

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
STROJARSTVA**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**REGENERATIVNI OVJESI ZA HIBRIDNA
VOZILA I MODELIRANJE BOND
GRAFOVIMA**

Vjekoslav Tvrđić

Split, rujna 2018.

SADRŽAJ

1. UVOD	3
2. HIDRAULIČNA HIBRIDNA VOZILA – PREGLED ISTRAŽIVANJA	5
2.1. Paralelna hidraulična hibridna vozila	6
2.2. Serijska hidraulična hibridna vozila	8
2.3. Hidraulična hibridna vozila podijeljene snage	11
2.4. Usporedba HHV sa HEV	12
3. REGENERATIVNI OVJESI – PREGLED ISTRAŽIVANJA	15
4. MODELIRANJE BOND GRAFOVIMA	51
4.1. Teorija bond grafova	51
4.1.1. Četverokut stanja: varijable, konstante i odnosi među njima	52
4.1.2. Elementarne komponente bond grafova	55
4.1.3. Komponente sa jednim priključkom snage.....	55
4.1.4. Komponente sa dva priključka snage	60
4.1.5. Komponente sa više priključaka snage	61
4.1.6. Kontrolirane komponente	63
4.2. Pregled istraživanja sa primjenom teorije bond grafova u strojarstvu	64
5. ZAKLJUČAK	88
LITERATURA	90
POPIS OZNAKA I KRATICA	108
SAŽETAK	112

1. UVOD

Ljudsko djelovanje nije uvelike utjecalo na stanje okoliša sve dok nije došlo do eksponencijalnog razvoja industrije. Početak promjena stanja okoliša koje je uzrokovano ljudskim djelovanjem, nastao je zbog novih aktivnosti i potreba čovjeka diljem svijeta. Razvojem i osnivanjem društvenih zajednica počinje nagli utjecaj na životni okoliš. Primjerice u prvim gradovima i naseljima dolazi do različitih vrsta onečišćenja koji dovode do epidemija zaraznih bolesti. Kako se industrija razvijala, a upotreba ugljena u proizvodnji energije bila sve veća, dolazi do stvaranja velikih količina ugljičnih, sumpornih i dušičnih oksida. Novi veliki val zagađenja dolazi paralelno sa početkom korištenja nafte i naftnih derivata. Za vrijeme trajanja ove industrijalizacije, interes za zaštitu okoliša bio je malen i svodio se na tek pokoji primjer ili slučaj. Želja za profitom u ovome periodu bila je iznad ikakve svijesti o štetnom utjecaju na okoliš. Tek poslije 1945. godine dolazi do postepenog ekološkog osvješćivanja i to nakon što se primijetilo da se broj bolesnih i umrlih od određenih bolesti relativno brzo povećava u velikim industrijskim središtima. Najveći generatori onečišćenja u svijetu su Sjedinjene Američke Države i Narodna Republika Kina.

Vrlo velika količina navedenih štetnih plinova stvara se u transportnom industrijskom sektoru. Dizel i benzinski motori postaju neučinkoviti i štetni strojevi koji sve više zagađuju ovaj planet. Potrebna su nova, efikasnija rješenja sa inteligentnim mehanizmima i uređajima koji će značajno smanjiti količinu štetnih plinova u ovome sektoru. Kao jedno od mogućih rješenja predstavljeni su hibridni automobili. Hibridni automobili su takva vrsta automobila, koji za pogon koriste dva ili više izvora energije za razliku od jednog izvora koji se koristi kod tradicionalnih automobila. Najčešće se koristi kombinacija između benzinskog ili dizelskog motora s elektromotorom. U posljednje vrijeme, ovakva vrsta vozila dobiva sve veću popularnost u javnosti zbog svoje smanjene emisije štetnih plinova i značajne redukcije u potrošnji goriva. Predmet istraživanja ovog kvalifikacijskog rada su hidraulična hibridna vozila koja za pogon koriste hidrauličnu pumpu ili motor u kombinaciji sa motorom s unutrašnjim izgaranjem.

Hidraulična hibridna vozila su trenutno relativno učinkovita vozila koja je potrebno još dodatno razvijati i učiniti ih boljima u budućnosti. Glavni fokus suvremenih istraživača je na razvoju kvalitetne strategije upravljanja energijom između više izvora snage u vozilu. Već je poznat koncept regenerativnog kočenja kojim se dio kinetičke energije zaustavljanja vozila sprema u neki drugi iskoristivi oblik energije, umjesto da se ta energija nepovratno izgubi u

okolinu pretvorbom u toplinu. Najpoznatiji tipovi regenerativnog kočenja su: regenerativno kočenje na principu zamašnjaka, na principu generatora i hidraulično regenerativno kočenje. U ovome istraživanju glavna tema su regenerativni ovjesi koji pretvaraju linearno vibracijsko gibanje vozila u korisnu energiju. Postoje različiti tipovi regenerativnih ovjesa kao što su primjerice elektromagnetski, elektromehanički, hidromehanički, hidraulični/pneumatski i magnetsko-mehanički regenerativni ovjesi. Sve je veći broj istraživača koji osmišljavaju nove tipove regenerativnih ovjesa koji rade na različitim principima rada. Cilj je razviti dovoljno učinkovit uređaj koji će povećati globalnu efikasnost hibridnog vozila uz najmanje moguće financijsko ulaganje.

Analiza procesa koji se događaju u regenerativnom ovjesu nije jednostavna i predstavlja zahtjevan zadatak za današnje znanstvenike. Kao matematički alat za modeliranje ovih složenih procesa odabrala se teorija bond grafova koja omogućava kombinirano modeliranje u različitim energetske domenama kao što su primjerice mehanička, elektrotehnička i hidraulična domena. U kasnijim poglavljima ovog kvalifikacijskog rada predstavljeni su teoretski temelji bond grafova zajedno sa pregledom istraživanja koji sadrže primjenu navedene teorije u području strojarstva.

2. HIDRAULIČNA HIBRIDNA VOZILA – PREGLED ISTRAŽIVANJA

Zbog štetnih utjecaja koji su rezultat izgaranja goriva u transportnom sektoru, hibridna vozila su sve češći predmet znanstvenih istraživanja diljem svijeta. Cilj istraživanja i razvijanja hidrauličnih hibridnih vozila (HHV) je dobiti vozilo sa smanjenom emisijom štetnih plinova, uz minimalnu potrošnju goriva i najmanje troškove početnog ulaganja. Posljednjih godina, količina goriva koja se potroši u transportnom sektoru teških vozila (kamioni i slična vozila) raste znatno brže od količine goriva koja se potroši za pogon osobnih automobila.[1] Ta činjenica je posljedica povećanog broja kamiona i autobusa u transportnom sektoru zbog sve veće potražnje za teretnim prijevozom robe i ljudi. Teška vozila i kamioni već imaju relativno učinkovite dizelske motore, stoga je za daljnje smanjenje potrošnje goriva i štetnih emisija u ovoj kategoriji transportnog sektora, potrebno osmisliti novi koncept hibridnih vozila.

Hibridno vozilo sadrži dva izvora snage (energije). Takav pogonski sustav se sastoji od motora s unutrašnjim izgaranjem i drugog izvora snage koji omogućuje skladištenje energije. Izvori snage kod HHV su motor s unutrašnjim izgaranjem i hidraulična pumpa/motor. Spremanje energije omogućeno je u hidrauličnom akumulatoru. Hidraulične pumpe, motori i akumulatori imaju vrlo visoku gustoću snage (oko 500 do 1000W/m³). Gustoća snage se definira kao količina snage po jedinici volumena. U energetske transformatorima kao što su baterije, gorive ćelije i slično, gustoća snage se tada naziva volumna gustoća snage čije ime proizlazi iz same SI jedinice. Hidraulične komponente u odnosu na električne komponente za ovu kategoriju teških vozila imaju jeftinija početna ulaganja i lakše ih je održavati. Drugim riječima, hibridizacija ove kategorije vozila pomoću hidrauličnih komponenti, vrlo je vjerojatna u budućnosti.

Kako bi prednosti hibridnog vozila došle do izražaja, potrebno je razviti odgovarajuću strategiju upravljanja energijom (engl. EMS-energy management strategy) kako bi se učinkovito mogla sinkronizirati snaga između dva različita energetska izvora. Preko 90% marketinga i komercijalizacije usmjereno je na hibridna električna vozila (HEV), a gotovo svi komercijalno dostupni (hibridni) osobni automobili i kamioni srednje teške kategorije su električni hibridi. Hidraulični hibridni sustavi sa hidrauličnom pumpom, motorima i hidrauličnim akumulatorom mogu spremati i ponovno iskoristiti veći postotak kinetičke energije od električnih generatora, motora i baterija. HHV je u stanju uhvatiti i ponovno iskoristiti približno oko 70-80% ukupne kinetičke energije kočenja. Kod HEV taj postotak

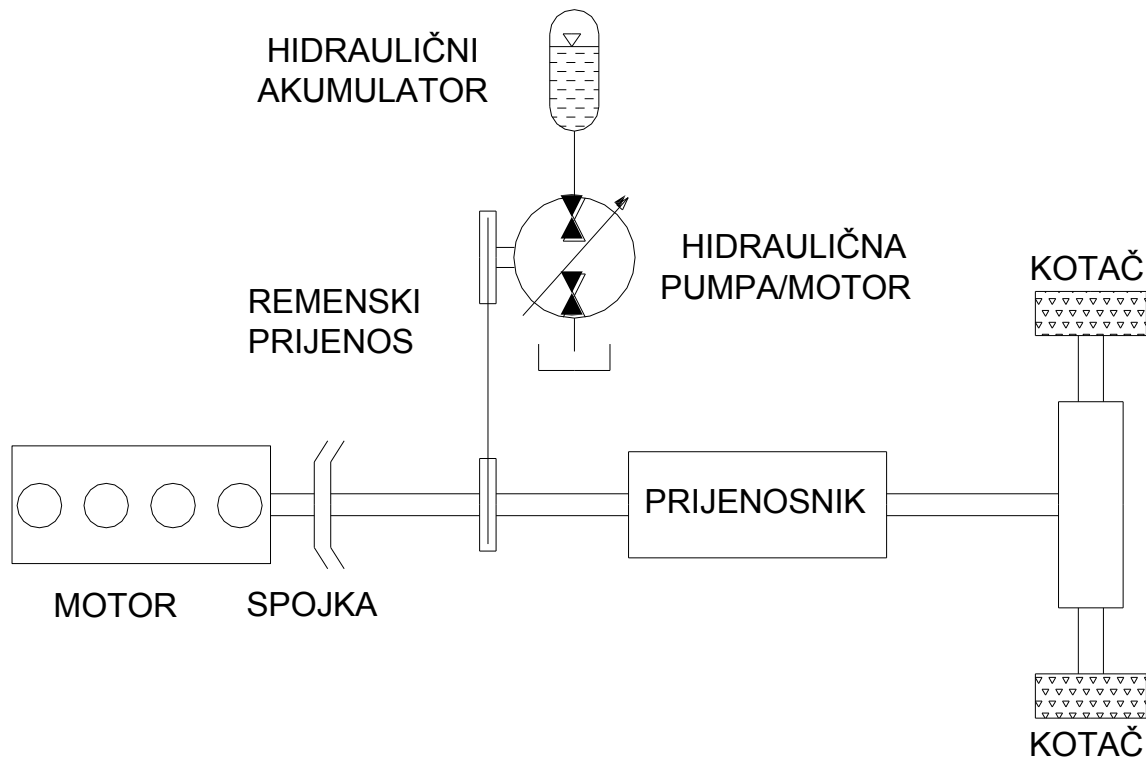
regenerativnog kočenja iznosi oko 20 do 30%, što je znatno manje nego kod HHV.[2, 3] Ova značajka i efikasnost hidrauličnih hibrida je osobito korisna za primjenu kod kamiona koji imaju takve rute putovanja gdje su česta zaustavljanja i ponovna pokretanja vozila.

Ovisno o sekundarnom izvoru snage kod hidrauličnih hibridnih vozila, postoje tri osnovne vrste konfiguracija: paralelni hidraulični hibridi, serijski hidraulični hibridi i hidraulični hibridi podijeljene snage. Svaki od tri različita tipa konfiguracije ima svoje prednosti i nedostatke. Iako je paralelnu konfiguraciju lako implementirati na postojeće konvencionalne konfiguracije vozila, ušteda goriva i nije tako velika, jer je rad motora s unutrašnjim izgaranjem ovisan o vanjskom opterećenju na kotačima. U serijskoj konfiguraciji je taj problem je riješen, ali prijenos snage u sustavu je relativno neučinkovit. Konfiguracija podijeljene snage je kombinacija paralelne i serijske konfiguracije. Ovakav tip konfiguracije umanjuje nedostatke serijske i paralelne konfiguracije, ali je najslabiji za upravljanje (najefikasniju kontrolnu strategiju upravljanja nije jednostavno odrediti). U slijedećim potpoglavljima je opisan princip rada svakog od triju konfiguracija, zajedno s pregledom literature za svaki od gore navedenih tipova HHV.

2.1. Paralelna hidraulična hibridna vozila

Kod paralelnih hidrauličnih hibridnih vozila (PHHV), za prijenos snage i gibanja koristi se konvencionalna mehanička pogonska jedinica. Koljenasto vratilo motora izravno je povezano s prijenosnikom koji je spojen na diferencijal preko kojeg se prenosi snaga na svaki od kotača. Hidraulična pumpa/motor je spojena na pogonsko vratilo između motora i prijenosnika. Navedena hidraulična komponenta omogućava isporuku hidraulične energije iz hidrauličnog akumulatora (kada to zahtjeva vožnja) ili pak u suprotnoj situaciji omogućava pohranjivanje hidraulične energije u hidraulični akumulator tijekom usporavanja vozila regenerativnim kočenjem. Mehanička spojka je postavljena između motora s unutrašnjim izgaranjem i hidraulične pumpe/motora, tako da se motor može potpuno odvojiti od vanjskog opterećenja, a vozilo tada može biti potpuno pogonjeno hidraulikom ako se u hidrauličnom akumulatoru nalazi dovoljno spremljene energije. Ovakva izvedba omogućava da se motor isključi kada nema potrebe za njegovim radom, uz mogućnost ponovnog uključivanja kada tlak u hidrauličnom akumulatoru padne na niske vrijednosti. Optimalno upravljanje motorom s unutrašnjim izgaranjem ne može se postići jer je brzina motora direktno ovisna o brzini

kotača vozila (veza preko prijenosnog omjera zupčanog prijenosa).[1, 2, 3] Shematski prikaz konfiguracije PHHV dat je na slici 2.1.



Slika 2.1. Konfiguracija paralelnog hidrauličnog hibridnog vozila (PHHV)

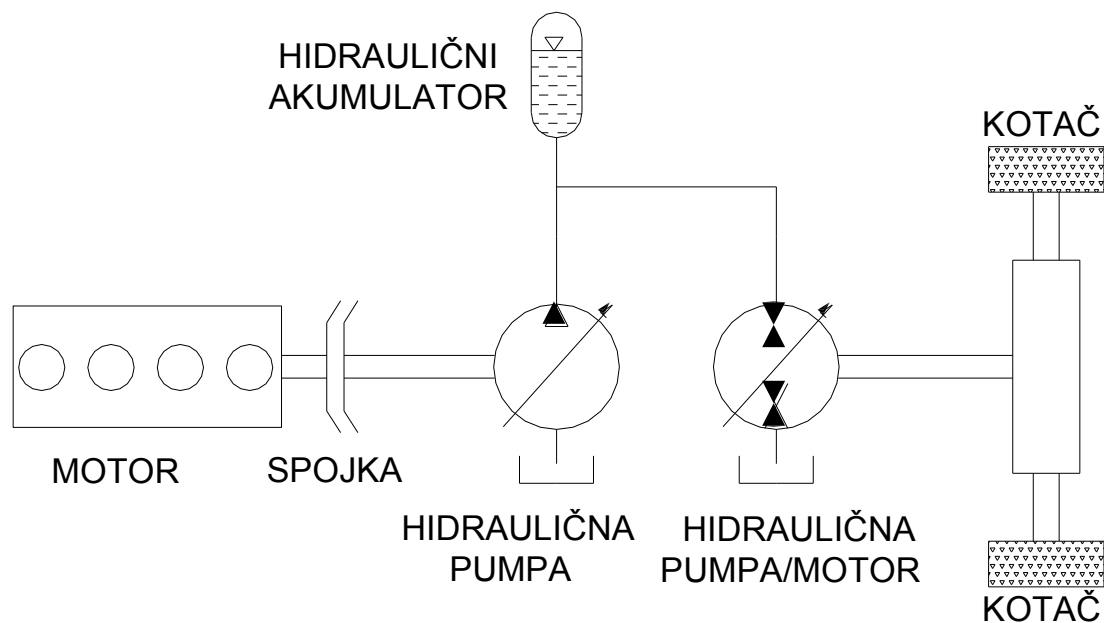
Wu i dr. [4] su predstavili razvoj strategije upravljanja energijom koju su posebno prilagodili za srednje teški kamion s paralelnim hidrauličnim hibridnim pogonom. Za modeliranje vozila koristili su MATLAB/Simulink. Uz korištenje algoritma za dinamičko programiranje (DP) iskoristili su strategiju upravljanja energijom koja se temelji na pravilima kako bi pronašli optimum za mijenjanje brzina i dijeljenje snage između motora s unutrašnjim izgaranjem i hidrauličnog motora. Stelson i dr. [5] su predstavili različite paralelne konfiguracije, serijske konfiguracije i konfiguracije podijeljene snage HHV u MATLAB okruženju. Koristili su hidraulične pumpe/motore sa promjenljivom učinkovitosti. Algoritam DP su koristili za određivanje optimalnih trajektorija za podjelu snage između motora s unutrašnjim izgaranjem i hidrauličnog motora, i to za svaku od navedenih konfiguracija. Sustave su modelirali i simulirali prema urbanim ciklusima vožnje i ciklusima vožnje na autocesti. Sakota i dr. [6] su predložili paralelni hidraulični hibridni model koji su napravili u AVL Cruise okruženju. Rezultati simulacije na modelu su pokazali da predloženi model može postići značajne uštede u potrošnji goriva, osobito u situacijama kada se vozilo pogoni isključivo na hidrauliku. Liu i

dr. [7] su predstavili strategiju kontrole regenerativnog kočenja u PHHV. U radu su prikazali model koji su analizirali nazadnom simulacijom u MATLAB/Simulink-u. Rezultati simulacije su pokazali da predstavljena strategija kontrole regenerativnog kočenja može ostvariti značajne uštede u potrošnji goriva. Hilman i dr. [8] su projektirali i testirali model PHHV za agresivni ciklus vožnje US06 kako bi demonstrirali značajno smanjenje emisije štetnih plinova i općenito smanjenje potrošnje goriva. Model su kontrolirali fuzzy logičkim sustavom, dok su model simulirali pomoću programa ADVISOR 2002. Mrdja i dr. [9] su predstavili paralelnu i serijsku konfiguraciju za hidraulički hibridni autobus. Analiza modela u ovome radu pokazala je mogućnost smanjenja potrošnje goriva za više od 15% ako se prilikom rada vozila koristi opcija isključivanja motora ovisno o različitim situacijama u vožnji. Deppen i dr. [10] su predstavili model predvidljivog kontroliranja (engl. MPC-model predictive control) za rješavanje problema upravljanja energijom u PHHV. Predstavljani model predvidljivog kontroliranja je uspješno omogućio potrebni okretni moment na kotačima, uz mogućnost korištenja opcije skladištenja energije radi povećanje uštede u potrošnji goriva. Wu i dr. [11] su predstavili metodologiju za razvoj strategije upravljanja energijom koju su posebno prilagodili za srednje veliki dostavni PHHV kamion. HHV su modelirali i simulirali u MATLAB/Simulink okruženju. Nova predstavljena strategija upravljanja (kontrole), u ovome radu koristi prednosti visoke gustoće snage i karakteristične učinkovitosti hidrauličnih komponenata, a minimizira nedostatke niske gustoće energije istih. Rezultati simulacije pokazali su da potencijal za smanjenje potrošnje goriva srednjih kamiona s hidrauličnim hibridnim pogonom može iznositi čak i do 48%. Tao i dr. [12] su razvili strategiju kontrole energije za PHHV koja se temelji na metodi logičkog praga. Simulacijski model za analizu dinamike cijelog vozila su razvili u Simulink-u. Koristili su više-ciljnu metodu optimizacije genetskog algoritma (GA) kako bi postigli optimalne režime rada. Rezultati simulacije pokazali su da se dinamička izvedba vozila može poboljšati strategijom kontrole energije koja je predstavljena u ovome radu.

2.2. Serijska hidraulična hibridna vozila

U serijskom hidrauličnom hibridnom vozilu (SHHV) uklonjen je mehanički prijenosnik, a vozilo se pogoni hidrauličnim motorom. Koljenasto vratilo motora izravno je spojeno na hidrauličnu pumpu/motor, koji je putem hidrauličnih cijevi spojen na hidraulični akumulator kako bi se omogućilo skladištenje hidraulične energije. Hidraulični akumulator pokreće (protokom fluida pod tlakom) drugu hidrauličnu pumpu/motor koji preko diferencijala predaje snagu na kotače vozila. Spojka za uključivanje i isključivanje prijenosa snage je postavljena

neposredno iza motora sa unutrašnjim izgaranjem kako bi se omogućilo odvajanje motora od vanjskog opterećenja i isključivanje istog iz rada ovisno o potrebi. SHHV konfiguracija omogućava da izlazna snaga motora ne mora odgovarati potrebama vanjskog opterećenja. Također, brzina motora s unutrašnjim izgaranjem ne mora odgovarati brzini kotača na izlazu što omogućava optimalno upravljanje motorom. Shematski prikaz konfiguracije SHHV dat je na slici 2.2.



Slika 2.2. Konfiguracija serijskog hidrauličnog hibridnog vozila (SHHV)

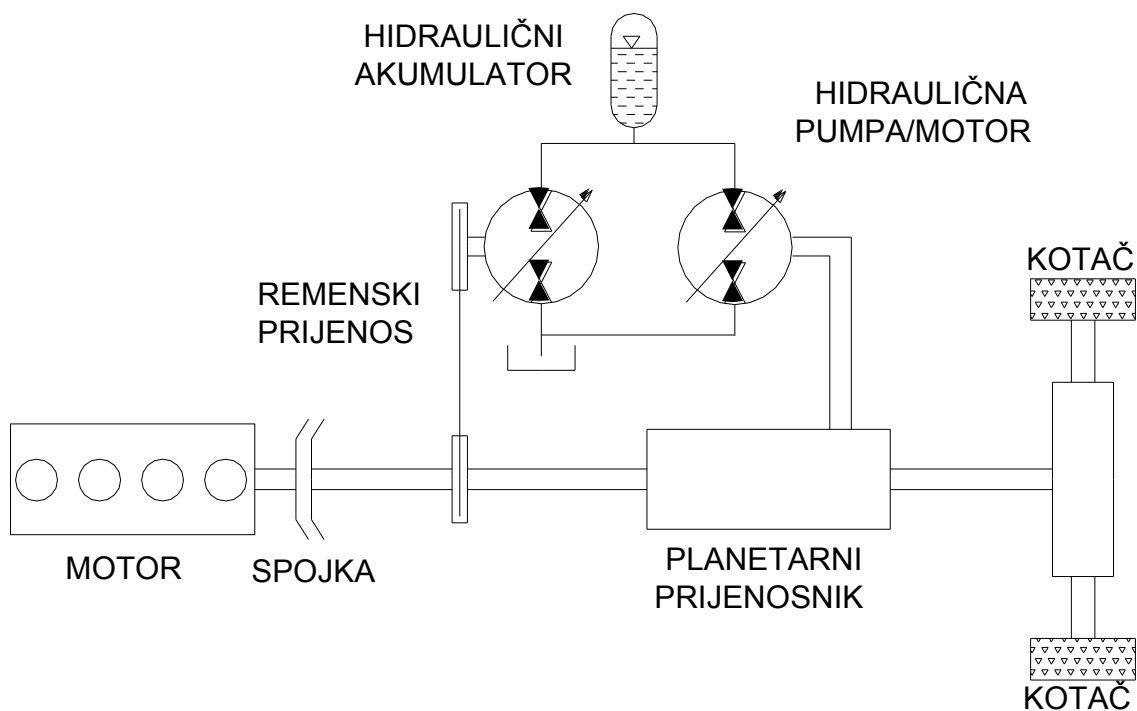
Hatti [13] je predstavio SHHV pogonski sustav za poboljšanje učinkovitosti potrošnje u automobilu. Inovacija koju je prezentirao u ovome radu omogućava neovisno upravljanje momentom na kotačima. Vu [14] je predstavio različite upravljačke sheme koje su temeljene na pravilima (metoda upravljanja) za SHHV mase 3,5 tona. Ova kontrolna strategija SHHV omogućava povećanje uštede goriva od 35% do 43% u odnosu na konvencionalno vozilo. Chen i dr. [15] su predstavili optimalnu tehniku kontrole DP za model SHHV. Povećanje ekonomičnosti predloženog sustava analizirali su za Japanski 1015 ciklus vožnje s različitim strategijama kontrole za SHHV. Rezultati simulacije pokazali su da poboljšanje uštede goriva predloženog sustava (ako se koristi strategija upravljanja koja se temelji na pravilima) može biti do 80% više u odnosu na uštede koje se dobiju korištenjem tradicionalne hidrostatičke strategije upravljanja. Kada bi se koristila tehnika upravljanja DP, rezultati poboljšanja potrošnje goriva mogu biti i do 112% u odnosu na ostale strategije upravljanja. Chen i dr. [16] su opisali konfiguraciju i radni princip SHHV koji se temelji na hidrauličnom transformatoru kojim je moguće povećati potencijal regeneracije energije u HHV. Rezultati simulacije

pokazali su da je bolje postaviti hidraulične akumulatore u seriju nego u paralelnu vezu jer se tako smanjuje prigušno pulsiranje hidrauličnog transformatora. Prilikom simulacije uzeli su u obzir i efekte hidrauličnih cijevi. Baer i dr. [17] su izmijenili postojeći model SHHV kako bi pokazali utjecaj sužavanja intervala radnih točaka motora na mogućnosti povećanja učinkovitosti čitavog sustava. Proučili su problem konstruiranja lakih vozila obzirom na učinak njegovih glavnih hidrauličnih komponenata, posebno u smislu smanjenja dimenzija komponenti, bez ugrožavanja točnosti, voznih karakteristika i količine regenerirane energije. Model SHHV su simulirali i analizirali za standardne urbane cikluse vožnje. Feng i dr. [18] su predstavili naprijed-usmjereni (metoda upravljanja) simulacijski model SHHV i njegovu primjenu kako bi procijenili predstavljenu strategiju upravljanja energijom. Zajedno s predloženom hijerarhijskom kontrolnom konfiguracijom su analizirali i strategiju nadzora upravljanja energijom koja se temeljila na termostatskom stanju napunjenosti (engl. SoC – State of Charge). Rezultati simulacije za FUDS cikluse vožnje pokazali su da bi se potrošnja goriva u odnosu na konvencionalna vozila mogla poboljšati za 96,5% uz gašenje motora s unutrašnjim izgaranjem i za 71,9% uz rad motora u praznome hodu. Filipi i dr. [19] su predložili metodologiju "motora-u-petlji" (engl. EIL-Engine in the loop) za kombinirani hibridni sustav radi poboljšanja ekonomije goriva i smanjenja emisija štetnih plinova. Studija EIL potvrdila je prednosti modulirane kontrolne metode nad termostatskim pristupom uz demonstraciju sposobnosti SHHV da poboljša potrošnju goriva srednje teškog kamiona za 72% i smanjenje emisije za 74% u usporedbi s konvencionalnim vozilom. Payeganeh i dr. [20] su predstavili koncept spremanja energije kočenja i ponovnog korištenja te iste energije tijekom ubrzavanja serijskog hidrauličnog kamiona. Pogonski sustav kamiona i elemente hidraulične pogonske jedinice su modelirali u MATLAB/Simulink-u. Strategiju neizravne kontrole (engl. Fuzzy control strategy) osmislili su i modelirali kako bi smanjili potrošnju goriva kamiona s hibridnim pogonskim sustavom. Li i dr. [21] su predstavili koncept upravljačkog sustava za SHHV koji se temelji na tehnologiji kontrolne područne mreže (engl. CAN-Controller Area Network). Eksperimenti koje su proveli su pokazali da sustav s CAN sabirnicom ima visoku komunikacijsku pouzdanost i visoku točnost dinamičkog povezivanja. Hiremath i dr. [22] su predložili novu konfiguraciju SHHV sustava. Dinamički odziv sustava analizirali su pomoću simulacijskih rezultata modela u AMESim programu. Rezultati simulacije (nakon optimizacije) su pokazali da optimizirani parametri sustava značajno poboljšavaju energetske učinkovitost SHHV. Mahmoodi i dr. [23] su predstavili serijski hibridni hidraulično/električni sustav (SHHES) za teška hibridna vozila. Predložili su strategiju kontrole okretnog momenta koja se temelji na neizravnom logičkom upravljaču

kako bi se postigla što bolja učinkovitost prijenosa snage u vozilu uz minimalnu potrošnju goriva. Chen i dr. [24] su primijenili tehniku kontrole DP na sustav SHHV. Proučavali su i usvojili optimalne trajektorije snage i gibanja kako bi uspostavili implementiranu strategiju kontrole koja se temelji na pravilima. Predstavljenu kontrolnu strategiju simulirali su u MATLAB/Simulink okruženju radi predviđanja mogućnosti smanjenja potrošnje goriva predloženog sustava za različite režime rada.

