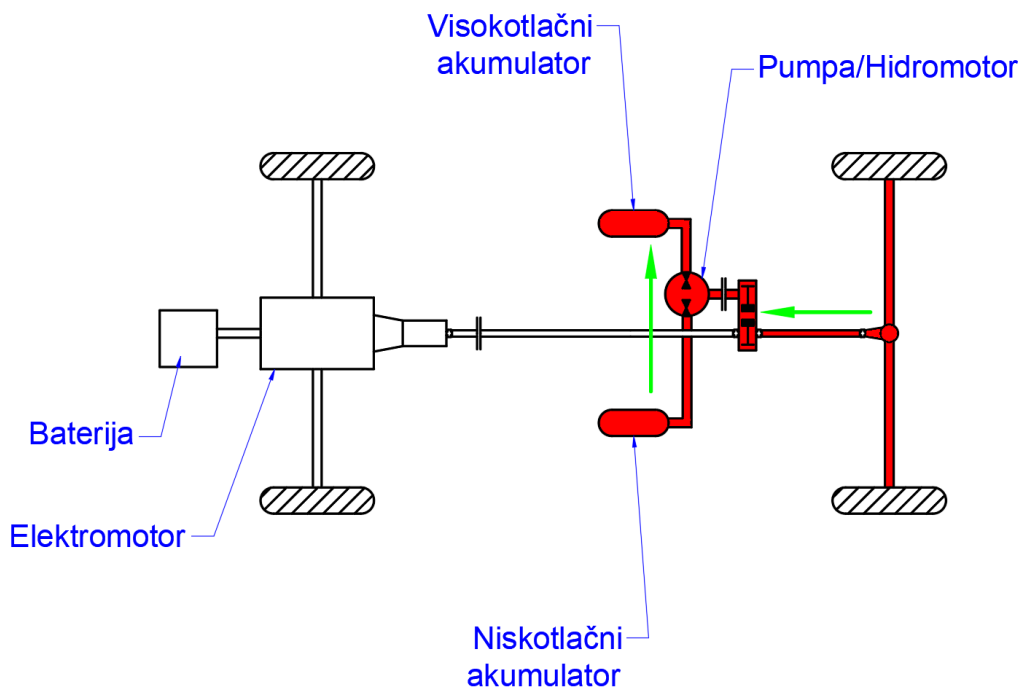
Protok hidrauličke pumpe ovisi o brzini okretanja pogonskog vratila. Prilikom regenerativnog kočenja pumpa je pogonjena pogonskim vratilom vozila. Radna tekućina prelazi iz niskotlačnog u visokotlačni spremnik, gdje se kinetička energija kočenja sprema u obliku energije tlaka radne tekućine. Prilikom kretanja/ubrzavanja pumpa radi kao hidromotor koji energiju tlaka radne tekućine pretvara u mehaničku energiju, te se stlačena tekućina koristi za pokretanje pogonskog vratila. Hidraulički akumulator je sastavljen od dvije komore odvojene elastičnom dijafragmom ili klipom. Ostali dijelovi su hidrauličkog električnog hibridnog vozila su mjenjač i pogon vozila. Analizom svojstava hidrauličkog električnog hibridnog vozila, moguće je razlikovati pet načina rada [19].

Prvi način rada je tipična vožnja pri konstantnoj brzini. U ovom načinu rada se koristi samo elektromotor za pogon vozila, te se princip rada ne razlikuje od tradicionalnog električnog vozila. Izlazno vratilo elektromotora pogoni kotače vozila. Slika 4.4 prikazuje shemu hibridnog sustava vozila u ovom načinu rada. Crvenom bojom su označene komponente koje su aktivne tijekom opisanog načina rada vozila, dok zelena strelica prikazuje smjer kretanja energije kroz sustav.



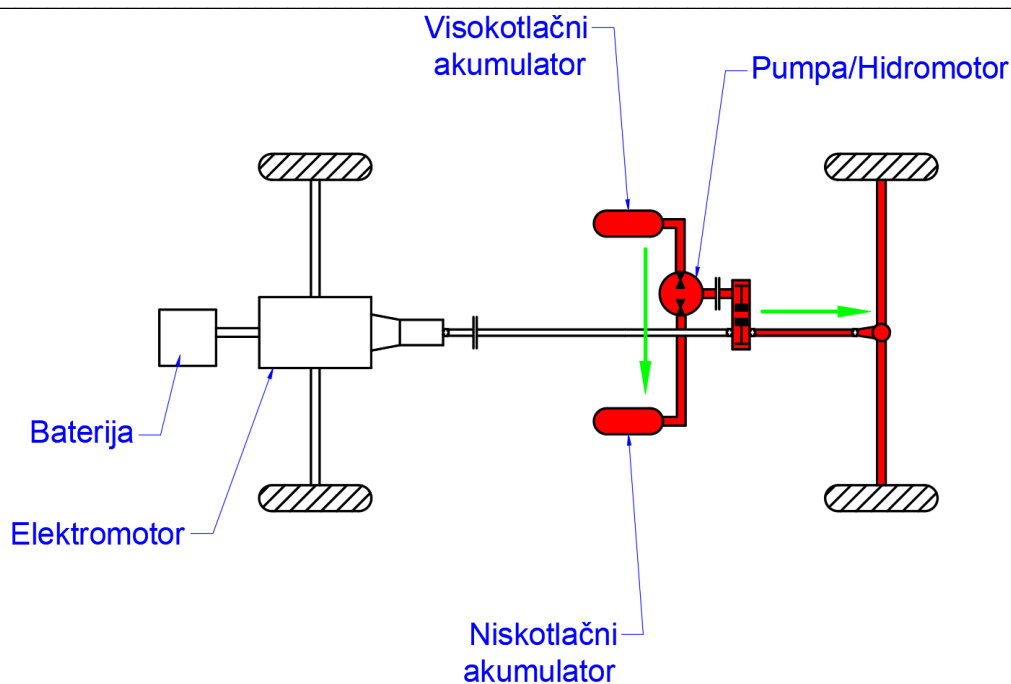
Slika 4.4 – Shematski prikaz rada vozila u načinu vožnje pri konstantnoj brzini

Drugi način rada je regenerativno kočenje, jedna od glavnih prednosti ovakvog sustava. Kada vozilo usporava i koči, uključuje se pumpa koja ostvaruje protok radne tekućine iz niskotlačnog u visokotlačni akumulator. Tijekom regenerativnog kočenja usporavanje vozila se ostvaruje samo radom hidrauličkog sustava, na način povećanja momenta na vratilu pumpe s porastom tlaka u hidrauličkom akumulatoru. Kada se hidraulički akumulator napuni, ostatak kočenja se odvija preko mehaničke kočnice. Na slici 4.5 je prikazan protok energije u vozilu prilikom regenerativnog kočenja.



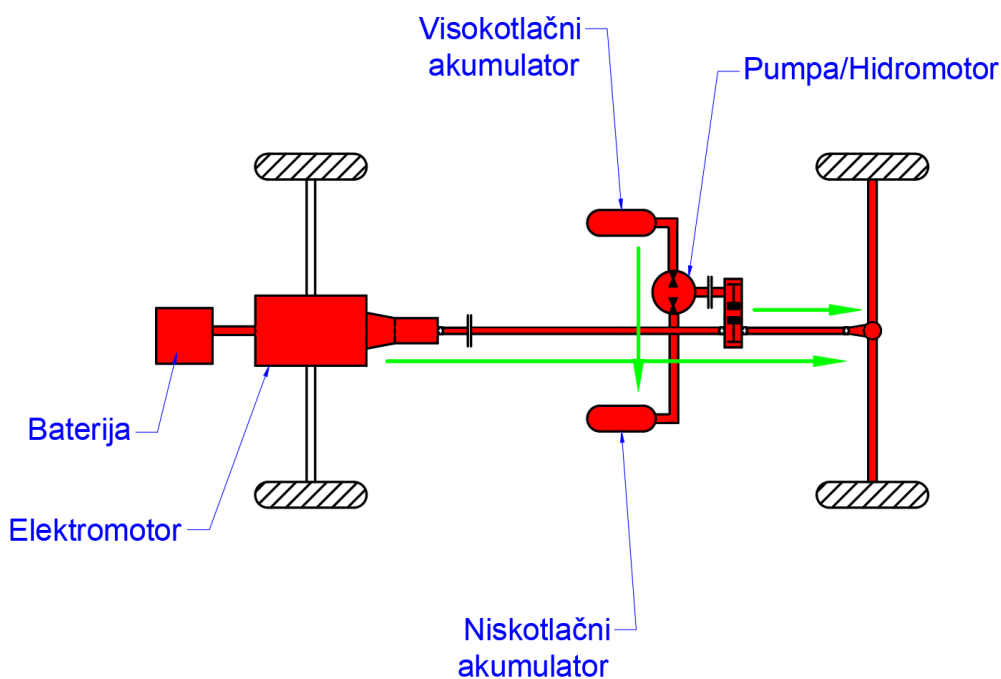
Slika 4.5 – Shematski prikaz rada vozila kod regenerativnog kočenja

Treći način rada je lagani način ubrzavanja. Ovaj način rada se koristi uglavnom tijekom gradske vožnje, kada je potrebno često zaustavljanje i kretanje. Zbog toga je važno kretanje pri određenoj brzini. Energija pohranjena u hidrauličkom akumulatoru regenerativnim kočenjem pogoni hidromotor koji pokreće vozilo, te se povećava stupanj iskoristivosti jer se energija koja bi se „bacila“ u okolinu iskorištava za obavljanje korisnog rada. U ovom načinu rada, koristi se samo hidraulička energija za pogon vozila. Radna tekućina prelazi iz visokotlačnog u niskotlačni spremnik. Elektromotor se aktivira nakon ubrzavanja vozila, kada vozilo pređe neku graničnu brzinu kretanja. Protok energije pri kretanju vozila prikazan je na slici 4.6.



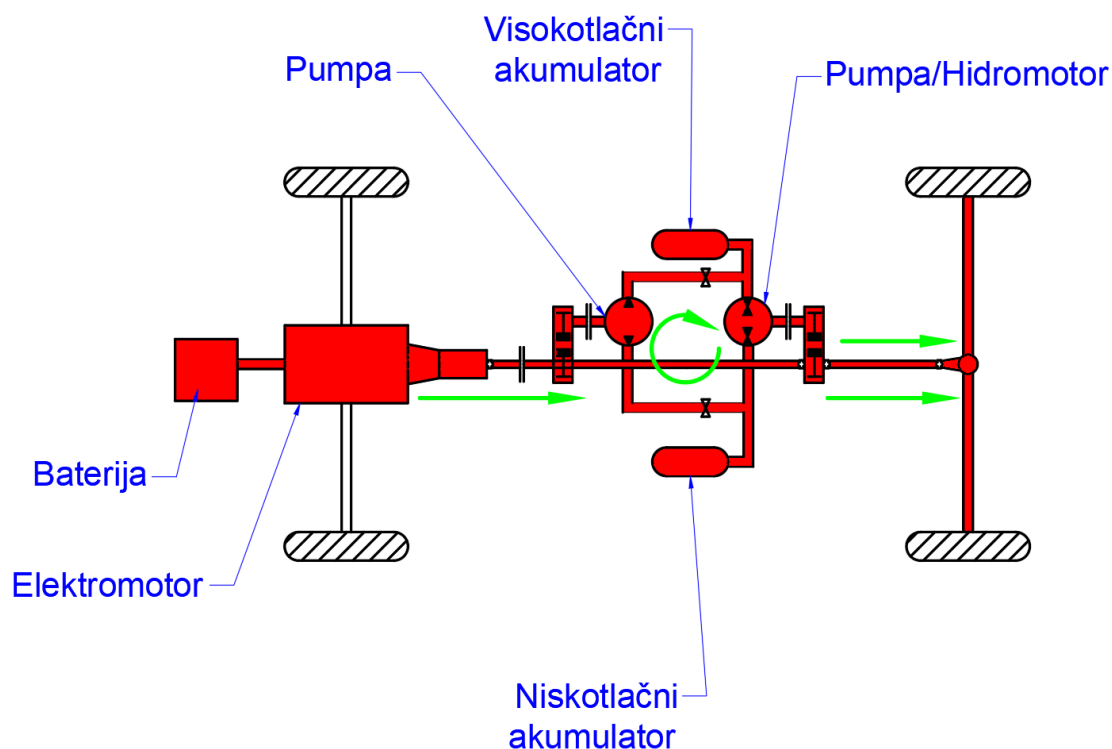
Slika 4.6 – Shematski prikaz rada vozila u načinu ubrzavanja korištenjem hidrostatske transmisije

Način produženog ubrzavanja je četvrti način rada hibridnog vozila. Kada vozilu treba duže vrijeme da postigne radnu brzinu, kada se kreće iz mjesta uz velik teret, ili na uzvisini, tada istovremeno rade i elektromotor i hidromotor. U ovom načinu rada se koristi manje električne energije nego kod konvencionalnih električnih vozila. Protok energije i radne tekućine pri kretanju vozila prikazan je na slici 4.7.



Slika 4.7 – Shematski prikaz rada vozila u načinu produženog ubrzavanja

Peti način rada se naziva način dvostrukog ubrzanja. Kada vozilo kreće ili ubrzava, a u visokotlačnom spremniku nema dovoljno radne tekućine za pogon hidromotora, a elektromotor ne ostvaruje dovoljni moment za pokretanje vozila, tada se aktivira hidrostatski pogon za pomoć pri kretanju. Kako odabrana komponenta pumpa/hidromotor u ovom režimu rada funkcionira kao hidromotor, potrebno je u sustav ugraditi dodatnu pumpu koja ostvaruje protok radne tekućine prema hidromotoru. Ova pumpa je odvojena od ostatka sustava ventilima kako ne bi štetno utjecala na rad vozila tijekom kočenja ili laganog ubrzanja. Elektromotor preko razdjelnika snage pogoni vratilo dodatne pumpe što znači da u ovom načinu rada dio energije elektromotora pogoni pogonski sustav vozila, a dio pogoni hidrostatsku transmisiju koja služi za kretanje. Protok energije i radne tekućine pri kretanju vozila prikazan je na slici 4.8.



Slika 4.8 – Shematski prikaz rada vozila u načinu dvostrukog ubrzanja

5. PRORAČUN HIDRAULIČKOG ELEKTRIČNOG HIBRIDNOG VOZILA

Proračun obuhvaća ulazne podatke odabranog vozila, pomoću kojih se određuju pogonski parametri za odabir hidrauličkih komponenata. U radu [4] je odabrano dostavno vozilo *Volkswagen Crafter* TDI400 koje će se također koristiti i u ovom radu s ciljem usporedbe rezultata simulacije. Tvrtka Volkswagen je 2020. godine krenula s proizvodnjom električnog dostavnog vozila *Volkswagen e-Crafter* (slika 5.1). Neke specifikacije se razlikuju između dizel i električne varijante vozila, no za potrebe proračuna koristiti će se ulazni podaci *e-Craftera*, kako je u praksi jednostavnije na postojeće vozilo ugraditi hidrauličke komponente. Kapacitet baterije iznosi 35,8 kWh, masa tereta koja se može prevoziti je između 1 i 1,75 t, uz domet od 115 do 160 km na jednom punjenju baterije [20].



Slika 5.1 – Volkswagen e-Crafter [20]

Ulazni podaci [21]:

- Snaga elektromotora $P_{em} = 100$ kW
- Maksimalna masa vozila $m_{Vmax} = 3500$ kg, uz ubrzanje sile teže $g = 9,81$ težina vozila iznosi $G_{Vmax} = 3500 \cdot 9,81 = 34335$ N
- Promjer kotača $d_k = 28'' = 71,2$ cm = 0,712 m
- Maksimalna brzina vožnje $v = 90$ km/h = 25 m/s
- Površina prednje strane vozila $A = 3,45$ m²

- Koeficijent otpora kretanja vozila, ovisi o obliku $C_d = 0,25 \dots 0,3 = 0,25$
- Vozilo ubrzava od 0 do 100 km/h u 20 s, ubrzanje $a = 1,4 \text{ m/s}^2$
- Nagib ceste po kojoj se vozilo kreće, maksimalan kut $\theta = 14,03^\circ$, predstavlja nagib terena od 25%
- Faktor trenja kotrljanja između gume i asfalta $\mu = 0,02$
- Gustoća zraka pri 25°C $\rho = 1,18 \text{ kg/m}^3$

5.1 Proračun vučne sile vozila

Prvi korak proračuna je izračunavanje vučne sile vozila koja se dobije kao zbroj svih sila otpora koje djeluju na automobil tijekom vožnje.

Sila trenja

$$F_{\text{tr}} = G_{V_{\text{max}}} \cdot \mu = 34335 \cdot 0,02 = 686,7 \text{ N} \quad (5.1)$$

Sila otpora zraka

$$F_{\text{oz}} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot C_d \cdot A}{2} = \frac{1,18 \cdot 25^2 \cdot 0,25 \cdot 3,45}{2} = 318,04 \text{ N} \quad (5.2)$$

Sila otpora ubrzanja

$$F_{\text{in}} = m_{V_{\text{max}}} \cdot a = 3500 \cdot 1,4 = 4900 \text{ N} \quad (5.3)$$

Sila otpora nagiba ceste

$$F_{\text{on}} = m_{V_{\text{max}}} \cdot g \cdot \sin \theta = 3500 \cdot 9,81 \cdot \sin 14,03^\circ = 8323,83 \text{ N} \quad (5.4)$$

Vučna sila

$$F_V = F_{\text{tr}} + F_{\text{oz}} + F_{\text{in}} + F_{\text{on}} = 686,7 + 318,04 + 4900 + 8323,83 = 14228,58 \text{ N} \quad (5.5)$$

Maksimalni moment na kotačima vozila

$$T_{V\max} = F_V \cdot \frac{d_k}{2} = 14228,58 \cdot \frac{0,3556}{2} = 5059,68 \text{ Nm} \quad (5.6)$$

5.2 Proračun pumpe/hidromotora

Moment na vratilu pumpe/hidromotora se računa kao maksimalni moment na kotačima automobila podijeljen sa zbrojem koeficijenata diferencijalnog omjera mjenjača vozila i omjera mjenjača za odvod snage:

- Diferencijalni omjer mjenjača $i_d = 4$; ovisi o vozilu, a vrijednost od 4 je srednja vrijednost dobivena analizom više različitih dostavnih vozila
- Omjer mjenjača za odvod snage $i_{pto} = 2$

$$T_{shf} = \frac{T_{V\max}}{i_d + i_{pto}} = \frac{5059,68}{4 + 2} = 843,28 \text{ Nm} \quad (5.7)$$

Za izbor pumpe/hidromotora se prvo pretpostavlja pad tlaka. Ovisno o masi i brzini vozila pretpostavlja se pad tlaka $\Delta p = 350$ bar, uz hidromehaničku iskoristivost pumpe/hidromotora $\eta_{hm} = 0,98$. Odavde slijedi:

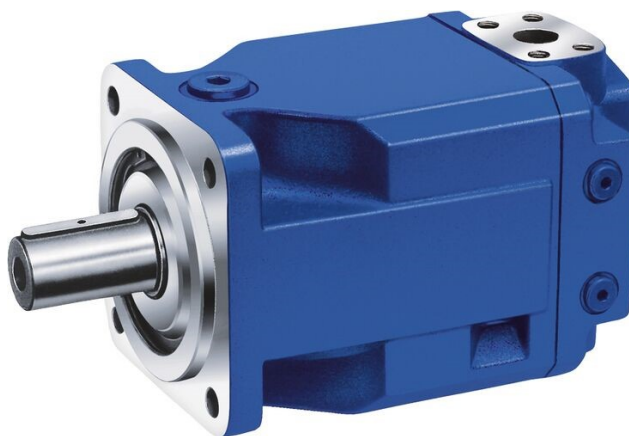
Teoretski moment na vratilu pumpe/hidromotora

$$T_{th} = T_{shf} \cdot \eta_{hm} = 843,28 \cdot 0,98 = 826,41 \text{ Nm} \quad (5.8)$$

Specifični protok pumpe/hidromotora

$$Q_1 = \frac{2\pi \cdot T_{th}}{\Delta p} = \frac{2\pi \cdot 826,41}{350 \cdot 10^5} = 0,000148 \text{ m}^3 = 148,36 \text{ cm}^3 \quad (5.9)$$

Prema ovim podacima bira se pumpa/hidromotor iz kataloga proizvođača. Izabrana je aksijalno klipna pumpa/hidromotor *Bosch Rexroth A4FM-250* (slika 5.2) [22].



Slika 5.2 – Odabrana pumpa *Bosch Rexroth A4FM-250* [22]

Glavne specifikacije odabrane pumpe/hidromotora su:

- Specifični protok pumpe/hidromotora $Q_1 = 250 \text{ cm}^3$
- Maksimalna brzina $n_{\max} = 2200 \text{ okr/min}$
- Maksimalni protok $Q_{\max} = 550 \text{ l/min}$
- Nominalni tlak $\Delta p = 350 \text{ bar}$
- Maksimalni tlak $\Delta p_{\max} = 400 \text{ bar}$
- Maksimalni moment $T_{\max} = 1393 \text{ Nm}$

U petom opisanom režimu rada hibridnog sustava, odnosno u načinu dvostrukog ubrzavanja ugrađuje se dodatna hidraulička pumpa. Dodatna pumpa služi samo za povećanje protoka prema hidromotoru, pa nije potrebno odabrati komponentu jednakog specifičnog protoka. Na taj način se smanjuje ukupna masa i cijena sustava. Uzima se u obzir da dodatna pumpa radi na 50% specifičnog protoka glavne pumpe/hidromotora, tj. specifični protok pumpe iznosi 125 cm^3 , te se odabire pumpa *Bosch Rexroth A4FM-125*.

5.3 Proračun hidrauličkog akumulatora

Slijedeći korak proračuna je određivanje kinetičke energije kočenja, preko koje se dobivaju potrebni podaci za odabir visokotlačnog spremnika.

Kinetička energija kočenja za brzinu od 90 km/h = 25 m/s.

$$E_B = \frac{mv^2}{2} = \frac{3500 \cdot 25^2}{2} = 1093750 \text{ J} \quad (5.10)$$

Zbog utjecaja hidrauličkih gubitaka, u visokotlačnom se spremniku može pohraniti maksimalno 60% kinetičke energije kočenja.

Kinetička energija kočenja pohranjena u visokotlačnom spremniku

$$E_{B1} = 0,6E_B = 0,6 \cdot 1093750 = 656250 \text{ J} \quad (5.11)$$

Pretpostavljaju se svojstva visokotlačnog spremnika:

- Volumen $V_0 = 50 \text{ l} = 0,05 \text{ m}^3$
- Minimalni tlak $p_1 = 200 \text{ bar}$
- Maksimalni tlak $p_2 = 330 \text{ bar}$

Tlak u visokotlačnom spremniku prije nego je pun je za 10% manji od minimalnog tlaka u spremniku, odnosno:

$$p_0 = 0,9 \cdot p_1 = 0,9 \cdot 200 = 180 \text{ bar} \quad (5.12)$$

Slijedeći korak je izračun količine ulja koja će se nalaziti u spremniku, koja se dobije preko izraza za izmjenu topline između termodinamičkog sustava spremnika i njegove okoline. Pretpostavlja

se adijabatski proces uz koeficijent adijabate ulja $\kappa = 1,67$. Prema tome, maksimalni volumen ulja u spremniku iznosi:

$$V_{\text{oil}} = V_0 \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right] \quad (5.13)$$

$$V_{\text{oil}} = 50 \left(\frac{180}{200}\right)^{\frac{1}{1,67}} \cdot \left[1 - \left(\frac{180}{330}\right)^{\frac{1}{1,67}}\right] = 14,28 \text{ l} = 0,01428 \text{ m}^3$$

Maksimalna energija pohranjena u visokotlačnom spremniku

$$E_A = p_2(V_0 - V_{\text{oil}}) - p_0V_0 \quad (5.14)$$

$$E_A = 330 \cdot 10^5(0,05 - 0,01542) - 180 \cdot 10^5 \cdot 0,05 = 278475,6 \text{ J}$$

Prema dobivenim podacima je potrebno odabrati odgovarajući visokotlačni spremnik iz kataloga proizvođača. Odabran je visokotlačni spremnik s mješom *Bosch Rexroth HAB 20-330* (slika 5.3), čiji je nominalni volumen 20 l, a maksimalni tlak 330 bar. Ovakav hidraulički akumulator u sebi sadrži elastičnu dijafragmu koja dijeli komoru u koju utječe ulje od komore u kojoj se nalazi plin, najčešće dušik [23].



Slika 5.3 - Hidraulički akumulator Bosch Rexroth HAB [23]

Niskotlačni spremnik nije potrebno proračunavati, već se samo odabere prema minimalnom odabranom tlaku spremnika. Odabran je niskotlačni spremnik *Bosch Rexroth* HAB 20-207 čiji je nominalni volumen 20 l, a maksimalni tlak 207 bar.

5.4 Proračun hidrauličkih cijevi

Hidrauličke komponente su povezane cijevima, te je potrebno proračunati njihove promjere, debljine stijenke, materijal i kvalitetu zavara. Unutarnji promjer cijevi računa se prema izrazu

$$d_u = \sqrt{\frac{4Q_{\max}}{\pi v_s}} \quad (5.15)$$

Gdje je:

- Q_{\max} maksimalni protok kroz cijev, definiran protokom hidrauličkih komponenti (pumpe i hidromotora), maksimalni protok pumpe/hidromotora dobiven kao rezultat simulacijskih modela iznosi 465 l/min, $Q_{\max} = 465 \text{ l/min} = 7,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
- v_s je srednja dopuštena brzina strujanja radne tekućine, koja ovisi o tlaku u cjevovodu, za maksimalni tlak od 350 bar, $v_s = 7,875 \text{ m/s}$ [24]

Unutarnji promjer cijevi

$$d_u = \sqrt{\frac{4Q_{\max}}{\pi v_s}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7,75 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 7,875}} = 0,0354 \text{ m} = 35,4 \text{ mm}$$

Usvojena vrijednost unutarnjeg promjera cijevi iznosi $d_u = 40 \text{ mm}$.

Debljina stijenke cijevi računa se prema izrazu

$$s_{\min} = \frac{d_u p}{20 \frac{K}{S} v - 2p} \quad (5.16)$$

Gdje je

- d_u unutarnji promjer cijevi, $d_u = 40$ mm
- p tlak u cijevima, $p = 350$ bar
- K čvrstoća materijala, za čelik Č0545 iznosi $K = 470$ N/mm²
- S faktor sigurnosti, kreće se u granicama od 1,5 do 1,8, odabrano $S = 1,7$
- v_{kz} faktor kvalitete zavara, za bešavne cijevi iznosi $v = 1$

Prema tome proizlazi debljina stijenke cijevi

$$s_{\min} = \frac{d_u p}{20 \frac{K}{S} v_{kz} - 2p} = \frac{40 \cdot 350}{20 \cdot \frac{470}{1,7} \cdot 1 - 2 \cdot 350} = 2,89 \text{ mm}$$

Usvaja se vrijednost debljine stijenke cijevi $s_{\min} = 3$ mm. Ovoj vrijednosti je još potrebno pribrojiti c_1 dodatak zbog netočnosti izrade koji je 10 puta manji od usvojene debljine, odnosno $c_1 = 0,3$ mm i c_2 dodatak zbog istrošenosti uzrokovane korozijom koji iznosi 1 mm. Prema tome ukupna debljina stijenke cijevi iznosi 4,3 mm, odnosno usvojena vrijednost iznosi $s = 4,5$ mm. Prema standardu DIN 2391 odabire se bešavna cijev 40x4,5 mm.

Kao hidraulička tekućina korištena u hibridnom sustavu odabire se mineralno ulje ISO VG 68. Ovakvo mineralno ulje može se nabaviti pod nazivom INA Epol SP 68, a njegova svojstva su prikazana u tablici 5.1 [25].

Tablica 5.1 - Svojstva odabranog mineralnog ulja INA Epol SP 68 [25]

| Svojstva | INA EPOL SP | | | | | | | | | Metoda |
|--|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| ISO VG | 68 | 100 | 150 | 220 | 320 | 460 | 680 | 800 | 1000 | ISO 3448 |
| ANSI/AGMA 9005-E02 | 2EP | 3EP | 4EP | 5EP | 6EP | 7EP | 8EP | - | - | - |
| Gustoća pri 15 °C, g/cm ³ | 0,88 | 0,89 | 0,893 | 0,898 | 0,902 | 0,906 | 0,916 | 0,924 | 0,932 | ASTM D 4052 |
| Kinematička viskoznost, mm ² /s | | | | | | | | | | |
| - pri 40 °C | 68 | 100 | 150 | 220 | 320 | 460 | 680 | 800 | 940 | ISO 3104 |
| - pri 100 °C | 8,5 | 11,0 | 14,4 | 18,6 | 23,6 | 29,9 | 37,6 | 38,1 | 42,1 | |
| Indeks viskoznosti | 94 | 92 | 93 | 93 | 93 | 93 | 91 | 80 | 80 | ISO 2909 |
| Plamište, (COC) °C | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 290 | 290 | ISO 2592 |
| Tecište, °C | -24 | -22 | -22 | -22 | -21 | -16 | -11 | -6 | -6 | ISO 3016 |
| Korozivnost (Cu, 100 °C, 3 h) | 1 b | 1 b | 1 b | 1 b | 1 b | 1 b | 1 b | 1 b | 1 b | ISO 2160 |
| Deemulzivnost | | | | | | | | | | |
| - slobodna voda, ml | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | ASTM D 2711 |
| - emulzija, ml | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | |
| - voda u ulju, % | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | |
| Izdvajanje vode (deemulzivnost) | | | | | | | | | | |
| - pri 54 °C, 40-37-3 ml, min | 20 | - | - | - | - | - | - | - | - | ISO 6614 |
| - pri 82 °C, 40-37-3 ml, min | - | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| EP Test - točka zavarivanja, N | 3150 | 3150 | 3150 | 3150 | 3150 | 3150 | 3150 | 3150 | 3150 | ASTM D 2783 |
| Srednji promjer istrošenja (193 N/1800 min ⁻¹ /54 °C/1 h), mm | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | ASTM D 4172 |
| FZG, A/8,3/90, prolazi | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | ISO 14635-1 |
| Timken, N | 295 | 295 | 295 | 295 | 295 | 295 | 295 | 295 | 295 | ASTM D 2782 |

Pad tlaka u cijevima se izračunava prema izrazu

$$\Delta p_c = \lambda \frac{\rho v^2}{2} \cdot \frac{l}{d_u} \quad (5.17)$$

Gdje je:

- λ faktor trenja strujanja ulja kroz cijevi
- ρ_u gustoća ulja, $\rho_u = 0,88 \text{ g/cm}^3 = 880 \text{ kg/m}^3$
- v_{rt} brzina strujanja radne tekućine
- l duljina cijevi, pretpostavlja se da iznosi $l = 0,5 \text{ m}$
- d_u unutarnji promjer cijevi, $d_u = 40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m}$

Uz pretpostavku da je strujanje ulja kroz cijevi laminarno, faktor trenja iznosi

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{2300} = 0,0278 \quad (5.18)$$

Brzina strujanja ovisi o maksimalnom protoku kroz hidrauličke komponente i površini poprečnog presjeka cijevi, računa se prema izrazu

$$v_{rt} = \frac{Q_{max}}{\frac{d_u^2 \pi}{4}} = \frac{9,167 \cdot 10^{-3}}{\frac{0,04^2 \cdot \pi}{4}} = 7,29 \text{ m/s} \quad (5.19)$$

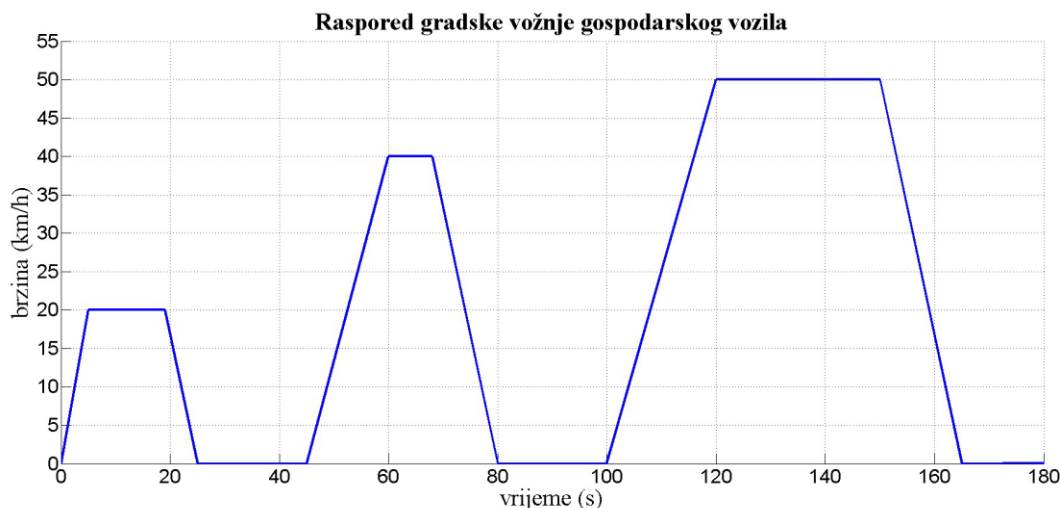
Prema tome, pad tlaka u cijevima iznosi

$$\Delta p_c = \lambda \frac{\rho_u v_{rt}^2}{2} \cdot \frac{l}{d_u} = 0,0278 \cdot \frac{880 \cdot 7,29^2}{2} \cdot \frac{0,5}{0,04} = 8125,73 \text{ Pa} = 0,08 \text{ bar} \quad (5.20)$$

Kako nominalni tlak u hidrauličkom sustavu iznosi 350 bar, vrijednost pada tlaka u cijevima od približno 0,08 bar se može zanemariti.

5.5 Proračun uštede energije za gradsku vožnju

Promatrajući ciklus vožnje kod standardizirane gradske testne vožnje po europskim gradovima – SORT (*Standardised On-Road Test*), moguće je odrediti količinu energije potrebnu za standardnu gradsku vožnju dostavnog vozila, kao i količinu energije koja se može uštedjeti korištenjem hidrauličkog hibridnog sustava. Slika 5.4 prikazuje ovakav ciklus gradske vožnje, ovisnost brzine o vremenu. Za SORT test se pretpostavlja da je cesta ravna [4].



Slika 5.4 – Ovisnost brzine o vremenu vožnje kod SORT testa [4]

Ukupni utrošeni rad vozila jednak je zbroju rada koje vozilo obavi tijekom ubrzavanja i tijekom vožnje konstantnom brzinom.

$$W_{uk} = W_u + W_k \quad (5.21)$$

Rad se računa kao umnožak vučne sile vozila i puta koji vozilo prođe. Ukupni rad tijekom ubrzavanja vozila je zbroj pojedinačnih radova kada vozilo ubrzava, odnosno iz slike 17, to se odvija između 0. i 5. s kada vozilo ubrzava s 0 na 20 km/h, između 45. i 60. s gdje ubrzava s 0 na 40 km/h i između 100. i 120. s kada vozilo ubrzava s 0 na 50 km/h.

$$W_u = F_u \cdot s_u = F_{u1} \cdot s_{u1} + F_{u2} \cdot s_{u2} + F_{u3} \cdot s_{u3} \quad (5.22)$$

Vučna sila vozila tijekom ubrzavanja jednaka je zbroju otpora koji se javljaju tijekom vožnje.

$$F_{u1} = F_{k1} + F_{z1} + F_{in1} \quad (5.23)$$

Gdje je F_{k1} sila otpora kotrljanja i ona je jednaka za svaki slučaj ubrzavanja vozila. Računa se kao umnožak mase vozila m , ubrzanja sile teže g i faktora trenja između kotača i ceste μ .

$$F_{k1} = F_{k2} = F_{k3} = m \cdot g \cdot \mu = 3500 \cdot 9,81 \cdot 0,02 = 686,7 \text{ N} \quad (5.24)$$

F_{z1} je sila aerodinamičkog otpora zraka i izračunava se prema izrazu

$$F_{z1} = \frac{1}{2} \rho c A v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,18 \cdot 0,25 \cdot 3,45 \cdot 5,56^2 = 15,73 \text{ N} \quad (5.25)$$

Gdje je ρ gustoća zraka, c je aerodinamički koeficijent otpora, A je površina prednje strane vozila, a v je brzina kretanja vozila. Za $v = 20 \text{ km/h} = 5,56 \text{ m/s}$ sila aerodinamičkog otpora iznosi 15,73 N.

Za izračun otpora ubrzanja vozila, potrebno je poznavati vrijednost ubrzanja u pojedinom trenutku. U prvom intervalu od 0. do 5. s se brzina promijeni s 0 na 20 km/h, tj. 5,56 m/s. Kako je ubrzanje promjena brzine u vremenu, slijedi

$$a_1 = \frac{v_1 - v_0}{t_1 - t_0} = \frac{5,56 - 0}{5 - 0} = 1,112 \text{ m/s}^2 \quad (5.26)$$

Sila otpora ubrzanja

$$F_{in1} = ma_1 = 3500 \cdot 1,112 = 3892 \text{ N} \quad (5.27)$$

Vučna sila za prvi segment ubrzavanja vozila

$$F_{u1} = F_{k1} + F_{z1} + F_{in1} = 686,7 + 15,73 + 3892 = 4594,43 \text{ N} \quad (5.28)$$

Potrebno je još poznavati put koji vozilo prođe za vrijeme ubrzavanja

$$s_{u1} = \frac{a_1 t_1^2}{2} = \frac{1,112 \cdot 5^2}{2} = 13,9 \text{ m} \quad (5.29)$$

Postupak se ponavlja za drugi i treći ciklus ubrzavanja vozila.

Sila aerodinamičkog otpora zraka za drugi ciklus, kada vozilo ubrzava s 0 na 40 km/h, tj. 11,1 m/s tijekom vremena od 45. do 60. s.

$$F_{z2} = \frac{1}{2} \rho c A v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,18 \cdot 0,25 \cdot 3,45 \cdot 11,1^2 = 62,7 \text{ N} \quad (5.30)$$

Ubrzanje za drugi ciklus

$$a_2 = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{11,1 - 0}{60 - 45} = 0,74 \text{ m/s}^2 \quad (5.31)$$

Sila otpora ubrzanja

$$F_{in2} = m a_2 = 3500 \cdot 0,74 = 2590 \text{ N} \quad (5.32)$$

Vučna sila za drugi segment ubrzavanja vozila

$$F_{u2} = F_{k2} + F_{z2} + F_{in2} = 686,7 + 62,7 + 2590 = 3339,4 \text{ N} \quad (5.33)$$

Put koji vozilo prođe tijekom drugog ciklusa ubrzavanja

$$s_{u2} = \frac{a_2 t_2^2}{2} = \frac{0,74 \cdot 15^2}{2} = 83,25 \text{ m} \quad (5.34)$$

Sila aerodinamičkog otpora zraka za treći ciklus, kada vozilo ubrzava s 0 na 50 km/h, tj. 13,89 m/s tijekom vremena od 100. do 120. s.

$$F_{z3} = \frac{1}{2} \rho c A v_3^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,18 \cdot 0,25 \cdot 3,45 \cdot 13,89^2 = 98,18 \text{ N} \quad (5.35)$$

Ubrzanje za treći ciklus

$$a_3 = \frac{v_3 - v_2}{t_3 - t_2} = \frac{13,89 - 0}{120 - 100} = 0,6945 \text{ m/s}^2 \quad (5.36)$$

Sila otpora ubrzanja

$$F_{in3} = ma_3 = 3500 \cdot 0,6945 = 2430,75 \text{ N} \quad (5.37)$$

Vučna sila za treći segment ubrzavanja vozila

$$F_{u3} = F_{k3} + F_{z3} + F_{in3} = 686,7 + 98,18 + 2430,75 = 3215,63 \text{ N} \quad (5.38)$$

Put koji vozilo prođe tijekom trećeg ciklusa ubrzavanja

$$s_{u3} = \frac{a_3 t_3^2}{2} = \frac{0,6945 \cdot 20^2}{2} = 138,9 \text{ m} \quad (5.39)$$

Ukupni utrošeni rad tijekom ubrzavanja vozila

$$W_u = F_{u1} \cdot s_{u1} + F_{u2} \cdot s_{u2} + F_{u3} \cdot s_{u3} = 4594,43 \cdot 13,9 + 3339,4 \cdot 83,25 + 3215,63 \cdot 138,9 \quad (5.40)$$

$$W_u = 788518,63 \text{ J}$$

Još je potrebno odrediti rad utrošen tijekom vožnje konstantnom brzinom. Prvi ciklus je od 5. do 19. s 20 km/h, drugi od 60. do 68. s 40 km/h, te treći od 120. do 150. s 50 km/h. Ovaj se rad računa kao umnožak vučne sile i prijeđenog puta za svaki ciklus vožnje konstantnom brzinom.

$$W_k = F_k \cdot s_k = F_{k1} \cdot s_{k1} + F_{k2} \cdot s_{k2} + F_{k3} \cdot s_{k3} \quad (5.41)$$

Vučna sila za prvi ciklus vožnje

$$F_{k1} = F_{k1} + F_{z1} = 686,7 + 15,73 = 702,43 \text{ N} \quad (5.42)$$

Put koji vozilo prođe tijekom prvog ciklusa vožnje konstantom brzinom

$$s_{k1} = v_1 \cdot t_{k1} = 5,56 \cdot 14 = 77,84 \text{ m} \quad (5.43)$$

Vučna sila za drugi ciklus vožnje

$$F_{k2} = F_{k2} + F_{z2} = 686,7 + 62,7 = 749,4 \text{ N} \quad (5.44)$$

Put koji vozilo prođe tijekom drugog ciklusa vožnje konstantom brzinom

$$s_{k2} = v_2 \cdot t_{k2} = 11,1 \cdot 8 = 88,8 \text{ m} \quad (5.45)$$

Vučna sila za treći ciklus vožnje

$$F_{k3} = F_{k3} + F_{z3} = 686,7 + 98,18 = 784,88 \text{ N} \quad (5.46)$$

Put koji vozilo prođe tijekom trećeg ciklusa vožnje konstantom brzinom

$$s_{k3} = v_3 \cdot t_{k3} = 13,89 \cdot 30 = 416,7 \text{ m} \quad (5.47)$$

Ukupni utrošeni rad tijekom vožnje konstantnom brzinom

$$W_k = F_{k1} \cdot s_{k1} + F_{k2} \cdot s_{k2} + F_{k3} \cdot s_{k3} = 702,43 \cdot 77,84 + 749,4 \cdot 88,8 + 784,88 \cdot 416,7 \quad (5.48)$$

$$W_k = 448283,37 \text{ J}$$

Ukupni utrošeni rad vozila za SORT test

$$W_{uk} = W_u + W_k = 788518,63 + 448283,37 = 1236802 \text{ J} = 1,23 \text{ MJ} \quad (5.49)$$

Slijedeći korak je određivanje energije koju je moguće apsorbirati regenerativnim kočenjem. Regenerativno kočenje se koči do brzine od 10 km/h = 2,78 m/s, a nakon toga se aktiviraju mehaničke kočnice koje zaustavljaju vozilo do brzine 0 m/s. Prema slici 17, vozilo koči u tri ciklusa. Prvi ciklus kočenja je između 19. i 25. s kada vozilo usporava s 20 km/h = 5,56 m/s na 0 m/s, drugi ciklus javlja se između 68. i 80. s kada vozilo počinje kočiti na brzini od 40 km/h = 11,1 m/s do 0 m/s, i treći ciklus kočenja je između 150. i 165. s kada vozilo koči s brzine 50 km/h = 13,89 m/s na 0 m/s.

Energija koja se apsorbira regenerativnim kočenjem

$$E_{rk} = E_{rk1} + E_{rk2} + E_{rk3} \quad (5.50)$$

$$E_{rk} = \frac{m(v_1 - v_k)^2}{2} + \frac{m(v_2 - v_k)^2}{2} + \frac{m(v_3 - v_k)^2}{2}$$

$$E_{rk} = \frac{3500 \cdot (5,56 - 2,78)^2}{2} + \frac{3500 \cdot (11,1 - 2,78)^2}{2} + \frac{3500 \cdot (13,89 - 2,78)^2}{2}$$

$$E_{rk} = 350670,075 \text{ J} = 0,35 \text{ MJ}$$

Prema tome moguće je izraziti teoretsku uštedu energije korištenjem regenerativnog kočenja

$$\frac{E_{rk}}{W_{uk}} = \frac{350670,075}{1236802} = 0,28353 = 28,35 \% \quad (5.51)$$

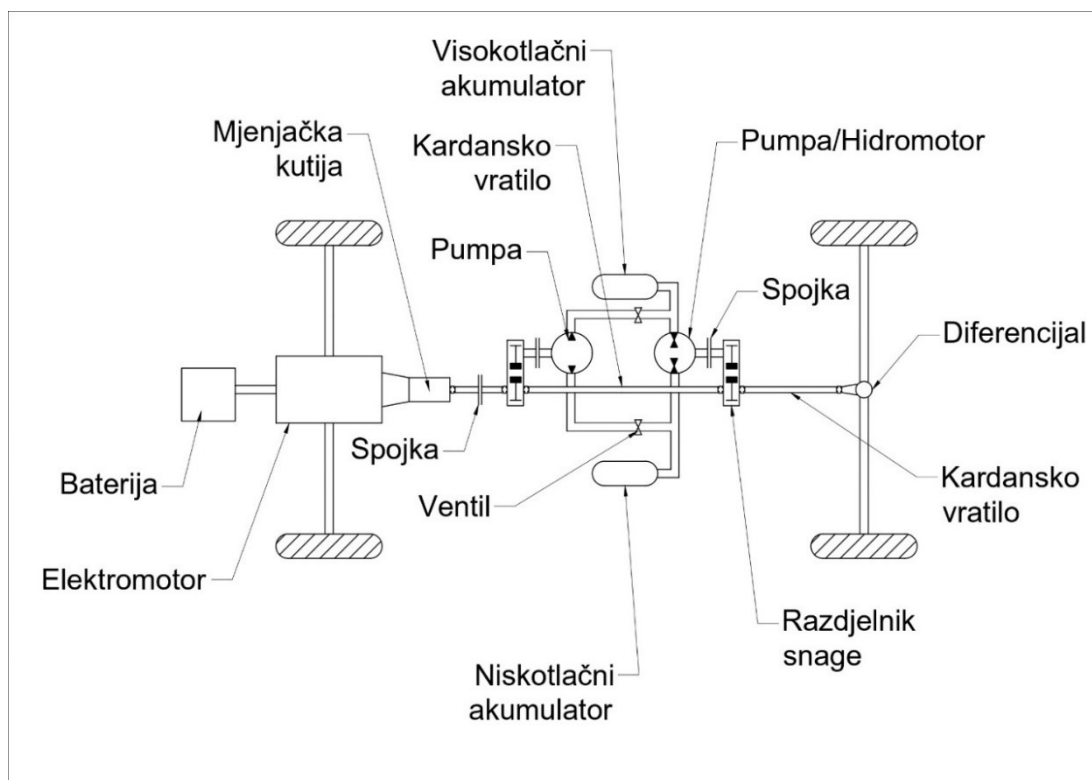
Uzimajući u obzir činjenicu da se regenerativnim kočenjem može 60% energije kočenja pohraniti u visokotlačnom akumulatoru, ušteda energije korištenjem hidrauličkog regenerativnog kočenja iznosi

$$\frac{0,6 \cdot E_{rk}}{W_{uk}} = \frac{0,6 \cdot 350670,075}{1236802} = 0,1701 = 17 \% \quad (5.52)$$

Korištenjem dostavnog vozila kojem je primarni pogon elektromotor (*Volkswagen e-Crafter*), a sekundarni, hibridni hidraulički sustav, te korištenjem regenerativnog kočenja, moguće je uštedjeti i do 17% energije koja bi se toplinom „bacila“ u okoliš kod konvencionalnog vozila. Za usporedbu, rezultat uštede energije za *Volkswagen Crafter* TDI400, kojem je primarni pogon dizel motor, dobiven u radu [4] iznosi 14,8%. Prema tome, korištenjem elektromotora za pogon dostavnog vozila se postiže ekološki prihvatljiviji pogon, a k tome se i veća količina energije može uštedjeti primjenom hidrauličkog hibridnog sustava.

Koncept regenerativnog kočenja se koristi i kod konvencionalnog električnog vozila, gdje se kočenjem vozila pokreće generator preko kojeg se pune baterije vozila. Regenerativno kočenje kod hidrauličkog hibridnog sustava pohranjuje kinetičku energiju u obliku energije tlaka radne tekućine, te koristi tu energiju za pokretanje vozila, što se ostvaruje puno brže, te je moguće pohraniti veću količinu energije u kratkom vremenu. Ovakvo ponovno korištenje energije je brzo, a u načinu rada kada vozilo često koči i kreće, moguće je koristiti za pogon samo energiju koja se regenerira. Teoretski bi to značilo da se vozilo može kretati bez utroška energije.

Slika 5.5 prikazuje shemu svih potrebnih komponenti, njihov raspored i način spajanja potreban za funkcioniranje hidrauličkog električnog hibridnog vozila opisanog kroz pet načina rada (poglavlje 4). Primarni pogon, elektromotor je napajan pomoću baterije, te je preko kardanskog vratila i spojke povezan s pogonskim kotačima, a preko razdjelnika snage može pokretati dodatnu pumpu u načinu dvostrukog ubrzavanja. Hidraulički sustav koji se sastoji od pumpe/hidromotora, visokotlačnog i niskotlačnog akumulatora spojenih hidrauličkim cijevima, je također povezan preko spojki i razdjelnika snage s kardanskim vratilom koje pogoni kotače. Na ovaj način kada vozilo usporava, preko razdjelnika snage se pokreće pumpa. Spojke spajaju i odvajaju pogonske sustave od pogonskih kotača, te o njima ovisi pokreće li se vozilo pomoću elektromotora ili hidrostatske transmisije.



Slika 5.5 – Skica paralelnog hidrauličkog električnog hibridnog vozila

6. IZRADA SIMULACIJSKOG MODELA HIDRAULIČKOG ELEKTRIČNOG HIBRIDNOG VOZILA

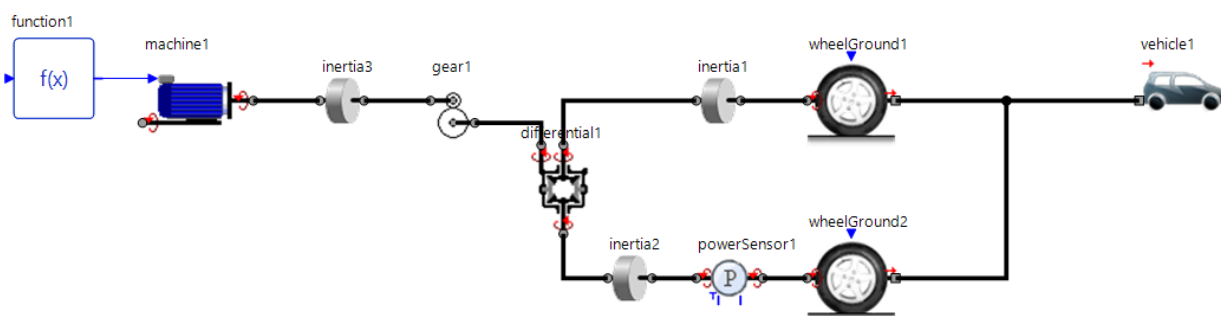
Simulacijski model hidrauličkog električnog hibridnog vozila opisanog kroz poglavlja 4 i 5 je izrađen u softverskom paketu *SimulationX*. Radi se o softveru koji služi za izradu simulacijskih shema grafičkim putem, tj. spajanjem simbola koji predstavljaju hidrauličke, električne i mehaničke komponente. Te komponente se spajaju međusobno vezama koje mogu biti mehaničke (vratila, osovine, spojke), hidrauličke (cijevi), te se mogu spajati pomoću nekog pobudnog signala za aktivaciju ili isključivanje komponenata. Komponentama sustava se definiraju odgovarajući proračunati i odabrani parametri, otpori i gubici tijekom rada, odabiru se izlazni podaci simulacije u obliku grafova ovisnosti o vremenu, te se simulacija pokreće, a softver uzima u obzir razne otpore i fenomene kako bi se simulacija što bliže približila stvarnom funkcioniranju sustava.

Za potrebu rada, ukupni model hidrauličkog električnog hibridnog vozila je raščlanjen na pet jednostavnijih modela, opisanih u poglavlju 4 – vožnja pri konstantnoj brzini korištenjem elektromotora, regenerativno kočenje, lagano ubrzavanje, produženo ubrzavanje i dvostruko ubrzavanje. Svaki od ovih modela funkcionira zasebno i daje rezultate koji su bitni za razumijevanje rada hidrauličkog električnog hibridnog vozila, kao što su brzina vozila, ubrzanje okretni moment, te tlak i volumen ulja u hidrauličkom akumulatoru. Unutar modela se detaljno definiraju parametri svake zasebne komponente, kako bi rezultati simulacije bili što bliži stvarnom radu ovakvog vozila, te se konačni rezultati uspoređuju s proračunatim vrijednostima i prethodno obavljenim radom u kojem je simuliran rad dizel-hidrauličkog hibridnog vozila.