2.3. Hidraulična hibridna vozila podijeljene snage

Hidraulično hibridno vozilo podijeljene snage (HHVPS) kombinira paralelnu i serijsku konfiguraciju u jednu. Shematski prikaz konfiguracije HHVPS dat je na slici 2.3. Mehanički pogonski sustav je konvencionalan kao i kod konfiguracije PHHV. Međutim, hidraulična pumpa/motor su spojeni na vratilo pogonskih kotača kao što je to slučaj u konfiguraciji SHHV. Kombiniranje svojstava konfiguracija PHHV i SHHV omogućava planetarni prijenosnik koji je smješten između motora s unutrašnjim izgaranjem, hidraulične pumpe/motora i kotača vozila. Konfiguracija HHVPS također omogućava optimalno upravljanje motorom s unutrašnjim izgaranjem. Spojka na izlazu iz motora s unutrašnjim izgaranjem omogućava da se isti odvoji od vanjskog opterećenja prema potrebi, baš kao i u paralelnim i serijskim konfiguracijama.



Slika 2.3. Konfiguracija hidrauličnog hibridnog vozila podijeljene snage (HHVPS)

Može se reći da HHVPS konfiguracija kombinira glavne prednosti paralelnih i serijskih konfiguracija: mehanički pogonski sustav omogućava vrlo učinkovit prijenos snage s motora na kotače kao kod paralelne konfiguracije uz mogućnost optimalnog upravljanja motora s unutrašnjim izgaranjem kao što je to slučaj kod serijske konfiguracije HHV.

Li i dr. [25] su predložili novi hidraulični hibridni gradski autobus podijeljene snage. Analizirali su različite operativne režime rada sustava. Simulacije su napravili u MATLAB/Simulink-u. Usporedba rezultata simulacije na novom hibridu sa rezultatima simulacije tradicionalnog gradskog autobusa pokazala je mogućnost korištenja motora manje snage u hidrauličnom hibridnom gradskom autobusu. Predloženim promjenama znatno bi se poboljšala potrošnja goriva i smanjila emisija štetnih plinova. Cheong i dr. [26] su predložili novi pristup za optimizaciju HHVPS konfiguracije i dimenzioniranje HHVPS prijenosnika snage. U ovome radu predstavljene su različite konfiguracije HHVPS kao što su primjerice ulazno spojena konfiguracija i izlazno spojena konfiguracija. Analiza rezultata na kompaktno dimenzioniranom vozilu pokazala je da ulazno spojena konfiguracija HHVPS ima bolju potrošnju goriva i zahtijeva manje hidraulične pumpe/motore od optimizirane izlazno spojene konfiguracije HHVPS.

2.4. Usporedba HHV sa HEV

Jedan od najvećih nedostataka HHV je niska gustoća energije. Gustoća energije je količina energije koja je pohranjena u određenom sustavu po jedinici volumena. Dakle, kako bi se energija mogla spremati i kasnije ponovno iskoristiti u HHV, potrebno je imati relativno veliki spremnik (hidraulični akumulator). Vozilo također mora imati spremnik za gorivo uz dodatni hidraulični akumulator niskog tlaka. Važno je naglasiti da za tešku kategoriju vozila ovaj nedostatak nije toliko izražen jer ima dovoljno mjesta za svu dodatnu hidrauličnu opremu. HEV nema ovaj problem jer električna baterija ima relativno visoku gustoću energije. Zbog toga se HEV koriste za manja putnička vozila. Mnoga se današnja znanstvena istraživanja bave problemom povećanja gustoće energije hidrauličnih akumulatora. Kada je riječ o gustoći snage, HHV nema konkurenciju među ostalim hibridima. Gustoća snage ili gustoća snage volumena je količina snage po jedinici volumena. HHV imaju vrlo veliku gustoću snage za razliku od HEV koji imaju nisku gustoću snage. Drugim riječima, HHV može isporučiti veliku količinu energije u vrlo kratkom vremenskom periodu. Takva situacija se primjerice javlja kada treba naglo ubrzati vozilo pod teškim opterećenjem. Glavne prednosti i nedostaci HHV i HEV prikazani su u tablici 2.1. [3]

Tablica 2.1. Glavne prednosti i nedostaci HHV i HEV

Svojstvo	HHV	HEV
Gustoća energije	Niska	Visoka
Gustoća snage	Visoka	Niska
Efikasnost regenerativnog kočenja	80%	30%
Brzina regenerativnog punjenja	Brzo	Sporo
Omjer snage po masi	Visok	Nizak
Početna ulaganja i troškovi održavanja	Niska	Visoka

Još jedna vrlo važna značajka kod hibridnih vozila je regenerativno kočenje. Regenerativnim kočenjem, hibridno vozilo hvata i sprema kinetičku energiju kočenja vozila umjesto da tu energiju gubi putem konvencionalnog kočenja. Energija pohranjena u električnim ili hidrauličnim akumulatorima može se putem regenerativnog kočenja ponovno iskoristiti za pokretanje vozila, ubrzavanje i slično. Učinkovitost regenerativnog kočenja HHV je znatno veća od učinkovitosti regenerativnog kočenja HEV [2]. Dakle, za istu količinu energije, hidraulično hibridno vozilo može spremi gotovo 80% kinetičke energije i ponovno je pretvoriti u koristan rad, dok HEV može iskoristiti samo 30% kinetičke energije vozila. Učinkovitosti hidrauličnih komponenti, hidraulične transformacije u mehaničku energiju i obratno su znatno veće nego kod električnih komponenti. Vrlo je važno koliko se brzo može spremi energija u hibridnom vozilu. Regenerativno punjenje u HHV je znatno brže od punjenja u HEV. Razlog za to je relativno sporo punjenje električne baterije u usporedbi s brzom i učinkovitom pretvorbom iz hidraulične u mehaničku energiju kod HHV. Danas cijene proizvoda i troškovi održavanja određuju konkurentnost proizvoda na tržištu. Početno ulaganje u hidrauličnu opremu je niže od ulaganja u električnu opremu HEV. To se posebno odnosi na električne baterije koje su znatno skuplje od hidrauličnih akumulatora. Period povrata investicije za HEV u kategoriji teških vozila je vrlo velik ili gotovo ne postoji. Također, puno je lakše i jeftinije održavati hidrauličke sustave od električnih. Iz svega navedenog može se zaključiti da HHV posjeduje određene prednosti u odnosu na HEV. Činjenica je da postoji problem sa prostorom za hidraulične spremnike zbog niske gustoće energije istih, iako je možda čak i veći problem niska zastupljenost HHV na tržištu. Potrebno je unaprijediti marketing HHV i upoznati širu populaciju s prednostima i mogućnostima takvih hibridnih sustava.

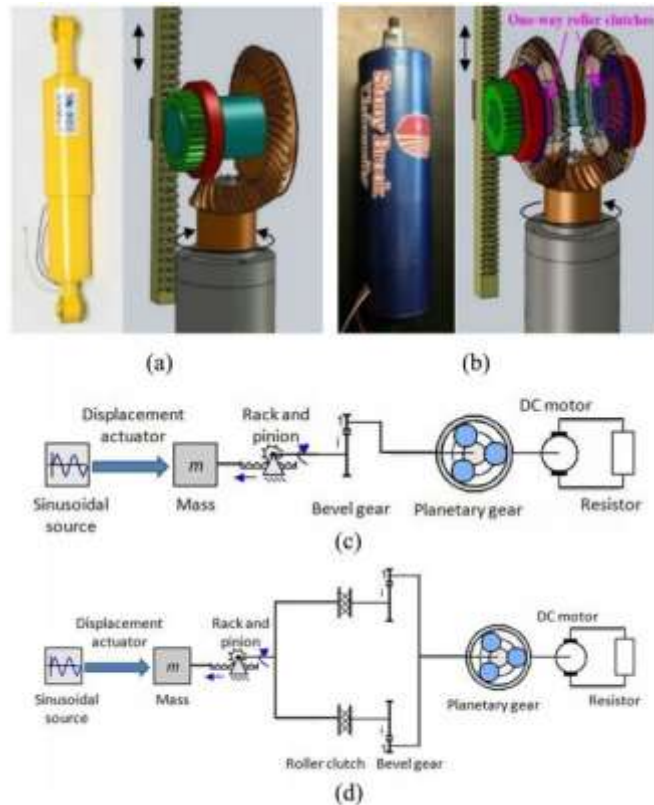
Rydberg [27] je predstavio prednosti hidrauličnih hibridnih sustava nad električnim hibridima i objasnio način projektiranja hibridnih sustava. Chen [28] je primijenio MATLAB/Simulink na razvoj modela HHV i HEV za unatražnu simulaciju. Za određivanje promjena u potrošnji goriva koristio je nove europske cikluse vožnje. Rezultati simulacije pokazali su da je potrošnja goriva u SHHV manja za 21,80% u usporedbi s potrošnjom goriva u serijskom električnom hibridnom vozilu. Također, potrošnja goriva u paralelnom hibridnom električnom vozilu bila je za 3,80% manja u usporedbi s potrošnjom goriva u PHHV. Simulacije su pokazale da hidraulično-električno hibridno vozilo može pružiti najbolje rezultate potrošnje goriva među svim konfiguracijama koje su proučavane u ovome radu. Louvigny i dr. [29] su usporedili hibridne električne i hibridne hidraulične autobuse. Potrošnju goriva simulirali su pomoću programa ADVISOR na temelju tri različita ciklusa vožnje. Rezultati simulacija su pokazali da HHV autobusi imaju ograničenje svojom težinom, ali i da mogu biti ekonomski isplativi zbog nižih troškova održavanja i dužeg vijeka trajanja hidrauličnog sustava. Louvigny i dr. [30] su istražili i usporedili s ekonomskog i tehničkog gledišta hibridne hidraulične i hibridne električne autobuse. Za sustav pohrane energije koristili su električne baterije i super kondenzatore. Rezultati analize su pokazali da HHV i HEV u kojima se za spremanje energije koriste super kondenzatori ne mogu konkurirati s gledišta potrošnje goriva HEV u kojima se za spremanje energije koriste električne baterije.

3. REGENERATIVNI OVJESI – PREGLED ISTRAŽIVANJA

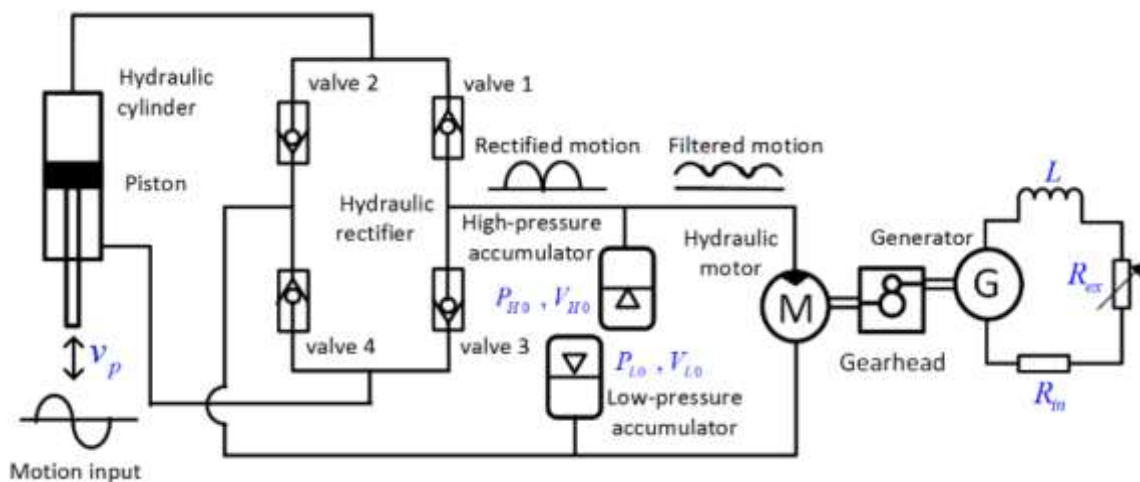
Regenerativni ovjes je vrsta ovjesa koji pretvara energiju linearnog i vibracijskog gibanja u korisnu energiju kao što je to primjerice električna energija. Ovjesi na konvencionalnim vozilima gube tu energiju u nepovrat pretvorbom u toplinsku energiju. Kada bi se regenerativni ovjes koristio u npr. električnim vozilima (EV) ili HEV, generirana električna energija u njemu bi se mogla iskoristiti za pogon elektromotora s ciljem povećanja vijeka trajanja električne baterije ili radi povećanja opće učinkovitosti vozila. U neelektričnim vozilima električna energija koja bi se dobila u ovakvoj vrsti uređaja, mogla bi se koristiti za napajanje pomoćnih uređaja kao što su to primjerice klima uređaj ili pomoćna električna oprema. U posljednje vrijeme, razvijeni su različiti sustavi regenerativnih ovjesa koji će biti predstavljeni u ovome poglavlju. Regenerativni ovjesi se trenutno još nalaze u fazi znanstvenog istraživanja i zasad nisu instalirani na proizvodna i prodajna vozila.

Li i Zuo [31] su modelirali i analizirali dva različita tipa regenerativnog rotacijskog elektromagnetskog prigušivača: sa i bez ispravljača mehaničkog gibanja. Ispravljač mehaničkog gibanja je mehanizam koji pretvara nepravilne višesmjernne vibracije u jednosmjernu rotaciju generatora. Usporedili su performanse predstavljenih elektromagnetskih prigušivača s performansama konvencionalnog prigušivača. Prilikom analize, uzeli su u obzir slučaj kada gume vozila izgube kontakt sa tlom. Simulacije su proveli za skokovitu (engl. Step) cestovnu pobudu i za cestovni profil koji je definiran ISO standardom kako bi procijenili utjecaj ekvivalentne inercije masa i utjecaj ekvivalentnog koeficijenta prigušenja. Rezultati analize modela, pokazali su da se sa optimiziranom ekvivalentnom inercijom masa regenerativnih elektromagnetskih prigušivača mogu postići bolje performanse nego kod klasičnih konvencionalnih prigušivača. Osim toga, pokazalo se da ispravljači mehaničkog gibanja mogu znatno poboljšati udobnost vožnje. Prikazi izrađenih prototipova i shematskih modela regenerativnih elektromagnetskih prigušivača sa i bez ispravljača mehaničkog gibanja dati su na slici 3.1. Mi i dr. [32] su predstavili novu primjenu hidraulično-elektromagnetskog regenerativnog ovjesa u željezničkim vozilima. Model sustava su napravili i simulirali u AMESim programu kako bi objasnili dinamičke karakteristike ovjesa i utvrdili efikasnost iskorištavanja energije, kada bi se predstavljeni regenerativni sustav instalirao na stvarna vozila. Rezultati simulacije modela su pokazali da ovaj sustav može učinkovito smanjiti vibracije vagona željezničkog vozila, uz održavanje potencijala

regeneracije energije vibriranja na zadovoljavajućoj razini. Shematski prikaz regenerativnog hidraulično-elektromagnetskog ovjesa za željeznička vozila dat je na slici 3.2.

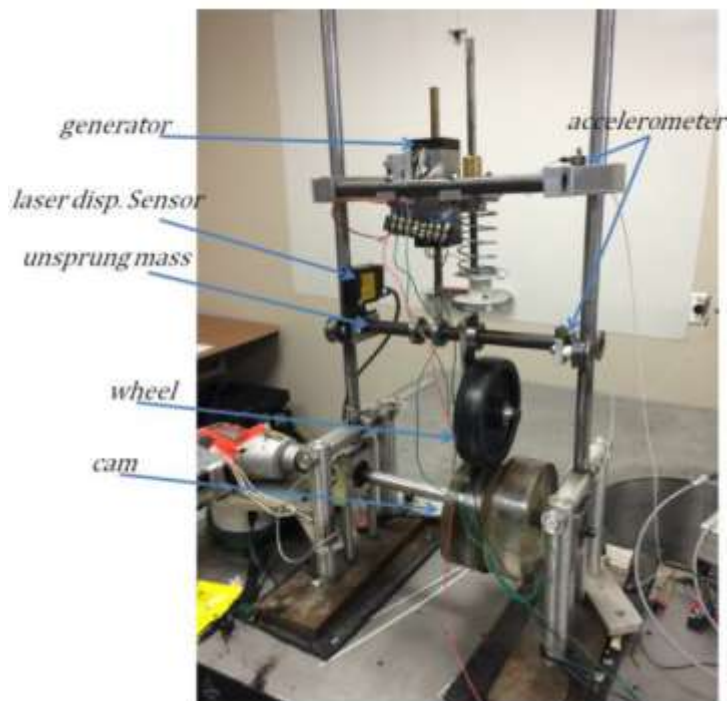


Slika 3.1. Prototip i shematski model elektromagnetskog regenerativnog prigušivača - (a) i (c) bez ispravljača mehaničkog gibanja, (b) i (d) sa ispravljačem mehaničkog gibanja[31]



Slika 3.2. Shematski prikaz regenerativnog hidraulično-elektromagnetskog ovjesa za željeznička vozila[32]

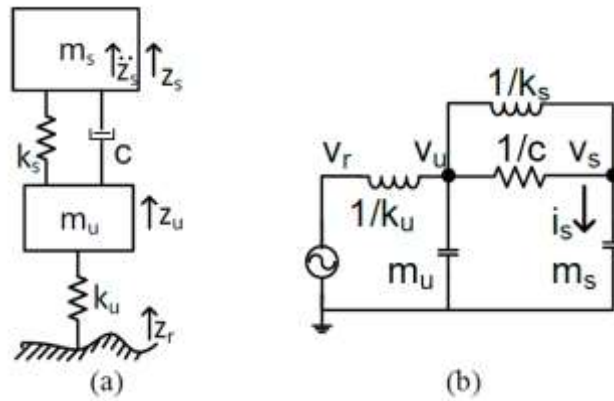
Algethami i Kim [33] su izradili eksperimentalnu jedinicu aktivnog regenerativnog ovjesa koji su modelirali kao sustav sa dva stupnja slobode gibanja. Kao regenerativni prigušivač za spremanje energije vibriranja, koristili su linearni generator. Linearni generator je uređaj koji pretvara magnetski tok (koji se javlja zbog relativnog gibanja magneta unutar elektromagnetskog namotaja) u električnu struju. Konstante generatora i koeficijente prigušenja su odredili eksperimentalnim ispitivanjima. Autori su istražili prednosti korištenja regenerativnog umjesto konvencionalnog aktivnog sustava ovjesa u automobilu. Korištenjem regenerativnog sustava uspjeli su spremiti 8–9W snage. Dodatnim ispitivanjima zaključili su da iznos spremljene snage može biti i veći ako se smanji mehaničko trenje, a poveća koeficijent prigušenja linearnog generatora. Eksperimentalna jedinica aktivnog regenerativnog ovjesa sa linearnim generatorom prikazana je na slici 3.3.



Slika 3.3. Prototip/eksperimentalna jedinica aktivnog regenerativnog ovjesa sa linearnim generatorom[33]

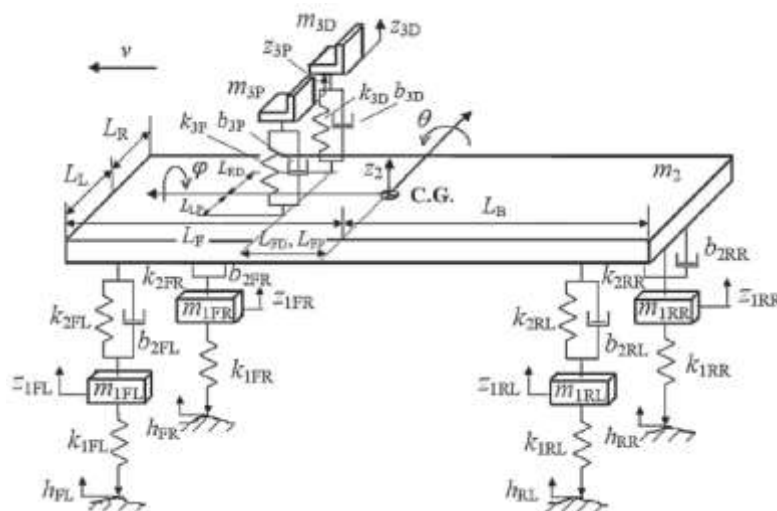
Chen i dr. [34] su predstavili regenerativni ovjes koji sadrži ispravljač mehaničkog gibanja, pretvarač snage i upravljač za praćenje struje i sile. Različita istraživanja su pokazala da regenerativni ovjesi koji su bazirani na upotrebi ispravljača mehaničkog gibanja imaju veću efikasnost i bolju mehaničku pouzdanost nego konvencionalni regenerativni prigušivači. Dodavanjem dodatnih kontrolnih zakona u upravljač za praćenje struje i sile, uspjeli su riješiti problem nelinearnosti tijekom kontrole ispravljača mehaničkog gibanja. Rezultati simulacije

pokazali su da je predstavljenim regenerativnim sustavom ovjesa moguće spremiti ukupnu energiju od 56J. Za simulaciju ovjesa koristili su ekvivalentne strujne krugove koji su imali identične parametre kao i mehanički model ovjesa. Prikazi mehaničkog modela i ekvivalentnog strujnog kruga četvrtine automobila sa pasivnim ovjesom dati su na slici 3.4.



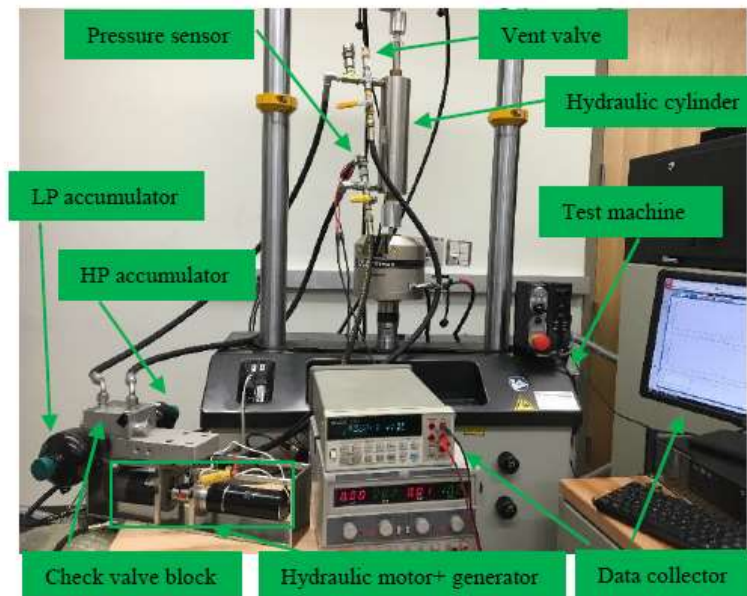
Slika 3.4. Model četvrtine automobila: (a) mehanički blok dijagram sustava; (b) ekvivalentni strujni krug sustava[34]

Mučka [35] je odredio količinu disipacije energije u prigušivaču automobilskog ovjesa radi procjene potencijala za spremanje energije u putničkim vozilima. Koristio je bazu podataka stvarnih profila cesta, model cijelog automobila sa 9 stupnjeva slobode gibanja (za realne parametre) i model kontakta gume kotača sa tlom. Usporedio je rezultate simulacije modela cijelog vozila i modela četvrtine vozila. Razlika u dobivenoj disipaciji snage za ove različite modele je bila u vrlo malim postotnim vrijednostima. Model cijelog automobila sa 9 stupnjeva slobode gibanja koji je predstavljen u ovome radu prikazan je na slici 3.5.