6.1 Simulacijski model vožnje korištenjem elektromotora

Prvi simulacijski model se odnosi na rad vozila jednak konvencionalnom električnom vozilu, u nešto pojednostavljenom obliku. Elektromotor koji dobiva električnu energiju od baterije stvara moment na izlaznom vratilu i preko njega pogoni pogonske kotače vozila. Elektromotor je u modelu predstavljen komponentom *Asynchronous motor*, odnosno asinkroni motor kojem je moguće definirati snagu, nazivni broj okretaja vratila, i frekvenciju napona. Ulazni signal u elektromotor definira njegovo stanje, je li uključen ili isključen u danom vremenskom trenutku simulacije. U ovom slučaju ulazni signal je definiran funkcijom $f(x) = 1$, što znači da je

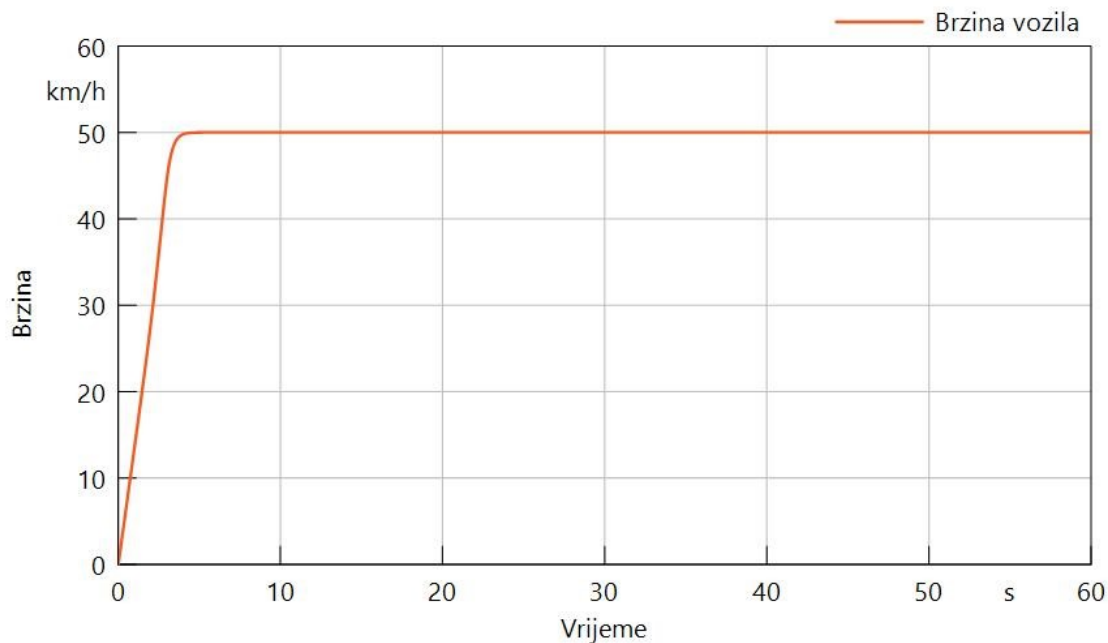
elektromotor upaljen na početku simulacije. Motor je spojen na *Inertia* komponentu koja predstavlja inicijalnu masu rotirajućih dijelova. Nakon *Inertia*-e dolazi *Transmission* komponenta koja predstavlja prijenosni omjer mjenjača vozila. Kako je brzina vrtnje izlaznog vratila konstantna, mijenjanjem prijenosnog omjera mjenjača postižu se različite vrijednosti brzine i izlaznog momenta vozila. Vozilo ima dva pogonska kotača (komponenta *Wheel ground contact*) spojena preko diferencijala (komponenta *Differential gearbox*). Komponenta *Wheel ground contact* uzima u obzir opterećenje vozila na jednom kotaču i promjer kotača. Konačno, na kraju se nalazi komponenta *Vehicle* koja predstavlja vozilo zajedno s ukupnom masom i otporima koji djeluju tijekom vožnje. Komponenta *Power sensor* služi za mjerenje snage i momenta na pogonskom kotaču vozila. Na svakoj komponenti je potrebno definirati pripadajuće parametre, i označiti koje rezultate će softver prikazati u obliku grafa na završetku simulacije. Slika 6.1 prikazuje pojednostavljeni shematski prikaz modela vožnje električnog vozila.



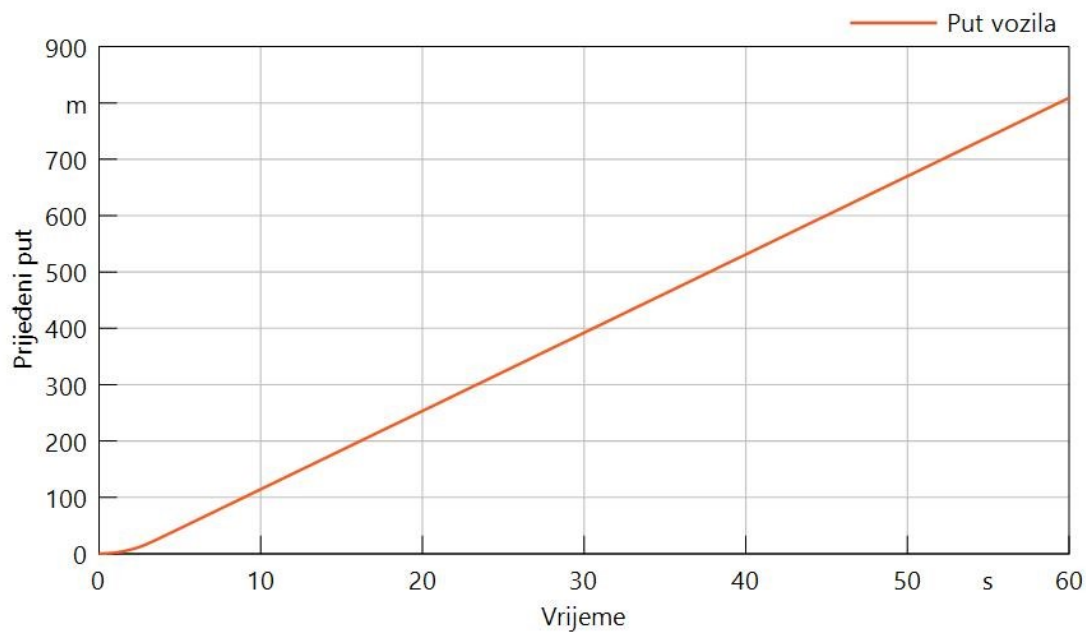
Slika 6.1 – Simulacijski model vožnje korištenjem elektromotora

Elektromotor ima nazivnu snagu od 100 kW pri brzini vrtnje od 1450 okr/min i radnu frekvenciju izvora struje od 50 Hz. Prijenosni omjer mjenjača u ovom slučaju iznosi 8. Sila na pogonskim kotačima iznosi 8583,75 N, odnosno četvrtinu ukupne težine vozila, a promjer kotača iznosi 28''. Parametri vozila su ukupna masa od 3,5 t, koeficijent otpora zraka je 0,25, površina prednje strane vozila 3,45 m², gustoća zraka 1,18 kg/m³, te faktor trenja između kotača i podloge iznosi 0,02. Uvrštavanjem ovih parametara komponenata, na kraju simulacije koja traje 60 s dobivaju se sljedeći rezultati.

Brzina vozila je konstantna i iznosi 50 km/h , a vozilu treba oko 5 s da postigne tu brzinu.



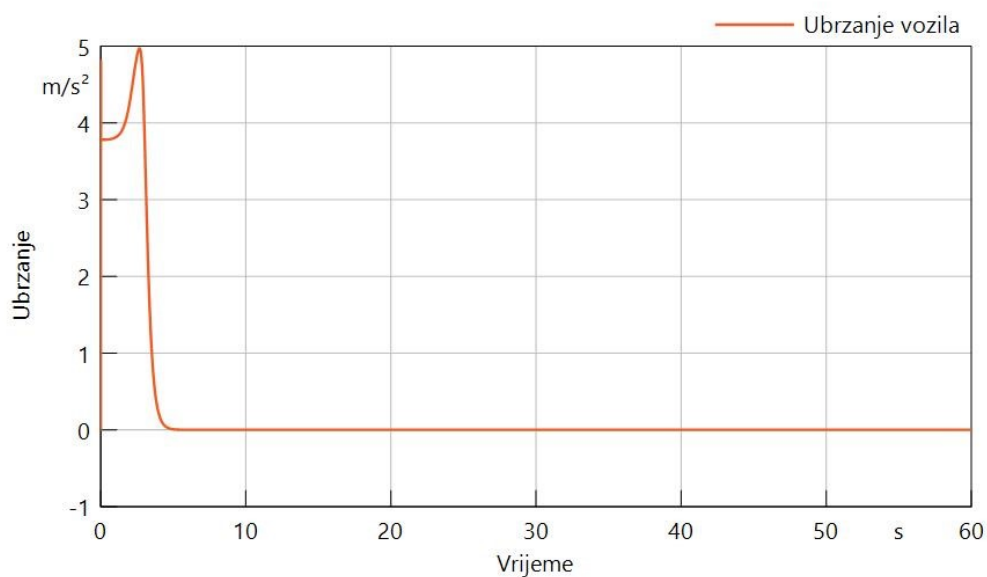
Slika 6.2 - Graf ovisnosti brzine vozila o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora



Slika 6.3 - Graf ovisnosti puta o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora

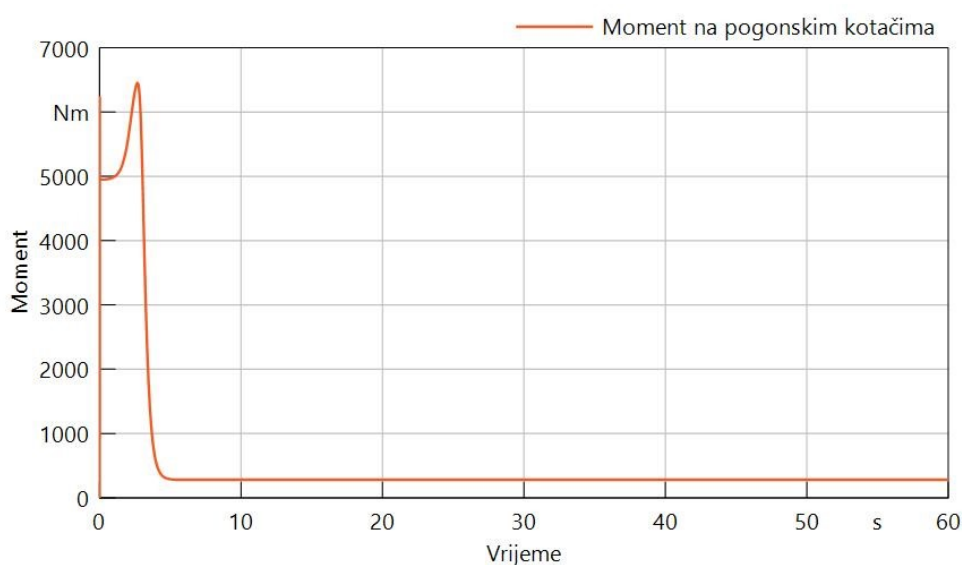
Put koji vozilo prođe za vrijeme odvijanja simulacije iznosi oko 800 m.

Ubrzanje vozila poprima maksimalnu vrijednost od 5 m/s^2 kako bi vozilo postiglo konstantnu brzinu. Kada vozilo ubrza do brzine od 50 km/h kroz 5 s , ubrzanje pada na nulu.



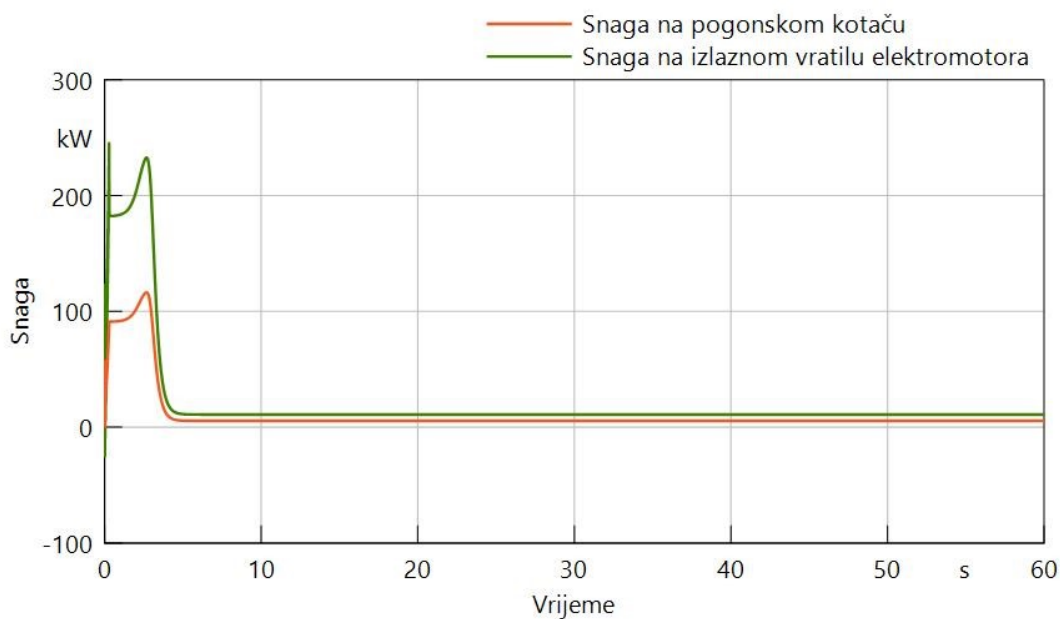
Slika 6.4 – Graf ovisnosti ubrzanja vozila o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora

Moment na pogonskim kotačima, kao i ubrzanje poprima maksimalnu vrijednost prije postizanja konstantne brzine. Maksimalni moment na kotačima javlja se u vremenu od $2,7 \text{ s}$ i iznosi 6450 Nm , no ta vrijednost brzo pada. Moment dobiven proračunom iznosi $5059,68 \text{ Nm}$ i on se javlja na početku simulacije.



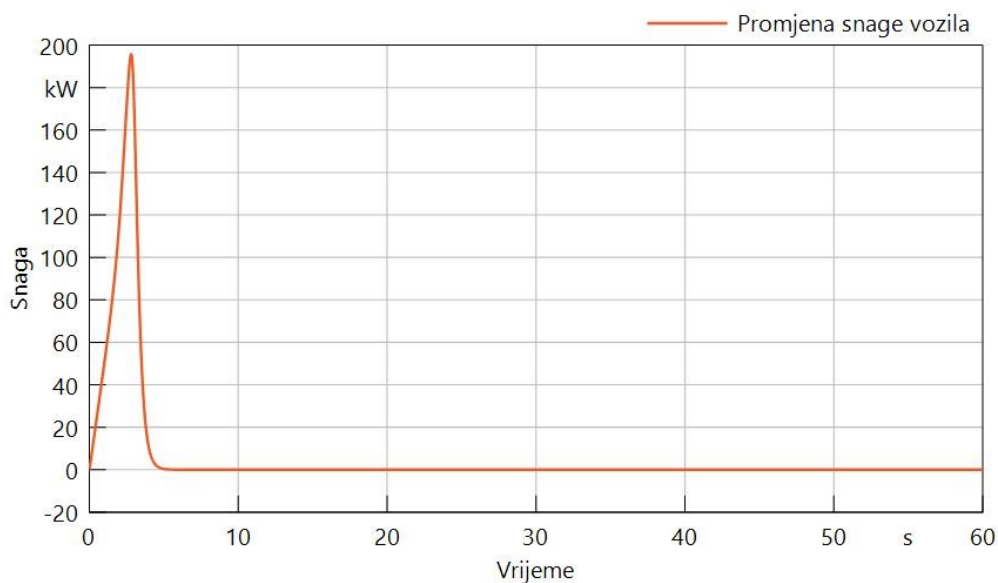
Slika 6.5 – Graf ovisnosti momenta na pogonskim kotačima o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora

Snaga koja se razvija na izlaznom vratilu elektromotora (zeleno) i snaga na pogonskom kotaču (crveno) su prikazane na istom grafu. Maksimalne vrijednosti snaga javljaju se u istom vremenskom trenutku (2,7 s) i iznose 220 kW za elektromotor i 110 kW za pogonski kotač. Uspostavljanjem konstantne brzine vožnje vrijednosti snaga se smanjuju. Snaga na pogonskom kotaču je upola manja od izlazne snage elektromotora, jer diferencijal grana tu snagu na dva kotača.



Slika 6.6 – Graf ovisnosti izlazne snage elektromotora i snage na pogonskom kotaču o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora

Promjena snage vozila tijekom vožnje elektromotornim pogonom. Kako graf prikazuje promjenu snage, ona je maksimalna u trenutku 2,7 s i iznosi 196 kW. Uspostavom konstantne brzine vozila, promjena snage pada u nulu. U *e-Crafteru* se nalazi elektromotor snage 100 kW, a snaga dobivena simulacijom je skoro dvostruko veća jer graf prikazuje promjenu snage potrebnu da se vozilo pomakne iz mirujućeg položaja, odnosno pokazuje trenutno radno opterećenje.

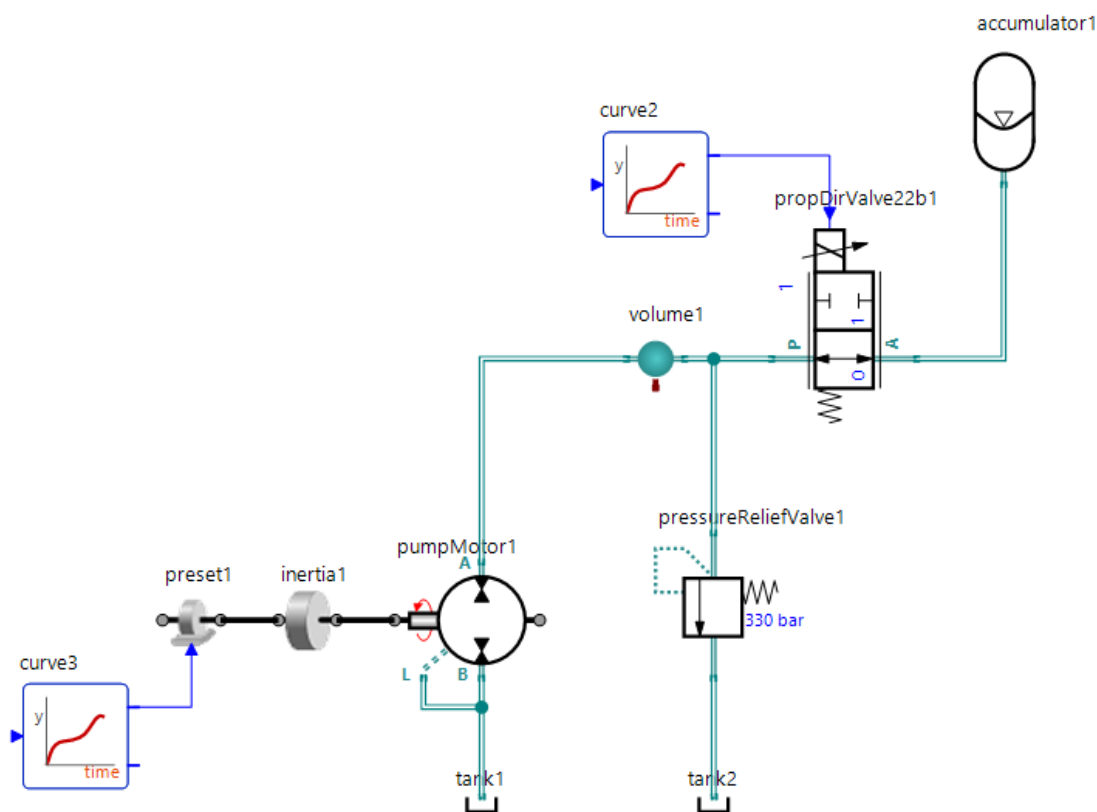


Slika 6.7 - Graf ovisnosti promjene snage vozila o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora

Rezultati dobiveni simulacijom se u određenoj mjeri poklapaju s vrijednostima dobivenima u proračunu. Ako se i javi odstupanje od maksimalne vrijednosti, kao za snagu i moment, to se javlja kod velikih opterećenja vozila kada je potrebno pokrenuti vozilo i svladati uvjete ceste i otpora pri vožnji. Kako se simulacija normalno izvršava i rezultati imaju smisla, zaključuje se da su radni parametri komponenata i njihovo međusobno povezivanje pravilno definirani, te da model funkcionira. Za svrhu uštede energije, ovaj se simulacijski model može nadograditi hidrauličkim hibridnim sustavom.

6.2 Simulacijski model regenerativnog kočenja vozila

U ovom simulacijskom modelu je prikazan princip skladištenja energije tijekom kočenja vozila, koja se pohranjuje u hidraulički akumulator. Model se sastoji od komponente *Preset* koja predstavlja rotacijsko gibanje pogonskog vratila. Vozilo usporava, a pad broja okretaja je definiran linearno preko signala koji ulazi u *Preset*. Pretpostavljeno je da se okretanje pogonskog vratila zaustavi kroz 15 s. Kako vratilo usporava, ono pogoni pumpu koja tlači hidrauličku tekućinu i preko normalno otvorenog razvodnog ventila, tekućina ulazi u hidraulički akumulator. Razvodni ventil tijekom cijele simulacije ostaje otvoren. Komponenta *Tank* predstavlja niskotlačni spremnik radne tekućine. Iako se na shemi pojavljuje više puta, na stvarnom modelu radi se o jednoj komponenti, kako hidraulički sustav mora biti kružno zatvoren. Slika 6.8 prikazuje shematski model regenerativnog kočenja.



Slika 6.8 – Simulacijski model regenerativnog kočenja

Parametri koje je bilo potrebno definirati su specifični protok pumpe od 250 cm^3 , maksimalni pad tlaka od 350 bar i brzina vrtnje od 2200 okr/min. Ovdje se također uzimaju u obzir i hidromehanički gubici pumpe, kao i gubici curenja radne tekućine. Hidraulički akumulator ima

kapacitet od 20 l, a maksimalni tlak je definiran dodavanjem ventila za ograničenje tlaka, koji se uključuje kada tlak u sustavu premaši vrijednost od 330 bar. Rezultati dobiveni simulacijom regenerativnog kočenja prikazani su u nastavku.

Brzina vrtnje pumpe jednaka je brzini vrtnje pogonskog vratila koje usporava. Vozilo usporava od brzine 90 km/h do 20 km/h kroz 15 s. Brzina vrtnje se preko brzine vozila dobiva korištenjem izraza

$$n = \frac{v}{0,1885 \cdot d} \quad (6.1)$$

Gdje je

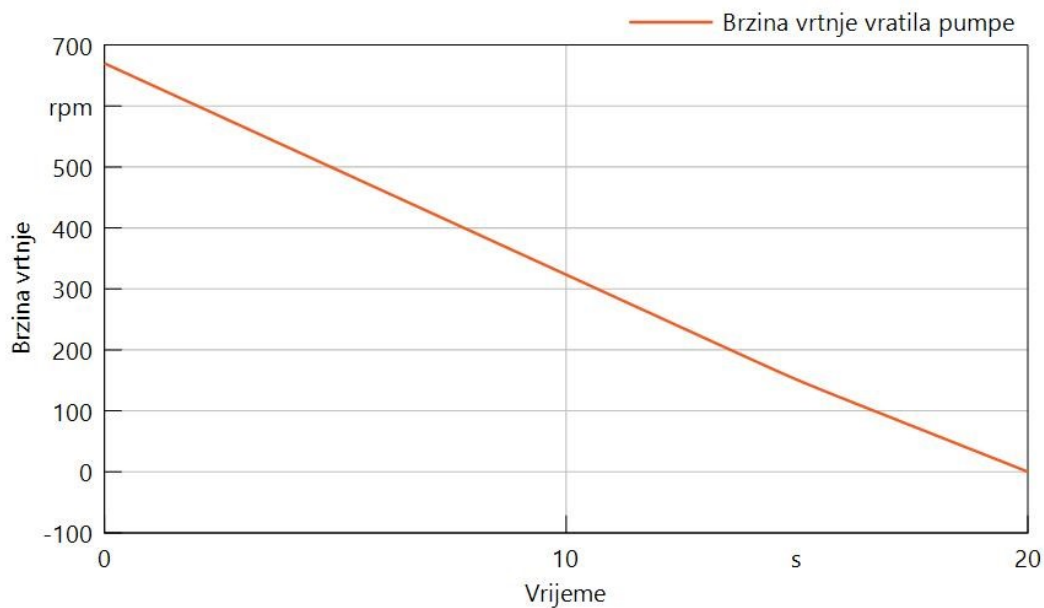
- n brzina vrtnje kotača, a time i pogonskog vratila [okr/min]
- v brzina vozila [km/h]
- d promjer kotača [m]

Brzina vrtnje vratila kada se vozilo kreće 90 km/h

$$n_1 = \frac{v_1}{0,1885 \cdot d} = \frac{90}{0,1885 \cdot 0,712} = 670,58 \text{ okr/min} \quad (6.2)$$

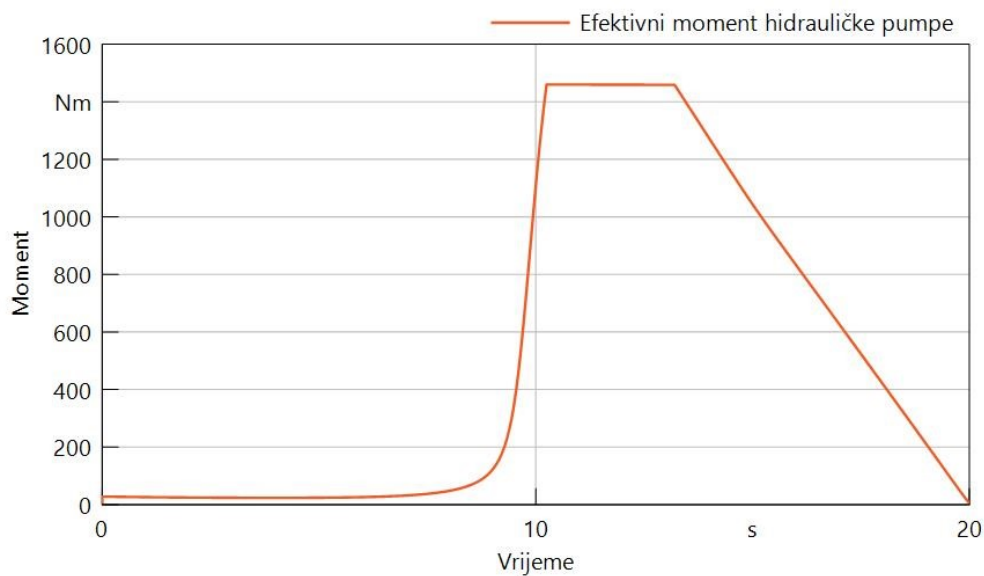
Brzina vrtnje vratila kada se vozilo kreće 20 km/h

$$n_2 = \frac{v_2}{0,1885 \cdot d} = \frac{20}{0,1885 \cdot 0,712} = 149,02 \text{ okr/min} \quad (6.3)$$



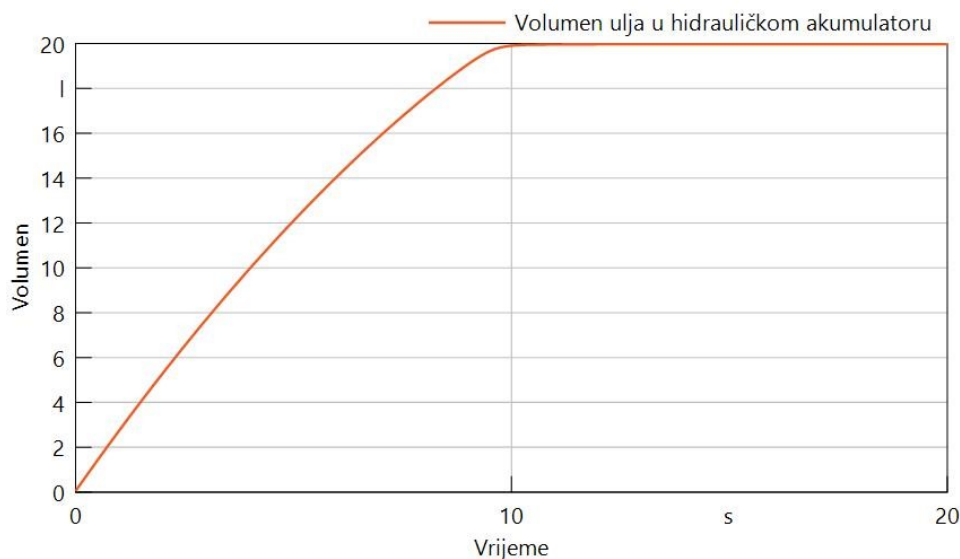
Slika 6.9 – Graf ovisnosti brzine vrtnje ulaznog vratila hidrauličke pumpe o vremenu simulacije

Efektivni moment na pumpi raste kako pumpa duže radi i tlači sve više radne tekućine. Postiže maksimalnu vrijednost od 1460 Nm u vremenu od 10,25 s, kada se postigne maksimalni tlak u akumulatoru, i ta vrijednost ostaje konstantna do 13,2 s, kada moment opada zbog zatvaranja razvodnog ventila nakon pumpe i kako se hidraulički akumulator puni radnom tekućinom.