Slika 3.5. Model cijelog automobila sa 9 stupnjeva slobode gibanja[35]

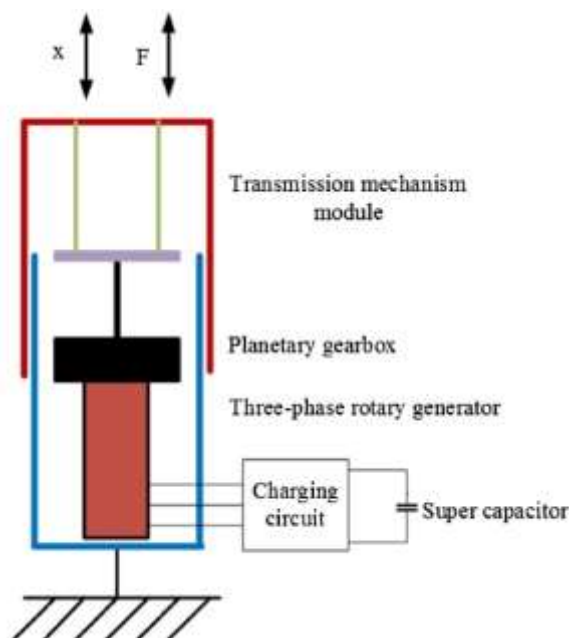
Guo i dr. [36] su predstavili dinamički model regenerativnog hidraulično-elektromagnetskog ovjesa koji je pokazao da se prigušna sila sastoji od komponenata sile trenja, inercijske sile i sile akumulacije. Utjecaje hidrauličnog motora i promjera cijevi na silu prigušenja analizirali su simulacijom numeričkog modela dok su parametre nelinearne komponente akumulatora analizirali eksperimentalno na ispitnoj stanici (slika 3.6.).



Slika 3.6. Eksperimentalna jedinica regenerativnog hidraulično-elektromagnetskog ovjesa[36]

Eksperimentalni i simulacijski testovi pokazali su da sila akumulacije može djelovati na dio efekta koji izaziva inercijska sila što je vrlo značajno za vozila i implementaciju ovakvog tipa ovjesa u stvarnim vozilima. Autori su zaključili da iskoristivost hidraulično-elektromagnetskog ovjesa može biti 30% za vibracijski ulazni signal sa frekvencijom od 3Hz i 7mm amplitude uz vanjski otpor od 4Ω . Prosječna snaga koju su uspjeli spremiti za ovakvu pobudu iznosila je 102W. Xu i dr. [37] su teoretski analizirali dinamiku sustava ovjesa sa hidraulično-elektromagnetskim regenerativnim uređajem. U radu su predložili i vodič za konstrukciju ovakvog tipa uređaja. Napravili su simulacijske modele ovjesa u AMESim programu radi usporedbe istih za različita gibanja vozila koja su uzrokovana nelinearnim ponašanjem hidraulično-elektromagnetskog regenerativnog ovjesa. Rezultati ispitivanja su pokazali da korištenje ovakvog regenerativnog ovjesa daje slične radne karakteristike u usporedbi sa radnim karakteristikama konvencionalnog ovjesa. Ovakav regenerativni uređaj istovremeno omogućava iskorištavanje energije koja inače odlazi u nepovrat prilikom korištenja konvencionalnih prigušivača. Guo i dr. [38] su objasnili utjecaj ispravljača mehaničkog

gibanja na regenerativni ovjes, a time i utjecaj na dinamiku vozila. Simulacije su proveli za pet tipičnih vrsta vozila: putnički automobil, autobus i tri različita tipa kamiona. Rezultati simulacija su pokazali da je uz korištenje regenerativnog ovjesa koji je baziran na ispravljaču mehaničkog gibanja moguće poboljšati udobnost vožnje i upravljivost vozila u odnosu na korištenje tradicionalnog ovjesa. Zhang i dr. [39] su predstavili novi visoko-efikasni regenerativni ovjes koji sadrži super-kondenzatore radi produženja vijeka trajanja baterije u EV. Predloženi sustav se sastoji od četiri glavne komponente: ulaznog vibracijskog modula za ovjes, prijenosničkog modula, generatorskog modula i modula za spremanje snage. Simulacijom modela ovog sustava dobili su povećanje srednje efikasnosti EV na 44,24%. Shematski prikaz novog regenerativnog ovjesa sa super-kondenzatorima koji je predstavljen u navedenom radu dat je na slici 3.7.



Slika 3.7. Shematski prikaz novog regenerativnog ovjesa sa super-kondenzatorima za EV[39]

Akseki i Topaloglu [40] su uspjeli ostvariti profil prigušenja ovjesa koji je ovisan o položaju. Za dobivanje takve ovisnosti koristili su elektromagnetske principe. Ideja ovoga rada bila je u tome da vanjski cilindar ovjesa sadrži više elektromagnetskih namotaja, uz dodatnu upotrebu magneta umjesto klipa koji se giba u takvoj vrsti cilindra. Profil prigušenja su mijenjali promjenom broja zavoja na svakoj od zavojnica elektromagnetskih namota. Prema procjenama i dobivenim rezultatima, ovakvo rješenje sa magnetskim namotajima ima potencijal za regenerativnu upotrebu u budućnosti. Wang i dr. [41] su predstavili studiju regenerativnog hidrauličnog ovjesa koji pretvara linearno oscilacijsko gibanje vozila u jednosmjerno rotacijsko gibanje generatora. Napravili su model ovjesa koji je uzimao u obzir

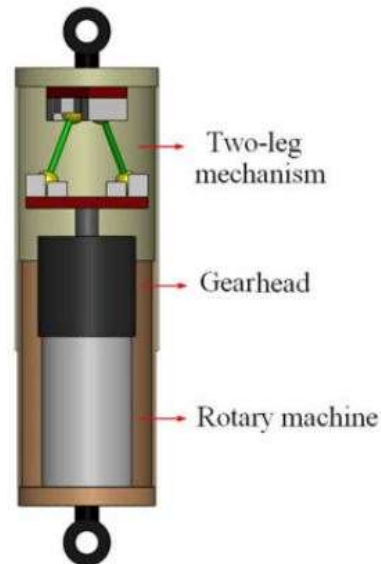
utjecaje dinamike hidrauličnog toka, rotacijskog gibanja i regeneracije snage. Na temelju modela izradili su eksperimentalni prototip ovjesa. Ispitali su model za različite ulazne pobude i otpore opterećenja. Rezultati (ispitivanja modela) su pokazali dobra slaganja sa očekivanim rezultatima i kasnijim mjerenjima na prototipu ovjesa. Korištenjem ovog sustava uspjeli su spremiti snagu od 260W sa efikasnošću od 40% za sinusnu pobudu sa frekvencijom od 1Hz i amplitudom od 25mm. Prikaz prototipa i glavnih komponenata regenerativnog ovjesa koji je predstavljen u ovome radu dat je na slici 3.8.



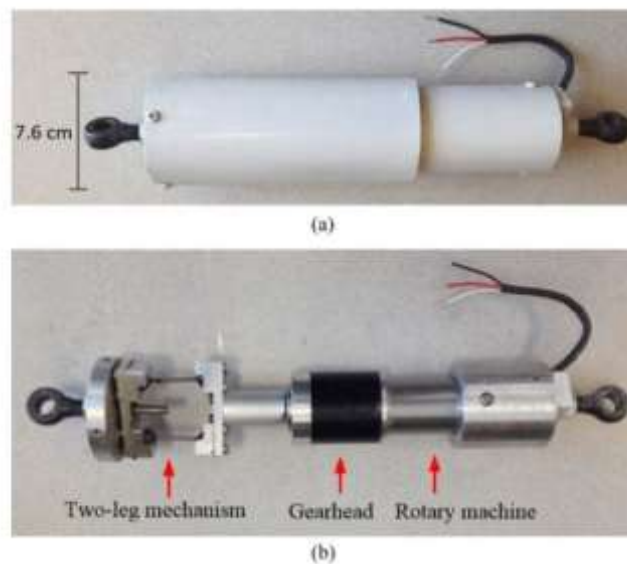
Slika 3.8. Prototip hidrauličnog regenerativnog ovjesa i njegove glavne komponente[41]

Wang i dr. [42] su predstavili studiju radnih karakteristika hidrauličnog regenerativnog ovjesa za različite dimenzije hidrauličnog akumulatora (koji je napunjen plinom) kako bi poboljšali stabilnost hidrauličnog ponašanja i regeneraciju snage. Model su napravili s ciljem stabilizacije hidrauličnog toka kako bi dobili što veću efikasnost regeneracije snage, koja se u ovom slučaju pokazala približno konstantna. Prilikom modeliranja, koristili su različite profile cesta (kao izvor vibracijske pobude) radi kasnijeg eksperimentalnog istraživanja potencijala regeneracije snage. Rezultati analize su pokazali da se stabilnost i kontinuiranost regeneracije snage mogu znatno poboljšati podešavanjem kapaciteta hidrauličnog akumulatora. Huang i dr. [43] su predstavili razvoj novog regenerativnog ovjesa za putnički automobil. Regenerativni ovjes koji su objasnili u ovome radu sadrži visoko efikasni pretvarač gibanja (često se naziva dvonožni mehanizam), planetarni prijenosnik i trofazni rotacijski motor bez četkica. Predstavili su konstrukciju i analizu regenerativnog ovjesa. Prilikom analize, uzeli su u obzir dinamiku i učinkovitost elektromehaničkog uređaja. Efikasnost pretvorbe energije koja je

dobivena analizama u ovome radu, kretala se u granicama od 0,71 do 0,84. Takve vrijednosti efikasnosti su značajno veće od onih koje su dobivene u drugim znanstvenim istraživanjima regenerativnih ovjesa ovakvog tipa. Shematski prikaz regenerativnog ovjesa sa dvonožnim mehanizmom i prototip istog dati su na slikama 3.9. i 3.10.



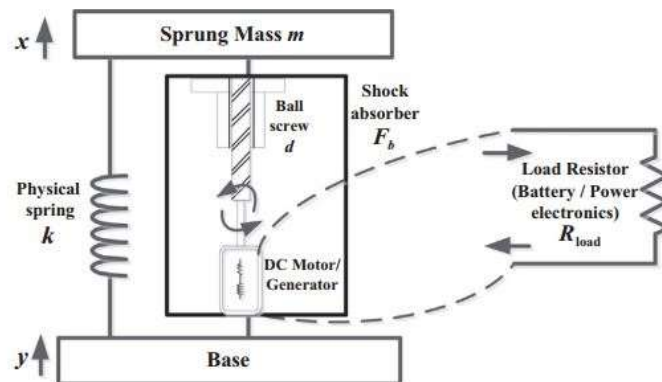
Slika 3.9. Shematski prikaz regenerativnog ovjesa sa dvonožnim mehanizmom[43]



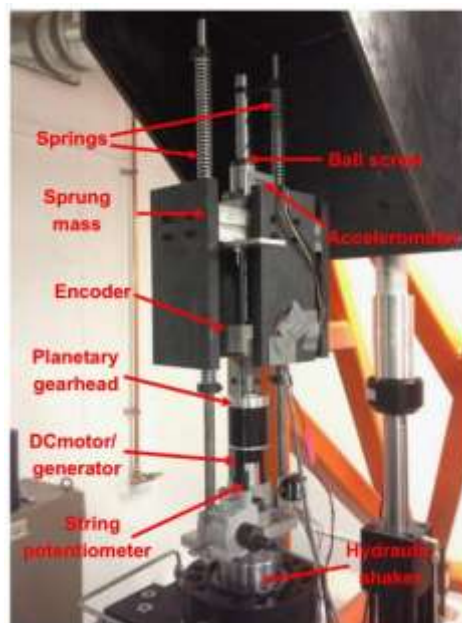
Slika 3.10. Prototip regenerativnog ovjesa sa dvonožnim mehanizmom a) sa kućištem, b) bez kućišta[43]

Maravandi i Moallem [44] su predstavili analitičku metodologiju za optimalnu konstrukciju sustava regenerativnog ovjesa s ciljem iskorištavanja energije linearnog oscilacijskog gibanja vozila. Regenerativni ovjes koji su predstavili sastoji se od kugličnog navojnog vretena,

matice, istosmjernog električnog motora i električne baterije. Tehnika optimizacije koju su predložili opisuje konstrukcijske smjernice za određivanje koeficijenata krutosti i prigušenja, kako bi se dobile optimalne radne karakteristike regenerativnog ovjesa u vidu udobnosti vožnje i regeneracije energije. Za pobudu ovjesa, koristili su stohastični standardni cestovni profil koji je definiran prema ISO 8608:1995 standardu. Uz to, predstavili su električni strujni krug koji omogućava varijabilno prigušenje ovjesa, ako se koristi realno-vremensko optimizacijsko pravilo. Shematski prikaz regenerativnog ovjesa sa kugličnim navojnim vretenom koji je predstavljen u ovome radu i prototip istog dati su na slikama 3.11. i 3.12.



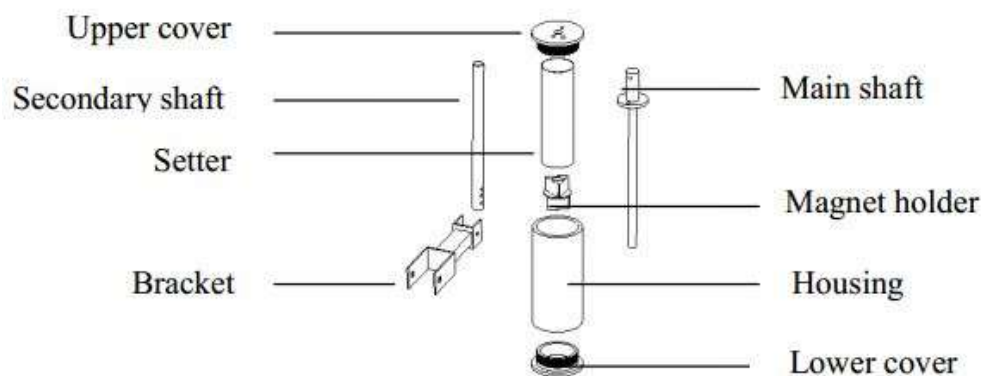
Slika 3.11. Shematski prikaz regenerativnog ovjesa sa kugličnim navojnim vretenom[44]



Slika 3.12. Prototip regenerativnog ovjesa sa kugličnim navojnim vretenom[44]

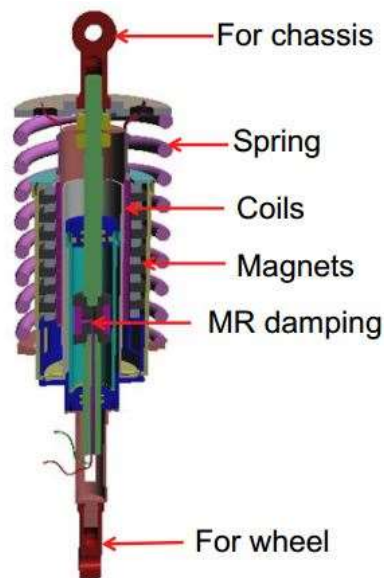
Khoshnoud i dr. [45] su analizirali količinu generirane snage za različita gibanja vozila kao što su npr.: linearna vibracija vozila, rotacija vozila po širini i rotacija vozila po dužini.

Izračunali su potencijalne vrijednosti regenerativne snage za sva tri navedena gibanja vozila. Rezultati koje su dobili simulacijom za pobudu sa frekvencijom od 20Hz i amplitudom pomaka 5mm na svakom kotaču vozila, pokazali su da se najveća snaga generira za linearnu vibraciju vozila (1,1kW). Srednju vrijednost generirane snage dobili su za rotaciju vozila po dužini (0,97kW), dok su najmanju vrijednost generirane snage dobili za rotaciju vozila po širini (0,88kW). Ekvivalentne vrijednosti generirane snage koje su dobili eksperimentalnim putem, bile su 0,98kW za linearnu vibraciju vozila, 0,78kW za rotaciju vozila po dužini i 0,74kW za rotaciju vozila po širini. Huang i dr. [46] su predstavili sistematsku metodologiju za predviđanje i optimizaciju performansi sustava regenerativnog ovjesa, radi efikasnog spremanja energije vibriranja koja se generira zbog prelaženja vozila preko neravnina na cesti. Predstavljena metoda sadrži i opisuje smjernice za odabir koeficijenta krutosti i prigušenja ovjesa u svrhu dobivanja najbolje moguće udobnosti vožnje ili maksimalnog iskorištenja energije. Radi postizanja mogućnosti regeneracije energije, razvili su i izradili električni krug niske snage koji je sposoban ostvariti varijabilni otpor. Električnim krugom su upravljali kako bi dobili podesivi koeficijent prigušenja u realnom vremenu. Rezultati koje su dobili analitičkim putem i simulacijama, pokazali su dobra slaganja sa rezultatima koje su dobili eksperimentalnim putem i analizom. Abdullah i dr. [47] su razvili i izradili regenerativni ovjes za energetske efikasno vozilo (EEV) ili hibridno vozilo (HV). Izrađeni uređaj su testirali u laboratoriju i na stvarnome vozilu. Testove su napravili uz korištenje voltmetra radi očitavanja napona kojeg generira regenerativni ovjes. Parametre regenerativnog ovjesa su varirali brojem namotaja na standardnom magnetu. Eksperimentalnom analizom ovjesa, dobili su maksimalni izlazni napon od 5,6V za 530 namotaja. Dodatnim istraživanjem su zaključili da se uz korištenje boljih materijala može doći do značajnog povećanja izlaznog napona. Shematski prikaz regenerativnog ovjesa koji je izrađen u ovome radu dat je na slici 3.13.



Slika 3.13. Konstrukcijski koncept regenerativnog ovjesa[47]

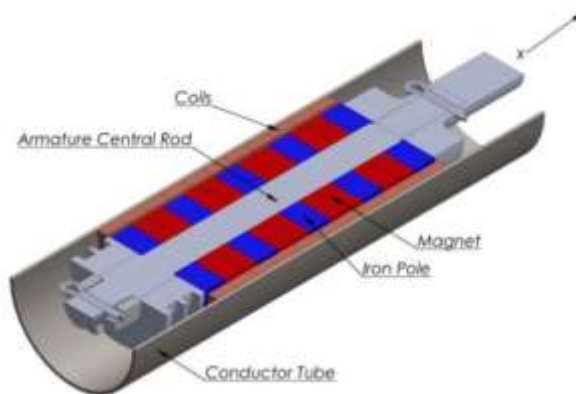
Chen i dr. [48] su predstavili magnetoreološki regenerativni ovjes koji integrira funkcije iskorištavanja energije i kontrole prigušenja. Magnetoreološki ovjes je prigušivač koji je napunjen magnetoreološkim fluidom čija se vrijednost viskoznosti može kontrolirati magnetskim poljem (najčešće elektromagnetom). Ovo svojstvo omogućava kontinuiranu kontrolu karakteristike prigušenja ovjesa. Autori su analizirali i modelirali prigušnu silu i karakteristike dobivanja snage u magnetoreološkom regenerativnom ovjesu. Rezultati simulacije pokazali su da udobnost vožnje korištenjem ovakvog ovjesa može biti značajno poboljšana uz mogućnost iskorištavanja energije vibriranja u korisne svrhe. Shematski prikaz magnetoreološkog regenerativnog ovjesa koji je predstavljen u ovome radu dat je na slici 3.14.



Slika 3.14. Shematski prikaz presjeka magnetoreološkog regenerativnog ovjesa[48]

Asadi i dr. [49] su predstavili razvoj novog elektromagnetskog hibridnog prigušivača koji omogućava adaptivnu regenerativnu silu prigušenja za različite aplikacije. Hibridni prigušivač su konfigurirali za operativno kooperacijsko djelovanje sa viskoznom i elektromagnetskim podsistemima. Viskozni medij omogućio je silu prigušenja dok je elektromagnetska komponenta omogućila hibridnoj konstrukciji prilagodljivost i kapacitet za regeneraciju. Elektromagnetsku komponentu sustava su modelirali i analizirali analitički (ekvivalentnim magnetskim krugom) i elektromagnetskom metodom konačnih elemenata. Kombinacijom tih dvaju pristupa napravili su optimizaciju geometrijskih aspekata i elektromagnetskih podsistema. Na temelju preliminarnih optimizacijskih rješenja, konstruirali su i izradili prototip prigušivača. Uočili su dobro slaganje rezultata eksperimenta i metode konačnih elemenata usporedbom vrijednosti za raspodjelu magnetskog polja i elektromagnetske sile

prigušenja. Shematski prikaz presjeka elektromagnetskog hibridnog prigušivača i izrađeni prototip istog dati su na slikama 3.15. i 3.16.

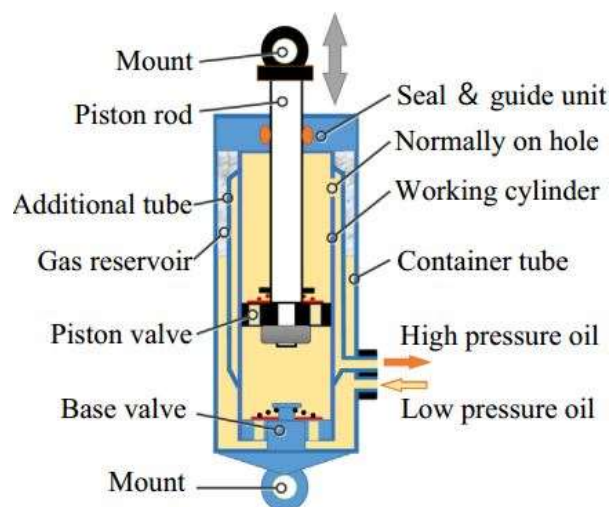


Slika 3.15. Uzdužni presjek hibridnog prigušivača – shematski prikaz[49]



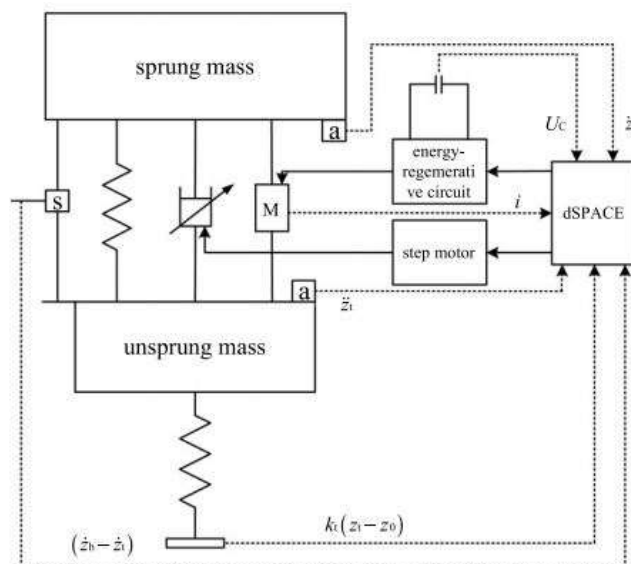
Slika 3.16. Izrađeni prototip hibridnog prigušivača[49]

Zhang i dr. [50] su predstavili model, konstrukciju i studiju performansi novog hidrauličnog regenerativnog ovjesa koji se temelji na regenerativnoj energetskej jedinici i hidrauličnom pokretaču. Shematski prikaz presjeka novog hidrauličnog regenerativnog ovjesa kojeg su predstavili u ovome radu dat je na slici 3.17.



Slika 3.17. Presjek hidrauličnog regenerativnog ovjesa – shematski prikaz[50]

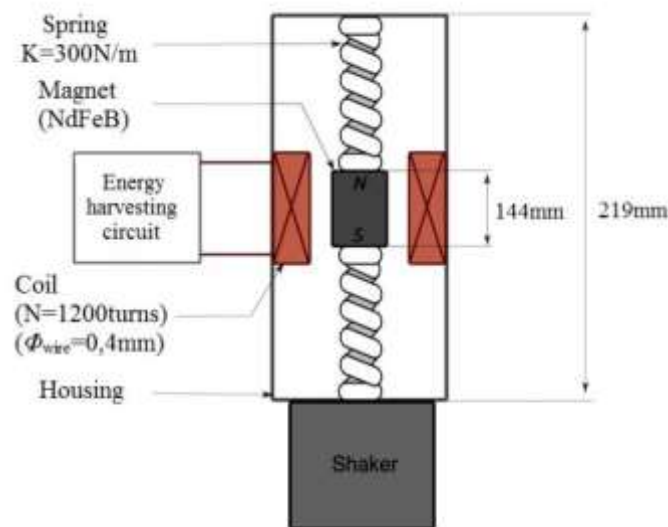
Ovakav regenerativni ovjes može iskorištavati energiju vibriranja i smanjiti porast temperature ulja za prigušivanje. Autori su pokazali su da je moguće ostvariti varijabilnu prigušnu silu upravljanjem električnog opterećenja jedinice za regeneraciju energije. Testiranjem hidrauličnog regenerativnog ovjesa uspjeli su dobiti 33,4W regenerirane snage uz korištenje optimizacije GA. Ispitivanje su proveli za vanjsko opterećenje od $14,7\Omega$, pobudu frekvencije od 1,67Hz i amplitudu pomaka 50mm. Dodatna istraživanja pokazala su da prigušna sila ovisi o vanjskim električnim otporima i ulaznoj frekvenciji pobude. Shi i dr. [51] su predstavili polu-aktivni sustav regenerativnog ovjesa kako bi omogućili spremanje i iskorištavanje energije vibriranja vozila. Predstavljeni sustav sastoji se od energetske regenerativnog prigušivača i istosmjernog DC/DC pretvarača. Energetsko regenerativni prigušivač sadrži elektromagnetski linearni motor (koji služi kao generator) sa tri regulacijska nivoa. Autori su otkrili da se upravljanjem električnog kruga ovjesa može postići poboljšanje performansi regeneracije energije i kontinuirana regulacija elektromagnetske prigušne sile motora. Analizirali su karakteristike prigušenja na modelu ovjesa sa dva stupnja slobode. Daljnjom analizom sustava za različite režime rada, izradili su upravljač sa dvostrukom petljom za praćenje željene prigušne sile. Sustav su testirali simulacijama i eksperimentalnim putem. Rezultati analize pokazali su da polu-aktivni sustav regenerativnog ovjesa može poboljšati udobnost vožnje, ako se omogući upravljanje karakteristikom prigušenja linearnog motora. Shematski prikaz polu-aktivnog regenerativnog ovjesa dat je na slici 3.18.