Slika 6.10 – Graf ovisnosti efektivnog momenta hidrauličke pumpe o vremenu simulacije

Volumen ulja unutar hidrauličkog akumulatora se povećava radom pumpe. U ovakvim uvjetima, hidraulički akumulator kapaciteta 20 l se napuni do kraja za oko 10 s.



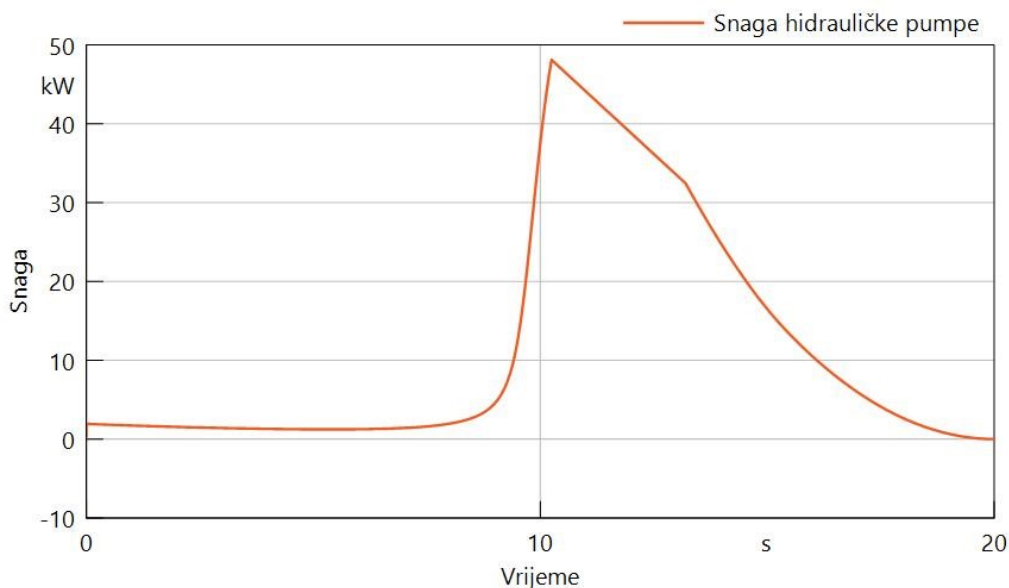
Slika 6.11 – Graf ovisnosti volumena ulja unutar hidrauličkog akumulatora za slučaj regenerativnog kočenja o vremenu simulacije

Tlak ulja unutar hidrauličkog akumulatora raste do maksimalne vrijednosti od 330 bar, koja je definirana ventilom za ograničenje tlaka. Vrijeme potrebno za postizanje maksimalnog tlaka unutar hidrauličkog akumulatora iznosi 10,25 s.



Slika 6.12 – Graf ovisnosti tlaka ulja unutar hidrauličkog akumulatora za slučaj regenerativnog kočenja o vremenu simulacije

Snaga hidrauličke pumpe tijekom regenerativnog kočenja je maksimalna u trenutku kada je tlak u sustavu maksimalne vrijednosti od 330 bar, a snaga iznosi 48 kW. Snaga nakon tog trenutka pada kako je maksimalni tlak postignut, a hidraulički akumulator je napunjen stlačenim radnim fluidom.

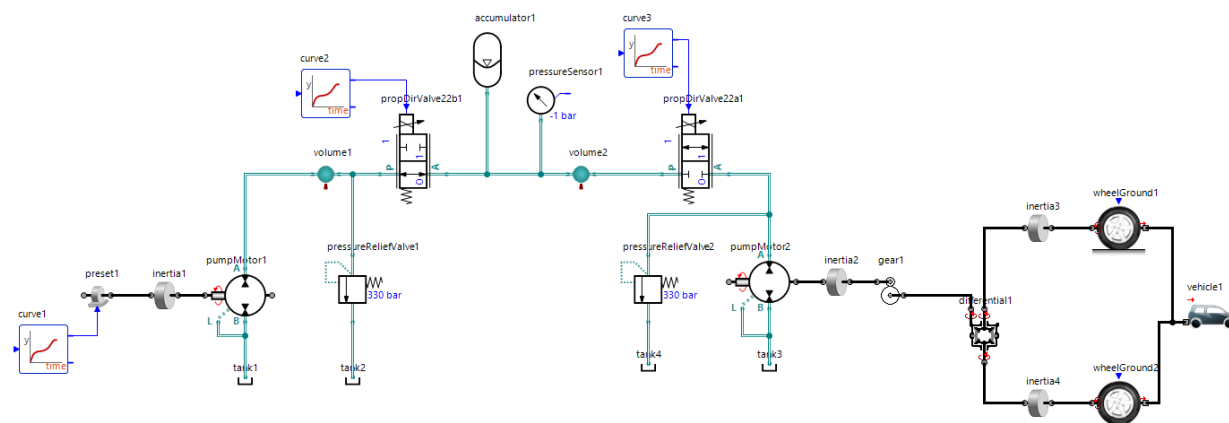


Slika 6.13 – Graf ovisnosti snage hidrauličke pumpe za slučaj regenerativnog kočenja o vremenu simulacije

Prema rezultatima simulacije daje se zaključiti da se kočenjem vozila, odnosno smanjenjem brzine vrtnje pogonskog vratila može pohraniti energija za daljnju uporabu. Kinetička energija koja se kod konvencionalnog kočenja pretvara u toplinu i odlazi u okoliš na ovaj način pogoni pumpu, koja tu kinetičku energije pretvara u energiju tlaka radne tekućine. Kako bi se ova pohranjena energija mogla iskoristiti za dalje, potrebno je nadograditi simulacijski model.

6.3 Simulacijski model laganog ubrzavanja vozila

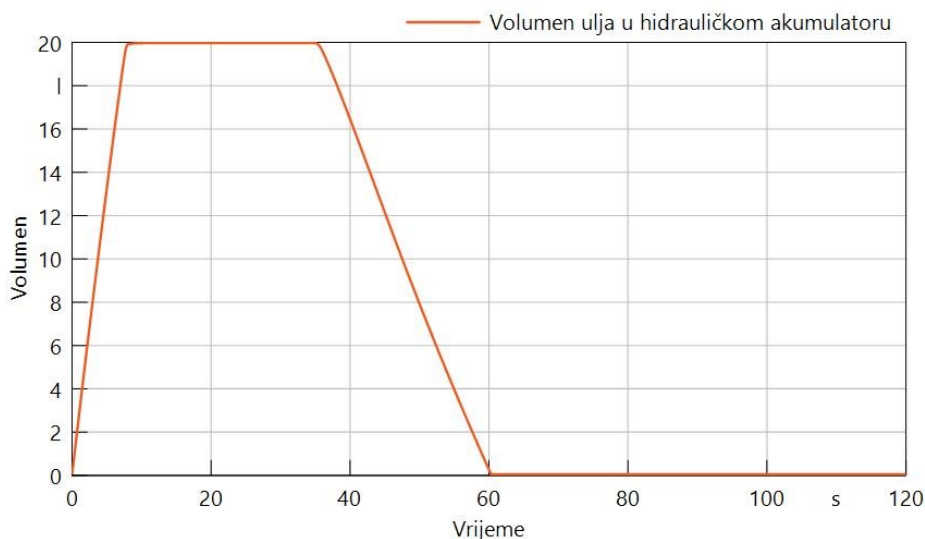
Nadogradnjom prethodnog modela moguće je dobiti simulacijski model u kojem se stlačeni radni fluid spremljen u hidrauličkom akumulatoru koristi za pokretanje hidromotora koji tada pogoni pogonske kotače vozila, te vozilo ubrzava (slika 6.14). U shematskom prikazu modela, nakon hidrauličkog akumulatora dolazi drugi razvodni ventil koji je normalno zatvoren, a otvara se kada je potrebno pogoniti vozilo, odnosno u trenutku kada se zatvori prvi razvodni ventil koji dovodi stlačeni fluid u akumulator. Hidromotor je zatim spojen na komponentu *Transmission*, te na diferencijal, pogonske kotače i konačno na komponentu *Vehicle* koja predstavlja ukupno vozilo zajedno s otporima tijekom vožnje. U simulacijskom modelu komponente pumpa i hidromotor su prikazane odvojeno jer one u softveru *SimulationX* mogu obavljati funkciju samo kao pumpa ili samo kao hidromotor, iako je u stvarnosti to jedna komponenta koja obavlja obje funkcije.



Slika 6.14 – Simulacijski model laganog ubrzavanja

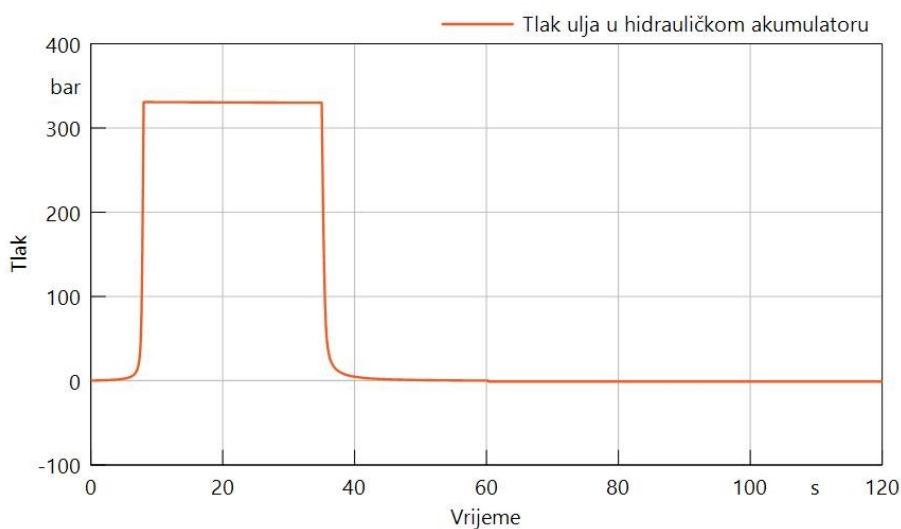
Parametri kod ovog modela obuhvaćaju radne karakteristike hidromotora, te regulaciju ulaznog signala na razvodnim ventilima za njihovo pravovremeno otvaranje i zatvaranje kako bi sustav mogao funkcionirati. Također je bilo potrebno obratiti pažnju na protok ulja kroz same razvodne ventile, kako premali protok kroz razvodne ventile uzrokuje nagli pad tlaka u hidrauličkom akumulatoru što rezultira nepovoljnim pogonskim uvjetima hidromotora. Drukčije rečeno, u tom slučaju razvodni ventili rade kao prigušni. Vrijeme odvijanja simulacije i promatranje rada komponenata je duže nego bi to bilo u praksi zbog dobivanja preglednijih rezultata i njihove točnije analize. U nastavku su prikazani rezultati dobiveni simulacijom.

Volumen ulja u hidrauličkom akumulatoru. Hidraulički akumulator se napuni do krajnje vrijednosti od 20 l za oko 10 s kao i u prethodnom simulacijskom modelu. U 35. s otvara se razvodni ventil, te ulje iz hidrauličkog akumulatora odlazi u hidromotor koji pokreće pogonske kotače vozila. Akumulator se potpuno isprazni u 60. s, što znači da vrijeme potrebno za pražnjenje hidrauličkog akumulatora iznosi 25 s.



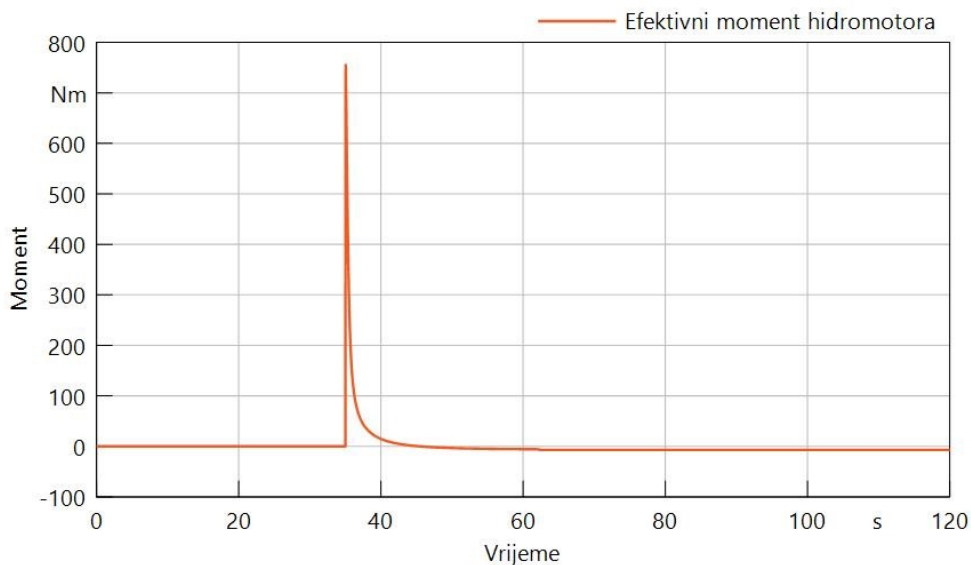
Slika 6.15 – Graf ovisnosti volumena ulja unutar hidrauličkog akumulatora za slučaj laganog ubrzavanja o vremenu simulacije

Tlak radne tekućine u hidrauličkom akumulatoru. Maksimalni tlak od 330 bar se postiže za 10 s, te tlak opada od 35. s kada se otvara razvodni ventil. Oko 50. s tlak padne na vrijednost približno nuli, a tlak je jednak nuli u trenutku kada se akumulator potpuno isprazni.



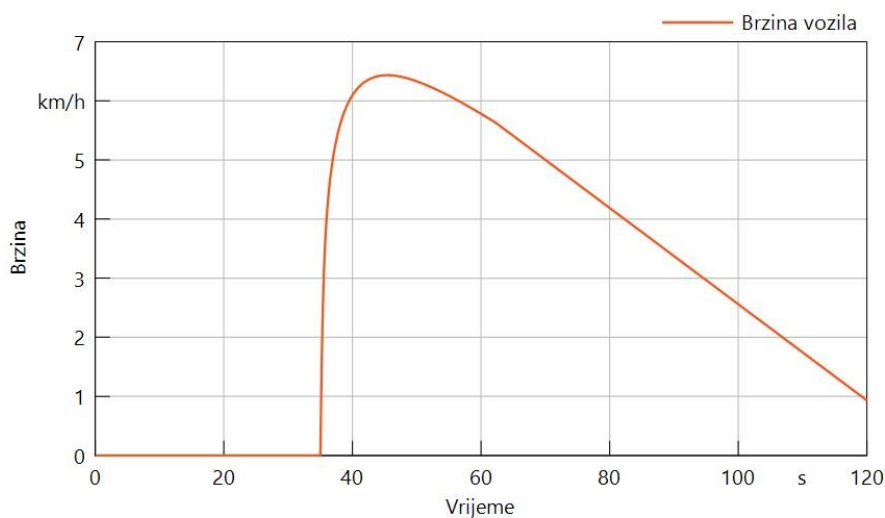
Slika 6.16 – Graf ovisnosti tlaka ulja unutar hidrauličkog akumulatora za slučaj laganog ubrzavanja o vremenu simulacije

Efektivni moment na hidromotoru postiže maksimalnu vrijednost od 755 Nm u trenutku aktivacije u 35. s. Dobiveni moment je manji od proračunatog koji iznosi 843,28 Nm zbog gubitaka i otpora tijekom vožnje koje simulacijski model uzima u obzir, koji jasnije pokazuju radne karakteristike nego proračun. Nakon toga moment naglo opada kako se vozilo pokreće a moment se približi nuli u 45. s, te pada u nulu u trenutku pražnjenja hidrauličkog akumulatora.



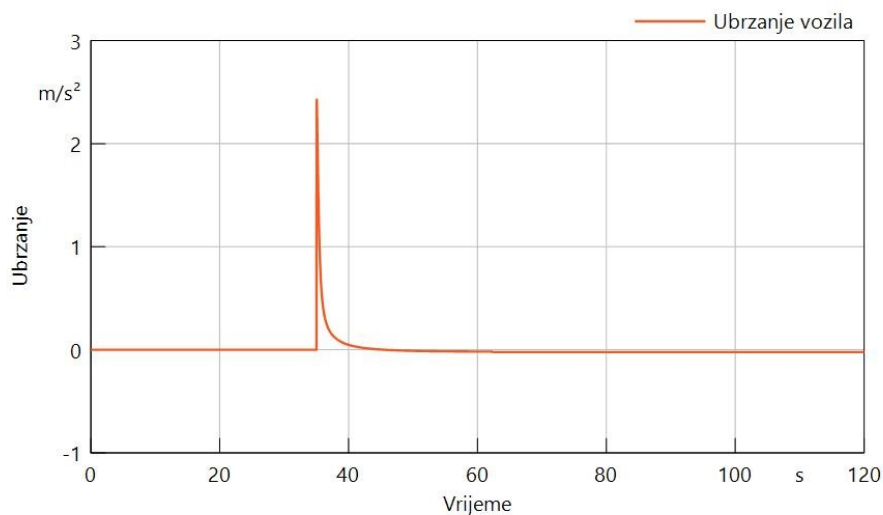
Slika 6.17 – Graf ovisnosti efektivnog momenta hidromotora za slučaj laganog ubrzavanja o vremenu simulacije

Brzina vozila u načinu rada laganog ubrzavanja pomoću hidromotora. Brzina kretanja vozila raste do maksimalne brzine od oko 6,5 km/h koja se postiže oko 45. s, a vozilo nakon toga usporava. Ova brzina nije namijenjena za vožnju, već samo ga pokretanje vozila iz mirujućeg položaja. Nakon postizanja određene brzine uključuje se elektromotor za daljnju vožnju.



Slika 6.18 – Graf ovisnosti brzine vozila za slučaj laganog ubrzanja o vremenu simulacije

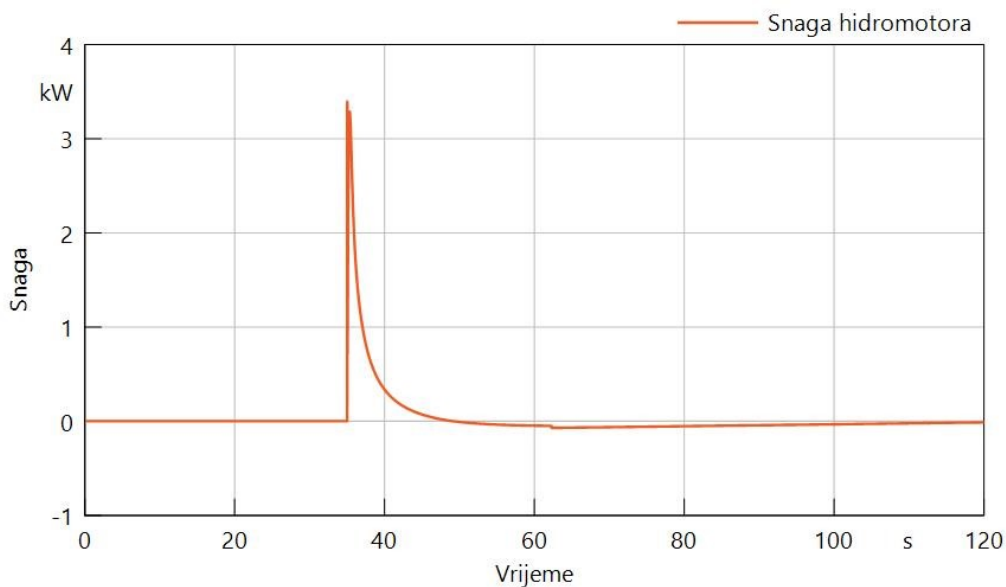
Ubrzanje vozila pomoću hidromotora. Kao i efektivni moment na hidromotoru maksimalna vrijednost se postiže u trenutku uključivanja i nakon toga opada kako vozilo kreće. Maksimalna vrijednost ubrzanja vozila iznosi $2,4 \text{ m/s}^2$. Vrijednost ubrzanja dobivena simulacijom je veća od proračunate od $1,4 \text{ m/s}^2$, koja je dobivena kao ubrzanje od 0 do 100 km/h kroz 20 s. jer ona predstavlja pokretanje vozila iz mirujućeg položaja uz maksimalnu masu tereta, a kad vozilo postigne određenu brzinu ona naglo pada.



Slika 6.19 – Graf ovisnosti ubrzanja vozila za slučaj laganog ubrzanja o vremenu simulacije

Snaga na pumpi tijekom laganog ubrzanja jednaka je kao i u slučaju regenerativnog kočenja (slika 6.13), dok je graf ovisnosti snage na hidromotoru i vremena simulacije sličan kao i graf ubrzanja i momenta. Snaga hidromotora je najveća u trenutku njegova pokretanja i iznosi 3,4 kW, što je manje nego snaga na pumpi, ali je svejedno dovoljno za pokretanje vozila od 3,5 t iz stanja

mirovanja do brzine od oko 7 m/s. Također, snaga je ovdje manja jer simulacijski model uzima u obzir sve komponente koje se nalaze nakon hidromotora koje uključuju diferencijal, kotače, te samo vozilo.

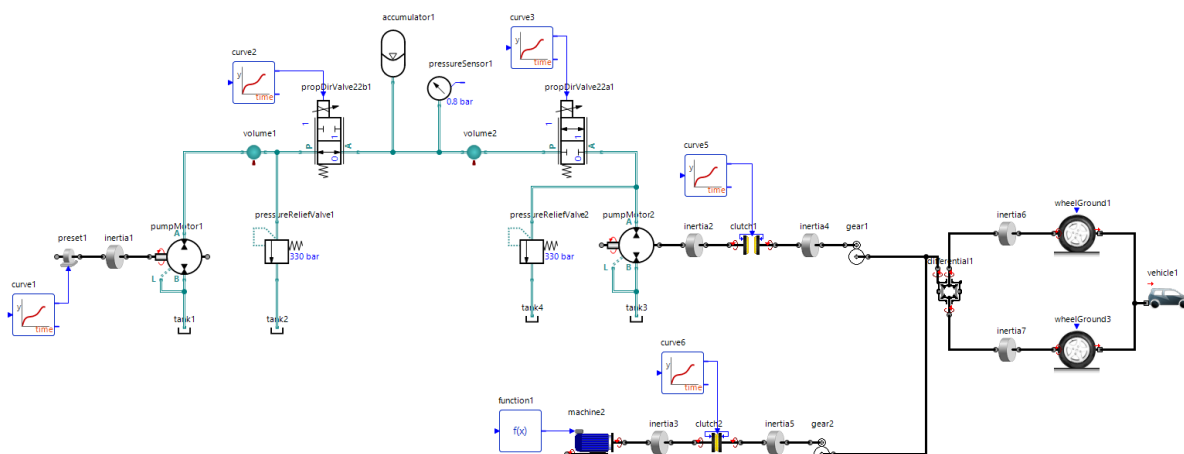


Slika 6.20 - Graf ovisnosti snage hidromotora za slučaj laganog ubrzavanja o vremenu simulacije

Pokretanje dostavnog vozila ukupne mase od 3,5 t bi bilo moguće korištenjem režima rada laganog ubrzavanja pomoću sustava hidrostatske transmisije. Iako su vremenski rasponi svakog koraka simulacije veći nego bi to bilo u stvarnosti, rezultati izlaznih momenata, brzina i ubrzanja su dovoljno zadovoljavajući da bi sustav funkcionirao prije nego se vozilo prebaci na elektromotorni pogon. Najviše energije se troši upravo na pokretanje vozila, te bi hidraulički hibridni sustav uvelike pomogao težim vozilima koja se često zaustavljaju i pokreću.

6.4 Simulacijski model produženog ubravanja vozila

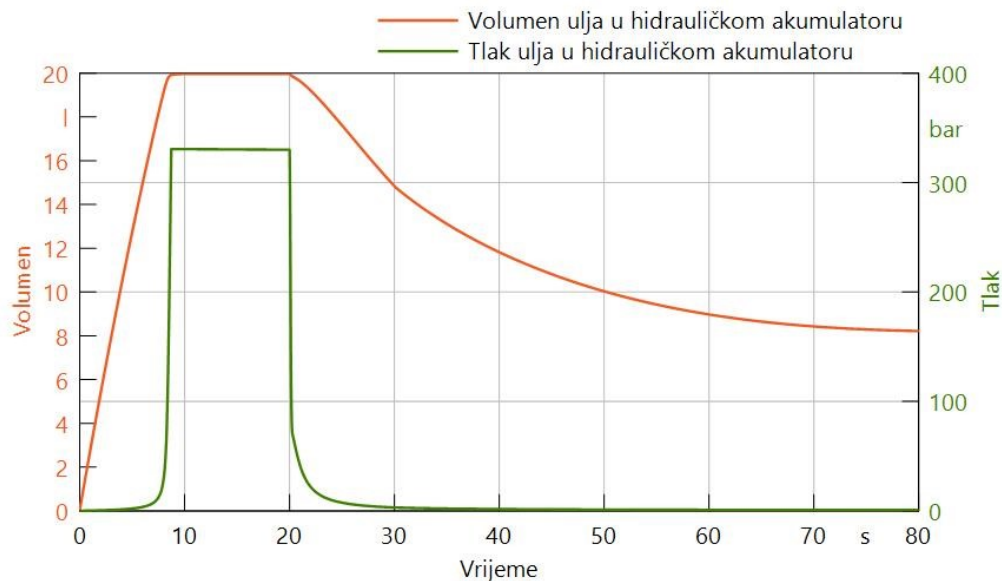
Daljnjom nadogradnjom postojećeg modela može se doći do načina rada produženog ubravanja. Radi se o početnom pokretanju vozila pomoću hidrostatske transmisije, a nakon određenog vremena ili postignute brzine, preko spojki se pogon vozila prebacuje s hidromotora na elektromotor za daljnju vožnju (slika 6.21). Simulacijski model izrađen u softveru *SimulationX* prikazan je na slici 38 te se sastoji od paralelno spojenog postojećeg modela laganog ubravanja vozila i elektromotornog pogona vozila. Ti različiti sustavi pogona su spojeni na diferencijal vozila, i njihovo sudjelovanje u pokretanju vozila se uključuje i isključuje preko sustava spojki. Spojke su upravljane signalima te u istom trenutku kada se spojka hidrostatske transmisije isključuje, uključuje se spojka elektromotornog pogona.



Slika 6.21 – Simulacijski model produženog ubravanja

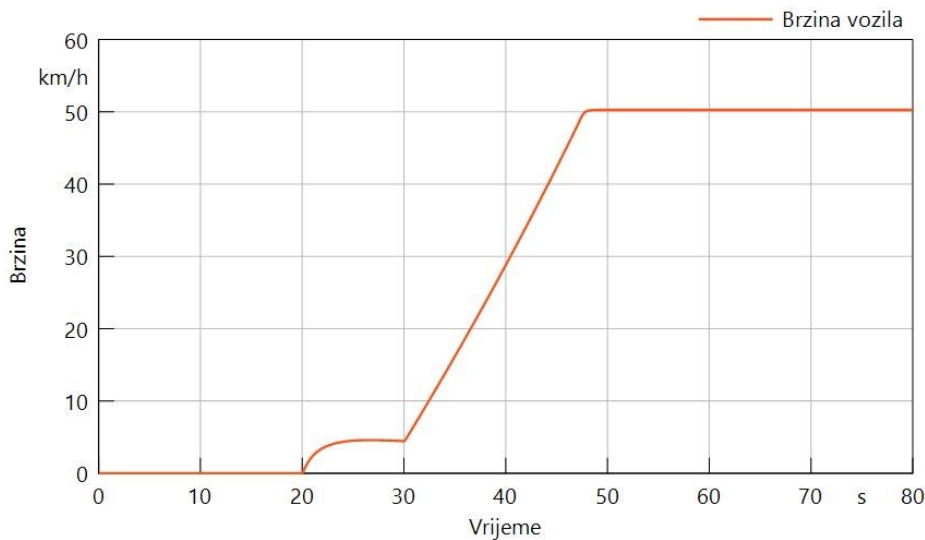
U ovom načinu rada vozilo koči kroz prvih 15 s tijekom kojih se hidraulički akumulator puni radnom tekućinom. Vozilo za pogon koristi hidrostatsku transmisiju od 20. do 30. s, a nakon 30. s se za pogon koristi elektromotor. Korištenje različitih pogona vozila je vidljivo na različitim nagibima krivulja u rezultatima.

Volumen (crveno) i tlak (zeleno) ulja u hidrauličkom akumulatoru.



Slika 6.22 – Graf ovisnosti volumena i tlaka ulja u hidrauličkom akumulatoru za slučaj produženog ubrzavanja o vremenu simulacije

Brzina vozila u načinu rada produženog ubrzavanja. Kroz 10 s vozilo ubrza do 4,5 km/h pomoću hidromotora nakon čega pogon preuzima elektromotor.

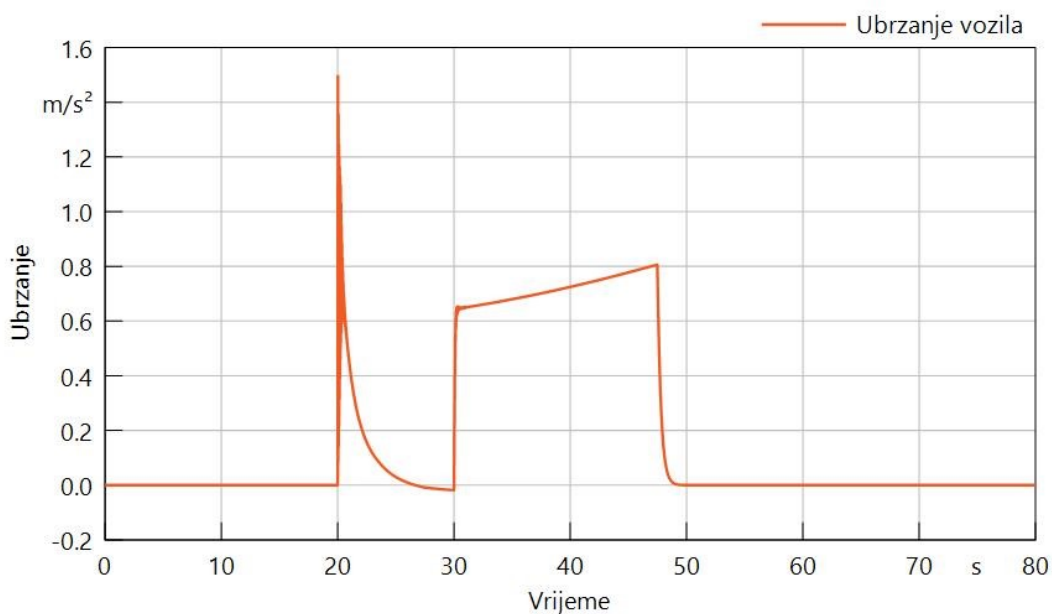


Slika 6.23 – Graf ovisnosti brzine vozila u slučaju produženog ubrzavanja o vremenu simulacije

Na grafu brzine vozila se jasno vidi razlika između pogona vozila hidromotorom i elektromotorom. Kako se najviše energije troši na pokretanje vozila, poželjno je da se kretanje ostvaruje energijom prethodno spremljenom u hidrauličkom akumulatoru umjesto da se opterećuje baterija koja pogoni

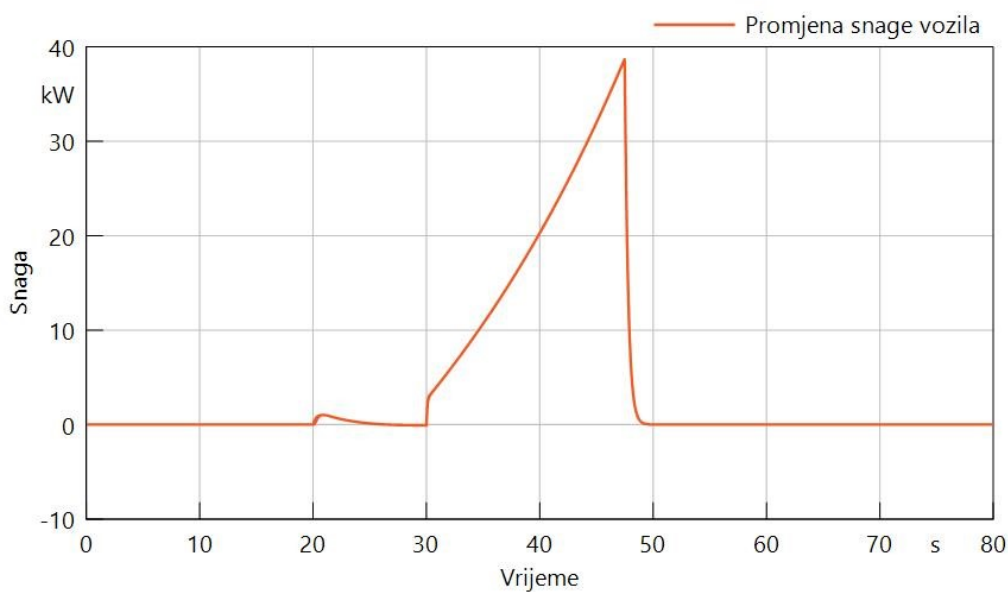
elektromotor. Nakon 30. s kada se promijeni pogonski stroj vozilo ubrzava dok ne postigne konstantnu brzinu od 50 km/h u 48. s.

Ubrzanje vozila u radu produženog ubrzavanja se također može podijeliti na dio pogonjen hidromotorom i dio pogonjen elektromotorom. Maksimalna vrijednost ubrzanja iznosi $1,5 \text{ m/s}^2$ i javlja se u 20. s kada počinje ubrzanje hidromotorom. Ta vrijednost pada kako se troši dostupna količina radne tekućine kojoj se smanjuje tlak. Simulacija uzima u obzir masu elektromotora, te je vrijednost maksimalnog ubrzanja ovdje manja nego kod načina laganog ubrzavanja gdje se koristi samo hidromotor. Od 30. do 47. s ubrzanje raste od $0,65$ do $0,8 \text{ m/s}^2$, kada pada u nulu zbog uspostave konstantne brzine.



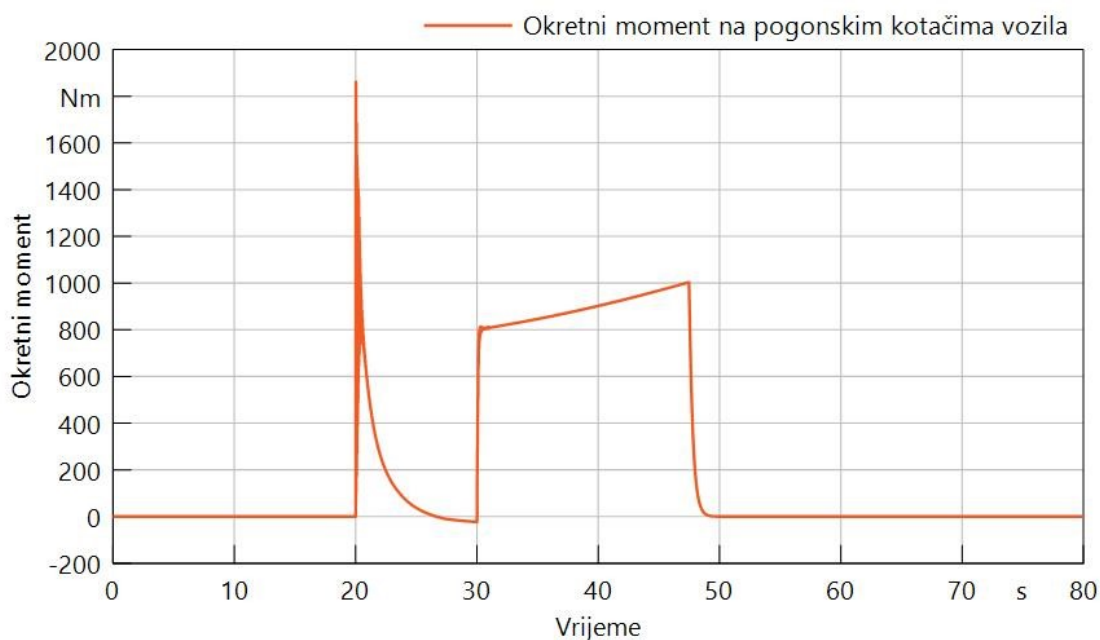
Slika 6.24 - Graf ovisnosti ubrzanja vozila u slučaju produženog ubrzavanja o vremenu simulacije

Snaga koje se razvijaju na pumpi, odnosno hidromotoru su iste kao i u prethodnim slučajevima, a ovdje se može promatrati promjena izlazne snage na pogonskim kotačima vozila tijekom produženog ubrzavanja. Pri pokretanju vozila pomoću hidromotora snaga iznosi oko 1 kW, te ta vrijednost pada do trenutka kada se preko spojke pogon vozila prebaci na elektromotorni pogon. Izlazna snaga na pogonskim kotačima raste do maksimalne vrijednosti od 38,7 kW. Snaga koja se razvija na kotačima tijekom ubrzavanja vozila je puno manja od snage koju dobivaju kotači od pogona elektromotorom, ali okretni moment vozila je veći tijekom pogona hidromotorom, tako da on više utječe na pokretanje vozila iz stanja mirovanja.



Slika 6.25 - Graf ovisnosti snage na pogonskim kotačima za slučaj produženog ubrzavanja o vremenu simulacije

Graf okretnog momenta je sličan grafu ubrzanja vozila, a maksimalna vrijednost momenta iznosi 1860 Nm tijekom pogona hidromotorom. Kada se pogon prebaci na elektromotor, moment raste od vrijednosti 800 Nm do 1000 Nm.

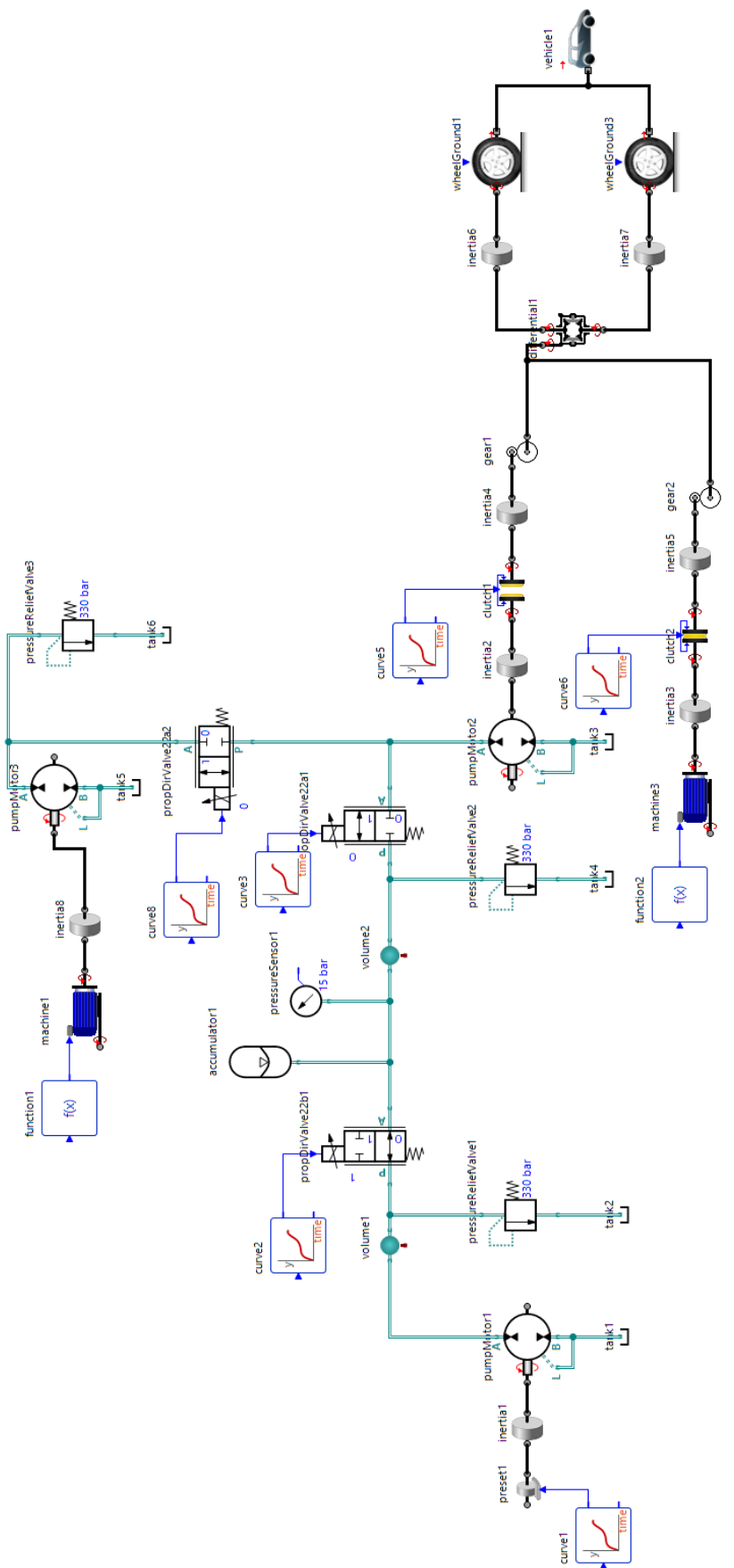


Slika 6.26 – Graf ovisnosti okretnog momenta pogonskih kotača za slučaj produženog ubrzavanja o vremenu simulacije

Ovaj način rada je uobičajeni princip rada elektro-hidrauličkog hibridnog vozila. Pokretanje vozila energijom iz hidrauličkog akumulatora spremljenu regenerativnim kočenjem, te isključivanjem i uključivanjem pogonskih spojki za pogon vozila elektromotorom. U grafičkom prikazu rezultata su uzeti veći vremenski intervali nego bi to bilo u praksi zbog jasnijeg shvaćanja principa rada. Iako vrijednosti brzina i ubrzanja vozila pogonjenog hidromotorom brzo padaju, u praksi bi se to odvijalo brže, što znači da bi te vrijednosti manje pale, a sam sustav bi mogao funkcionirati kao u simulacijskom modelu.

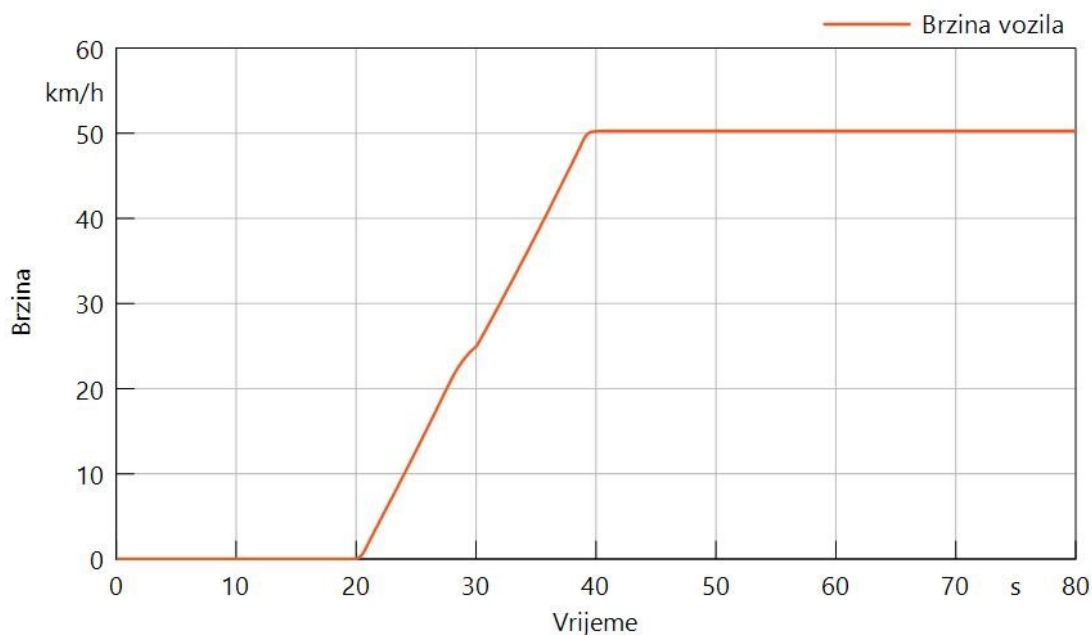
6.5 Simulacijski model dvostrukog ubrzavanja vozila

Prethodni modeli laganog i produženog ubrzavanja vozila se koriste u općenitim slučajevima kretanja. No kod kretanja na uzvisini, ili kada je potrebno razviti veće brzine u kraćem vremenskom roku koristi se način dvostrukog ubrzavanja. Radi se o nadogradnji prethodnog modela, kada u hidrauličkom akumulatoru nema dovoljne količine ulja pod tlakom ili je tlak nedovoljan za pokretanje vozila (slika 6.27). U tom slučaju elektromotor preko razdjelnika snage pokreće dodatnu pumpu koja tlači radni fluid, te direktno pogoni hidromotor, odnosno pogonske kotače vozila. Postizanjem željene brzine ili nakon određenog vremena, pogon vozila se prebacuje na elektromotor preko sustava spojki. Iako su u modelu prikazana dva elektromotora, u praksi se koristi samo jedan, kako se pogon dodatne pumpe ostvaruje preko razdjelnika snage (slika 4.8). Također, u praksi se koristi komponenta pumpa/hidromotor, dok je u simulacijskom modelu ta komponenta razdvojena na pumpu i na hidromotor. Uz to ovaj model ima i dodatnu pumpu za pogon hidromotora.



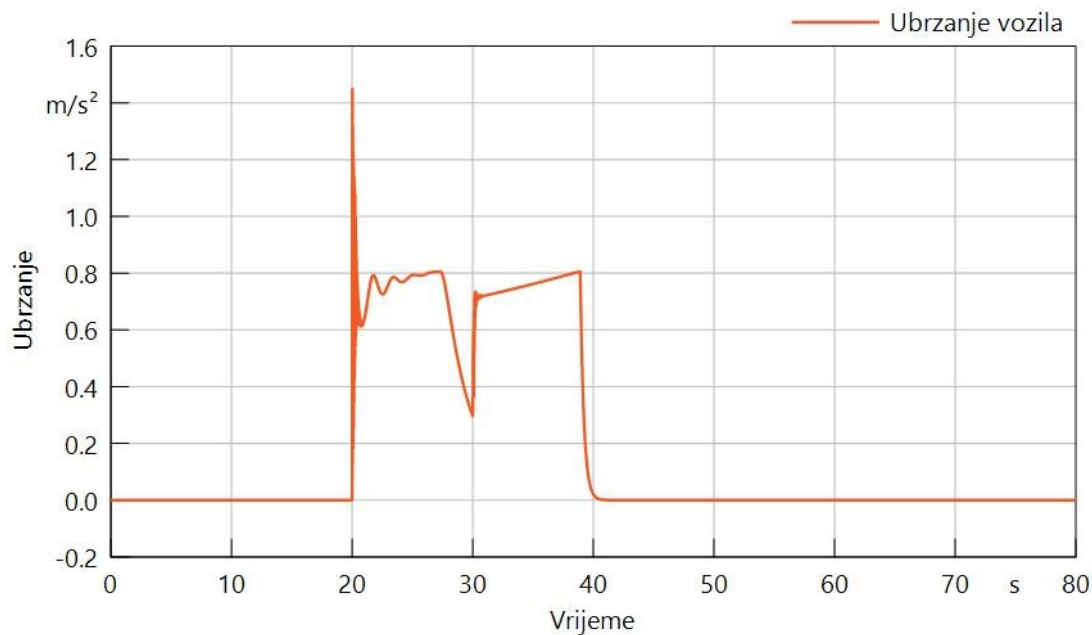
Slika 6.27 – Simulacijski model dvostrukog ubrzanja

Brzina vozila u načinu rada dvostrukog ubrzavanja. Za razliku od prethodnog modela gdje se za pogon hidromotora koristi stlačeni radni fluid iz hidrauličkog akumulatora, ovdje se još stlačeni fluid dovodi iz dodatne pumpe. To se i vidi na grafu gdje je brzina vozila pokretanog hidromotorom prikazana kao pravac, za razliku od krivulje. Vozilo hidrostatskom transmisijom postiže brzinu od 25 km/h za 10 s rada, kada se pogon prebacuje na elektromotor i vozilo ubrzava do brzine od 50 km/h za 9 s nakon čega brzina postaje konstantna.



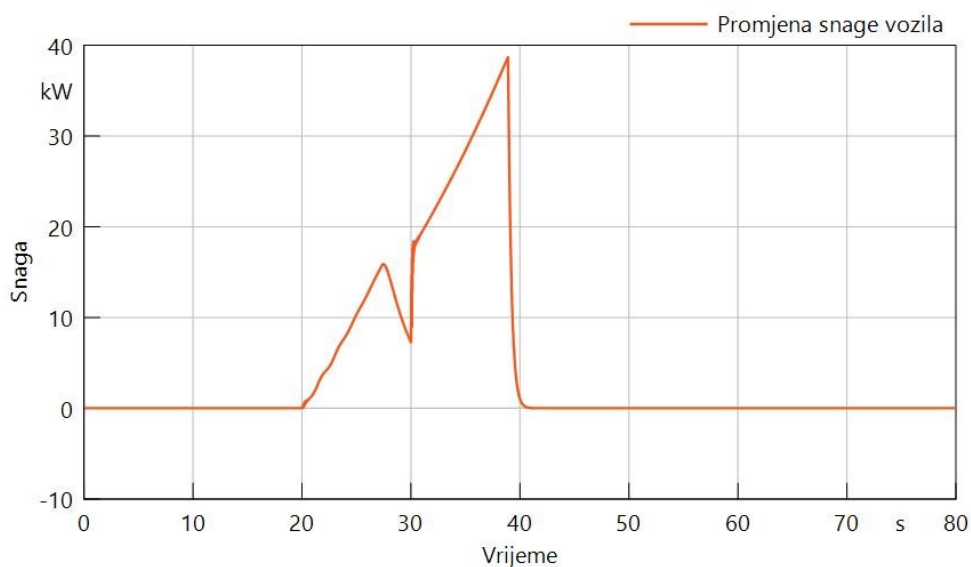
Slika 6.28 – Graf ovisnosti brzine vozila za slučaj dvostrukog ubrzavanja o vremenu simulacije

Ubrzanje vozila u načinu dvostrukog ubrzavanja. Kao i u prethodnom modelu, graf ubrzavanja je sličan. Na početku ubrzavanja hidromotorom vrijednost ubrzanja je maksimalna ($1,45 \text{ m/s}^2$) i tada opada, no ne u nulu, već oscilira oko $0,8 \text{ m/s}^2$, te pada u vrijednost $0,35 \text{ m/s}^2$. To se događa zbog stalnog protoka ulja iz dodatne pumpe. Nakon promjene pogona, ubrzanje poprima vrijednost od $0,68 \text{ m/s}^2$ i raste do $0,8 \text{ m/s}^2$ do uspostave konstantne brzine vožnje, kada vrijednost pada na nulu. Za razliku od prethodnog načina rada, vrijednosti ubrzanja osciliraju ali ubrzo se vraćaju u stabilne vrijednosti.



Slika 6.29 - Graf ovisnosti ubrzanja vozila za slučaj dvostrukog ubrzavanja o vremenu simulacije

Snaga na pogonskim kotačima raste od nule do 16 kW tijekom pogona pomoću hidromotora i dodatne pumpe. Ta vrijednost pada do 7,5 kW u trenutku promjena pogonskog sustava vozila kada snaga poprima vrijednost 18 kW i raste do konačne vrijednosti od 38,7 kW. Kao i u prethodnom slučaju produženog ubrzavanja, i ovdje je za pokretanje vozila važniji okretni moment od snage, ali je vrijednost snage tijekom ubrzavanja pomoću hidromotora veća zbog rada dodatne pumpe koja pomaže tijekom pogona vozila.



Slika 6.30 - Graf ovisnosti snage na pogonskim kotačima za slučaj dvostrukog ubrzavanja o vremenu simulacije

Kao i u slučaju produženog ubrzavanja vozila, graf okretnog momenta na pogonskim kotačima je vrlo sličan grafu ubrzanja vozila. Kod ubrzanja vozila pomoću hidromotora i dodatne pumpe moment poprima maksimalnu vrijednost od 1800 Nm, a ta vrijednost ne pada naglo u nulu, nego oscilira oko vrijednosti od 1000 Nm pod utjecajem dodatne pumpe. Prije promjene pogona moment pada u vrijednost 400 Nm, a promjenom pogona vozila moment raste od vrijednosti 900 Nm do 1000 Nm.