Slika 3.18. Shematski prikaz polu-aktivnog regenerativnog ovjesa[51]

Catanescu i Ion [52] su konstruirali, izradili i analizirali regenerativni elektromagnetski ovjes. Zaključili su da je potrebno koristiti veće magnetsko polje ako se želi generirati veća količina

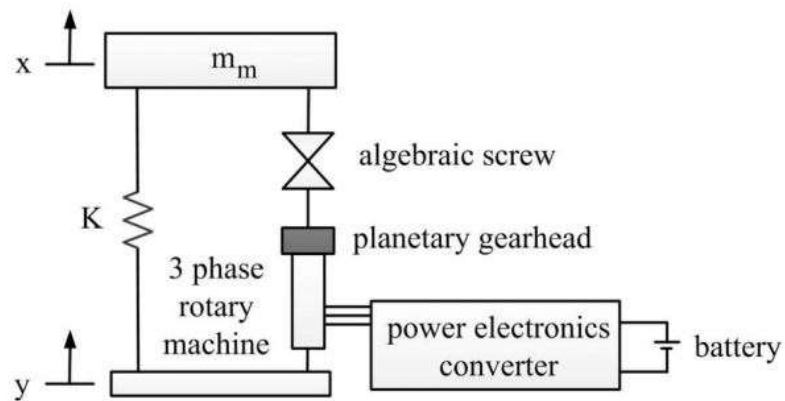
snage vibriranja. Dobili su rezonantne karakteristike regenerativnog elektromagnetskog ovjesa. Uočili su optimalnu frekvenciju od 20Hz prilikom analize dobivenih rezonantnih karakteristika (ovaj iznos frekvencije načelno je karakterističan za elektromagnetske prigušivače). Autori su istaknuli glavne prednosti korištenja elektromagnetskog regenerativnog ovjesa (u odnosu na konvencionalne), a to su: alternativni izvor energije za električnu bateriju vozila, jednostavna konstrukcija i relativno niski troškovi održavanja/instalacije. Shematski prikaz eksperimentalne jedinice elektromagnetskog regenerativnog ovjesa dat je na slici 3.19.



Slika 3.19. Shematski prikaz eksperimentalne jedinice elektromagnetskog regenerativnog ovjesa[52]

Sabzehgar i dr. [53] su razvili novi mehanizam za regenerativni ovjes. Sustav koji su predstavili u ovome radu sastoji se od: jedinice s masom/oprugom (koja je spojena sa vijčanim kinematskim parom), planetarnog prijenosnika, rotacijskog permanentnog sinkronog magnetskog generatora i trofaznog punjača koji je spojen na električnu bateriju. Vijčani kinematski par pretvara translacijsku linearnu vibraciju u recipročno rotacijsko gibanje koje pogoni permanentni sinkroni generator preko planetarnog prijenosnika. Nakon toga, trofazni punjač pretvara mehaničku energiju (koja se generira u rotacijskom generatoru) u električnu energiju i sprema je u električnu bateriju. Autori su predstavili konstrukciju i analizu regenerativnog ovjesa. Prilikom analize, uzeli su u obzir: dinamiku elektromehaničkog uređaja, parametre sustava ovjesa i različite profile ulazne pobude. Rezultati analize pokazali su da ovaj sustav može uspješno ostvariti regenerativno prigušenje mehaničkih vibracija.

Također, autori su zaključili da najveći utjecaj na efikasnost ove energetske pretvorbe ima terminalni otpor generatora. Uočili su da smanjenje vrijednosti terminalnog otpora može dovesti do značajnog povećanja efikasnosti predstavljenog regenerativnog ovjesa. Shematski prikaz elektromehaničkog regenerativnog ovjesa i prikaz prototipa vijčanog kinematskog para dati su na slikama 3.20. i 3.21.



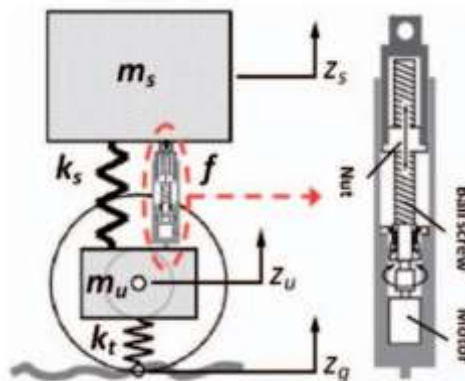
Slika 3.20. Shematski prikaz regenerativnog ovjesa sa algebarskim vijčanim kinematskim parom[53]



Slika 3.21. Izrađeni prototip vijčanog kinematskog para[53]

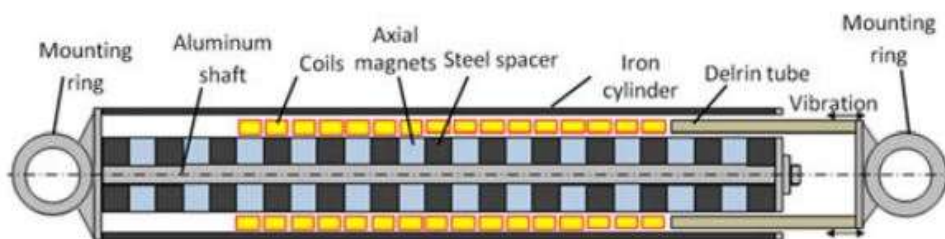
Montazeri i Kavianipour [54] su predstavili elektromagnetski prigušivač koji se sastoji od istosmjernog motora sa permanentnim magnetom, kugličnog navojnog vretena i matice kao aktivnog pokretača. Napravili su studiju aktivnog elektromagnetskog ovjesa koristeći hibridnu kontrolnu strategiju. Za linearne uvjete odredili su potrebne koeficijente hibridne kontrolne strategije (uz korištenje GA) kako bi poboljšali performanse vozila i regeneraciju energije. Dobivene koeficijente su iskoristili prilikom testiranja aktivnog elektromagnetskog ovjesa za

stvarne cestovne uvjete i profile. Shematski prikaz elektromagnetskog prigušivača sa kugličnim navojnim vretenom, maticom i motorom dat je na slici 3.22.



Slika 3.22. Shematski prikaz elektromagnetskog regenerativnog prigušivača sa mehanizmom kugličnog navojnog vretena[54]

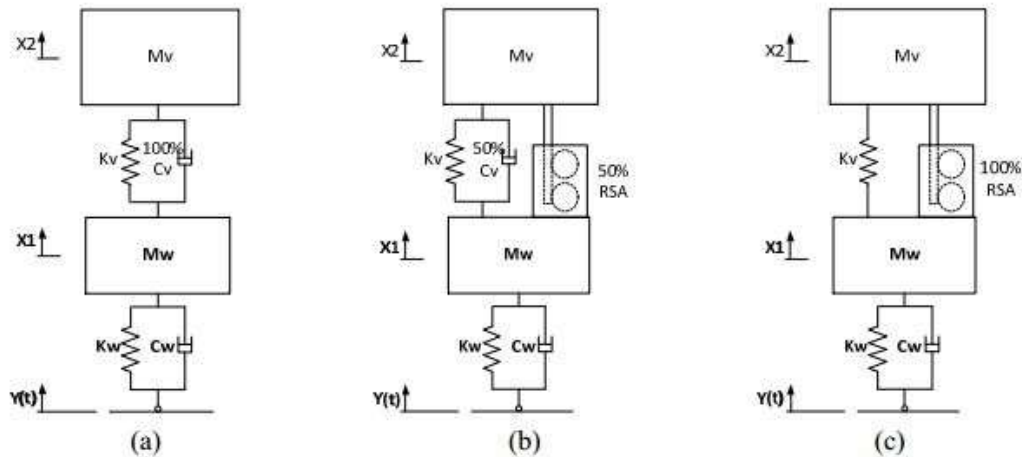
Tang i dr. [55] su predstavili konstrukciju i optimizaciju cjevastog linearnog elektromagnetskog pretvarača koji služi za spremanje i iskorištavanje energije vibriranja vozila. Shematski prikaz cjevastog linearnog elektromagnetskog pretvarača sa jednoslojnom aksijalnim magnetima dat je na slici 3.23. Uređaj se sastoji od sklopova magneta i namotaja zavojnica koji svojim relativnim pomicanjem pretvaraju linearno vibracijsko gibanje u električnu struju. Parametre cjevastog elektromagnetskog pretvarača kao što su primjerice debljina magneta u aksijalnom smjeru i debljina namotaja u radijalnom smjeru, optimizirali su primjenom metode konačnih elemenata s ciljem postizanja visoke vrijednosti gustoće snage i prigušenja. Istražili su četiri različite konfiguracije cjevastog linearnog elektromagnetskog pretvarača u svrhu daljnjih poboljšanja: sa jednoslojnom aksijalnim magnetima, sa dvoslojnom aksijalnim magnetima, sa jednoslojnom aksijalnim i radijalnim magnetima i konačno sa dvoslojnom aksijalnim i radijalnim magnetima. Analiza je pokazala da optimizacija parametara omogućava povećanje gustoće snage pretvarača za 3,8 puta u odnosu na inicijalno



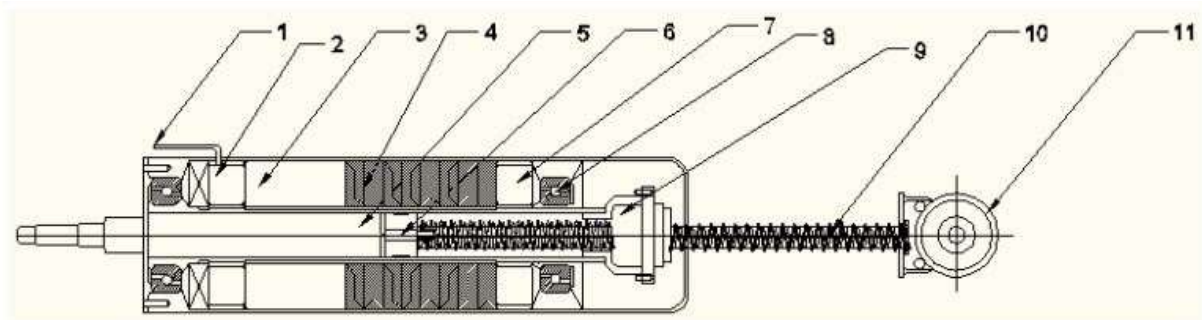
Slika 3.23. Cjevasti linearni elektromagnetski pretvarač s jednoslojnim aksijalnim magnetima[55]

rješenje. Izradili su prototip sa aksijalnim NdFeB magnetom koji su testirali na vibracijskom ispitnom stolu. Rezultati koje su dobili eksperimentalnim putem pokazali su da ovakav prototip cjevastog pretvarača može spremiti 2,8W snage i ostvariti koeficijent prigušenja od $940 \frac{Ns}{m}$. Li i Zuo [56] su predstavili model vozila i elektromagnetskog regenerativnog ovjesa koji su napravili pomoću integriranog ekvivalentnog strujnog kruga. Valorizirali su performanse dinamike vozila i potencijal iskoristive energije za različite konstrukcijske parametre i uvjete na cesti. Na temelju analize simulacijskih rezultata predložili su smjernice za konstrukciju rotacijskog elektromagnetskog ovjesa. Rezultati istraživanja pokazali su da je ovim sustavom moguće spremiti između 312-344W električne snage (u električnom generatoru) za putnički automobil sa 4 kotača pri brzini od 30m/s. Guntur i dr. [57] su konstruirali, modelirali i analizirali hibridni ovjes za teško vojno vozilo. Predstavili su specifičnu konstrukciju frikcijsko-elektromagnetskog regenerativnog ovjesa. Predstavljeni hibridni ovjes sastoji se od klasičnog viskozno ovjesa koji je spojen u paralelu sa frikcijsko elektromagnetskim regenerativnim ovjesom. Ovu kombinaciju su napravili kako bi omogućili spremanje energije vibriranja vozila putem regenerativnog ovjesa. Klasični viskozni ovjes (koji je spojen u paralelu sa regenerativnim ovjesom) služi za održavanje parametara ovjesa u takvim vrijednostima koje su karakteristične za originalnu konvencionalnu izvedbu. Dinamiku ovjesa vozila modelirali su matematički za tri različita tipa ovjesa (slika 3.24): konvencionalni viskozni ovjes, hibridni ovjes kao kombinacija 50% frikcijskog-elektromagnetskog ovjesa i 50% konvencionalnog viskozno ovjesa, i potpuno regenerativni ovjes kao 100% frikcijski elektromagnetski regenerativni ovjes. Rezultati analize pokazali su da hibridni ovjes i potpuno regenerativni ovjes povećavaju koeficijent prigušenja zbog inercijskih gubitaka u regenerativnom ovjesu. Također, istraživanja su pokazala da pri radnoj brzini od 20km/h do 60km/h regenerativni ovjes (označen sa RSA na modelu (b) na slici 3.24) koji je podsustav hibridnog ovjesa generira veću snagu nego potpuno regenerativni ovjes (označen sa RSA na modelu (c) na slici 3.24). Sultoni i dr. [58] su konstruirali i testirali regenerativni elektromagnetski ovjes koji može efikasno iskoristiti vibracijsku energiju vozila koja se javlja zbog neravnina na cesti i tijekom ubrzavanja/usporavanja vozila. Glavni cilj konstrukcije koju su predstavili u ovome radu je regeneracija energije uz najbolje moguće očuvanje udobnosti i upravljivosti vozila. Predstavili su, napravili i opisali dinamički model cijelog sustava elektromagnetskog ovjesa. Rezultate dobivene simulacijom usporedili su sa eksperimentalnim rezultatima. Prema simulaciji, model četvrtine automobila ostvario je rezultat u kojem je srednja spremljena snaga iznosila 45W za cestu C klase pri brzini od

50km/h. Eksperimentalnim mjerenjima koja su proveli na prototipu ovjesa uspjeli su dobiti maksimalnu snagu od 45W i srednju snagu od 11,43W pri vibracijskoj brzini od 0,1m/s. Shematski prikaz presjeka elektromagnetskog ovjesa koji je analiziran u ovome radu dat je na slici 3.25.



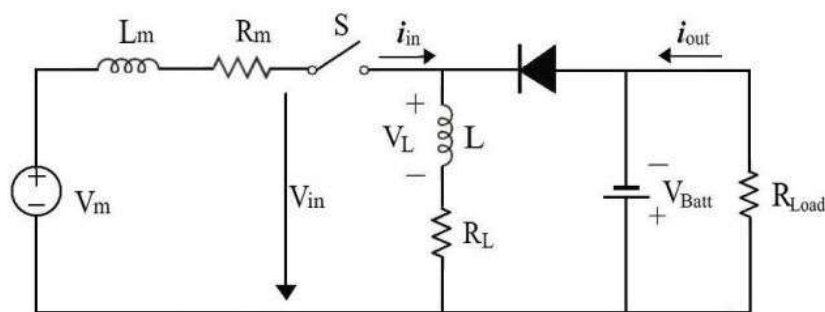
Slika 3.24. Matematički modeli ovjesa: (a) Konvencionalni ovjes, (b) Hibridni ovjes, (c) Potpuno regenerativni ovjes[57]



Slika 3.25. Presjek elektromagnetskog regenerativnog ovjesa – 1.Električni priključak, 2.Adapter, 3.Kućiče namotaja, 4.Permanentni magnet, 5.Glavno vratilo, 6.Klizač, 7.Adapter, 8.Kotrljajući ležaj, 9.Kućiče kugličnog navojnog vretena, 10.Vijak, 11.Uška za vješanje[58]

Zhang i dr. [59] su modelirali i konstruirali hidraulično-električni regenerativni ovjes. Napravili su matematički model dinamičkog klasičnog sustava ovjesa sa dva stupnja slobode gibanja i model sustava regenerativnog hidraulično-električnog ovjesa. Uz korištenje modela hidraulično-električnog regenerativnog ovjesa proveli su simulacije kako bi dobili sila/pomak i sila/brzina karakteristike za sinusnu pobudu sa frekvencijom od 1,67Hz. Napravili su simulaciju i analizu modela koji je nastao kao kombinacija dva klasična sustava ovjesa sa jednim regenerativnim ovjesom. Detaljnije su analizirali utjecaje: tlaka punjenja, volumena hidrauličnog akumulatora, radnog volumena hidrauličnog motora, radne površine

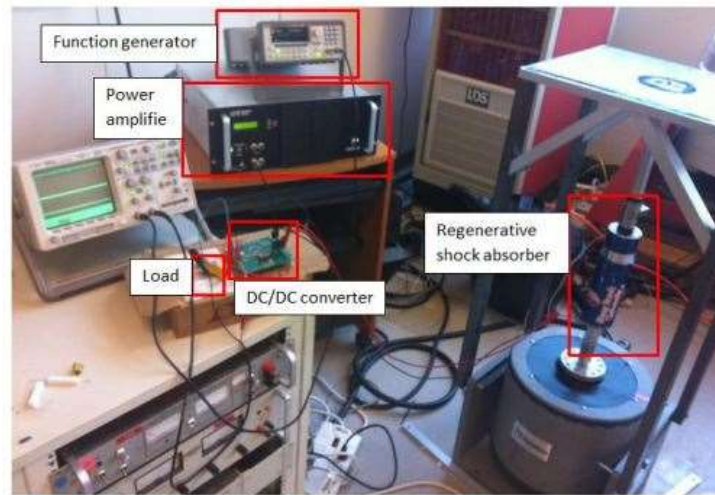
kombinaciju između specijalnog tipa istosmjernog pretvarača električne struje i elektromagnetskog regenerativnog ovjesa. Otkrili su da kada strujni krug radi u diskontinuiranom strujnom režimu, omjer između ulaznog napona i struje ovisi samo o radnom ciklusu signala za modulaciju širine impulsa. Zaključili su da se korištenjem ovog svojstva specijalni istosmjerni pretvarač može iskoristiti za polu-aktivnu kontrolu vibracija, i to upravljanjem opterećenja između terminala generatora u elektromagnetskom ovjesu. Simulirali su princip rada ovjesa i dinamiku strujnog kruga radi potvrđivanja svojih ideja i koncepta. Shematski prikaz električnog kruga koji je kombinacija specijalnog tipa istosmjernog pretvarača i elektromagnetskog regenerativnog ovjesa dat je na slici 3.27.



Slika 3.27. Ekvivalentni strujni krug kombinacije istosmjernog ispravljača i elektromagnetskog regenerativnog ovjesa[62]

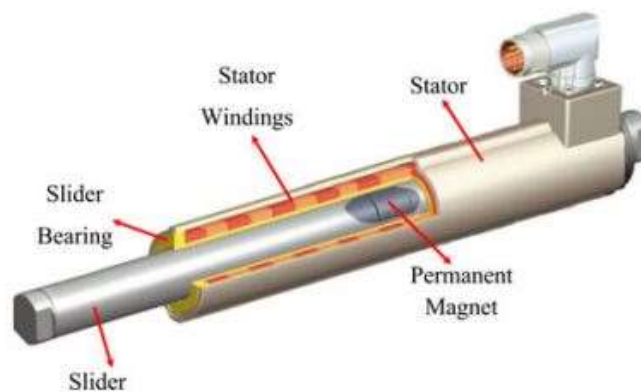
Zhang i dr. [63] su demonstrirali integraciju regenerativnog ovjesa sa alternatorom vozila, električnom baterijom i električnim opterećenjem unutar vozila. U predstavljenom sustavu, ovjes koji pretvara kinetičku energiju u električnu energiju pobudili su vibracijskim pokretačem. Ovako dobivena struja išla je u istosmjerni pretvarač koji je ostvario dvije funkcije: kontrolu prigušenja regenerativnog ovjesa i regulaciju izlaznog napona. Prigušenje su podesili kontrolom izlazne struje iz regenerativnog ovjesa. Kontrolirana izlazna struja ujedno je predstavljala i ulaznu struju u istosmjerni pretvarač. Podešavanjem ciklusa sklopki u pretvaraču, uspjeli su podesiti njegovu ulaznu impedanciju zajedno s ulaznom strujom prema zahtjevima dinamike prigušenja. Akumulatorska baterija punila se na izlazu iz istosmjernog pretvarača. Zbog simulacije radnih uvjeta motora s unutrašnjim izgaranjem, koristili su izmjenični električni motor za pogon alternatora kamiona (koji također puni bateriju). Kao baterijsko električno opterećenje koristili su otpornike snage radi simulacije pomoćnih električnih uređaja unutar vozila. Eksperimentalni rezultati pokazali su da ova integrirana strategija može efikasno iskoristiti energiju, a pritom smanjiti potrebe za snagom izmjeničnog električnog motora. Ova navedena činjenica dokazuje smanjenje opterećenje motora s

unutrašnjim izgaranjem i smanjenje potrošnje goriva u motoru. Grafički prikaz eksperimentalnog sustava regenerativnog ovjesa kojeg su izradili autori navedenog rada dat je na slici 3.28.



Slika 3.28. Eksperimentalni sustav regenerativnog ovjesa sa električnim opterećenjem i istosmjernim pretvaračem[63]

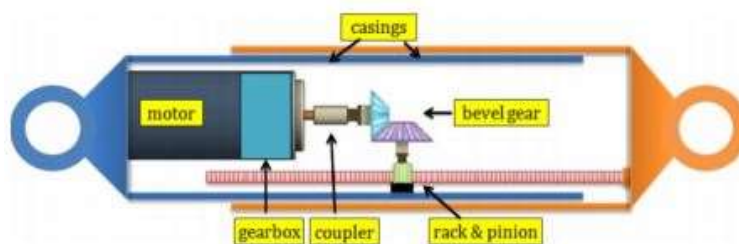
Sabzehgar i Moallem [64] su predstavili razvoj regenerativnog prigušivača koji se sastojao od: sustava masa i opruga (kojeg su spojili na istosmjerni uređaj s linearnim permanentnim magnetom), pretvarača snage za elektroniku i električne baterije. Shematski prikaz djelomičnog presjeka regenerativnog prigušivača koji su predstavili u ovome radu dat je na slici 3.29. Razvili su modulirani pretvarač na bazi pojačanja širine impulsa koji je omogućio (putem kontrolne sheme s povratnim petljama) pseudo-otporničko ponašanje između ulaznih priključaka istosmjernog uređaja. Korištenjem ovog pseudo-otporničkog ponašanja, ostvarili su isti efekt kao i kod mehaničkog prigušivača ali sada sa funkcijom regenerativnog priguše-



Slika 3.29. Regenerativni prigušivač sa linearnim permanentnim magnetom – shematski prikaz[64]

nja. Performanse regenerativnog ovjesa testirali su putem eksperimentalne analize. Rezultati analize pokazali su da pretvarač na bazi pojačanja širine impulsa (koji je upravlján pomoću kontrolne sheme s povratnim petljama) može uspješno provesti visokoeffikasno regenerativno prigušenje mehaničkih vibracija. Zuo i Zhang [65] su napravili analizu potencijala snage koja je dostupna za spremanje i iskorištavanje putem regenerativnih ovjesa. Razmotrili su kompromis između iskorištavanja energije, udobnosti vožnje i upravljivosti vozila provodeći analizu sustava simulacijama i eksperimentalnim putem. Pobudu ovjesa koja se javlja zbog neravnina na cesti, modelirali su stacionarnim nasumičnim procesom koji su predložili prema ISO standardu. Koristili su koncept sustava H2 norme kako bi dobili vrijednosti generirane snage, ubrzanja mase vozila i sile dinamičkog kontakta između kotača i tla. Za model četvrtine vozila dobili su vrijednost generirane snage analitičkim putem. Analizirali su posebno utjecaje: neravnina na cesti, brzine vozila, krutosti opruge, prigušenja ovjesa, krutosti gume kotača, mase kotača/šasije na radne karakteristike vozila i potencijal iskoristive energije. Proveli su eksperimente radi potvrde svojih teoretskih pretpostavki i rezultata. Rezultati eksperimenata i simulacija pokazali su da neravnine na cesti, krutost gume kotača i brzina vožnje imaju najveći utjecaj na potencijal iskoristive energije u regenerativnom ovjesu. Pri brzini od 65km/h (na prosječno dobroj cesti) uspjeli su generirati 100-400W prosječne snage u regenerativnom ovjesu srednje teškog vozila. Zhang i dr. [66] su napravili pregled i sistematizaciju dosadašnjih konfiguracija regenerativnih ovjesa. Prema principima rada podijelili su sve regenerativne ovjese u dvije skupine: mehaničke regenerativne ovjese i elektromagnetske regenerativne ovjese. Naveli su i istaknuli osnovne prednosti i nedostatke istih. Prema ovim autorima, u skupinu mehaničkih regenerativnih ovjesa spadaju uglavnom napredni hidraulični i pneumatski sustavi. Osnovni nedostaci takvih sustava su složeni sustavi cijevi, nezanemariva masa samog sustava i potreba za većim instalacijskim prostorom. Također, istraživači koji se bave regenerativnim hidrauličnim i pneumatskim ovjesima relativno su malobrojni. U skupinu elektromagnetskih regenerativnih ovjesa spadaju primjerice: elektromagnetski ovjes sa direktnim pogonom, elektromagnetski prigušivač sa ozubljenom letvom, elektromagnetski ovjes sa planetarnim zupčanikom, elektromagnetski ovjes sa hidrauličnim prijenosnikom i samo-pogonjeni magnetoreološki regenerativni ovjes. Analizom efikasnosti različitih konfiguracija regenerativnih ovjesa, autori su zaključili da ovjesi na principima kugličnog navojnog vretena i ozubljene letve imaju značajne inercijske gubitke koji smanjuju efikasnost i pogoršavaju radne karakteristike sustava. Za usporedbu, regenerativni prigušivači sa hidrauličnim prijenosom imaju značajno efikasniju pretvorbu energije. U ovom preglednom znanstvenom radu analizirali su i pouzdanost sustava

regenerativnih ovjesa. Ovjesi sa direktnim pogonom, kugličnim navojnim vretenom i ozubljenom letvom pokazali su nisku pouzdanost jer otkazom određenih komponenti može doći do većih oštećenja čitavog sustava. Suprotno njima, hidraulični prijenosnici i samopogonjeni magnetoreološki prigušivači pokazali su vrlo visoku pouzdanost u radu. Li i dr. [67] su predstavili model, konstrukciju, eksperiment i cestovna testiranja regenerativnog ovjesa čije su osnovne komponente permanentni magnetski generator i mehanizam sa ozubljenom letvom. Shematski prikaz regenerativnog ovjesa koji je predstavljen u ovome radu dat je na slici 3.30.



Slika 3.30. Shematski prikaz regenerativnog ovjesa sa permanentnim magnetskim generatorom i ozubljenom letvom[67]

Rezultati analize modela pokazali su da se varijabilni koeficijenti prigušenja i asimetrična značajka u vibracijskim gibanjima mogu ostvariti kontrolom i upravljanjem električnog opterećenja regenerativnog ovjesa. Autori su uspjeli postići poboljšanu učinkovitost i pouzdanost sustava koristeći valjke za vođenje ozubljene letve uz prednaprezanje zupčanog prijenosnika kako bi smanjili trenje. Pri brzini vožnje vozila od 48km/h (na približno ravnoj cesti) uspjeli su dobiti (uz korištenje prototipa regenerativnog ovjesa sa slike 3.31.) maksimalnu generiranu snagu od 68W i prosječnu generiranu snagu od 19W.



Slika 3.31. Prototip regenerativnog ovjesa sa permanentnim magnetskim generatorom i ozubljenom letvom koji je instaliran na stvarno vozilo[67]

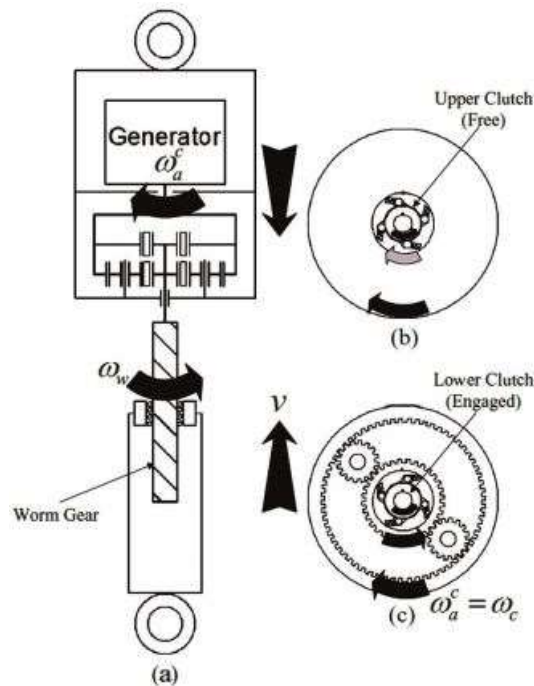
Fang i dr. [68] su predstavili i izradili prototip novog regenerativnog hidraulično-elektromagnetskog ovjesa. Testirali su karakteristiku prigušenja regenerativnog ovjesa za niske tlakove i male amplitude pobude. Rezultati koje su dobili pokazali su dobre performanse ovjesa za ovako postavljene ulazne parametre. Istražili su energetske regenerativnu karakteristiku hidraulično-elektromagnetskog ovjesa. Eksperimentalnim ispitivanjem uspjeli su dobiti vrijednost od 200W spremljene snage pri frekvenciji od 10Hz sa amplitudom pobude 3mm. Prikaz prototipa regenerativnog hidraulično-elektromagnetskog ovjesa i ispitne jedinice istog dati su na slici 3.32.



Slika 3.32. Prototip regenerativnog ovjesa i njegova ispitna jedinica[68]

Prilikom eksperimentalnog ispitivanja prototipa regenerativnog ovjesa, učinkovitost sustava iznosila je samo 16,6%. Istraživači su uočili da ispravljачka učinkovitost hidrauličnog ispravljачa opada sa povećanjem frekvencije pobude što u konačnici vodi do smanjenja ukupne učinkovitosti regeneracije energije. Teoretski su analizirali linearne gubitke strujanja ulja u hidrauličnim cijevima. Analizom dobivenih rezultata zaključili su da se ovim putem izgubi čak 1/3 ukupne snage koja bi se mogla spremirati i ponovno iskoristiti. Iz matematičkog modela linearnih gubitaka u hidrauličnim cijevima, uočili su da se taj gubitak energije može značajno smanjiti ako se poveća unutrašnji promjer cijevi. Yu i dr. [69] su predstavili koncept elektromehaničkog regenerativnog prigušivača u svrhu ostvarenja varijabilnog asimetričnog pasivnog prigušenja i radi eventualnog iskorištavanja potencijala energije vibracija vozila. Predstavljeni koncept sastoji se od dvije spojke i planetarnog mehanizma koji je spojen na vijčano vreteno za prijenos gibanja. Ovako konstruiran mehanizam pretvara višesmjerno

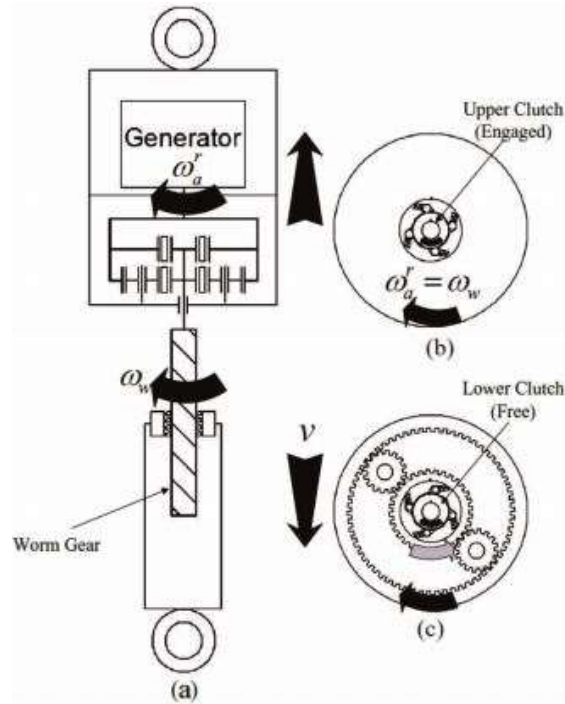
linearno gibanje u asimetrično jednosmjerno rotacijsko gibanje koje se prenosi na električni generator (slike 3.33. i 3.34).



Slika 3.33. Princip rada elektromehaničkog regenerativnog ovjesa – prvi smjer linearnog gibanja: (a) predstavljena konstrukcija regenerativnog ovjesa, (b) gornja spojka (slobodna rotacija), (c) donja spojka (radna rotacija)[69]

Na slici 3.33. dat je grafički princip rada regenerativnog ovjesa za prvi smjer linearnog gibanja. Kotač preko mehaničke veze prenosi linearno gibanje na maticu s navojem koja translacijom uzrokuje rotaciju vijčanog vretena. Vijčano vreteno spojeno je mehanički na donju i gornju spojku (slika 3.33. (b) i (c)) te uzrokuje rotaciju istih. Za ovaj smjer linearnog gibanja gornja spojka (b) je isključena i rotira u praznom hodu, dok je donja spojka (c) uključena i rotacijsko gibanje vretena se prenosi na sunčani zupčanik planetarnog prijenosnika. Sunčani zupčanik pogoni dva planeta koji pak pogone vanjski zupčanik sa unutrašnjim ozubljenjem koji je spojen na električni generator radi dobivanja električne energije. Smjerovi rotacija pojedinih dijelova i princip rada regenerativnog ovjesa za drugi smjer linearnog gibanja dati su na slici 3.34. Kotač preko mehaničke veze opet prenosi linearno gibanje na maticu s navojem koja translacijom uzrokuje rotaciju vijčanog vretena. Sada je ta rotacija vretena suprotna od one na slici 3.33. i potrebno je održati isti smjer vrtnje električnog generatora. Ovaj zahtjev ispunjen je i omogućen uključivanjem gornje spojke (b) u rad koja direktno prenosi rotaciju sa vretena na generator. Istovremeno donja spojka (c) sada je isključena i nema direktnog prijenosa gibanja sa vretena na planetarni prijenosnik koji

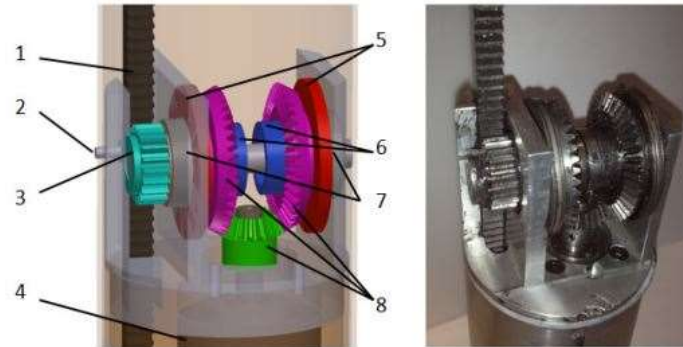
rotira u praznome hodu za ovaj smjer linearnog gibanja. Autori su analizirali utjecaje parametara prijenosnika i elektromagnetskog kruga na svojstva prigušenja za različite harmo-



Slika 3.34. Princip rada elektromehaničkog regenerativnog ovjesa – drugi smjer linearnog gibanja: (a) predstavljena konstrukcija regenerativnog ovjesa, (b) gornja spojka (radna rotacija), (c) donja spojka (slobodna rotacija)[69]

nijske pobude ovjesa. Rezultati analize pokazali su da predstavljena konstrukcija prijenosnika pomaže u ograničavanju inercijske prigušne sile i da kompresijska asimetrija prigušenja ovisi direktno o prijenosnim omjerima između zupčanika. Dodatnim analizama pokazalo se da izmjenično upravljanje spojkama nudi fleksibilnost u upravljanju i omogućava poboljšanu izolaciju vibracija vozila. Li i dr. [70] su predstavili inovativnu konstrukciju regenerativnog prigušivača sa ispravljačem mehaničkog gibanja. Uspjeli su značajno povećati efikasnost spremanja energije u regenerativnom ovjesu, smanjivši pritom vrijednosti udarnih sila koje su uzrokovane oscilacijskim gibanjima vozila. Napravili su dinamički model regenerativnog ovjesa s ciljem analize generalnih svojstava ispravljača mehaničkog gibanja putem analogije mehaničkih sustava sa električnim krugovima. Model kojeg su osmislili sposoban je istovremeno analizirati električne i mehaničke komponente. Simulacijama i eksperimentalnim testovima prototipa prigušivača, dobili su učinkovitost od 60% pri visokim frekvencijama što je znatno veća efikasnost nego kod ostalih regenerativnih ovjesa u oscilacijskom gibanju. Napravili su stvarne testove na prototipu regenerativnog prigušivača sa ispravljačem

mehaničkog gibanja u kojem su uspjeli generirati 15W električne snage pri brzini vožnje od 25km/h na realnoj ravnoj cesti. Prikaz 3D modela i fizičkog prototipa ispravljača mehaničkog gibanja koji je korišten u ovome radu dat je na slici 3.35., dok je na slici 3.36. dat model cijelog ovjesa sa montiranim ispravljačem mehaničkog gibanja.



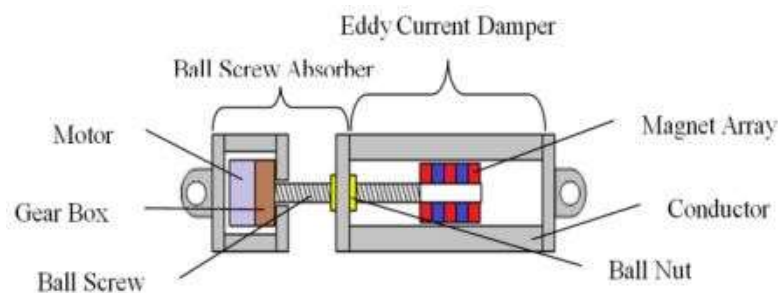
Slika 3.35. 3D model i izrađeni prototip ispravljača mehaničkog gibanja za regenerativni ovjes: 1. Ozubljena letva, 2. Valjak, 3. Cilindrični zupčanik, 4. Planetarni prijenosnik i motor, 5. Klizni aksijalni ležajevi, 6. Kotrljajuće spojke, 7. Kuglični kotrljajući ležajevi, 8. Konični zupčanici[70]



Slika 3.36. Model regenerativnog ovjesa sa montiranim ispravljačem mehaničkog gibanja[70]

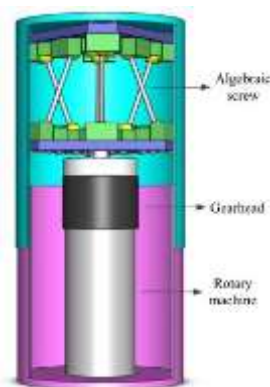
Zi i dr. [71] su predstavili novi tip hidraulično-elektromagnetskog regenerativnog ovjesa. Napravili su teoretsku analizu sustava i simulacijske testove na modelu prigušivača. Model čitavog hidraulično-elektromagnetskog regenerativnog ovjesa izradili su u programu AMESim što im je omogućilo dobivanje karakteristike prigušenja. Rezultati testiranja pokazali su da njihov regenerativni ovjes ima jedinstvenu karakteristiku prigušenja i potencijalno dobre regenerativne karakteristike u odnosu na slične konstrukcije. Wai i Rong [72] naveli su razloge zbog kojih je danas na automobilskom tržištu sve više električnih vozila i novih sustava regenerativnih ovjesa. Predstavili su novi hibridni električno-mehanički regenerativni prigušivač (slika 3.37.). Detaljno su objasnili koncept i konstrukciju novog prigušivača dok su simulacije proveli uglavnom na komponenti prigušenja sa vrtložnom strujom. Prigušivači sa vrtložnom strujom sastoje se načelno od permanentnog magneta i vodiča električne struje. Linearnim gibanjem između tih dviju komponenti dolazi do toka

električne struje i stvaranja magnetskog polja koji se opire gibanju. Zbog bezkontaktnog prigušenja, ovakva vrsta regenerativnog ovjesa ima duži vijek trajanja. Glavni nedostatak je taj što ovaj prigušivač ne može cjelokupno izolirati tijelo od vibracija radi niske vrijednosti sile prigušenja. Autori su modelirali i simulirali sustav hibridnog regenerativnog ovjesa. Dodatnim analizama otkrili su da mogu značajno povećati silu prigušenja uvođenjem dopunske rotacijske komponente u sustav ovjesa. Hibridni sustav regenerativnog ovjesa na slici 3.37 sastoji se od dvije komponente za generiranje snage: kugličnog navojnog vretena (koje je spojeno na zupčani prijenosnik i preko njega na električni motor/generator) i namotaja zavojnice sa magnetima i vodičem.



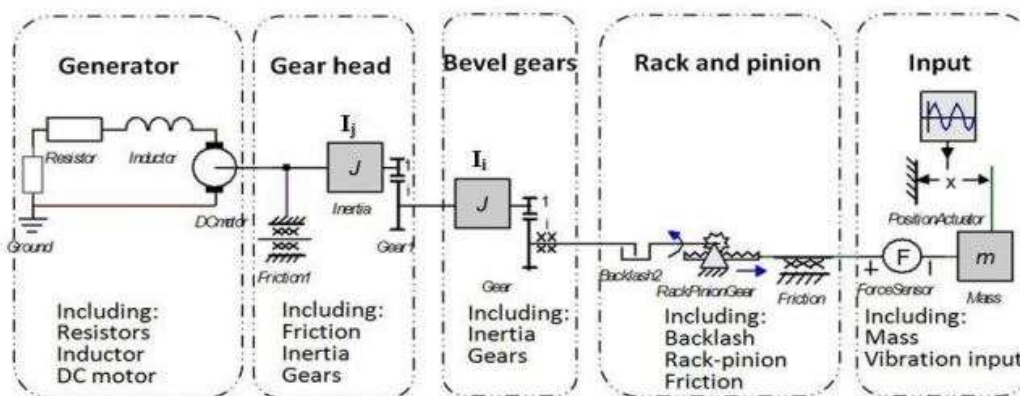
Slika 3.37. Shematski prikaz hibridnog električno-mehaničkog regenerativnog ovjesa[72]

Maravandi i Moallem [73] su predstavili analizu i konstrukciju mehanizma koji se može koristiti kao sustav regenerativnog ovjesa. Uređaj koji su predstavili u ovome radu sastoji se od mehanizma algebarskog vijka, planetarnog prijenosnika i istosmjernog električnog rotacijskog uređaja. Kao pretvarač linearnog mehaničkog gibanja u rotacijsko mehaničko gibanje koristili su algebarski vijak, dok su generiranu energiju u istosmjernom električnom rotacijskom uređaju spremali u električnu bateriju putem električnog pretvarača snage. Shematski prikaz ovog sustava dat je na slici 3.38.



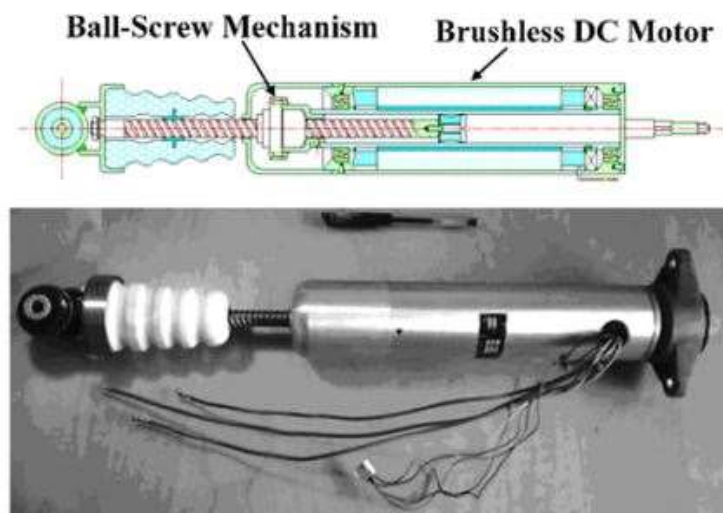
Slika 3.38. Shematski prikaz regenerativnog ovjesa sa algebarskim vijkom, planetarnim prijenosnikom i istosmjernim električnim rotacijskim uređajem[73]

Količinu prigušenja koju može dati ovakav regenerativni ovjes, izračunali su pomoću dinamičke analize na modelu četvrtine automobila. Autori su izveli izraze za ulaznu, spremljenu i izgubljenju snagu u ovisnosti o parametrima regenerativnog ovjesa i različitim profila cesta. U konačnici, potvrdu točnosti modela regenerativnog ovjesa pokazali su usporedbom između simulacijskih i numeričko-teoretskih rezultata. Zhang i dr. [74] su predstavili novi tip hidraulično-električnog regenerativnog ovjesa koji istovremeno može obavljati funkcije prigušenja vibracija i spremanja određene količine energije koja se inače izgubi u okolinu. Autori su izradili novi prototip regenerativnog ovjesa prema pravilima koje propisuje QC/T 545-1999 standard. Testiranjima na prototipu otkrili su da kontrolom električnog opterećenja mogu ograničiti regeneriranu energiju na određeni vrijednosni interval. Yu i dr. [75] su predstavili koncept električno-mehaničkog regenerativnog prigušivača koji se sastoji od zupčanog mehanizma i spojki radi postizanja jednosmjernog kutnog gibanja mehanizma. Formulirali su analitički model regenerativnog prigušivača kako bi dobili vrijednosti parametara sile i brzine u ovome sustavu. Analitički model pokazao je dominaciju inercijskog prigušnog efekta zajedno s električno-magnetskim prigušenjem. Dodatni testovi na modelu pokazali su da se prigušna svojstva predstavljenog sustava mogu jednostavno mijenjati putem varijacije parametara u električnom krugu i varijacijom parametara u procesu mehaničkog konstruiranja. Tumačenjem rezultata analize, autori su zaključili da ukupna razvijena sila u sustavu regenerativnog ovjesa sadrži dvije glavne komponente: generatorsku i efektivnu inercijsku silu. Li i Zuo [76] su predstavili model i analizu elektromagnetskog regenerativnog prigušivača koji može imati potencijalnu primjenu u sustavima s ponavljajućim oscilacijskim gibanjem sa velikim amplitudama. Grafički model elektromagnetskog regenerativnog prigušivača koji je predstavljen u ovome radu dat je na slici 3.39.



Slika 3.39. Grafički model elektromagnetskog regenerativnog prigušivača [76]

Model sa slike 3.39. sastoji se od sinusne pobude koja predstavlja ulazni signal sile u sustav. Ulazna sila prenosi se preko ozubljene letve na zupčanik koji uzrokuje rotaciju para koničnih zupčanika. Rotacija i dobivena energija, prenosi se sa koničnih zupčanika na planetarni prijenosnik koji uzrokuje rotaciju električnog generatora za dobivanje električne energije. Prema modelu sa slike 3.39. autori su postavili matematičko-dinamički model sustava koji su analizirali uz korištenje diferencijalnih jednadžbi. Napravili su nelinearne modele radi razumijevanja utjecaja trenja na elektromagnetski regenerativni sustav. Predstavili su i objasnili smjernice za konstrukciju i dizajn ovakvog tipa regenerativnog ovjesa. Li i dr. [77] su predstavili novu konstrukciju regenerativnog ovjesa koja omogućava značajno povećanje efikasnosti spremanja energije. Novim tehničkim rješenjem uspjeli su smanjiti udarne sile koje su uzrokovane vibracijama. Glavna komponenta ovog regenerativnog ovjesa je već prethodno spomenuti ispravljač mehaničkog gibanja. Napravili su dinamički model sustava radi analize općih svojstava mehaničkog ispravljača, uz korištenje analogije između mehaničkih sustava i električnih krugova. Predloženi model sposoban je analizirati električne i mehaničke komponente u istom vremenskom intervalu. Prototip regenerativnog ovjesa koji su izradili imao je efikasnost od 60% pri visokim frekvencijama što je mnogo više nego kod drugih tipova regenerativnih ovjesa. Analizom rezultata provedenih eksperimenata uočili su da je njihov tip regenerativnog ovjesa uspio spremiti 15W električne snage pri brzini vožnje vozila od 20km/h. Cai i dr. [78] su napravili model vozila u dinamičkom programu RecurDyn radi dobivanja vrijednosti količine izgubljene energije prilikom prigušenja u konvencionalnom ovjesu. Izradili su B, D i F modele stanja površine ceste koristeći metodu harmonične superpozicije. Simulacijom vibracija sustava ovjesa postavili su i opisali međuovisnost između izgubljene energije prigušenja, različitih stanja površine ceste i brzine vozila. Crolla i Cao [79] su napravili pregled literature u kojoj se različiti istraživači bave razvojem zelenih vozila i novih hibridnih tehnologija. Autori su posebno istaknuli područje istraživanja regenerativnih ovjesa koje se prema njihovoj analizi nameće kao vrlo interesantna tema za buduća znanstvena istraživanja u automobilskom sektoru. Huang i dr. [80] su napravili model i prototip regenerativnog elektromagnetskog ovjesa čiji su prikazi dati na slici 3.40. Regenerativni elektromagnetski ovjes sa slike 3.40. pretvara linearno gibanje ovjesa u rotaciju istosmjernog električnog DC motora/generatora (bez četkica) pomoću mehanizma kugličnog navojnog vretena. Iz podataka koje su autori dobili mjerenjem i testiranjima na prototipu, uspjeli su definirati parametre koji su im omogućili razvoj matematičkog modela elektromagnetskog regenerativnog ovjesa. Za aktivnu kontrolu regenerativnog sustava koristili su petlju glavne i unutrašnje strukture. Ograničenje kontrolne električne struje i stanje



Slika 3.40. Model i izrađeni prototip regenerativnog elektromagnetskog ovjesa[80]