Slika 6.31 - Graf ovisnosti okretnog momenta pogonskih kotača za slučaj dvostrukog ubrzavanja o vremenu simulacije

Način rada dvostrukog ubrzavanja elektro-hidrauličkog hibridnog vozila pokazuje bolje rezultate od načina rada produženog ili laganog ubrzavanja vozila zbog dodatnog pogona pumpe, ali na taj način se koristi više električne energije iz baterije za pogon dodatne pumpe i elektromotora. To znači da iako su brzina i ubrzanje vozila povoljniji, ovaj način rada bi bilo najbolje koristiti samo kada je potrebno ubrzati vozilo u kraćem vremenskom roku ili kada se vozilo nalazi na uzvisini. U ostalim slučajevima je povoljnije koristiti prethodno opisane načine rada, kako bi se uštedjela maksimalna količina električne energije potrebne za pogon elektromotora.

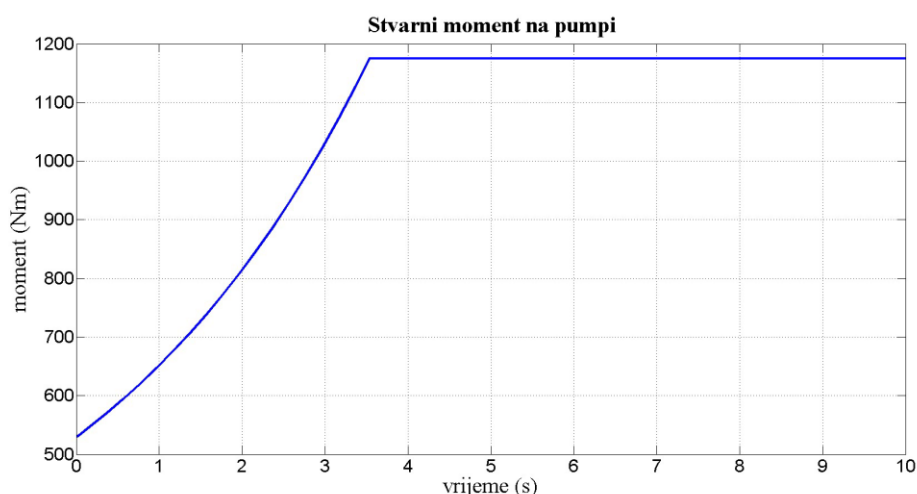
7. ANALIZA REZULTATA

Iz rezultata provedenih simulacija za svaki od pet načina rada hidrauličkog električnog hibridnog vozila, daje se uvidjeti da bi vozilo s ovakvim sustavom pogona moglo funkcionirati u praksi. Iako vrijednosti poput momenta hidromotora i ubrzanja naglo padaju u simulacijama, svaki dio procesa vožnje kao što je kretanje, vožnja i kočenje su promatrani kroz duži vremenski interval zbog dobivanja preglednijih grafova. U ovom poglavlju usporediti će se dobiveni rezultati simulacijskih modela s prethodno obavljenim matematičkim i numeričkim modelima hidrauličkog hibridnog vozila kojem je primarni pogon dizelski motor [4]; te objasniti i dokazati prednosti korištenja hidrauličke hibridne transmisije kod električnih vozila veće mase i snage.

7.1 Usporedba rezultata s dizel-hidrauličkim hibridnim vozilom

U radu [4] je izrađen numerički i matematički model hibridnog hidrauličkog gospodarskog vozila VW *Crafter* s primarnim dizelskim motornim pogonom. Modeli su izrađeni u softveru *Matlab Simulink*, gdje se svaka komponenta sustava opisuje pomoću numeričkih jednadžbi, a zatim povezuje logičkim sklopovima kako bi se prikazalo ponašanje svake komponente tijekom rada. Za razliku, softver *SimulationX* ima gotove komponente kojima je potrebno definirati radne parametre, a zatim ih grafički spajati pripadajućim vezama. U prethodnom radu je prikazan rad hidrauličkih komponenata za načine rada kočenja i kretanja vozila. Rezultati tijekom regenerativnog kočenja vozila prikazani su u nastavku.

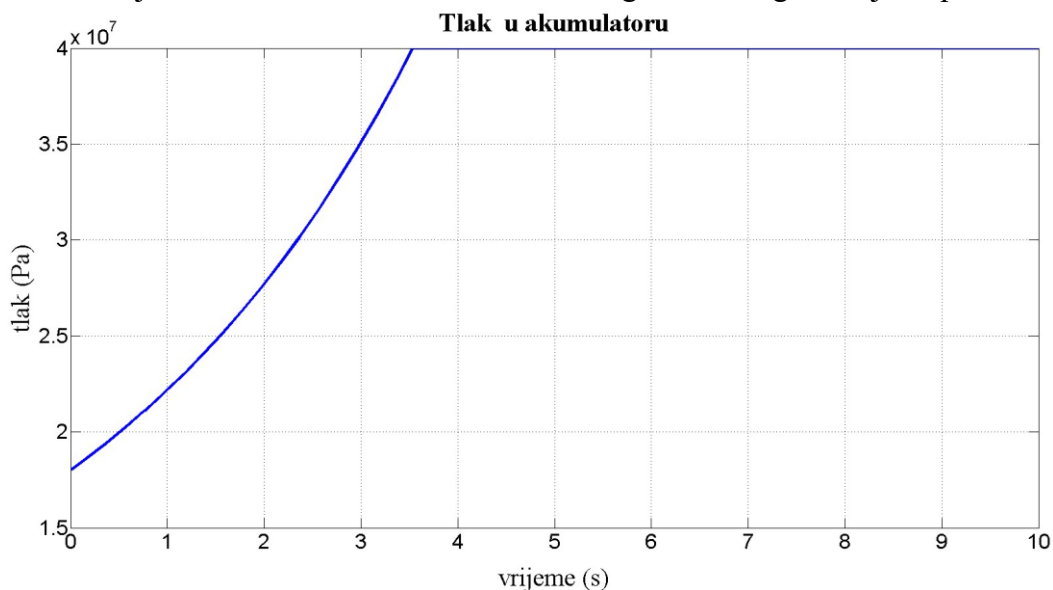
Moment na pumpi.



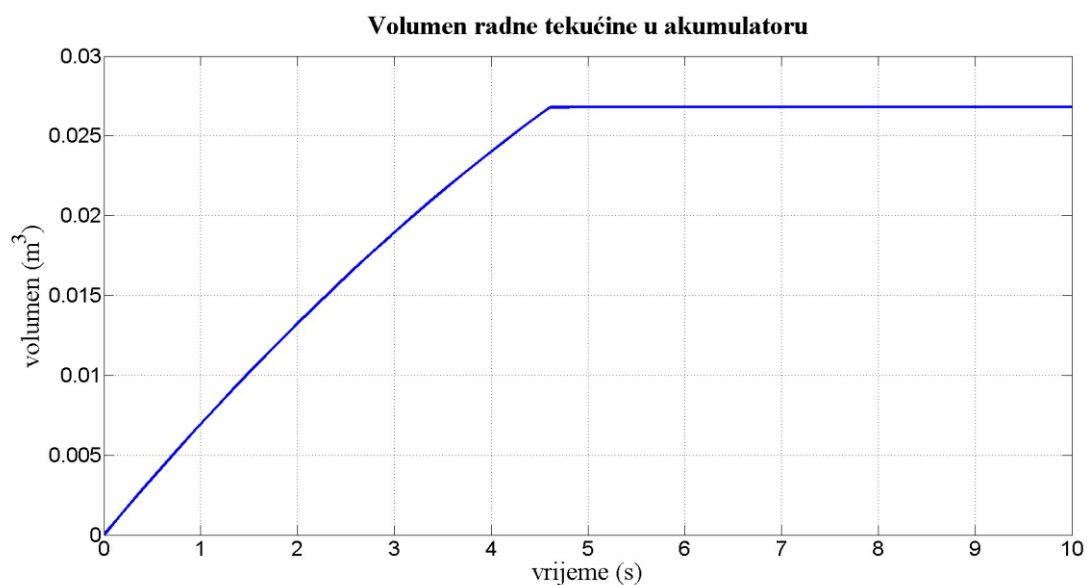
Slika 7.1 – Stvarni moment na pumpi tijekom regenerativnog kočenja (prethodni rad) [4]

U ovom slučaju moment na pumpi raste kroz 3,5 s od početne vrijednosti 545 Nm do maksimalne vrijednosti od 1185 Nm, gdje moment ostaje konstantan. Za usporedbu, u novom modelu (slika 6.10), moment raste po krivulji od vrijednosti 0 Nm do 1400 Nm kroz 10 s, a nakon toga ostaje konstantan, te konačno opada kako pumpa prestaje s radom.

Tlak i volumen ulja u hidrauličkom akumulatoru kod regenerativnog kočenja za prethodni rad.



Slika 7.2 – Tlak ulja u akumulatoru tijekom regenerativnog kočenja (prethodni rad) [4]

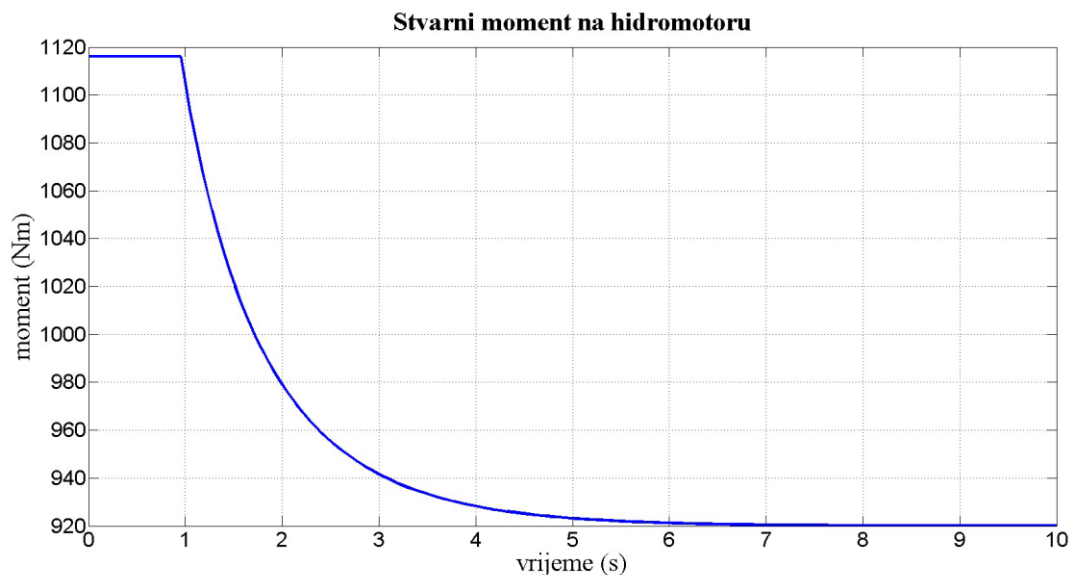


Slika 7.3 - Volumen ulja u akumulatoru tijekom regenerativnog kočenja (prethodni rad) [4]

Radni parametri tlaka i volumena ulja u ovom slučaju se razlikuju, zbog razlika u radnim parametrima odabranog vozila, te su dijelovi proračuna hidrauličkih komponenta drugačiji. Maksimalni tlak za prethodni rad u hidrauličkom akumulatoru iznosi 400 bar, a volumen akumulatora je 26 l, dok u ovom radu tlak iznosi 330 bar (slika 6.12), a volumen 20 l (slika 6.11). Vrijeme punjenja akumulatora za slučaj dizel-hidrauličkog hibrida iznosi 4,5 s, a maksimalni tlak se postiže za 3,5 s. Kod hidrauličkog električnog hibrida akumulator se napuni stlačenim uljem za 10 s, a maksimalni tlak se također postiže za oko 10 s. Iako su drugačiji parametri hidrauličkog akumulatora, dobiveni rezultati su vrlo slični, te bi oba slučaja mogla funkcionirati u praksi, neovisno o odabiru hidrauličkih komponentata.

Drugi slučaj simuliranja dizel-hidrauličkog hibridnog vozila je bio slučaj pokretanja vozila pomoću hidrostatske transmisije pogonjene stlačenim fluidom iz hidrauličkog akumulatora, u ovom radu prikazanog kao način laganog ubrzavanja. Promatraju se ponašanje hidrauličkih komponentata.

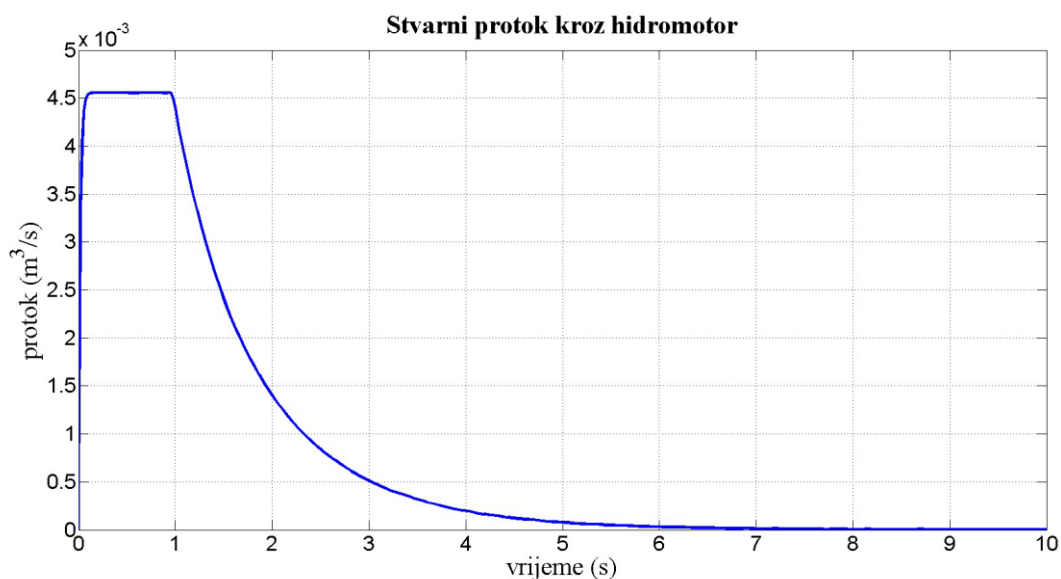
Moment na hidromotoru kod kretanja vozila za prethodni rad.



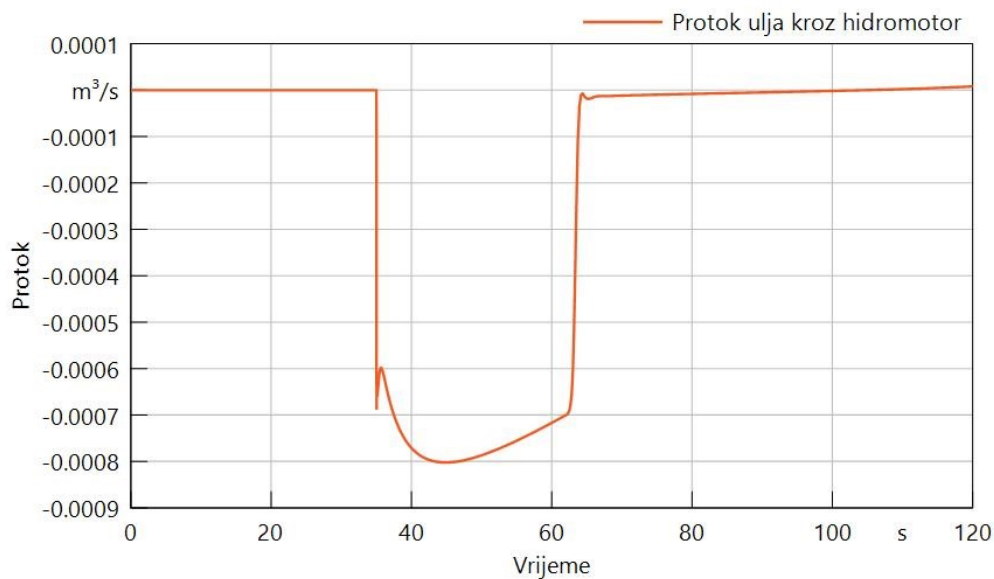
Slika 7.4 - Stvarni moment na hidromotoru tijekom kretanja vozila (prethodni rad) [4]

Moment iz maksimalne vrijednosti dobivene u prethodnom koraku, opada kroz slijedećih 10 s kako vozilo kreće iz mirujućeg položaja. Nakon 10 s moment padne na vrijednost od 920 Nm na kojoj ostaje konstantan. Za usporedbu, moment hidromotora kod laganog ubrzavanja hidrauličkog električnog hibridnog vozila (slika 6.17) u trenutku ubrzavanja iznosi 755 Nm, a zatim naglo pada u nulu kako vozilo kreće, a hidraulički akumulator se prazni. Ovdje je moguće primijetiti razlike u radu hidromotora. Krivulja je dosta slična u oba slučaja, a u slučaju prethodnog rada, prikazano vrijeme kretanja je 10 s, dok u ovom radu je ono prikazano kroz 87 s, pa krivulja izgleda puno strmija kada je stavljena u veći vremenski interval. U trenutku kada moment padne na nižu vrijednost, prebacuje se pogon vozila. U prethodnom radu to obavlja motor s unutarnjim izgaranjem, a u ovom slučaju elektromotor, u načinu rada produženog ili dvostrukog ubrzavanja.

Protok ulja kroz hidromotor. Slika 7.5 prikazuje protok kroz hidromotor u prethodnom radu, a slika 7.6 prikazuje protok kroz hidromotor u ovom radu.



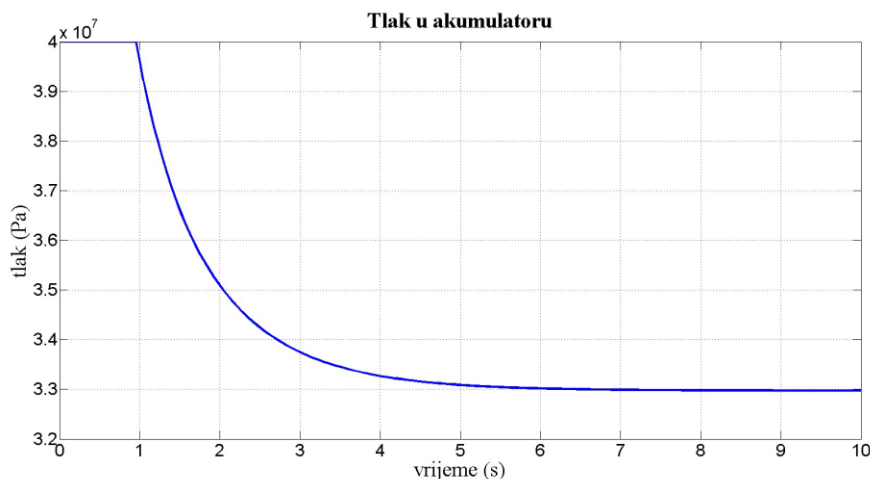
Slika 7.5 - Stvarni protok kroz hidromotor tijekom kretanja vozila (prethodni rad) [4]



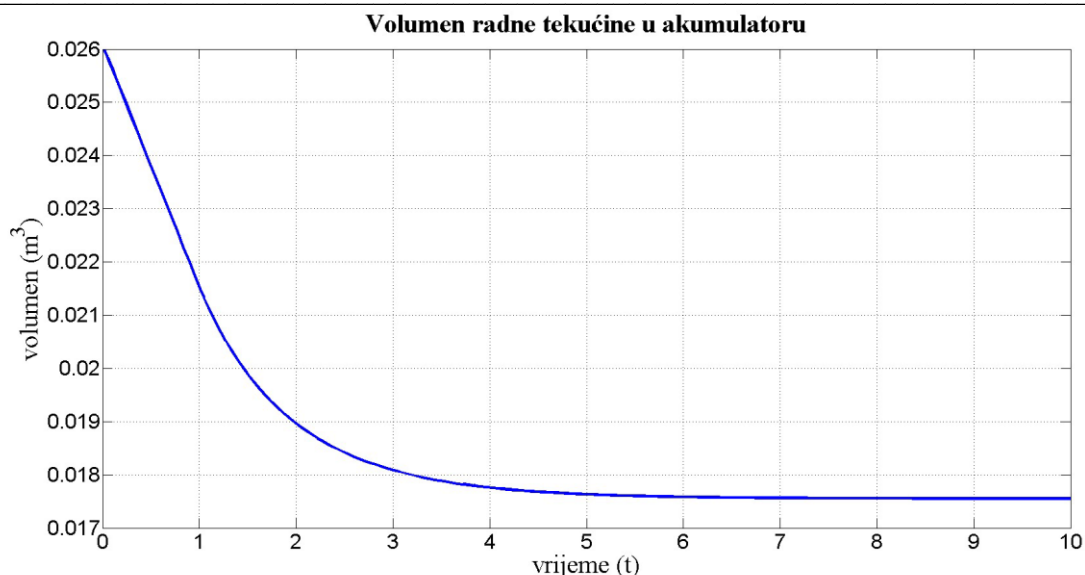
Slika 7.6 – Graf ovisnosti protoka radne tekućine kroz hidromotor u slučaju laganog ubrzavanja o vremenu simulacije

Protok ulja u prethodnom radu pada po krivulji od vrijednosti $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ do nule kroz 5 s, dok u ovom radu protok postiže maksimalnu vrijednost od $0,0008 \text{ m}^3/\text{s}$, te pada do vrijednosti od $0,0007 \text{ m}^3/\text{s}$ kroz 17 s, dok se dovod ulja u hidromotor ne isključi. Predznak u grafu je negativan zbog smjera protoka radne tekućine. Razlog ovako različitog protoka ulja kroz hidromotor je u karakteristikama odabranog hidromotora, odnosno njegovog specifičnog protoka i brzine vrtnje. Hidromotor odabran u prethodnom radu ima specifični protok od $171,8 \text{ cm}^3$ pri 3100 okr/min, dok u ovom radu ima specifični protok od 250 cm^3 pri 2200 okr/min.

Tlak i volumen radne tekućine u hidrauličkom akumulatoru za vrijeme kretanja vozila za prethodni rad.



Slika 7.7 - Tlak ulja u akumulatoru tijekom kretanja vozila (prethodni rad) [4]



Slika 7.8 - Volumen ulja u akumulatoru tijekom kretanja vozila (prethodni rad) [4]

Tlak i volumen radnog fluida se smanjuju po krivuljama kako hidromotor koristi stlačeni fluid za pokretanje vozila. Tlak u slučaju za prethodni rad padne s maksimalne vrijednosti od 400 bar na vrijednost od 330 bar kroz 5 s, dok se volumen ulja u hidrauličkom akumulatoru smanji s 26 l na 17,5 l, također kroz 5 s. U ovom radu tlak padne s maksimalne vrijednosti od 330 bar na nulu kroz 15 s (slika 6.16), a hidrauličkom akumulatoru je također potrebno 15 s da se potpuno potroši svih 20 l. Ove razlike se javljaju zbog drugačijih radnih karakteristika hidrauličkog akumulatora dobivenih proračunom, ali i hidromotora. Također, razlike između modela prikazanih u prethodnom radu i u ovom radu se javljaju zbog korištenja različitih softvera za simuliranje modela hibridnog vozila. *Matlab Simulink* zahtjeva ručno definiranje ponašanja svake komponente pomoću matematičkih funkcija, dok *SimulationX* ima gotove komponente s definiranim ponašanjem, funkcijom i svim gubicima i otporima tijekom rada uzetima u obzir. U prethodnom radu, okretni moment korišten za pogon hidrauličke pumpe je bio definiran kao konstantan, dok u ovom modelu je definiran kao usporavanje brzine vrtnje pogonskih kotača. Iz toga proizlaze puno realniji rezultati u simulacijskim modelima rađenima u *SimulationX*-u. Zbog toga korisnije je, jednostavnije i preglednije koristiti *SimulationX* za izradu simulacijskih modela, na kojima se definiraju željeni parametri svake komponente koja je logički povezana s idućom komponentom.

7.2 Prednosti korištenja hidrauličke transmisije kod električnih vozila

Nakon izrade simulacijskih modela, analize rezultata i njihove usporedbe s prethodnim radom gdje se promatra dizel-hidrauličko hibridno vozilo, slijedeći korak je dokazati prednosti korištenja hidrauličkog hibridnog sustava u vozilima naspram električnog hibridnog sustava, te zašto bi se hidraulička električna hibridna vozila sve češće mogla primjenjivati u budućnosti.

Prvi razlog zašto je povoljnije koristiti hidrostatsku transmisiju kao sekundarni hibridni pogon vozila je količina energije koja se može uštedjeti tijekom rada vozila, odnosno energija koja se može pohraniti tijekom kočenja i iskoristiti za pokretanje vozila. Odnos energije potrebne za kočenje E_k i energije potrebne za pokretanje vozila E_p moguće je prikazati izrazom

$$\frac{E_k}{E_p} = \eta_{pe} \cdot \eta_{ks}^2 \cdot \eta_{p/m}^2 \cdot \eta_{ps}^2 \quad (7.1)$$

Gdje je:

- η_{pe} iskoristivost uređaja za pohranu energije (baterija ili hidraulički akumulator)
- η_{ks} iskoristivost kontrole snage
- $\eta_{p/m}$ iskoristivost pogonskog stroja (elektromotor ili pumpa/hidromotor)
- η_{ps} iskoristivost mehaničkog prijenosa snage s pogonskog stroja na pogonske kotače vozila

U slučaju da se koristi električni hibridni sustav, nominalna iskoristivost za standardnu litij - ionsku bateriju kakva se koristi u vozilima iznosi između 0,75 i 0,85. Ovdje se uzima u obzir i vrijeme potrebno za punjenje električne baterije, koje može potrajati i do 12 sati. Za potrebe proračuna koristi se srednja vrijednost od 0,8. Iskoristivost hidrauličkog akumulatora odabranog u poglavlju 5.3 iznosi 0,95 i ta vrijednost je dokazana od strane proizvođača *Bosch Rexroth*. Iskoristivost kontrole snage ovisi o tipu energije koja se koristi u sustavu, a ona za oba slučaja iznosi 0,95. Elektromotori koji se uglavnom koriste za pogon vozila imaju iskoristivost od 0,9, što znači da se oko 10% ukupne električne energije ne koristi za pokretanje vozila. Za razliku komponenta pumpa/hidromotor ima uglavnom veću iskoristivost od 0,95, a novije inačice

hidrauličkih strojeva kao što su hidraulički strojevi s plivajućim cilindrima i hidraulički strojevi s digitalnim upravljanjem protoka (*digital displacement*) mogu imati iskoristivost i do 0,97 ili 0,98. Hidromotor ima veću iskoristivost zbog malih tolerancija izrade i brtvljenja koji onemogućuju gubitak radne tekućine i zbog konstantnog podmazivanja komponenata tijekom rada. Mehanički prijenos snage s pogonskog stroja do kotača kod električnog pogona se uglavnom koristi putem mjenjačke kutije, tj. sustava zupčanika koji znaju imati velike gubitke trenja. Iskoristivost mehaničkog prijenosa kod električnog pogona iznosi oko 0,9. S druge strane hidrostatska transmisija uglavnom ne koristi klasičnu mjenjački kutiju, već samo razdjelnik snage kako bi se pumpa mogla pokretati prilikom kočenja vozila. Kod novijih pumpi/hidromotora brzina vrtnje se može direktno mijenjati mijenjanjem specifičnog protoka kroz pumpu/hidromotor. Razdjelnik snage koji se koristi u ovakvim sustavima ima manji broj pokretnih dijelova od mjenjačke kutije što znači da se manje energije predaje u okolinu putem topline uzrokovane trenjem. Njegova iskoristivost iznosi oko 0,95. Uvrštavanjem vrijednosti iskoristivosti u izraz dobivaju se vrijednosti omjera energije kočenja i pokretanja vozila za elektromotorni pogon

$$\frac{E_{k,em}}{E_{p,em}} = \eta_{pe,em} \cdot \eta_{ks,em}^2 \cdot \eta_{p/m,em}^2 \cdot \eta_{ps,em}^2 \quad (7.2)$$

$$\frac{E_k}{E_p} = 0,8 \cdot 0,95^2 \cdot 0,9^2 \cdot 0,9^2 = 0,47$$

i za hidrostatsku transmisiju

$$\frac{E_{k,hm}}{E_{p,hm}} = \eta_{pe,hm} \cdot \eta_{ks,hm}^2 \cdot \eta_{p/m,hm}^2 \cdot \eta_{ps,hm}^2 \quad (7.3)$$

$$\frac{E_k}{E_p} = 0,95 \cdot 0,95^2 \cdot 0,95^2 \cdot 0,95^2 = 0,69$$

Ovdje se vidi razlika iskoristivosti povrata energije. Veća iskoristivost povrata energije kod hidrostatske transmisije javlja se zbog veće iskoristivosti uređaja za pohranu energije (hidrauličkog akumulatora), te zbog manjih mehaničkih gubitaka kod prijenosa snage.