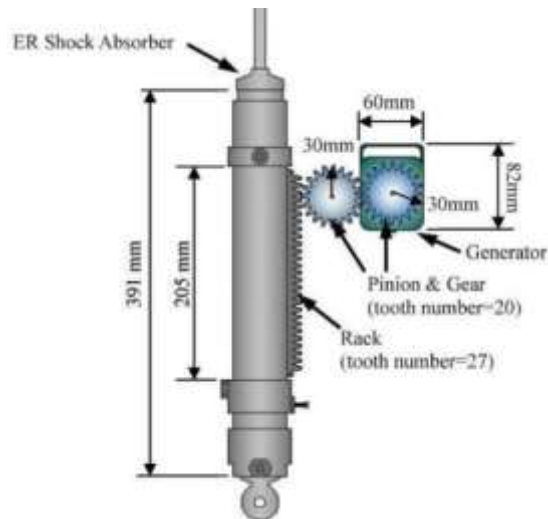
toka energije u sustavu ovjesa, analizirali su pojednostavljenjem kontrolnog sustava sa unutrašnjom petljom. Predstavili su dvije kontrolne metode: potpuno aktivnu i regenerativno polu-aktivnu metodu s ciljem kontrole vibracija mase vozila i regeneracije energije koja je uzrokovana neravninama na cesti. Rezultati simulacije (koja je provedena za različita stanja na površini ceste) pokazali su da potpuno aktivna metoda kontrole (ili upravljanja) može poboljšati udobnost vožnje za više od 30%, s naglaskom da u tom režimu rada električna baterija troši energiju na upravljanje ovjesom. Rezultati simulacije sa regenerativno polu-aktivnom metodom upravljanja pokazali su da korištenje ovakve vrste kontrolne metode može poboljšati udobnost do 10%, uz istovremeno punjenje električne baterije energijom koja se generira u regenerativnom ovjesu. Shen i dr. [81] su napravili simulacijski model samo-pogonskog ovjesa u MATLAB-u. Njihov rad primarno se bazirao na analizu kinematike i dinamike sustava koji se sastojao od više tijela. Simulacijski model vozila napravili su u MBS (engl. Multy-Body System) programu, dok su sklop između dva modela vozila i samo-pogonskog ovjesa ostvarili putem kooperacijske simulacije između MBS i MATLAB programa. Razvili su nelinearni model vozila radi analize vertikalne i kotrljajuće dinamike vozila. Rezultati simulacije modela pokazali su da samo-pogonski ovjes može spremiti određenu količinu energije koja bi se mogla koristiti za podešavanje visine vibracijskog gibanja vozila koje nastaje radi promjene vertikalnog opterećenja na kotačima zbog neravnina na cesti. Dodatnim analizama pokazalo se da samo-pogonski ovjes koji je predstavljen u ovome radu poboljšava performanse vozila u vožnji. Fang i dr. [82] su opisali ideju i princip novog tipa hidrauličnog elektromagnetskog regenerativnog ovjesa. Predstavili su i usporedili dva različita sustava ventila za ovaj tip regenerativnog ovjesa. Otkrili su da sustav sa

nepovratnim ventilima može učinkovito smanjiti gubitke energije u regenerativnom ovjesu kada se ti gubici usporede sa onima koji se generiraju u sustavu ovjesa sa kliznim ventilima. Važno je naglasiti da sustav sa nepovratnim ventilima ima znatno manju kompaktnost strukture u odnosu na sustav sa kliznim ventilima. Analizom ova dva sustava ventila, autori su predložili sustav sa nepovratnim ventilima kao idealan za korištenje u regenerativnim ovjesima koji za prijenos energije koriste hidraulični fluid. Xu i dr. [83] su predstavili konstrukciju novog mehaničko-elektromagnetskog hidrauličnog regenerativnog ovjesa. Istražili su kako kontrola generatorskog opterećenja utječe na podešavanje sile prigušenja u realnom vremenu. Predložili su korištenje istosmjernog električnog pretvarača radi kontrole generatorskog opterećenja kako bi se izbjegli nepotrebni gubici energije. Matematički model regenerativnog ovjesa i analize simulacijom napravili su u programu AMESim. Tang i dr. [84] su predstavili novu konstrukciju cjevastog linearnog elektromagnetskog pretvarača koji može spremati energiju vibriranja vozila. Princip rada ovog regenerativnog uređaja sličan je onome koji su opisali u radu [55]. Ispitivanjima na ovome tipu regenerativnog ovjesa dobili su vrijednost gustoće prigušenja od $3595 \frac{kNs}{m^4}$ što je vrlo blizu vrijednostima koje imaju ovjesi koji rade na hidrauličnom radnom principu, a koriste se u inženjerskoj praksi. Regenerativni uređaj koji su predstavili u ovome radu uspio je spremati 35,5W električne snage pri brzini ovjesa od 0,25m/s. Ning i dr. [85] su predstavili samo-energetski/kontrolni sustav koji može služiti kao uređaj za regeneraciju energije vibriranja vozila. Matematički model predstavljenog regenerativnog sustava napravili su u programu MSC.EASY5, dok su simulacijski model cijelog vozila napravili u programu MSC.ADAMS. Radi dobivanja realnih rezultata napravili su složeni kooperacijski simulacijski model između ADAMS/CAR modela (model cijelog vozila) i MSC.EASY5 modela (model regenerativnog uređaja). Rezultati analize simulacije pokazali su da ovaj sustav može spremati određenu količinu energije uz poboljšanje voznih karakteristika vozila. Zuo i dr. [86] su predstavili linearni elektromagnetski regenerativni ovjes. Izradili su eksperimentalnu jedinicu (prikaz dat na slici 3.41.) radi empirijske potvrde teoretskih pretpostavki. Za konfiguraciju četverofaznog linearnog generatora (glavna komponenta ovog elektromagnetskog regenerativnog ovjesa) koristili su trajne magnete i visoko propusne magnetske petlje radi povećanja učinkovitosti i smanjenja težine. Optimizaciju konstrukcije sustava i analizu magnetskog polja napravili su pomoću metode konačnih elemenata. Napravili su teoretski analitički model kako bi mogli proračunati količinu regenerirane energije za različite vibracijske amplitude, frekvencije i konstrukcijske parametre. Teoretska predviđanja potvrdili su eksperimentalnim studijama na



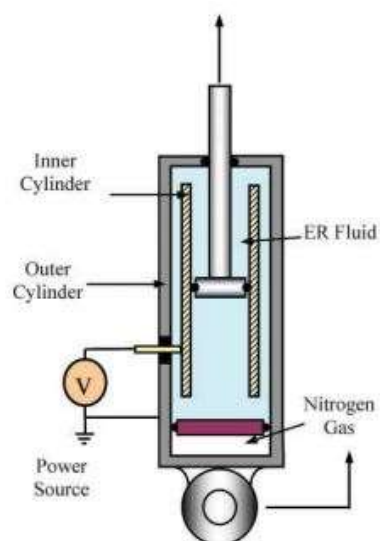
Slika 3.41. Eksperimentalna jedinica za testiranje linearnog elektromagnetskog ovjesa[86]

prototipu linearnog elektromagnetskog ovjesa. Prilikom testiranja uspjeli su spremati 16 do 64W električne snage pri brzini regenerativnog ovjesa od 0,25 do 0,5m/s. Song i Cao [87] su predstavili novu metodu upravljanja prenosivosti oblikovanjem (metoda kojom se upravlja karakteristikama ovjesa) koju su primijenili na aktivni ovjes vozila i regeneraciju energije u njemu. Analizirali su dinamičke performanse vozila za dva različita matematička modela: model četvrtine vozila i model cijelog vozila. Rezultati simulacije pokazali su značajno poboljšanje performansi vožnje uz povećanje ukupne učinkovitosti vozila zbog korištenja nove metode upravljanja regenerativnim ovjesom. Nagode i dr. [88] su razvili novi regenerativni uređaj koji radi na elektromagnetskom principu. Napravili su matematički model i laboratorijski prototip uređaja. Eksperimentalnim testovima na prototipu uspjeli su spremati 20W električne snage pri takvim ispitnim iznosima sile, pomaka i brzine koji su bili slični onim vrijednostima koje se javljaju prilikom stvarne vožnje vozila. Choi i dr. [89] su predstavili novi upravljivi elektromehanički regenerativni ovjes koji se aktivira pomoću generatora bez vanjskih izvora snage. Na vanjskom kućištu ovog elektromehaničkog ovjesa postavili su mehanizam sa zupčanicom i ozubljenom letvom (slika 3.42). Zupčani mehanizam na kućištu služi za pretvorbu linearnog gibanja ovjesa u rotacijsko gibanje električnog generatora koji kasnije tom regeneriranom električnom strujom utječe na ponašanje elektromehaničkog fluida. Elektromehanički fluidi su takva vrsta fluida koja ne provodi električnu struju ali sadrži električno aktivne čestice. Viskozitet ove posebne vrste tekućine može varirati i do 100 000 puta u vremenskom intervalu od svega par milisekunda kada se izloži



Slika 3.42. Skica kućišta elektoreološkog regenerativnog ovjesa sa zupčanicima i ozubljenom letvom[89]

utjecaju električnog polja. Jednostavnije objašnjeno, promjenom intenziteta električnog polja (u ovome radu to se ostvaruje pomoću električne struje iz generatora) dolazi do promjene viskoznosti fluida unutar ovjesa, a samim time i do promjene prigušne karakteristike koja se ovim putem može aktivno upravljati. Shematski prikaz presjeka regenerativnog ovjesa koji radi na principu elektoreološkog fluida dat je na slici 3.43. Autori su napravili matematičke modele i ispitni prototip novog elektoreološkog regenerativnog ovjesa. Testiranjem na prototipu regenerativnog ovjesa za vrstu ceste sa izraženim neravninama, uspjeli su postići značajno povećanje udobnosti vožnje, upravljajući iznosom viskoziteta fluida u ovjesu. Količina regenerirane energije u ovjesu bila je dovoljna za stvaranje električnog polja koje je



Slika 3.43. Shematski prikaz presjeka elektoreološkog regenerativnog ovjesa[89]

omogućilo aktivno upravljanje predloženim sustavom. Okada i dr. [90] su predstavili novu regenerativnu i aktivnu kontrolnu metodu upravljanja automobilskim ovjesom. Za regenerativni uređaj koji može biti aktivno upravljan koristili su linearni izmjenični električni motor. Zaključili su da regenerativna i aktivna kontrolna metoda ovjesa ne mogu kvalitetno funkcionirati u istome vremenskom intervalu. Razvili su novi kontrolni zakon koji ima ulogu prebacivanja sa jedne kontrolne metode na drugu ovisno o iznosu sile koje se javlja u ovjesu. U svrhu potvrde novog kontrolnog zakona napravili su eksperimentalnu jedinicu regenerativnog ovjesa sa linearnim izmjeničnim motorom. Rezultati testiranja na prototipu pokazali su dobra slaganja sa rezultatima koje su dobili simulacijom predloženog sustava. Ebrahimi i dr. [91] su prezentirali konstrukciju, modeliranje i FEM analizu novog elektromagnetskog regenerativnog prigušivača. Korištenjem metode magnetskog kruga, uspjeli su dobiti analitički model regenerativnog sustava. Istu metodu koristili su prilikom optimizacije bez-dimenzijskih geometrijskih faktora i za određivanje elektromagnetskih sila i tokova u regenerativnom prigušivaču. Radi potvrde konstrukcijskih smjernica koje su predložili u radu, proveli su analizu sustava metodom konačnih elemenata. Rezultati koje su dobili analitičkim i eksperimentalnim putem pokazali su dobra slaganja sa rezultatima koji su proizašli iz analize metodom konačnih elemenata. Graves i dr. [92] su napravili teoretsku usporedbu elektromagnetskih regenerativnih prigušivača koji se temelje na elektromotornoj sili gibanja sa onima koji se temelje na elektromotornoj sili transformacije. Elektromagnetski prigušivači sa elektromotornom silom transformacije generiraju elektromotornu silu u stacionarnom strujnom krugu gdje se ta sila generira procesom vremenske varijacije iznosa magnetskog polja uz strujni krug. Elektromagnetski prigušivači sa elektromotornom silom gibanja generiraju elektromotornu silu prilikom gibanja pokretnog vodiča unutar statičnog magnetskog polja. Autori su analizirali i usporedili koeficijente prigušenja ova dva elektromagnetska prigušna uređaja za prethodno zadane iznose magnetskog polja i volumena materijala koji provodi struju (volumen vodiča struje). Rezultati analize pokazali su da za vrlo mali interval dimenzija (koje nisu praktične) ovakvih regenerativnih sustava, sustav sa elektromotornom silom transformacije može biti i do dva puta učinkovitiji od uređaja sa elektromotornom silom gibanja. Za sve realne situacije najveću učinkovitost imaju elektromagnetski uređaji koji rade na principu elektromotorne sile gibanja. U svom drugom radu [93], isti autori predstavili su generaliziranu elektromagnetsku topologiju kao upute za optimalnu konstrukciju regenerativnih elektromagnetskih uređaja. Riješili su problem rotacijskog elektromagnetskog prigušivača (ima loš utjecaj na dinamiku vozila) tako što su dodali dodatne dinamičke elemente u seriju sa rotacijskim prigušivačem. Suda i dr. [94] su

prezentirali metodu aktivne kontrole vibracija za regenerativni hibridni sustav. Predstavili su regenerativni prigušivač sa linearnim istosmjernim motorom. Eksperimentalnim putem i numeričkim simulacijama uspjeli su dokazati da predstavljeni regenerativni sustav ima bolja izolacijska svojstva nego pasivni ili polu-aktivni sustav ovjesa. Jolly i Margolis [95] su dobili slične rezultate kao i istraživači u prethodnom radu [94]. Ovdje su autori eksperimentalno pokazali da regenerativni sustav sa linearnim istosmjernim motorom ima bolje performanse nego potpuno pasivni sustav prigušenja. Predstavljeni sustav sa linearnim motorom također može obavljati funkciju spremanja energije vibriranja. Fodor i Redfield [96] su osmislili varijabilni linearni prijenosnik koji može ostvariti zadovoljavajuću karakteristiku prigušenja uz obavljanje funkcije spremanja energije vibracija vozila. Rezultati ispitivanja pokazali su da regenerativna kontrolna metoda koju su razvili može održati karakteristiku prigušenja skoro identično onoj koja je prisutna kod pasivnih viskoznih prigušivača.

4. MODELIRANJE BOND GRAFOVIMA

Bond graf predstavlja grafičku reprezentaciju fizičkog dinamičkog sustava. Stvaranje i konstrukcija bond grafa nekog sustava omogućava konverziju tog istog sustava u matematički model stanja prostora. Reprezentacija stanja prostora je model koji je prikazan kao skup različitih varijabli, koje mogu biti ulazne, izlazne ili varijable stanja. Stanje prostora je takav Euklidov prostor u kojem varijable na osima predstavljaju varijable stanja, dok se stanje sustava može prikazati kao vektor unutar tog stanja prostora.

Bond grafovi su vrlo slični blok dijagramima i dijagramima toka, sa glavnom razlikom što linije u bond grafovima predstavljaju višesmjernu izmjenu fizičke energije, dok linije u blok dijagramima i dijagramima toka predstavljaju jednosmjerni tok informacije. Bond grafovi imaju više-energetsku domenu, što znači da modeli bond grafova mogu kombinirati različite fizikalne domene istovremeno (npr. mehaničku, hidrauličnu, električnu...). Modeliranje bond grafovima izmislio je američki znanstvenik i sveučilišni profesor Henry M. Paynter. [97, 98]

U idućem potpoglavlju objašnjena su temeljna teoretska znanja i važne komponente bond grafova kako bi se mogao pratiti pregled znanstvenih istraživanja (iz područja strojarstva) u kojima je korištena primjena teorije bond grafova. Ovakav način modeliranja ima svoj vlastiti poseban jezik i nemoguće je razumjeti složene grafove bez osnovnog poznavanja teorije.

4.1. Teorija bond grafova

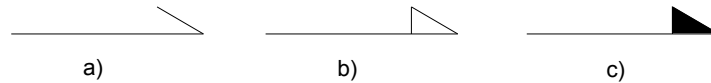
Bond grafovi se sastoje od linija koje povezuju različite vrste elemenata. Pri modeliranju bond grafovima razlikuju se slijedeći elementi odnosno komponente:

1. Elementi ili komponente sa jednim priključkom snage
2. Elementi ili komponente sa dva priključka snage
3. Elementi ili komponente sa više priključaka snage

Svaka linija između komponenti bond grafova predstavlja trenutni tok energije ili snage $\left(\frac{dE}{dt}, \frac{dP}{dt}\right)$. Tok energije ili snage je definiran parom varijabli koje se zovu varijable snage, a njihov produkt je trenutna snaga na liniji između elemenata bond grafova. Varijable snage su podijeljene na dva dijela: tok i napor. Primjerice, za liniju između komponenata u električnom sustavu, varijabla toka je električna struja, dok je varijabla napora napon. Množenjem

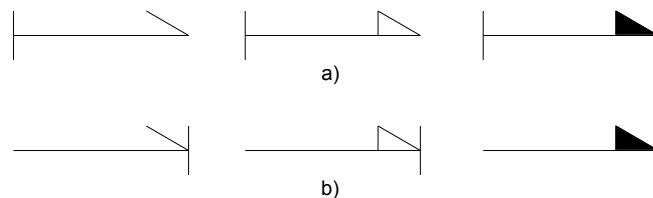
varijabli električne struje i napona u ovome primjeru, može se dobiti trenutna vrijednost snage na liniji bond grafa.

Linija između dvije komponente bond grafa može sadržavati još dvije oznake. Jedna od njih je polovina vrška strelice (prikazano na slici 4.1.). Ova oznaka definira pretpostavljeni smjer pozitivnog toka energije.



Slika 4.1. Označavanje smjera pozitivnog toka energije u bond grafovima – oznake a), b) i c) imaju identično značenje i proizvoljno se odabiru prilikom modeliranja

Slično kao što je to uobičajeno kod analiza dijagrama električnog kruga i tijela koje je oslobođeno od mehaničkih veza, izbor pozitivnog smjera toka energije je proizvoljan. Osoba koja modelira i analizira neki sustav mora biti dosljedna odabranoj definiciji pozitivnog smjera toka energije, i to tijekom čitavog procesa stvaranja bond grafa. Druga dodatna oznaka na liniji zapisuje se kao vertikalna crta koja se postavlja samo na jedan kraj linije (prikazano na slici 4.2.), odnosno na priključak snage komponente grafa. Ova druga oznaka na liniji bond grafa naziva se uzročnost ili kauzalnost.



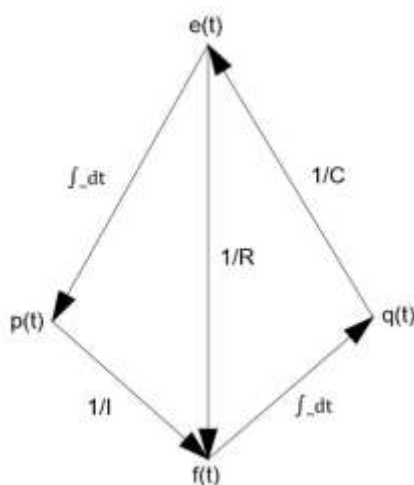
Slika 4.2. Označavanje uzročnosti u bond grafovima – a) na početku linije ili b) na kraju linije između komponenti bond grafova

Postoje pravila za dodjeljivanje uzročnosti određenom priključku, i pravila za određivanje prioriteta između priključaka snage. Uzročnost opisuje matematički odnos između varijabli napora i toka i ista neće biti detaljnije objašnjena u ovome radu jer trenutno nije neophodno poznavati pravila uzročnosti prilikom čitanja i razumijevanja bond grafova na ovoj razini.

4.1.1. Četverokut stanja: varijable, konstante i odnosi među njima

Četverokut stanja je nepravilni četverokut (engl. tetrahedron) koji grafički prikazuje konverziju između napora i toka. Četverokut stanja može se modificirati ovisno o energetske

domeni u kojoj se modelira. Grafički prikaz četverokuta stanja u općoj formi bez povezanosti sa nekom energetsom domenom dat je na slici 4.3.



Slika 4.3. Četverokut stanja u općoj formi

Tablica 4.1. Varijable i konstante četverokuta stanja za različite energetske domene bond grafova

Energetska domena							
Općenito	Opći tok $f(t)$	Opći napor $e(t)$	Opći pomak $q(t)$	Opći momentum $p(t)$	Otpor R	Inercija I	Kapacitet C
Linearna mehanika	Brzina $v(t)$	Sila $F(t)$	Pomak $x(t)$	Linearni momentum $p(t)$	Konstanta prigušenja b	Masa m	Recipročna krutost $\frac{1}{k}$
Rotacijska mehanika	Kutna brzina $\omega(t)$	Okretni moment $T(t)$	Kutni pomak $\varphi(t)$	Kutni momentum $p_r(t)$	Kutno prigušenje B	Moment tromosti J	Recipročna kutna krutost $\frac{1}{k_r}$
Elektromagnetizam	Struja $I(t)$	Napon $U(t)$	Naboj $q(t)$	Elektromagnetski tok $\lambda(t)$	Električni otpor R	Induktivitet L	Električni kapacitet C
Mehanika fluida	Volumni protok $Q(t)$	Tlak $p(t)$	Volumen $V(t)$	Fluidni momentum $p_f(t)$	Otpor strujanju R_f	Inercija fluida I_f	Kapacitet fluida C_f

U tablici 4.1. prikazane su varijable i konstante četverokuta stanja u najčešće korištenim energetske domenama. Sve varijable i konstante prilikom modeliranja bond grafovima uvrštavaju se isključivo u SI mjernim jedinicama. Korištenjem četverokuta stanja sa slike 4.3. može se pronaći matematički odnos između bilo kojih varijabli koje se javljaju na četverokutu. Postupak se obavlja praćenjem smjera strelica na dijagramu uz množenje sa konstantama koje se nađu u smjeru kretanja. Primjerice, ako se želi pronaći odnos između općeg toka $f(t)$ i općeg pomaka $q(t)$, kreće se od varijable $f(t)$ i onda se integrira za dobiti varijablu $q(t)$. Najvažnije matematičke relacije između varijabli koje su dobivene korištenjem četverokuta stanja su:

1. Odnos između općeg pomaka i općeg toka

$$q(t) = \int f(t)dt \quad (4.1)$$

2. Odnos između općeg toka i općeg napora

$$f(t) = \frac{1}{R} \cdot e(t) \quad (4.2)$$

3. Odnos između općeg toka i općeg momentuma

$$f(t) = \frac{1}{I} \cdot p(t) \quad (4.3)$$

4. Odnos između općeg momentuma i općeg napora

$$p(t) = \int e(t)dt \quad (4.4)$$

5. Odnos između općeg toka i općeg napora ali sa C konstantom u izrazu

$$e(t) = \frac{1}{C} \int f(t)dt \quad (4.5)$$

Svi ovi matematički odnosi u svojoj suštini ostaju isti kada se mijenja energetska domena, samo se simboli mijenjaju. Ovo se vidi u slijedećim primjerima:

Primjer odnosa između pomaka i brzine u linearnoj mehanici,

$$x(t) = \int v(t)dt$$

primjer odnosa između struje i napona u elektrotehnici (poznato kao Ohmov zakon),

$$I(t) = \frac{1}{R} \cdot U(t)$$

i konačno

$$F(t) = k \cdot x(t)$$

primjer odnosa između sile i pomaka u mehanici (poznato kao Hookeov zakon).

4.1.2. Elementarne komponente bond grafova

Elementarne komponente bond grafova imaju jednostavnu strukturu i služe za građenje blokova kompleksnih komponenti. U metodi bond grafova, ovakve elementarne komponente predstavljaju temeljne fizikalne procese. Ponekad se te komponente mogu koristiti kao pojednostavljeni prikaz stvarnih komponenta, kao što su tijela, opruge, otpornici, zavojnice ili transformatori.

Kao što je već spomenuto, postoji devet elementarnih komponenata koje predstavljaju temeljne fizičke procese i dijele se u tri skupine:

1. Komponente sa jednim priključkom snage: inercijske (I), kapacitetne (C) i otporne (R) komponente, izvori napora (SE) i izvori toka (SF)
2. Komponente sa dva priključka snage: transformatori (TF) i žiratori (GY)
3. Komponente sa više priključaka snage: čvorište napora (I) i čvorište toka (O)

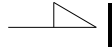
Standardni simboli koji se koriste za označavanje elementarnih komponenata bond grafova zapisani su u zagradama kraj naziva komponente. Na ovaj se način fizički procesi iz više domena (tipično za mehatroniku i druge inženjerske sustave), mogu modelirati na unificiran i konzistentan način.

Komponente bond grafova su opisane njihovim konstitutivnim relacijama ili odnosima preko varijabli i fizičkih parametara. Komponente mogu imati jedan ili više priključaka snage. Proces koji se događaju na tim priključcima opisani su parom varijabli snage: naporom (e) i tokom (f). Određene komponente mogu imati dodatne unutarnje varijable stanja.

4.1.3. Komponente sa jednim priključkom snage

a) Inercijske komponente

Inercijska komponenta identificira se sa simbolom I i ima barem jedan priključak snage. Ova komponenta sa svojim priključkom prikazana je na slici 4.4. Inercijska komponenta koristi se za modeliranje mase i tromosti tijela u mehanici gibanja ili električne zavojnice u elektrotehnici. Varijable na priključku snage su napor e i tok f .



Slika 4.4. Inercijska komponenta sa pripadajućim priključkom snage

Dodatna energetska varijabla je opći momentum p koji je za ovu komponentu definiran odnosom:

$$e = \dot{p} \quad (4.6)$$

Opći momentum može se shvatiti kao akumulacija napora u komponenti:

$$p = p_0 + \int_0^t e dt \quad (4.7)$$

Konstitutivni odnos procesa u inercijskoj komponenti je:

$$p = I \cdot f \quad (4.8)$$

gdje je I parametar. Konstitutivni odnos može također biti nelinearan, u obliku:

$$p = \phi(f, par) \quad (4.9)$$

ili alternativno,

$$f = \phi^{-1}(p, par) \quad (4.10)$$

gdje je ϕ prikladna nelinearna funkcija i par označava parametre.

Ako komponenta ima n priključaka, konstitutivni odnos na i -tom priključku općenito ima oblik

$$p_i = \phi_i(f_j, par), (i, j = 1, \dots, n) \quad (4.11)$$

ili, alternativno,

$$f_i = \phi_i^{-1}(p_j, par), (i, j = 1, \dots, n) \quad (4.12)$$

gdje su ϕ_i prikladne više-varijabilne funkcije.

Proces koji je opisan inercijskom komponentom karakterizira se kao akumulacija toka snage unutar komponente u obliku energije

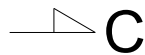
$$E = E_0 + \int_0^t e \cdot f dt \quad (4.13)$$

Korištenjem izraza (4.6) i sređivanjem dobije se konačan izraz

$$E(p) = E(p_0) + \int_0^t f dp \quad (4.14)$$

b) Kapacitetne komponente

Kapacitetna komponenta identificira se sa simbolom C i ima barem jedan priključak snage. Ova komponenta sa priključkom snage prikazana je na slici 4.5.



Slika 4.5. Kapacitetna komponenta sa pripadajućim priključkom snage

Kapacitetna komponenta koristi se za modeliranje mehaničkih opruga, električnih kondenzatora, i sličnih procesa. Varijable na priključku su napor e i tok f . Dodatna energetska varijabla je opći pomak q , koji je za ovu komponentu definiran odnosom

$$f = \dot{q} \quad (4.15)$$

Opći pomak može se shvatiti kao akumulacija toka u komponenti:

$$q = q_0 + \int_0^t f dt \quad (4.16)$$

Konstitutivni odnos procesa u kapacitetnoj komponenti je:

$$q = C \cdot e \quad (4.17)$$

gdje je C parametar. Konstitutivni odnos može također biti nelinearan, u obliku:

$$q = \phi(e, par) \quad (4.18)$$

ili alternativno,

$$e = \phi^{-1}(q, par) \quad (4.19)$$

gdje je ϕ prikladna nelinearna funkcija i par označava parametre.

Ako komponenta ima n priključaka, konstitutivni odnos na i -tom priključku općenito ima oblik

$$q_i = \phi_i(e_j, par), (i, j = 1, \dots, n) \quad (4.20)$$

ili, alternativno,

$$e_i = \phi_i^{-1}(q_j, par), (i, j = 1, \dots, n) \quad (4.21)$$

gdje su ϕ_i prikladne više-varijabilne funkcije.

Proces koji je opisan kapacitetnom komponentom karakterizira se kao akumulacija toka snage unutar komponente u obliku energije

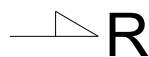
$$E = E_0 + \int_0^t e \cdot f dt \quad (4.22)$$

Korištenjem izraza (4.15) i sređivanjem dobije se konačan izraz

$$E(q) = E(q_0) + \int_0^t edq \quad (4.23)$$

c) Otporne komponente

Otporna komponenta identificira se sa simbolom R i ima barem jedan priključak snage. Ova komponenta sa priključkom snage prikazana je na slici 4.6.



Slika 4.6. Otporna komponenta sa pripadajućim priključkom snage

Otporna komponenta koristi se za modeliranje trenja u mehaničkim sustavima ili za modeliranje električnih otpornika u elektrotehnici. Varijable na priključku su napor e i tok f . Konstitutivni odnos procesa u otpornoj komponenti je:

$$e = R \cdot f \quad (4.24)$$

gdje je R parametar. Konstitutivni odnos može također biti nelinearan, u obliku:

$$e = \phi(f, par) \quad (4.25)$$

ili alternativno,

$$f = \phi^{-1}(e, par) \quad (4.26)$$

gdje je ϕ prikladna nelinearna funkcija i par označava parametre.

Ako komponenta ima n priključaka, konstitutivni odnos na i -tom priključku općenito ima oblik

$$e_i = \phi_i(f_j, par), (i, j = 1, \dots, n) \quad (4.27)$$

ili, alternativno,

$$f_i = \phi_i^{-1}(e_j, par), (i, j = 1, \dots, n) \quad (4.28)$$

gdje su ϕ_i prikladne više-varijabilne funkcije.

d) Komponente izvora

Izvori su komponente koje predstavljaju izvore snage (ili ponore snage), kao što su izvori napona i struje, nekih tipova sila (npr. gravitacija), volumenskog protoka (npr. pumpe) itd. U ovim izvorima, napor i tok su praktički neovisni o drugim varijablama snage. Moguće je definirati dvije vrste komponenti izvora: komponente izvora napora, koje se označavaju sa *SE* i komponente izvora toka, koje se označavaju sa *SF*.

Komponenta izvora napora sa priključkom snage prikazana je na slici 4.7.



Slika 4.7. Komponenta izvora napora sa priključkom snage

Ako se definira napor e na priključku snage komponente izvora napora, može se zapisati konstitutivni odnos za ovu komponentu:

$$e = E_0 \quad (4.29)$$

ili, više općenito,

$$e = \phi(t, par) \quad (4.30)$$

gdje su E_0 i par prikladni parametri, a ϕ je funkcija koja ovisi o vremenu t .

Komponenta izvora toka sa priključkom snage prikazana je na slici 4.8.



Slika 4.8. Komponenta izvora toka sa priključkom snage

Ako se definira tok f na priključku snage komponente izvora toka, može se zapisati konstitutivni odnos za ovu komponentu:

$$f = F_0 \quad (4.31)$$

ili, više općenito,

$$f = \phi(t, par) \quad (4.32)$$

gdje su F_0 i par prikladni parametri, a ϕ je funkcija koja ovisi o vremenu t .

4.1.4. Komponente sa dva priključka snage

U ovu skupinu komponenti spadaju transformatori (*TF*) i žiratori (*GY*). Ove dvije važne komponente predstavljaju transformaciju varijabli snage između njihovih priključaka. Obje komponente imaju dva priključka snage. Na jednome kraju snaga je usmjerena u komponentu (ulaz snage), a na drugom kraju snaga je usmjerena iz komponente (izlaz snage).

Važna karakteristika ovih komponenti je očuvanje toka snage, koje se jednostavno definira tako da ulazni tok snage mora biti jednak izlaznom toku snage. Ako se definiraju odgovarajuće varijable napora i toka na ulaznim i izlaznim priključcima snage sa e_i i f_i ($i = 0,1$), očuvanje toka snage može zapisati odnosom:

$$e_0 f_0 = e_1 f_1 \quad (4.33)$$

gdje su e_0 i f_0 napor i tok na ulaznom priključku snage, a e_1 i f_1 napor i tok na izlaznom priključku snage.

a) Transformatori

Transformatori služe za modeliranje poluga, zupčanika, električnih transformatora i sličnih uređaja. U robotici i mehanici više tijela, transformatori se najviše koriste za transformaciju varijabli snage između dva povezana dijela ili između više mehaničkih tijela u prostoru. Komponenta transformatora sa dva priključka snage prikazana je na slici 4.9.



Slika 4.9. Komponenta transformatora sa dva priključka snage

U komponenti transformatora definiran je linearni odnos između istog tipa varijabli na priključku. Ako se sa m definira omjer transformacije, taj linearni odnos može se zapisati kao

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= m \cdot e_0 \\ f_0 &= m \cdot f_1 \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

Ovi odnosi zadovoljavaju jednadžbu očuvanja toka snage koja je dana u izrazu (4.33). Za transformaciju snage vrijedi također i inverzno zapisan izraz:

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= k \cdot e_1 \\ f_1 &= k \cdot f_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.35)$$

gdje je k omjer transformacije koji je recipročan omjeru m , odnosno vrijedi izraz $k = \frac{1}{m}$.

b) Žiratori

Žiratori su slične komponente transformatorima, ali transformiraju različite tipove varijabli na priključcima. Komponenta žiratora sa dva priključka snage prikazana je na slici 4.10.



Slika 4.10. Komponenta žiratora sa dva priključka snage

Definiranjem omjera žiracije m i k , odgovarajuće jednačbe za ovu komponentu su

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= m \cdot f_1 \\ e_1 &= m \cdot f_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.36)$$

i alternativno,

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= m \cdot e_1 \\ f_1 &= m \cdot e_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

Svoje ime ova komponenta dobila je prema poznatom žiratorskom efektu iz dinamike (mehanike gibanja tijela). Žiratorska komponenta je fundamentalnija od transformatorske komponente, odnosno kombinacijom drugih elementarnih komponenti sa žiratorskom komponentom mogu se dobiti neke komponente bond grafova. Tako su primjerice dva spojena žiratora ekvivalentna transformatorskoj komponenti. Žirator spojen sa inercijskom komponentom je ekvivalentan kapacitetnoj komponenti. Slično, izvor napora koji je spojen sa žiratorom, ekvivalentan je izvoru toka.

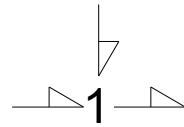
4.1.5. Komponente sa više priključaka snage

Kod fizičkih procesa postoje zakoni prema kojima se može dobiti određena vrijednost napora ili toka. U mehanici je to primjerice zakon ravnotežnog stanja, u elektrotehnici postoji Kirchhoffov zakon, a mogu se također pronaći slični zakoni u drugim znanstvenim poljima. Slična ograničenja postoje u dinamici, koja su definirana kinematskim zakonom relativnih brzina ili zakonom kontinuiteta fluidnog toka u mehanici fluida. Kako bi se zadovoljili takvi uvjeti, elementarne komponente koje su se definirale u prethodnim potpoglavljima spajaju se na čvorišta koja sadrže ograničenja za napor i tok. Takva čvorišta nazivaju se čvorište napora I i čvorište toka 0 .

a) Čvorište napora

Čvorište napora je komponenta sa više priključaka snage u koju snaga ulazi ili izlazi. Tradici-

onalni simbol za ovo čvorište je I . Komponenta čvorišta napora sa pripadajućim priključcima snage prikazana je na slici 4.11.



Slika 4.11. Komponenta čvorišta napora sa tri priključka snage

Često se ovo čvorište naziva i čvorištem zajedničkog toka jer su tokovi na svim priključcima snage isti

$$f_0 = f_1 = \dots = f_{n-1} \quad (4.38)$$

gdje je n broj priključaka u čvorištu. Unutar čvorišta nema akumulacije snage, dok je suma tokova snage koji ulaze i izlaze iz čvorišta jednaka nuli,

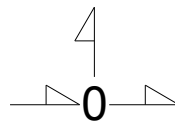
$$\pm e_0 f_0 \pm e_1 f_1 \dots \pm e_{n-1} f_{n-1} = 0 \quad (4.39)$$

U ovoj jednadžbi plus znak koristi se za priključke koji su usmjereni prema čvorištu (pozitivna snaga), a minus znak se koristi za priključke koji su usmjereni iz čvorišta (negativna snaga). Korištenjem izraza (4.38) dobije se jednadžba ravnoteže napora u čvorištu:

$$\pm e_0 \pm e_1 \dots \pm e_{n-1} = 0 \quad (4.40)$$

b) Čvorište toka

Čvorište toka je slično čvorištu napora, samo što su uloge napora i tokova zamijenjene. Ova komponenta spada u skupinu elemenata sa više priključaka snage i tradicionalno se označava sa 0 . Komponenta čvorišta toka sa pripadajućim priključcima snage prikazana je na slici 4.12.



Slika 4.12. Komponenta čvorišta toka sa tri priključka snage

Čvorište toka također se naziva i čvorištem zajedničkog napora, jer su napori na svim priključcima snage isti

$$e_0 = e_1 = \dots = e_{n-1} \quad (4.41)$$

Isto kao i za čvorište napora, u čvorištu toka nema akumulacije snage, odnosno suma ulaznih i izlaznih tokova snage u takvu vrstu čvorišta jednaka je nuli (vrijedi izraz (4.39)).

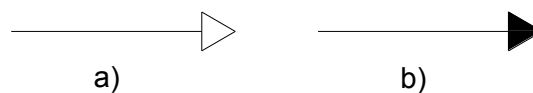
Uvrštavanjem izraza (4.41) u izraz (4.39) dobiva se konačna jednačba ravnoteže toka u čvorištu:

$$\pm f_0 \pm f_1 \dots \pm f_{n-1} = 0 \quad (4.42)$$

Predznaci u ovome izrazu odabiru se isto kao i za čvorište napora.

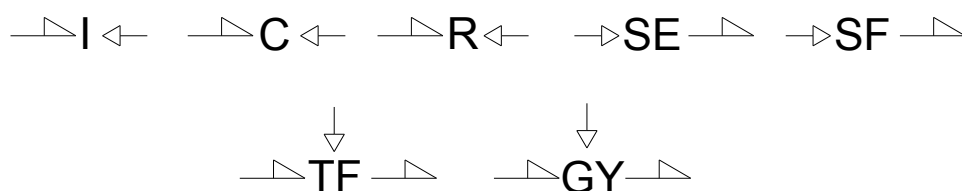
4.1.6. Kontrolirane komponente

Konstitutivni odnosi komponenti koje su do sada predstavljene ovise samo o unutrašnjim varijablama i varijablama snage na priključcima (i naravno o vremenu koje je globalna varijabla). U mnogim situacijama modeliranja potrebno je postaviti ovisnost o nekim vanjskim varijablama. To je slučaj kod modeliranja kontroliranih hidrauličkih ventila, varijabilnih otpornika, kondenzatora, izvora snage i drugih kontroliranih komponenti u elektrotehnici i mehanici. Kontrolirane komponente imaju dodatne kontrolne priključke koji se povezuju linijama sa cijelim vrškom strelice (prikazano na slici 4.13.).



Slika 4.13. Kontrolne linije sa oznakom smjera toka informacije a) prazna strelica ili b) puna strelica

Na slici 4.14. prikazane su komponente sa dodatnim ulaznim kontrolnim priključkom.



Slika 4.14. Komponente sa kontroliranim ulazom

Najviše elementarnih komponenti može imati kontrolirani ulaz. Ulazni priključak na ovim komponentama služi za slanje informacije u komponentu. Jedine komponente koje ne mogu imati kontrolirani ulaz su čvorišta napora i toka. Komponente bond grafova sa kontrolnim ulazom nazivaju se kontrolirane, i njihovi konstitutivni odnosi (izrazi od 4.6 do 4.32) ovise o odgovarajućim kontrolnim varijablama. Transformatori i žiratori moraju zadovoljiti dodatne zahtjeve očuvanja snage. Ovi zahtjevi ne predstavljaju problem jer su ispunjeni i to ne samo konstantnim omjerima transformacije i žiracije nego i omjerima koji ovise o kontrolnoj

varijabli c . Iz toga slijede odgovarajući konstitutivni odnosi za kontrolirane transformatore i žiratore, sa varijabilnim omjerima transformacije i žiracije ($m(c)$):

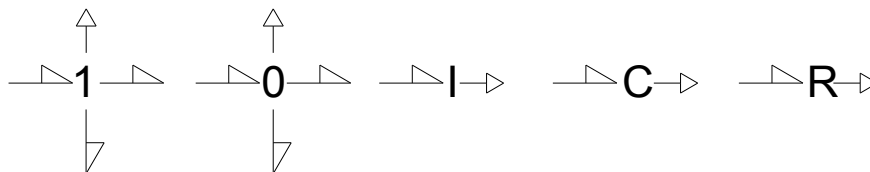
$$\left. \begin{aligned} e_1 &= m(c) \cdot e_0 \\ f_0 &= m(c) \cdot f_1 \end{aligned} \right\} \quad (4.43)$$

za transformatore, i

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= m(c) \cdot f_1 \\ e_1 &= m(c) \cdot f_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.44)$$

za žiratore.

Na slici 4.15. prikazane su komponente sa dodatnim izlaznim kontrolnim priključkom.

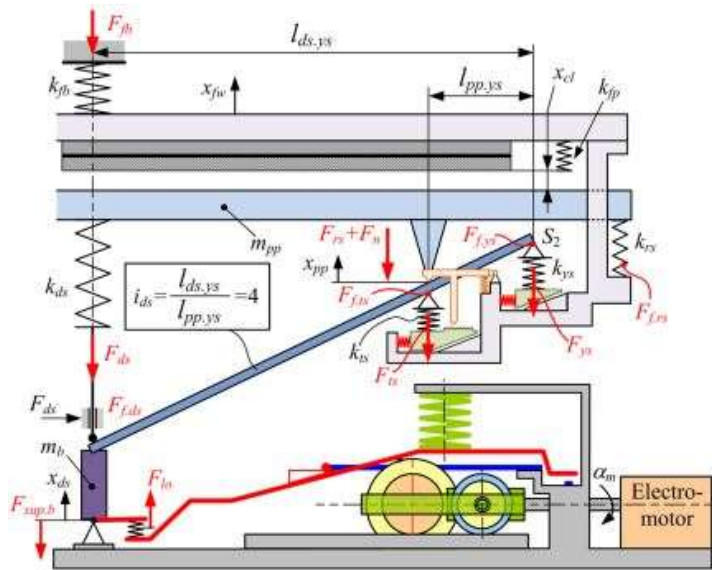


Slika 4.15. Komponente sa kontroliranim izlazom

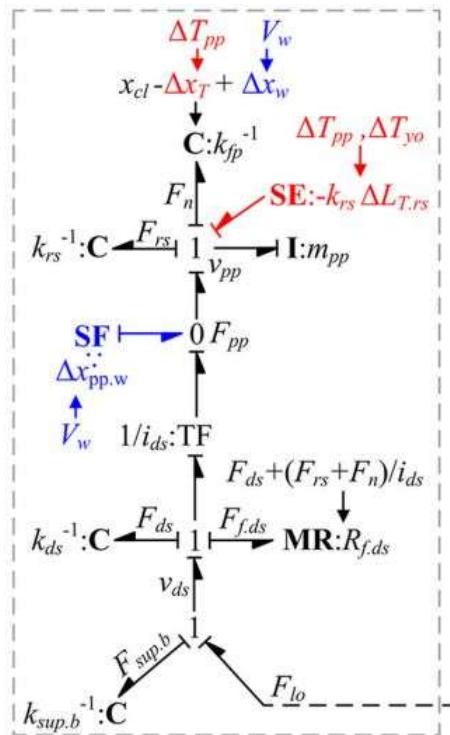
Izlazni kontrolni priključci koriste se za dobivanje varijabli komponenti kojima se ne može pristupiti drugim putevima. Ovakvi kontrolni priključci najčešće služe za ekstrakciju informacija o varijablama na čvorištima toka (ekstrakcija napora) i na čvorištima napora (ekstrakcija toka). Također, izlazni kontrolni priključci koriste se za ekstrakciju unutrašnjih varijabli inercijskih i kapacitetnih komponenti (npr. količine gibanja ili pomaka).

4.2. Pregled istraživanja sa primjenom teorije bond grafova u strojarstvu

Hoić i dr. [99] su predstavili dinamički model automobilske dvostruke suhe spojke. Napravili su eksperimentalnu jedinicu i analizu modela za različite intervale operacijskih uvjeta, uključujući one koji se odnose na efekte toplinske ekspanzije i efekte trošenja. Koeficijent trenja spojke opisali su kao funkciju temperature, brzine klizanja i normalne sile. Podatke o tim veličinama dobili su iz podataka koje su izmjerili tribometrom (uređaj ili instrument koji mjeri tribološke veličine kao što su koeficijent trenja, sila trenja i volumen trošenja između dvije površine koje su u kontaktu). Funkcionalni shematski prikaz suhe spojke sa elektromehaničkim pokretačem koji su autori koristili u ovome radu dat je na slici 4.16. Bond graf pojednostavljenog modela suhe spojke koji je proširen sa efektima toplinske ekspanzije i efektima trošenja dat je na slici 4.17. Jain i dr. [100] su studirali efekt asimetrične krutosti



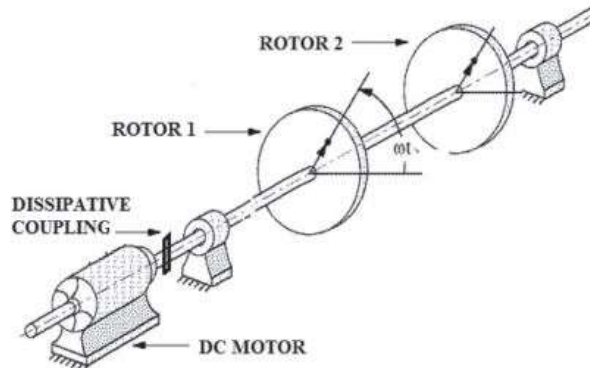
Slika 4.16. Shematski prikaz suhe spojke sa elektromehaničkim pokretačem[99]



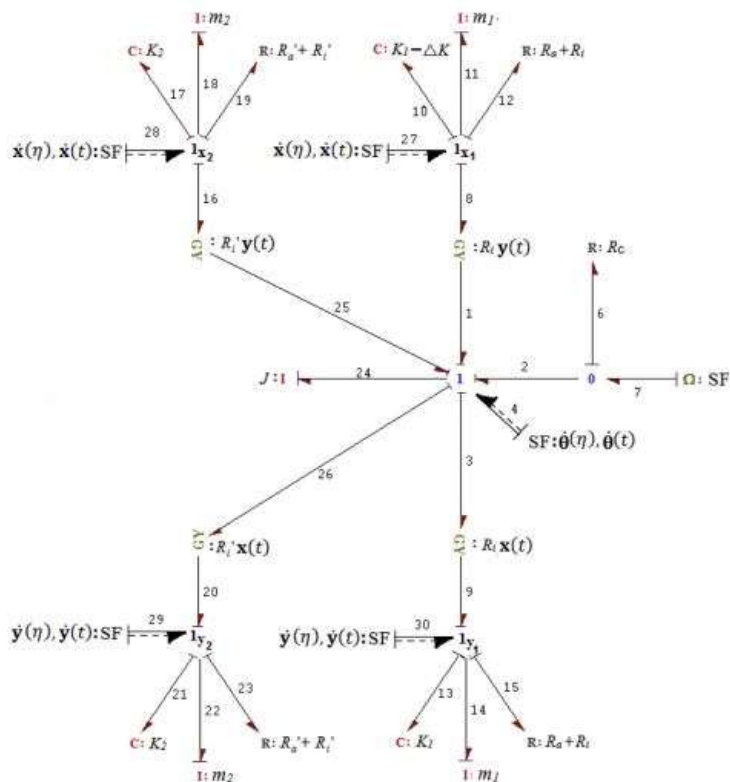
Slika 4.17. Pojednostavljeni bond graf model suhe spojke sa efektima trošenja i toplinske ekspanzije[99]

više-rotorskog sustava. Istražili su dinamičko ponašanje asimetričnog više-rotorskog sustava korištenjem proširenja Lagrangeove jednadžbe gibanja. Razvili su dinamički matematički model kojeg su napravili pomoću tehnike modeliranja bond grafovima. Za simulaciju modela koristili su program Symbol-shakti. Simulacijama na modelu dobili su rezultate koji su pokazali vrlo dobra slaganja sa teoretskim rezultatima koje su dobili Lagrangeovim

formalizmom. Rezultati analize pokazali su da se amplituda vibracije rotora povećava obrnuto proporcionalno sa krutošću rotora. Shematski 3D prikaz više-rotorskog sustava i bond graf model istog dati su na slikama 4.18. i 4.19.

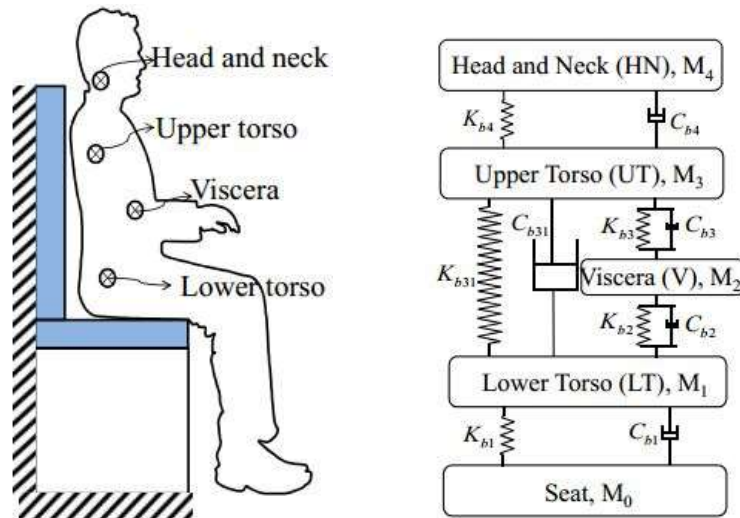


Slika 4.18. Shematski 3D prikaz više-rotorskog sustava[100]



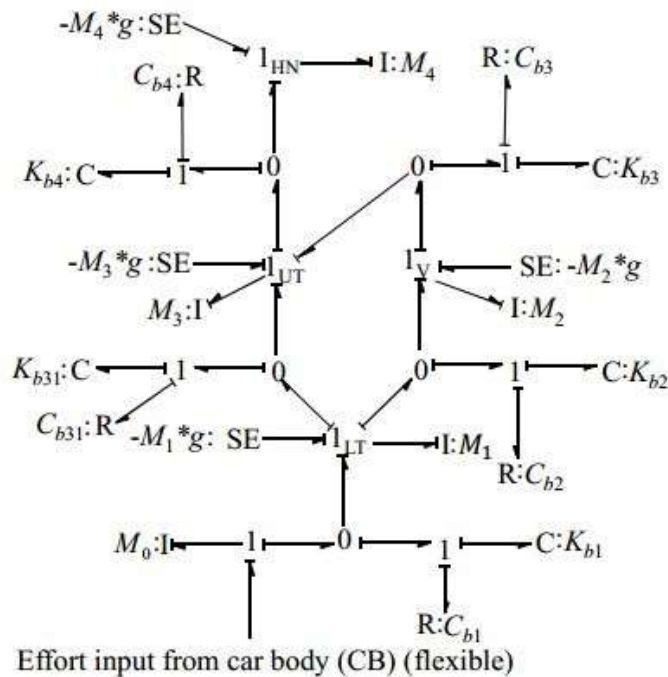
Slika 4.19. Bond graf model više-rotorskog sustava[100]

Pradhan i Samantaray [101] su razvili integrirani bio-mehanički bond graf model željezničkog vozila sa putnikom u njemu. Model su koristili radi procjene i evaluacije udobnosti vožnje u željezničkom vozilu. Napravili su bond graf model čovjeka kako bi prema standardu ISO 2631 odredili udobnost putnika u vozilu za različita trajanja putovanja i različite neravnine na putanji. Shematski model tijela čovjeka i bio-mehanički model istog dati su na slici 4.20.



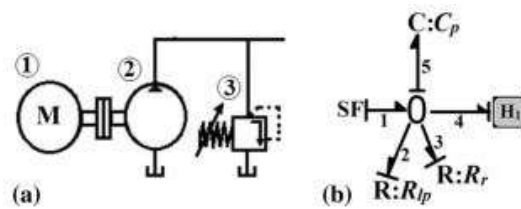
Slika 4.20. Shematski prikaz tijela čovjeka (lijevo) i bio-mehanički model tijela čovjeka (desno)[101]

Bond graf bio-mehaničkog modela čovjeka dat je na slici 4.21.



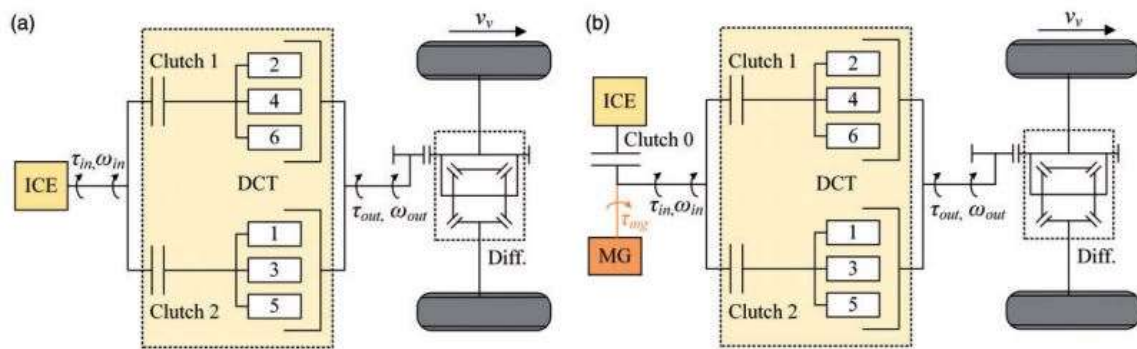
Slika 4.21. Bond graf bio-mehaničkog modela čovjeka [101]

Tripathi i dr. [102] su predstavili novu ideju modeliranja hidrauličnog cilindra pod pretpostavkom kao da je taj cilindar jedno tijelo ograničene duljine. Koristili su jednostavne kinematičke odnose za konstrukciju bond graf modela pomoću kojeg su proračunali Coriolis-ove i centrifugalne sile. Shematski prikaz hidraulične pogonske jedinice (služi za pokretanje hidrauličnog cilindra dizalice u ovome radu) i bond graf istog dati su na slici 4.22.