Usporedba elektromotora i hidromotora za pogon vozila je prikazana u tablici 7.1. Podaci se očitavaju iz radnih karakteristika pojedinog motora snage 100 kW iz kataloga njihovog proizvođača.

Tablica 7.1 – Usporedba karakteristika elektromotora i hidromotora

| | Elektromotor | Hidromotor |
|--------------------------------------|--------------|------------|
| Gustoća snage [kW/kg] | 0,5 | 4 |
| Iskoristivost na 20% opterećenja [-] | 0,9 | 0,93 |
| Cijena [\$/kW] | 1,73 | 0,52 |

Tablica 7.1 prikazuje da hidromotor ima više prednosti naspram elektromotora kao hibridnog sustava koji bi se koristio u vozilima. Gustoća snage je omjer između snage motora i njegove mase. Kako oba motora imaju nazivnu snagu od 100 kW, razlikuju se po masi. Elektromotor kakav se koristi u vozilima ima masu od 200 kg, dok hidromotor ima puno manju masu od 25 kg. Hidromotor može biti mnogo lakši od elektromotora za istu snagu. To znači da sekundarni pogon hibridnog vozila ne utječe negativno na performanse tijekom vožnje, nego je i njegova iskoristivost i isplativost veća, što je vidljivo u slijedećem retku tablice koji pokazuje iskoristivost motora na 20% njegovog opterećenja. Općenito, elektromotor ima manju iskoristivost pri opterećenju manjem od nazivnog, zato jer je proračunat za određene radne uvjete i opterećenja na kojima mora pružati zadovoljavajuće rezultate. Ovdje razlika nije jako velika, ali hidromotor ima veći stupanj iskoristivosti zbog same konstrukcije koja je osmišljena da se što više smanje mehanički gubici i zbog manjeg oslanjanja na mehanički prijenos snage tijekom vožnje. Novije pumpe/hidromotori koji koriste tzv. plivajuće klipove (*floating cup*) koji su povezani s rotirajućim vratilom i obavljaju funkciju brtvljenja mogu imati iskoristivost i do 97%, što ih čini idealnim za pogon hibridnih vozila. Konačno, što se tiče cijene, električna energija je sve skuplja što će se odražavati i na cijenu i isplativost električnih automobila i električnih hibridnih vozila. Kako hidrostatska transmisija

koristi ulje koje stalno kruži kroz hidraulički sustav vozila, uz minimalno potrebno održavanje, daje se zaključiti da je hidrostatska transmisija jeftinija alternativa kao sekundarni hibridni pogon vozila [26].

Usporedba karakteristika električne baterije i hidrauličkog akumulatora je prikazana u tablici 7.2. Za gospodarska vozila veće mase, sustav za pohranu energije igra važnu ulogu za uštedu energije i goriva. Kako se danas razvijaju i električni i hidraulički hibridi, dolazi se do zaključka da hidraulički akumulatori imaju određene prednosti nad električnim baterijama.

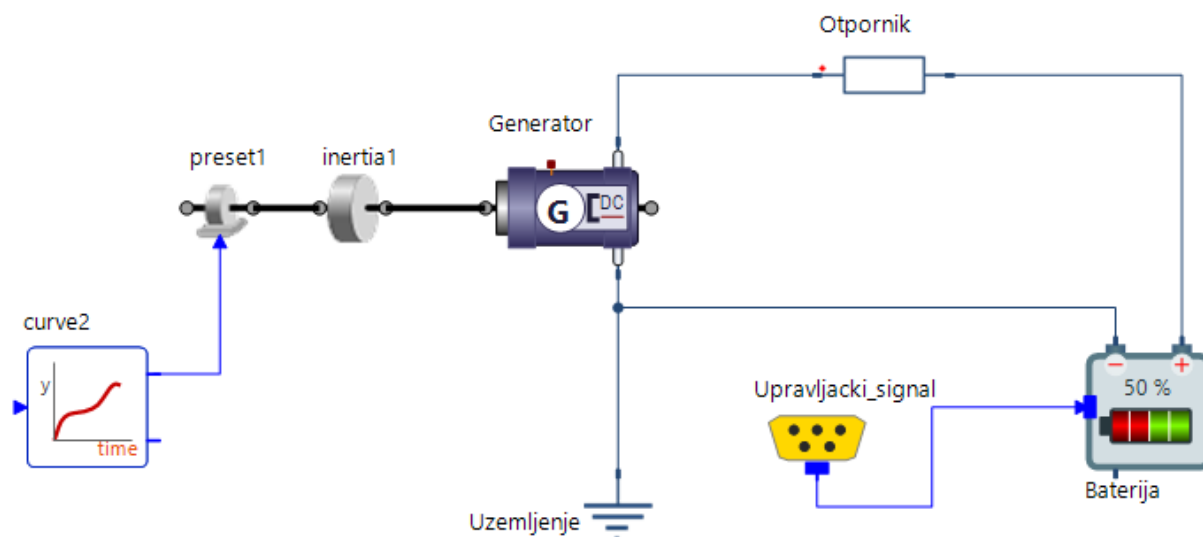
Tablica 7.2 - Usporedba karakteristika električne baterije i hidrauličkog akumulatora

| | Električna baterija | Hidraulički akumulator |
|--------------------------|---------------------|------------------------|
| Gustoća snage [kW/kg] | 0,5 | 5 |
| Gustoća energije [kJ/kg] | 150 | 8 |
| Iskoristivost [-] | 0,8 | 0,95 |

Iskoristivosti pojedinog sustava su već prethodno objašnjene, a ovdje se vide razlike između vrijednosti gustoća snage i energije koje se mogu pohraniti u spomenutim spremnicima. Glavna prednost hidrauličkog akumulatora nad konvencionalnom litij-ionskom baterijom je veća gustoća pohranjene snage u akumulatoru, koja može biti i do 10 puta veća. Jedina prednost koju električna baterija ima nad hidrauličkim akumulatorom je veća gustoća pohranjene energije. Ovo je i glavni razlog zbog čega se sve više razvijaju električna vozila manje mase. Na težim vozilima kao što su kamioni i gospodarska vozila koja zahtijevaju veću snagu za pogon i pokretanje, pogon isključivo s elektromotorom ne bi bio isplativ jer bi baterija morala biti puno većih dimenzija i veće mase da bi vozilo moglo preći određeni put. Npr. za teški kamion s teretom koji bi vozio isključivo na elektromotorni pogon na put od 1000 km, bez punjenja baterije, baterija bi morala biti mase 20 t [27]. Regeneracija energije postoji i kod električnog pogona vozila, ali korištenje regenerativnog kočenja kod električnog vozila ne može napuniti bateriju toliko brzo koliko može napuniti hidraulički akumulator kod vozila s hidrostatskom transmisijom. Kod težih i jačih vozila koja rade u načinu stani – kreni je povoljnije koristiti hidraulički hibridni sustav, zbog veće gustoće snage, bržeg punjenja hidrauličkog akumulatora, te minimalne potrošnje energije kod pokretanja vozila iz mirujućeg položaja. Zbog toga je puno isplativije i bolje koristiti hidrostatsku transmisiju, koja

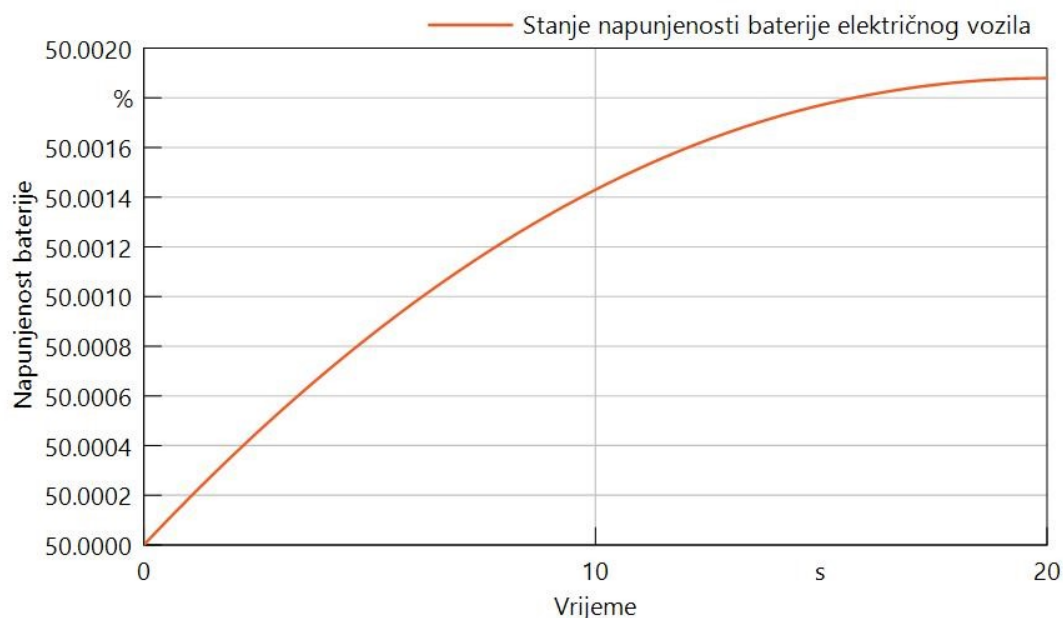
ima veću gustoću snage, za pokretanje vozila, dok se elektromotorni hibridni sustav, koji ima veću gustoću energije, uglavnom koristi za vožnju pri konstantnoj brzini [26].

Razliku između energija pohranjenih u električnoj bateriji i hidrauličkom akumulatoru tijekom regenerativnog kočenja moguće je prikazati pomoću simulacijskog modela u softveru *SimulationX*. Slika 7.9 prikazuje pojednostavljeni model regenerativnog kočenja za konvencionalno električno vozilo. Komponenta *Curve* definira brzinu vrtnje pogonskih kotača vozila, kada vozilo usporava od brzine 90 km/h do 20 km/h kroz 15 s, a nakon još 5 s vozilo se zaustavlja, isto kao i kod regenerativnog kočenja hidrauličkim sustavom prikazanog u poglavlju 6.2. *Preset* i *Inertia* prenose okretni moment od pogonskih kotača koji usporavaju do rotora generatora, koji pretvara kinetičku energiju u električnu, te tako kočenjem vozila puni bateriju. Generator je potrebno spojiti s uzemljenjem i otpornikom, te na polove baterije koja se koristi u vozilu. U ovom simulacijskom modelu početno stanje napunjenosti baterije iznosi 50%, a kapacitet kao za standardni *VW e-crafter* iznosi 35,8 kWh. Bateriju je također potrebno povezati s *bus* upravljačkim signalom kako bi mogla pravilno funkcionirati. *Bus* signal služi za promatranje ponašanja više analognih i digitalnih vrijednosti koje se odvijaju tijekom simulacije kao jedne vrijednosti u bilo kojem trenutku uz dodatne značajke za iscertavanje podataka.



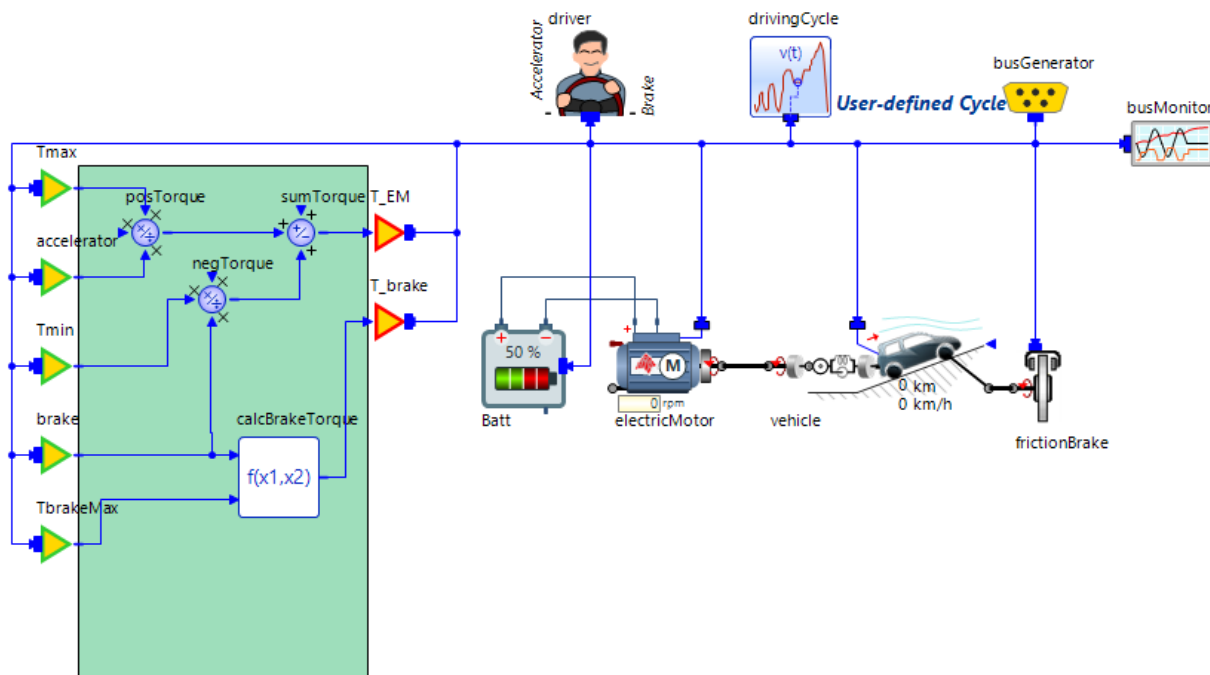
Slika 7.9 – Simulacijski model regenerativnog kočenja za električno vozilo

Usporavanjem i kočenjem vozila baterija se kroz 20 s napuni za 0,0019% što nije mnogo, ali za vožnju u kojoj je potrebno često usporavati i kočiti regenerativno kočenje može biti korisno. Slika 7.10 prikazuje stanje napunjenosti baterije za jedan ciklus regenerativnog kočenja električnog vozila.



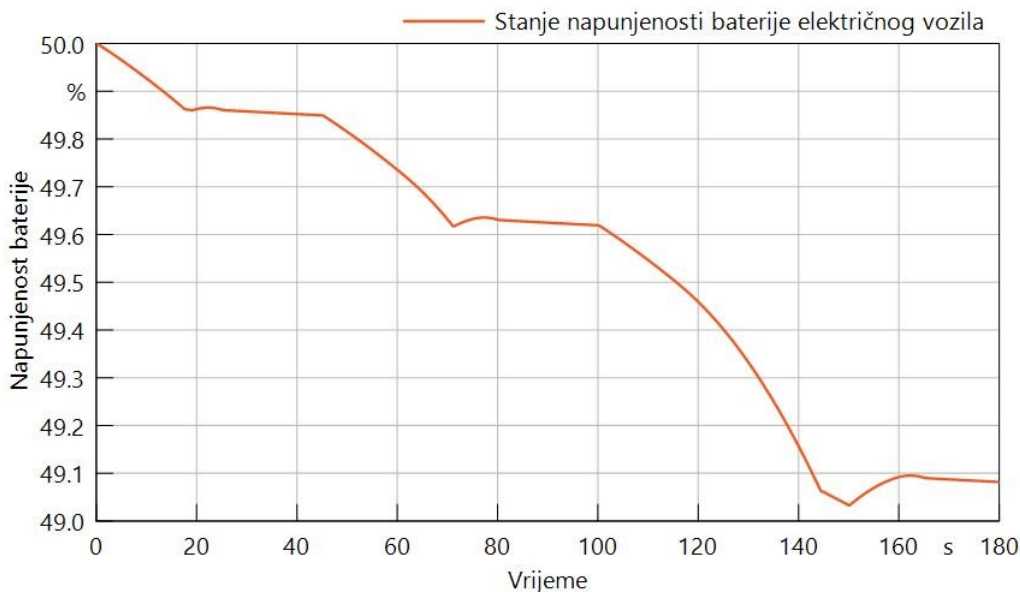
Slika 7.10 – Graf ovisnosti napunjenosti baterije električnog vozila tijekom regenerativnog kočenja o vremenu simulacije

Simulacijski model električnog regenerativnog kočenja je jako pojednostavljen, a kako bi dobiveni rezultati bili što bliži realnim vrijednostima, moguće je modificirati postojeći simulacijski model električnog vozila koji se nalazi u „knjižnici uzoraka“ (*sample library*) softverskog paketa *SimulationX*. Ovaj model uzima u obzir cjelokupno vozilo, nagib ceste, kočenje, prijenos snage i vrijeme reakcije vozača na pritiskanje upravljačkih papučica vozila. Upravljanje je ostvareno preko *bus* signala, a vrijednosti momenata ubrzanja i kočenja vozila se izračunavaju u realnom vremenu unutar petlje i one utječu na daljnji rad cjelokupnog sustava. Slika 7.11 prikazuje cjelokupni model električnog vozila dostupnog kao uzorak iz knjižnice softvera *SimulationX*.



Slika 7.11 – Simulacijski model cjelokupnog električnog vozila [31]

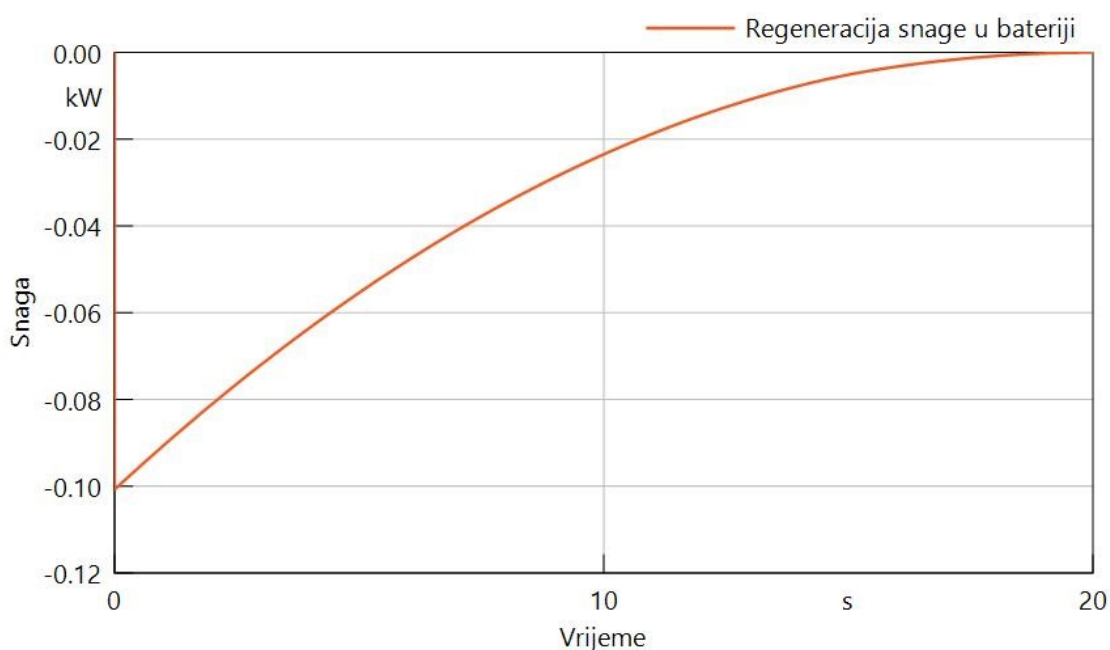
Simulacijski model cjelokupnog električnog vozila je modificiran tako da se vozilo (*e-Crafter*) kreće prema SORT ciklusu vožnje (poglavlje 5.5) na kojem će se prikazati stanje napunjenosti baterije (slika 7.12).



Slika 7.12 - Graf ovisnosti napunjenosti baterije cjelokupnog modela električnog vozila tijekom regenerativnog kočenja o vremenu simulacije

Ovdje se jasno vidi način rada SORT ciklusa vožnje. Vozilo ubrzava od 1. do 5. s do brzine od 20 km/h i vozi konstantnom brzinom do 19. s kada počinje kočiti i zaustavi se u 25. s, te miruje do 45. s kada ponovo ubrzava. Tijekom vožnje baterija se prazni, a kada vozilo koči dio električne energije se regenerira pomoću generatora. Od 45. do 60. s vozilo ubrzava do 40 km/h te vozi tom brzinom do 68. s kada počinje kočenje, a vozilo se zaustavi u 80. s. Treći dio ciklusa počinje u 100. s kada vozilo ubrzava do brzine od 50 km/h do 120. s, vozi se tom brzinom do 150. s, a do 165. s se vozilo zaustavlja. Kao i kod slike 7.10 gdje je prikazano punjenje baterije tijekom jednog ciklusa regenerativnog kočenja, i u ovom detaljnijem modelu je vidljivo da se kočenjem regenerira minimalna količina električne energije koja se pohranjuje u bateriju vozila.

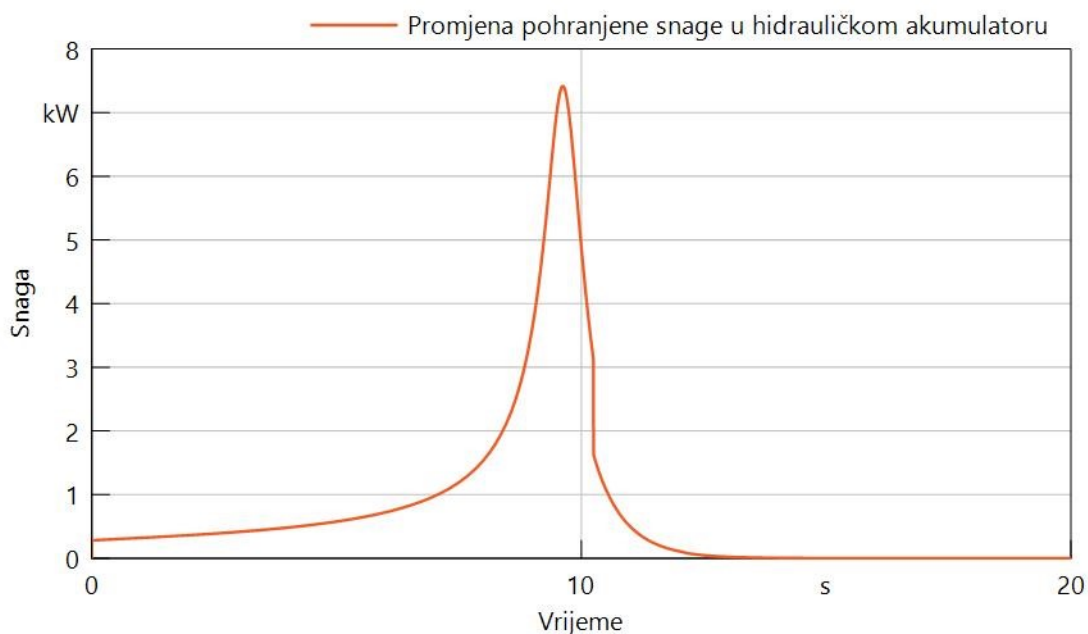
Što se tiče pohranjene snage u bateriji tijekom regenerativnog kočenja, slika 7.11 prikazuje snagu pohranjenu u bateriji tijekom jednog procesa regenerativnog kočenja objašnjenog kroz pojednostavljeni model (slika 7.9) koja iznosi 0,1 kW. Ovaj graf u softveru *SimulationX* predstavlja gubitak snage na bateriji, a kako se u slučaju regenerativnog kočenja baterija puni, snaga na grafu je prikazana s negativnim predznakom.



Slika 7.13 – Graf ovisnosti regenerirane snage baterije tijekom regenerativnog kočenja o vremenu simulacije

Simulacijski model hidrauličkog regenerativnog kočenja jednak je kao u poglavlju 6.2, te se na slikama 6.10 i 6.11 vidi da se kroz 10 s kočenja hidraulički akumulator u potpunosti napuni

stlačenim radnim fluidom pri maksimalnom tlaku potrebnom za daljnje pokretanje vozila, za razliku od električnog regenerativnog kočenja koje napuni gotovo zanemariv dio električne energije u bateriji. Što se tiče pohranjene snage kod regenerativnog kočenja pomoću hidrauličke pumpe, slika 7.14 prikazuje promjenu pohranjene u hidrauličkom akumulatoru za vrijeme usporavanja vozila. U trenutku kada se hidraulički akumulator u potpunosti napuni radnom tekućinom oko 10. s pohranjena snaga iznosi 7,4 kW. Snaga na grafu zatim naglo pada, kako graf prikazuje samo promjenu snage, a ne trenutno stanje u hidrauličkom akumulatoru.



Slika 7.14 – Graf ovisnosti promjene pohranjene snage u hidrauličkom akumulatoru za slučaj regenerativnog kočenja o vremenu simulacije

Usporedbom ovih grafova vidi se razlika pohranjene snage u električnoj bateriji, odnosno hidrauličkom akumulatoru. Kao što je prikazano u tablici 7.2, hidraulički akumulator može pohraniti snage do red veličine više nego može pohraniti električna baterija, uz puno brže punjenje i ponovno iskorištenje snage za pokretanje vozila.

8. ZAKLJUČAK

Iako su hidraulička električna hibridna vozila još uvijek u fazi razvoja, zbog svojstava regenerativnog kočenja i kretanja kojim se štedi energija, a time i razina zagađenja okoliša, ona bi mogla pronaći svoju primjenu kod vozila koja moraju često stajati i kretati, kao što su dostavna vozila ili vozila za odvoz smeća. Količina dostupnog momenta za kretanje vozila koji se razvija pomoću hidromotora pada s padom tlaka i količine hidraulične tekućine, no u relativno kratkim vremenskim intervalima može se uštedjeti na električnoj energiji potrebnoj za pogon elektromotora, čime se povećava njegova iskoristivost, a time i maksimalni domet električnog vozila. Kako se u zadnje vrijeme sve više nastoji smanjiti korištenje konvencionalnih vozila koja za pogon koriste motor s unutarnjim izgaranjem, tako bi u budućnosti mogao rasti interes za vozilima sa sustavom regenerativnog kočenja ostvarenog hidrauličkim sustavom, da bi se dobila maksimalna iskoristivost elektromotora uz minimalno zagađenje okoliša i štednju goriva. Rastom popularnosti električnih automobila i uz nedostatke elektromotora i električne baterije korištenih u vozilima, bilo bi vrlo korisno ugrađivati hidraulički hibridni sustav u postojeća vozila, ili razvijati hidraulička električna hibridna vozila. Hidrostatska transmisija pokazuje dobre rezultate tijekom pogona električnog vozila, pogotovo kod teških vozila koja se često zaustavljaju i pokreću. Takva vozila bi najviše imala koristi od hidrauličkog električnog hibridnog sustava, pogotovo u bližoj budućnosti kada će se nastojati preći na zelenu energiju za pogon vozila, te za uštedu energije u vožnji. Ako bi se ovakav sustav ugradio na vozilo koje često mora stajati i kretati, bilo bi moguće koristiti energiju pohranjenu regenerativnim kočenjem za pokretanje vozila samo pomoću hidrostatske transmisije i na taj način pogoniti vozilo uz minimalni utrošak električne energije.

U ovom radu je izrađen simulacijski model hidrauličkog električnog hibridnog vozila uz definirane parametre dobivene proračunom i uzimajući u obzir iskoristivost i gubitke svake komponente, kao i otpore koji se javljaju tijekom vožnje. Rezultati koje daju komponente odabrane proračunom ne odstupaju previše od proračunatih parametara, tako da se zaključuje da su komponente odabrane pravilno i funkcioniraju ispravno unutar simulacijskog softvera. Neke vrijednosti kao što su snaga, moment i ubrzanje dobiveni simulacijom su u danom trenutku poprimili i do dvostruko veće vrijednosti od proračunatih. To se javlja zbog tog jer softver *SimulationX* izračunava te rezultate kao trenutno stanje pojedine komponente, odnosno njeno radno opterećenje, koje brzo pada na nižu vrijednost kako vozilo poprima konstantnu brzinu kretanja. Rezultati simulacije brzine i ubrzanja vozila dobiveni kroz duži vremenski period nego kod korištenja sustava u praksi, kako

bi se radni parametri dobiveni na grafovima jasnije vidjeli i analizirali. Neki grafovi kao što su ubrzanje vozila i okretni moment pogonskih kotača ispadaju isti, ali vrijednosti na osima su različite. Također, kako kasniji simulacijski modeli kao što su produženo i dvostruko ubrzanje sadrže dodatne komponente s vlastitom masom i parametrima, softver to uzima u obzir, te daje drugačije rezultate brzine i ubrzanja vozila. Simulacija se izvršava uspješno, te se dokazuje da bi bilo moguće i učinkovito koristiti hibridni hidraulički sustav kod električnih vozila veće mase koja se često moraju zaustavljati i pokretati, iako se ovdje radi o pojednostavljenim modelima u kojima se ne uzima u obzir nagib ceste, stanje napunjenosti baterije koja pogoni elektromotor ili mehaničke gubitke kod prijenosa snage unutar vozila. Izrađeni modeli pet načina rada hidrauličkog električnog hibridnog vozila su rađeni s jednim ciklusom kočenja i kretanja vozila. Kako je u realnom slučaju često kretanje i zaustavljanje, u budućim istraživanjima bi se mogao simulirati sveukupni sustav s režimom vožnje kreni-stani, na kojem bi se promatralo ponašanje pojedine komponente, tlak i napunjenost hidrauličkog akumulatora radnom tekućinom, te brzina i ubrzanje vozila. Također, mogao bi se promijeniti nagib ceste po kojem se vozi vozilo koje se simulira čime bi se dobili rezultati vozila pod maksimalnim opterećenjem. Konačno, povezivanjem komponenata kao što su baterija, elektromotor i zadani režim vožnje na *bus* sustav mogli bi se dobiti rezultati koji su najbliži realnom slučaju vožnje, a koji bi mogli pokazati i razliku između stanja napunjenosti baterije kod konvencionalnog električnog vozila i kod hidrauličkog električnog hibridnog vozila, što je u ovom radu napravljeno samo u dijelu proračuna. Tako da ovaj rad, iako se analiziraju modeli jednostavniji od onih kakvi bi se koristili u praksi pokazuje da je korisno koristiti hidraulički hibridni sustav u električnim vozilima, te da bi se na taj način pozitivno utjecalo na zaštitu okoliša i iskoristivost energije.

9. LITERATURA

- [1]. King D.: „Hybrid vehicle“, s interneta, https://hr2.wiki/wiki/Hybrid_vehicle, 22.1.2022.
- [2]. *United States Enviromental Protection Agency: „How hybrids work“*, s interneta, <https://www.fueleconomy.gov/feg/hybridtech.shtml>, 26.1.2022.
- [3]. Lustbader J.: „Hydraulic hybrid vehicle“, s interneta, https://wblog.wiki/hr/Hydraulic_hybrid, 22.1.2022.
- [4]. Brnčić D.: „Projekt hidrauličkog hibridnog sustava za gospodarsko vozilo“, Sveučilište u Rijeci, 2016.
- [5]. Yang J., Zhang T., Hong J., Meng Z.: *Research on the Starting Acceleration Characteristics of a New Mechanical–Electric–Hydraulic Power Coupling Electric Vehicle*, Qingdao University, 2020.
- [6]. Cipek M.: „Kratak pregled razvoja hibridnih automobila“, s interneta, http://ekospark.com/info/02_tehnologija/01_automobili/istorija/razvoj_hronologija_01/razvoj_hronolog_1.html, 22.1.2022.
- [7]. Ireson N.: „Porsche 1900 Semper Vivus Hybrid Live Photos: 2011 Geneva Motor Show“, s interneta, https://www.motoraauthority.com/news/1056121_2012-porsche-panamera-s-hybrid-live-photos-2011-geneva-motor-show, 23.1.2022.
- [8]. Marušić Ž.: „Povijest automobila s hibridnim pogonom“, s interneta, <https://autoportal.hr/tehnika/povijest-automobila-s-hibridnim-pogonom-toyota-prius-1997-nije-prvi-to-je-bio-belgijski-pieper-iz-1899/>, 23.1.2022.
- [9]. Edsall L.: „This hybrid car dates to 1917“, s interneta, <https://journal.classiccars.com/2019/11/28/this-hybrid-drive-car-dates-to-1917/>, 23.1.2022.
- [10]. Marušić Ž.: „Toyota Prius 1997 - danas“, s interneta, <https://autoportal.hr/aktualno/toyota-prius-1997-danas-hibridni-revolucionar-koji-je-usprkos-skepsi-uspio-promijeniti-svijet/>, 23.1.2022.
- [11]. Gould R.: „Technology: stop-go drive system starts road test sin Sweden“, s interneta, <https://www.newscientist.com/article/mg12316843-100-technology-stop-go-drive-system-starts-road-tests-in-sweden/>, 24.1.2022.
- [12]. FIBA Canning Inc.: „Cumulo system“, s interneta, <http://primary.fibacanning.com/cumulo/hybrid/>, 24.1.2022.

- [13]. Van Rensselar J.: „*Power to spare: Hydraulic hybrids*“, s interneta, https://www.stle.org/images/pdf/STLE_ORG/BOK/LS/Hydraulics/Power%20to%20Sp%20are%20Hybrids_tlt%20article_Feb12.pdf, 24.1.2022.
- [14]. Summers N.: „*UPS will use Arrivals electric trucks in USA and Europe*“, s interneta, https://www.engadget.com/2020-01-29-ups-arrival-electric-trucks-order-investment.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAACuGWAjJtkgt4gzjqYRJlwVzOSnPjTA3mY_hicQwpIKAvG9u93ddOUFEmYudF1cPGT1gEWiGgIaX02aZ-yI4rgiSvUbiYIDeWOFotBF-x-Q33jYmHernfu39KvCj-I6-SsXHRQpog0t8-2MMcc2Rsa0QvXxA9XOwwO8Nh8sxiz4u, 27.1.2022.
- [15]. Krishnamurthy M., Garcia J.: „*Electric-hydraulic hybrid drivetrain for city vehicles: A novel approach to on-board energy storage*“, Illinois Institute of Technology, 2014.
- [16]. Hwang H-Y., Lan T-S., Chen J-S.: *Optimization and application for hydraulic electric hybrid vehicle*, National Taipei University of Technology, 2020.
- [17]. Tvrđić V., Podrug S.: „*Hydraulic hybrid vehicle and comparison with hybrid electric vehicle*“, Sveučilište u Splitu, 2018.
- [18]. Bernell Hydraulics: „*Are hybrid hydraulic systems the future for large vehicles?*“, s interneta, <https://www.bernellhydraulics.com/are-hybrid-hydraulic-systems-the-future-for-large-vehicles/>, 7.6.2022.
- [19]. Sun Y., Garcia J., Krishnamurthy M.: *A novel fixed displacement electric-hydraulic hybrid (EH2) drivetrain for city vehicles*, Illinois Institute of Technology, 2013.
- [20]. Volkswagen commercial vehicles: „*e – Crafter concept vehicle*“, s interneta, <https://www.volkswagen-vans.co.uk/en/about-us/van-life/ecrafter.html>, 8.6.2022.
- [21]. Kane M.: „*Volkswagen starts e – Crafter production in Poland*“, s interneta, <https://insideevs.com/news/435788/volkswagen-started-e-crafter-production-poland/>, 8.6.2022.
- [22]. Bosch Rexroth: „*Axial piston motors*“, s interneta, <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/mobile-hydraulics/motors/axial-piston-motors/fixed-motors/a4fm>, 26.1.2022.
- [23]. Bosch Rexroth: „*Bladder - type accumulators*“, s interneta, <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/industrial-hydraulics/accumulators/hydro-pneumatic-accumulators/hab-ce>, 27.1.2022.

- [24]. Brnčić D., Gregov G.: *Numerical simulation study of parallel hydraulic hybrid system for a delivery van*, University of Rijeka, 2017.
- [25]. INA Maziva: „Maziva i srodni proizvodi za industriju“, s interneta, https://www.ina-maziva.hr/storage/media/ti/EPOLSP-XX-HR-20210101_TI_INA_Epol_SP_68_100_150_220_320_460_680_800_1000_HR-01-2021.pdf, 21.6.2022.
- [26]. Rydberg K-E.: *Energy efficient hydraulic hybrid drives*, Linkoping University Sweden, 2009.
- [27]. Hellsing J.: *Electric hybrids – also for heavy vehicles and machines*, Volvo Technology, 2008.
- [28]. King D.: „Hydraulic hybrid vehicle“, s interneta, https://hr2.wiki/wiki/Hydraulic_hybrid_vehicle, 24.1.2022.
- [29]. CZero solutions: „Engineering hydraulic hybrid vehicles“, s interneta, <https://czero-solutions.com/projects/hydraulic-hybrid-vehicles/>, 24.1.2022.
- [30]. Zhou H., Zhaoping X., Liang L., Dong L., Lingling Z.: *Design and validation of a novel hydraulic hybrid vehicle with wheel motors*, Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [31]. ESI Group: *SimulationX Sample Library*, „Electric vehicle powertrain“, 2.9.2022.

10. POPIS OZNAKA

| | | |
|------------------|----------------------|--|
| P_{em} | [kW] | snaga elektromotora |
| m_{Vmax} | [kg] | maksimalna masa vozila |
| G_{Vmax} | [N] | maksimalna težina vozila |
| d_k | [m] | promjer kotača |
| v | [km/h] | maksimalna brzina vožnje |
| A | [m ²] | površina prednje strane vozila |
| C_d | [-] | koeficijent otpora kretanja vozila |
| a | [m/s ²] | ubrzanje |
| θ | [°] | nagib ceste po kojoj se vozilo kreće |
| μ | [-] | faktor trenja kotrljanja između gume i asfalta |
| ρ | [kg/m ³] | gustoća zraka pri 25 °C |
| F_{tr} | [N] | sila trenja vozila |
| F_{oz} | [N] | sila otpora zraka |
| F_{in} | [N] | sila otpora ubrzanja |
| F_{on} | [N] | sila otpora nagiba ceste |
| F_V | [N] | vučna sila |
| T_{Vmax} | [Nm] | maksimalni moment na kotačima vozila |
| i_d | [-] | diferencijalni omjer mjenjača |
| i_{pto} | [-] | omjer mjenjača za odvod snage |
| T_{shf} | [Nm] | moment na vratilu pumpe/hidromotora |
| Δp | [bar] | pad tlaka na pumpi/hidromotoru |
| η_{hm} | [-] | hidromehanička iskoristivost pumpe/hidromotora |
| T_{th} | [Nm] | teoretski moment na vratilu pumpe/hidromotora |
| Q_1 | [cm ³] | specifični protok pumpe/hidromotora |
| n_{max} | [okr/min] | maksimalna brzina vrtnje vratila pumpe/hidromotora |
| Q_{max} | [l/min] | maksimalni protok pumpe/hidromotora |
| Δp_{max} | [bar] | maksimalni tlak na pumpi/hidromotoru |
| T_{max} | [Nm] | maksimalni moment na pumpi/hidromotoru |

| | | |
|--------------|----------------------|---|
| E_B | [J] | kinetička energija kočenja vozila |
| E_{B1} | [J] | kinetička energija kočenja pohranjena u visokotlačnom spremniku |
| V_0 | [l] | pretpostavljeni volumen visokotlačnog spremnika |
| p_1 | [bar] | pretpostavljeni minimalni tlak visokotlačnog spremnika |
| p_2 | [bar] | pretpostavljeni maksimalni tlak visokotlačnog spremnika |
| p_0 | [bar] | tlak u visokotlačnom spremniku prije nego je pun |
| κ | [-] | koeficijent adijabate ulja |
| V_{oil} | [l] | maksimalni volumen ulja u spremniku |
| E_A | [J] | maksimalna energija pohranjena u visokotlačnom spremniku |
| d_u | [mm] | unutarnji promjer hidrauličkih cijevi |
| v_s | [m/s] | srednja dopuštena brzina strujanja radne tekućine |
| s_{min} | [mm] | debljina stijenke cijevi |
| p | [bar] | tlak u cijevima |
| K | [N/mm ²] | čvrstoća materijala cijevi |
| S | [-] | faktor sigurnosti |
| v_{kz} | [-] | faktor kvalitete zavara |
| c_1 | [mm] | dodatak zbog netočnosti izrade cijevi |
| c_2 | [mm] | dodatak zbog istrošenosti uzrokovane korozijom cijevi |
| s | [mm] | usvojena vrijednost debljine stijenke cijevi |
| Δp_c | [bar] | pad tlaka u cijevima |
| λ | [-] | faktor trenja strujanja ulja kroz cijevi |
| ρ_u | [kg/m ³] | gustoća ulja |
| v_{rt} | [m/s] | brzina strujanja radne tekućine |
| l | [m] | duljina cijevi |
| Re | [-] | Reynoldsov broj za laminarno strujanje tekućine |
| W_{uk} | [J] | ukupni utrošeni rad vozila |
| W_u | [J] | rad vozila tijekom ubrzavanja |
| W_k | [J] | rad vozila tijekom vožnje konstantnom brzinom |
| F_u | [N] | vučna sila tijekom ubrzavanja |
| s_u | [m] | prijeđeni put tijekom ubrzavanja |
| F_k | [N] | sila otpora kotrljanja |

| | | |
|----------|-----|--|
| F_z | [N] | sila aerodinamičkog otpora zraka |
| F_k | [N] | vučna sila vozila tijekom vožnje konstantnom brzinom |
| s_k | [m] | prijeđeni put tijekom vožnje konstantnom brzinom |
| E_{rk} | [J] | energija koja se apsorbira regenerativnim kočenjem |

11. POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1.1 - Hibridno vozilo s elektromotorom i motorom s unutarnjim izgaranjem [2] | 1 |
| Slika 2.1 - Porsche hibridni automobil s elektromotorima u kotačima [7] | 4 |
| Slika 2.2 - Prvi hibridni automobil koji je konstruirao Henri Pieper 1899. [8] | 5 |
| Slika 2.3 - Hibridni automobil tvrtke Owen magnetic iz 1917. [9] | 5 |
| Slika 2.4 - Toyota Prius iz 1997. s hibridnim pogonom [8]..... | 6 |
| Slika 3.1 – Konstrukcija Cumulo brake drive-a u vozilu [11] | 7 |
| Slika 3.2 – Autobus s hidrauličkim hibridnim pogonom BER System iz 1996. [21] | 8 |
| Slika 3.3 – UPS kamion za dostavu, dizel-hidraulički hibrid iz 2006. godine [13]..... | 8 |
| Slika 4.1 – Testno go-kart hidrauličko električno hibridno vozilo [15]..... | 10 |
| Slika 4.2 – Odnos napunjenosti baterije kod električnog vozila i hidrauličkog električnog hibridnog vozila [16]..... | 11 |
| Slika 4.3 – Shematski prikaz hidrauličkog električnog hibridnog vozila [19]..... | 13 |
| Slika 4.4 – Shematski prikaz rada vozila u načinu vožnje pri konstantnoj brzini..... | 14 |
| Slika 4.5 – Shematski prikaz rada vozila kod regenerativnog kočenja | 15 |
| Slika 4.6 – Shematski prikaz rada vozila u načinu ubrzavanja korištenjem hidrostatske transmisije | 16 |
| Slika 4.7 – Shematski prikaz rada vozila u načinu produženog ubrzavanja | 16 |
| Slika 4.8 – Shematski prikaz rada vozila u načinu dvostrukog ubrzavanja | 17 |
| Slika 5.1 – Volkswagen e-Crafter [25]..... | 18 |
| Slika 5.2 – Odabrana pumpa Bosch Rexroth A4FM-250 [22]..... | 21 |
| Slika 5.3 - Hidraulički akumulator Bosch Rexroth HAB [23]..... | 23 |
| Slika 5.4 – Ovisnost brzine o vremenu vožnje kod SORT testa [4]..... | 27 |
| Slika 5.5 – Skica paralelnog hidrauličkog električnog hibridnog vozila | 35 |
| Slika 6.1 – Simulacijski model vožnje korištenjem elektromotora..... | 37 |
| Slika 6.2 – Simulacijski model vožnje korištenjem elektromotora..... | 37 |
| Slika 6.3 - Graf ovisnosti puta o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora | 38 |
| Slika 6.4 – Graf ovisnosti ubrzanja vozila o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora | 39 |
| Slika 6.5 – Graf ovisnosti momenta na pogonskim kotačima o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Slika 6.6 – Graf ovisnosti izlazne snage elektromotora i snage na pogonskom kotaču o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora..... | 40 |
| Slika 6.7 - Graf ovisnosti promjene snage vozila o vremenu simulacije za vožnju pomoću elektromotora | 41 |
| Slika 6.8 – Simulacijski model regenerativnog kočenja | 42 |
| Slika 6.9 – Graf ovisnosti brzine vrtnje ulaznog vratila hidrauličke pumpe o vremenu simulacije | 44 |
| Slika 6.10 – Graf ovisnosti efektivnog momenta hidrauličke pumpe o vremenu simulacije..... | 44 |
| Slika 6.11 – Graf ovisnosti volumena ulja unutar hidrauličkog akumulatora za slučaj regenerativnog kočenja o vremenu simulacije | 45 |
| Slika 6.12 – Graf ovisnosti tlaka ulja unutar hidrauličkog akumulatora za slučaj regenerativnog kočenja o vremenu simulacije | 45 |
| Slika 6.13 – Graf ovisnosti snage hidrauličke pumpe za slučaj regenerativnog kočenja o vremenu simulacije | 46 |
| Slika 6.14 – Simulacijski model laganog ubrzavanja | 47 |
| Slika 6.15 – Graf ovisnosti volumena ulja unutar hidrauličkog akumulatora za slučaj laganog ubrzavanja o vremenu simulacije | 48 |
| Slika 6.16 – Graf ovisnosti tlaka ulja unutar hidrauličkog akumulatora za slučaj laganog ubrzavanja o vremenu simulacije | 48 |
| Slika 6.17 – Graf ovisnosti efektivnog momenta hidromotora za slučaj laganog ubrzavanja o vremenu simulacije | 49 |
| Slika 6.18 – Graf ovisnosti brzine vozila za slučaj laganog ubrzavanja o vremenu simulacije.... | 50 |
| Slika 6.19 – Graf ovisnosti ubrzanja vozila za slučaj laganog ubrzavanja o vremenu simulacije | 50 |
| Slika 6.20 - Graf ovisnosti snage hidromotora za slučaj laganog ubrzavanja o vremenu simulacije | 51 |
| Slika 6.21 – Simulacijski model produženog ubrzavanja | 52 |
| Slika 6.22 – Graf ovisnosti volumena i tlaka ulja u hidrauličkom akumulatoru za slučaj produženog ubrzavanja o vremenu simulacije | 53 |
| Slika 6.23 – Graf ovisnosti brzine vozila u slučaju produženog ubrzavanja o vremenu simulacije | 53 |
| Slika 6.24 - Graf ovisnosti ubrzanja vozila u slučaju produženog ubrzavanja o vremenu simulacije | 54 |
| Slika 6.25 - Graf ovisnosti snage na pogonskim kotačima za slučaj produženog ubrzavanja o vremenu simulacije | 55 |

| | |
|---|----|
| Slika 6.26 – Graf ovisnosti okretnog momenta pogonskih kotača za slučaj produženog ubrzavanja o vremenu simulacije | 55 |
| Slika 6.27 – Simulacijski model dvostrukog ubrzavanja | 57 |
| Slika 6.28 – Graf ovisnosti brzine vozila za slučaj dvostrukog ubrzavanja o vremenu simulacije | 58 |
| Slika 6.29 - Graf ovisnosti ubrzanja vozila za slučaj dvostrukog ubrzavanja o vremenu simulacije | 59 |
| Slika 6.30 - Graf ovisnosti snage na pogonskim kotačima za slučaj dvostrukog ubrzavanja o vremenu simulacije | 59 |
| Slika 6.31 - Graf ovisnosti okretnog momenta pogonskih kotača za slučaj dvostrukog ubrzavanja o vremenu simulacije | 60 |
| Slika 7.1 – Stvarni moment na pumpi tijekom regenerativnog kočenja (prethodni rad) [4]..... | 61 |
| Slika 7.2 – Tlak ulja u akumulatoru tijekom regenerativnog kočenja (prethodni rad) [4]..... | 62 |
| Slika 7.3 - Volumen ulja u akumulatoru tijekom regenerativnog kočenja (prethodni rad) [4]..... | 62 |
| Slika 7.4 - Stvarni moment na hidromotoru tijekom kretanja vozila (prethodni rad) [4] | 63 |
| Slika 7.5 - Stvarni protok kroz hidromotor tijekom kretanja vozila (prethodni rad) [4]..... | 64 |
| Slika 7.6 – Graf ovisnosti protoka radne tekućine kroz hidromotor u slučaju laganog ubrzavanja o vremenu simulacije | 65 |
| Slika 7.7 - Tlak ulja u akumulatoru tijekom kretanja vozila (prethodni rad) [4] | 65 |
| Slika 7.8 - Volumen ulja u akumulatoru tijekom kretanja vozila (prethodni rad) [4]..... | 66 |
| Slika 7.9 – Simulacijski model regenerativnog kočenja za električno vozilo..... | 71 |
| Slika 7.10 – Graf ovisnosti napunjenosti baterije električnog vozila tijekom regenerativnog kočenja o vremenu simulacije | 72 |
| Slika 7.11 – Simulacijski model cjelokupnog električnog vozila [31] | 73 |
| Slika 7.12 - Graf ovisnosti napunjenosti baterije cjelokupnog modela električnog vozila tijekom regenerativnog kočenja o vremenu simulacije | 73 |
| Slika 7.13 – Graf ovisnosti regenerirane snage baterije tijekom regenerativnog kočenja o vremenu simulacije | 74 |
| Slika 7.14 – Graf ovisnosti promjene pohranjene snage u hidrauličkom akumulatoru za slučaj regenerativnog kočenja o vremenu simulacije | 75 |

12.POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 5.1 - Svojstva odabranog mineralnog ulja INA Epol SP 68 [25] | 26 |
| Tablica 7.1 – Usporedba karakteristika elektromotora i hidromotora | 69 |
| Tablica 7.2 - Usporedba karakteristika električne baterije i hidrauličkog akumulatora | 70 |

13.SAŽETAK

U ovom radu je opisan povijesni razvoj i princip rada hibridnih vozila, te teorijske osnove rada i primjene elektro-hidrauličkih hibridnih vozila. Odabirom vozila *Volkswagen e-Crafter* i preko njegovih specifikacija obavljen je proračun u kojem su odabrane potrebne hidrauličke komponente. U softverskom paketu *SimulationX* izrađeni su simulacijski modeli elektro-hidrauličkog hibridnog vozila koji prikazuju različite načine rada koje vozilo može obavljati. Dobiveni rezultati simulacija se potom analiziraju i uspoređuju s prethodno obavljenim radom u kojem je opisan rad dizel-hidrauličkog hibridnog vozila. Dobiveni su rezultati tlaka i volumena radnog fluida spremljenog u hidrauličkom akumulatoru nakon regenerativnog kočenja, te brzina, ubrzanje i snaga vozila kada ga pokreće sustav hidrostatske transmisije. Također izrađen je i pojednostavljeni model regenerativnog kočenja električnog sustava na kojem su opisane prednosti korištenja hidrauličkog hibridnog sustava u vozilima.

Ključni pojmovi: Elektromotorni pogon, hibridna vozila, hidrauličko električno hibridno vozilo, hidrostatska transmisija

14. ABSTRACT

This paper defines the historical development and work principles of hybrid vehicles, and theoretical basis of operation and application of electric-hydraulic hybrid vehicles. By choosing the *Volkswagen e-Crafter* and using its specifications, a calculation was made in which the necessary hydraulic components were selected. In the *SimulationX* software package, simulation models of an electric-hydraulic hybrid vehicle were created that show the different modes of operation that the vehicle can perform. The obtained results of the simulations are then analyzed and compared with the previous work in which the operation of a diesel-hydraulic hybrid vehicle was described. The results of the pressure and volume of the working fluid stored in the hydraulic accumulator after regenerative braking, as well as the speed, acceleration and power of the vehicle when it is driven by the hydrostatic transmission were obtained. A simplified model of regenerative braking of the electrical system was also created, which describes the advantages of using a hydraulic hybrid system in vehicles.

Keywords: Electric drive, hybrid vehicles, hydraulic electric hybrid vehicle, hydrostatic transmission