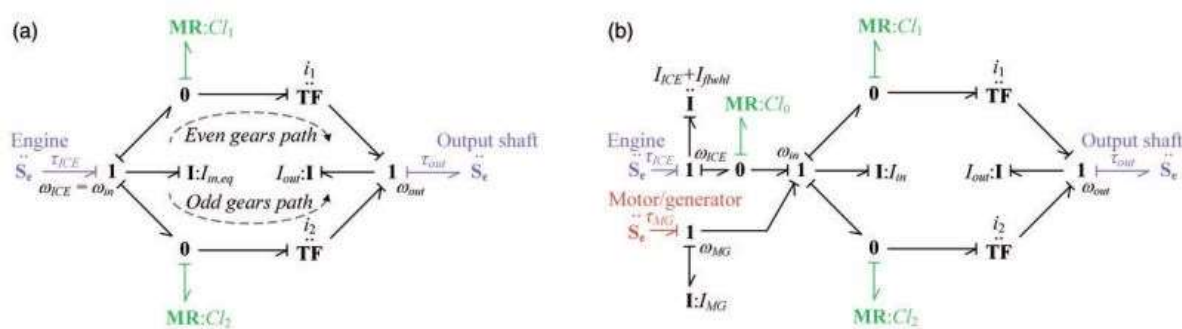
Slika 4.22. Hidraulična pogonska jedinica: (a) Shematski prikaz i (b) bond graf model [102]

Munari i dr. [103] su razvili parametarski bond graf model za predviđanje dinamičkih oscilacija fluida koje se mogu pojaviti u aksijalnom centrifugalnom kompresoru. Rezultati koje su dobili simulacijom bond graf modela pokazali su dobra slaganja sa vrijednostima koje su dobili eksperimentalnim putem. Rezultati iz ovog rada mogu se iskoristiti za postavljanje kvalitetnog rasporeda održavanja kompresora ili za otklanjanje eventualnih kvarova koji se mogu pojaviti u ovakvom uređaju. Kazemi i Montazeri [104] su predstavili novi robusni pristup dijagnostici grešaka i kvarova koristeći primjenu teorije bond grafova. Performanse predloženog pristupa i metode sa bond grafovima testirali su na modelu četvrtine automobila. Mishra i Vaz [105] su napravili bond graf model proteze ljudske ruke. Jedan prst proteze modelirali su kao rotacijsko-translacijski mehanizam sa tri pokretna dijela koji su međusobno zglobno povezani. Dinamičko ponašanje mehanizma čitave proteze objasnili su simulacijama na bond graf modelu. Autori ovog rada smatraju da korištenje bond grafova može imati široku primjenu pri modeliranju bio-mehaničkih problema. Geitner i Komurgoz [106] su predstavili općeniti bond graf model za planetarni mjenjač sa četiri brzine. Tipična procedura za modeliranje ovakvih sustava je potpuno drugačiji pristup za svaku vrstu zupčanika. Korištenjem bond grafova autori su uspjeli uopćiti postupak modeliranja ove vrste mjenjača koji omogućava lakšu usporedbu rezultata između različitih zupčanika. Mashayekhi, i Behdinan [107] su predstavili studiju analitičkog transfernog puta po kojem se javljaju i kreću vibracije. Analizu su temeljili na teoriji četiri pola za sustave sa više energetske domena. Algoritam za dobivanje ekvivalentnog dinamičkog sustava iz različitih energetske domena izradili su pomoću bond graf modela. Ranogajec i Deur [108] su predstavili komparativnu analizu procesa mijenjanja brzina za različite hibridne dvostruke spojke. Opisali su kontrolno orijentirani matematički model ovog prijenosnika snage, uz detaljno objašnjenje karakteristika mjenjača ovog tipa. Različite tipove dvostrukih spojki modelirali su bond grafovima. Analizom modela otkrili su mogućnost poboljšanja performansi promjene prijenosa ako se za mijenjanje brzina koristi električni motor. Shematski prikazi dvostruke spojke bez i sa električnim motorom dati su na slici 4.23.



Slika 4.23. Shematski prikaz dvostruke spojke (a) bez električnog motora (b) sa električnim motorom[108]

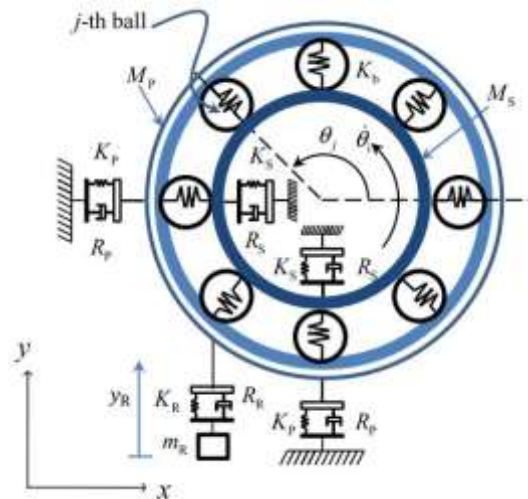
Bond graf modeli shematskih prikaza dvostruke spojke dati su na slici 4.24.



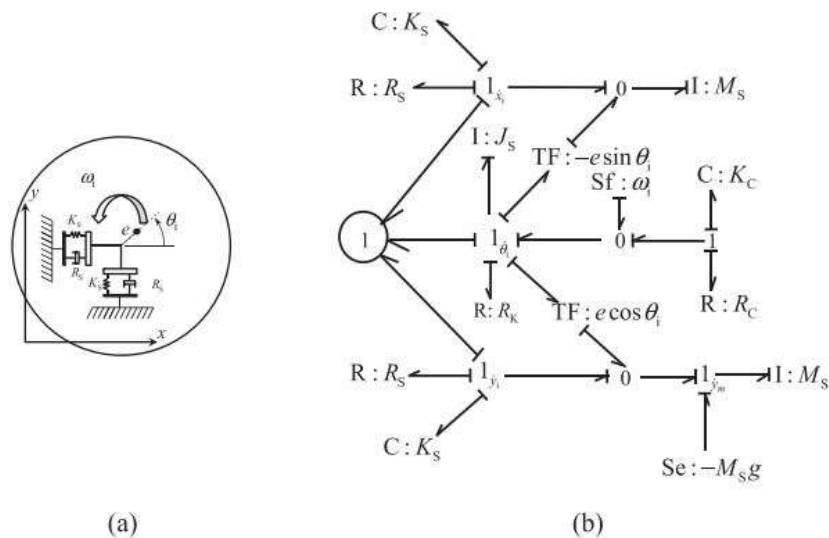
Slika 4.24. Bond graf modeli dvostruke spojke (a) bez električnog motora (b) sa električnim motorom[108]

Jha i dr. [109] su iskoristili tehniku modeliranja bond grafovima za analizu dijagnostike grešaka u nepouzdanim sustavima. Metodologiju koju su predstavili u ovome radu testirali su za različite scenarije (parametarske i mjerne greške) putem simulacija mehatroničkog sustava torzijskog štapa. Conti i dr. [110] razvili su inovativne realno vremenske bond graf modele i nove kontrolne konfiguracije radi analize i regulacije pomoćnih postrojenja za podmazivanje velikih industrijskih turbina. Razvili su novi parametarski model jedinice za podmazivanje uljem kako bi optimizirali ponašanje ovakvih postrojenja kada se sa njima upravlja (kontrolirano postrojenje). Usporedbom podataka koje su dobili simulacijom sa podacima iz stvarnih fizičkih postrojenja, zaključili su da predstavljeni model i kontrolna strategija pokazuju dobra slaganja rezultata uz visoku razinu pouzdanosti. Mishra i dr. [111] razvili su simulacijske modele za kuglične kotrljajuće ležajeve koji se koriste u različitim rotacijskim strojevima. Model im je služio za snimanje pojave vibracija koje najčešće uzrokuju kvarove na ležajevima ovakvog tipa. Razvili su tri različita modela u tri različita programa: MATLAB

(Simulink model), SYMBOLS (Bond graf model) i model u programu ADAMS. Bond graf model kugličnog ležaja sadržavao je gibanje kaveza ležaja u ravnini, efekte trenja i efekte dinamike kontakta. Shematski prikaz čitavog ležaja dat je na slici 4.25. Odvojeni detalj unutrašnjeg prstena ležaja i pripadajući bond graf model istog dati su na slici 4.26.



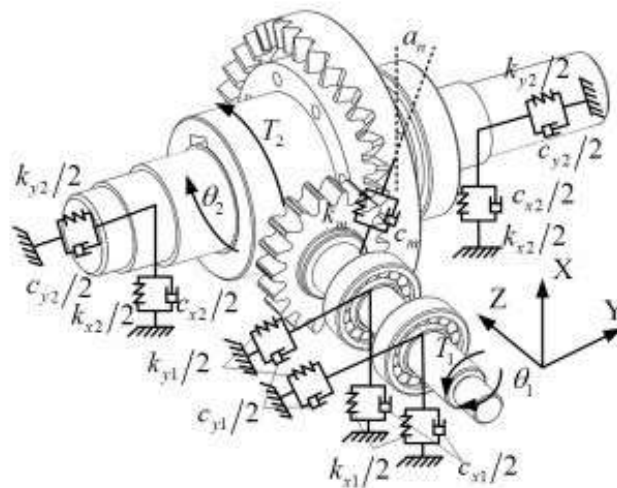
Slika 4.25. Shematski prikaz čitavog kugličnog kotrljajućeg ležaja[111]



Slika 4.26. Unutrašnji prsten ležaja (a) shematski prikaz (b) bond graf model[111]

Paul i dr. [112] su primijenili metodu detekcije i izolacije kvarova na složeni hidraulični sustav. Za modeliranje same metode i izolacije komponenti sustava koje su sklone kvarovima koristili su bond grafove. Pomoću bond grafova razvili su i novu kontrolnu strategiju izolacije pogrešaka koja se bazira na definiranju tolerancije moguće pogreške ili kvara. Mahato i dr. [113] su predstavili koncept blage promjene položaja ventila radi smanjenja potrošnje energije prilikom uključno-isključnog upravljanja ventilom hidrostatičkog pogonskog sustava. Uspjeli

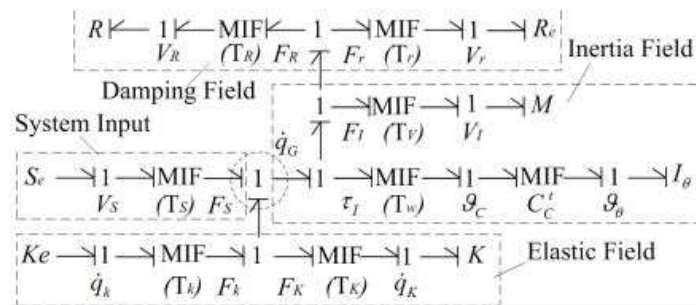
su optimizirati parametre blage promjene položaja ventila primjenom teorije bond grafova. Izradili su bond graf modele hidrostatičkog pogonskog sustava sa i bez blage promjene položaja ventila. Rezultate koje su dobili simulacijom usporedili su sa eksperimentalnim vrijednostima. Autori su otkrili da je moguće postići značajne uštede u potrošnji energije, ako se za upravljanje ventilom koristi predstavljeni koncept blage promjene položaja ventila. Biso i dr. [114] su napravili studiju o Sommerfeldovom efektu koji se javlja u žiroskopskim rotacijsko-dinamičkim sustavima. Ovaj efekt opisuje poseban slučaj kada rotirajući objekt ostane u rezonanciji pri kritičnoj brzini vrtnje ili njegova brzina vrtnje naglo skoči preko područja kritične brzine vrtnje na izrazito visoke vrijednosti. Autori su modelirali problem pomoću bond grafova. Analizom modela uspjeli su dobiti jednačbe gibanja sustava i karakteristike Sommerfeldovog efekta za promatrani dinamički sustav. Balino i Pellegrini [115] su koristili bond graf metodologiju za modeliranje jednodimenzionalnog toka fluida (koji nije kompresibilan) u cijevi sa krutim stjenkama. Kao varijable stanja bond graf modela definirali su volumenski protok i vektor entropije. Simulirali su zagrijavanje stjenke cijevi koje se događa zbog protoka fluida. Numerički rezultati simulacije pokazali su gotovo identične vrijednosti kao rezultati koji su dobiveni analitičkim rješenjem. Cai i Lin [116] su prezentirali Lagrangeov uopćeni nelinearni bond graf model zupčanog prijenosnika sa vratilima čije se osi sijeku. Dinamički model ovog zupčanog prijenosnika dat je na slici 4.27.



Slika 4.27. Dinamički model zupčanog prijenosnika sa vratilima čije se osi sijeku[116]

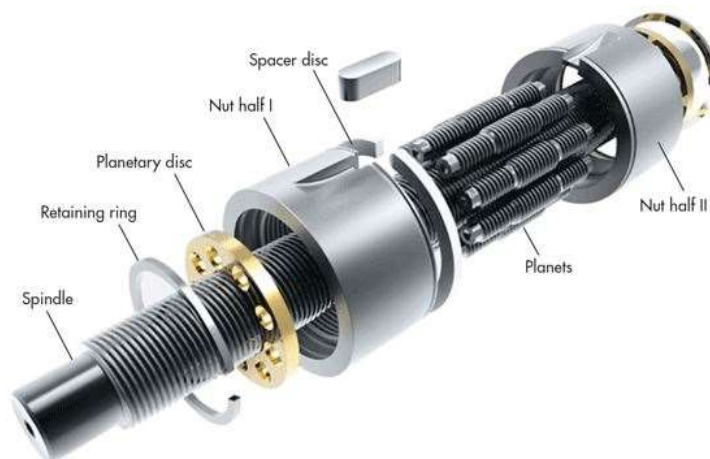
Bond graf model sadržavao je efekte osnovnih parametara zupčanog para, kao što su prekrivanje profila, ekscentričnost i slično. Simulacijama na modelu analizirali su vibracijske karakteristike kod ovakve vrste zupčanika. Karakteristike koje su dobili pokazuju da zupčani par koji su analizirali ne može biti direktno primijenjen u prijenosni sustav sa visokim

brzinama vrtnje. Ovu tvrdnju su potvrdili eksperimentalnim putem na stvarnom prijenosniku. Lagrangeov bond graf model analiziranog prijenosnika dat je na slici 4.28.



Slika 4.28. Lagrangeov bond graf model zupčanog prijenosnika sa vratilima čije se osi sijeku[116]

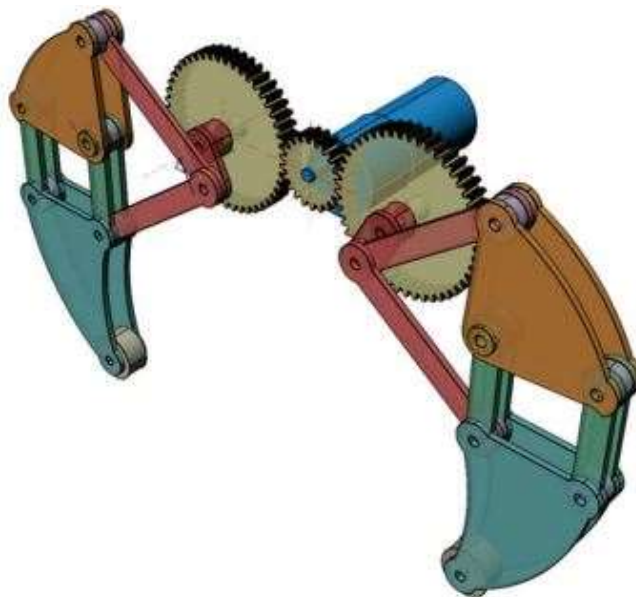
Ma i dr. [117] su primijenili bond graf teoriju kako bi dobili dinamički proračunski model krutosti planetarnog kotrljajućeg vijčanog mehanizma. Planetarni kotrljajući vijčani mehanizam je uređaj koji se koristi kao precizni tip vijčanog pokretača (vrlo nisko trenje) ili za pretvorbu rotacijskog gibanja u linearno gibanje. Ova vrsta mehanizma najčešće se koristi kao pokretni mehanizam u raznim električno-mehaničkim linearnim uređajima. Zbog svoje složenosti planetarni vijčani mehanizam je relativno skup (skuplji od kugličnog navojnog vretena) ali je prikladan za primjenu u visoko-preciznim, visokobrzinskim i visoko-opterećenim uređajima koji imaju dodatni zahtjev dugog vijeka trajanja. Planetarni vijčani mehanizam u rastavljenom pogledu prikazan je na slici 4.29.



Slika 4.29. Dijelovi planetarnog vijčanog mehanizma[118]

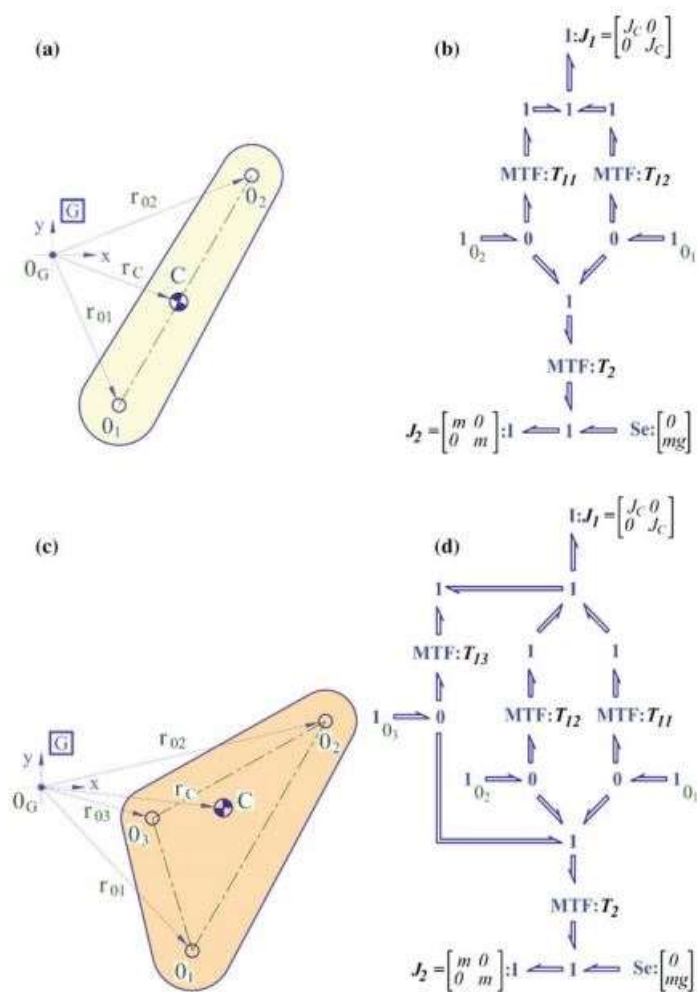
Dinamički model krutosti koji su autori napravili sadržavao je različite efekte sa parametrima strukturalne i kontaktne krutosti vijka, geometrijskih pogrešaka, kotrljajućih i kliznih faktora trenja i konačno efekt faktora raspodjele opterećenja na kotrljajućim navojima. Istražili su

kako dinamička krutost mehanizma varira ovisno o različitim frekvencijama i amplitudama opterećenja, i posebno kako na nju utječe promjena promjera vijka, kuta pritiska i broja kotrljajućih elemenata u sustavu. Rezultati koje su dobili mogu poslužiti kao teoretska baza za konstrukciju planetarnih vijčanih mehanizama. Nedic i dr. [119] su modelirali i simulirali hidraulični nepovratni ventil koji se koristi u teškoj opremi za industriju drva. Istražili su dva pristupa modeliranju: jedan sa varijabilnim korakom integracije kontinuiranog modela i drugi sa aproksimacijom hibridnog modela sustava. Oba pristupa su analizirali pomoću bond grafova. Ibansecu [120] je prezentirao primjenjivost bond graf metode na modeliranje dinamičkih sustava u mehaničkoj, električnoj, hidrauličnoj, toplinskoj, kemijskoj i magnetskoj energetske domeni. Istaknuo je prednosti modeliranja kombiniranih hibridnih sustava (oni koji uključuju više različitih energetskih domena) ovom tehnikom. Gola i dr. [121] su predstavili bond graf model robota sa dvanaest nogu. Napravili su različite kontrolne sustave i proveli simulacije pomoću bond grafova kako bi dobili najefikasnije konstrukcijsko rješenje. 3D prikaz jednog para nogu robota kojeg su modelirali dat je na slici 4.30.



Slika 4.30. 3D prikaz jednog para nogu modeliranog robota[121]

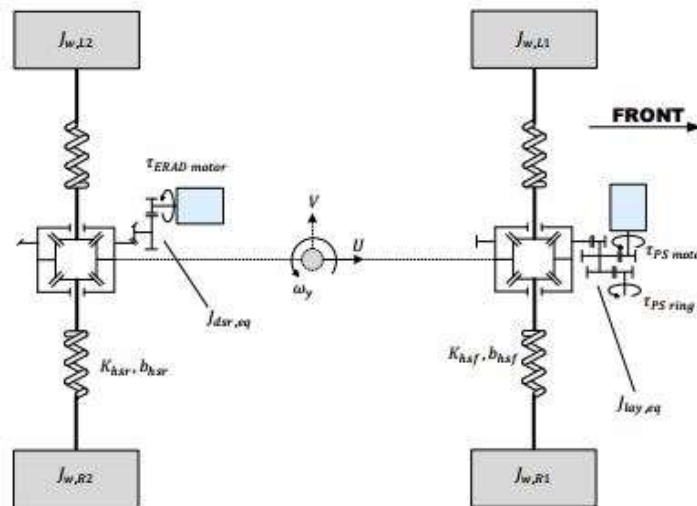
Prikazi poveznica dijelova nogu robota sa dvije ili tri veze, te njihovi bond graf modeli dati su na slici 4.31. Montazeri i Fashandi [122] su razvili bond graf model koji je baziran na toku energije u plinskoj turbini. Motor plinske turbine su prezentirali pomoću pseudo bond graf pristupa. Važno je napomenuti da se pseudo bond grafovi koriste za rješavanje problematike sa provođenjem topline i ne spadaju u opći tip bond graf tehnike. Autori su istražili kako na performanse plinske turbine utječe promjena vanjskog opterećenja. U tu svrhu su simulirali



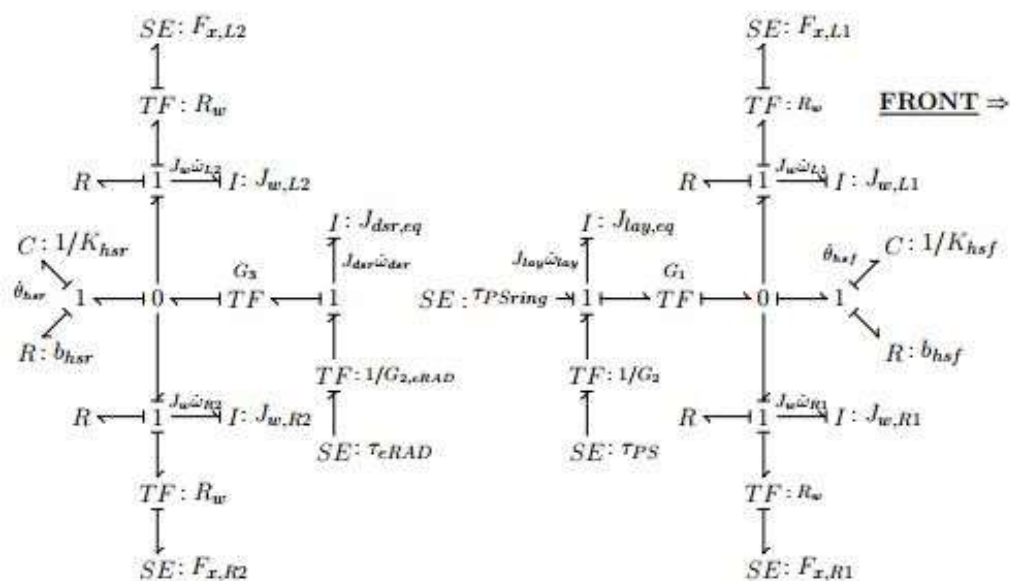
Slika 4.31. Poveznice dijelova nogu robota i njihovi bond grafovi: (a) i (b) element sa dvije veze, (c) i (d) element sa tri veze[121]

industrijsku plinsku turbinu sa dva vratila pri velikim opterećenjima. Kako bi procijenili rješenja koja su dobili bond grafovima, izradili su dodatni simulacijski model u komercijalnom programu za simulaciju plinskih turbina. Zaključili su da se neslaganje vrijednosti rezultata koje su dobili iz ove dvije simulacije nalazi u prihvatljivim granicama. Tan i dr. [123] su razvili vibracijski model polovine električnog vozila koje je pogonjeno sa električnim motorima koji se nalaze u kotačima. Za stvaranje modela koristili su bond graf teoriju i metodu modularnog modeliranja. Na temelju bond graf modela, napravili su modalnu analizu kako bi proučavali vibracijske karakteristike električnog vozila. Kako bi verificirali efikasnost predstavljenog bond graf modela, rezultate su usporedili sa onima koje su dobili metodom modularnog modeliranja i analitički preko Newtonovih jednačini. Usporedba je primarno pokazala da vibracijski bond graf model bolje računa vlastite frekvencije sustava.

paralelnog HEV. Simulacijski model pogonskog sustava napravili su pomoću metode bond grafova, a model cijelog vozila u CarSim programu. Predstavili su posebni kontrolni sustav za optimizaciju ponašanja kotača u raznim situacijama kočenja vozila. Shematski prikaz pogonskog sustava HEV i bond graf model istog, dati su na slikama 4.34. i 4.35.



Slika 4.34. Shematski prikaz pogonskog sustava HEV[126]



Slika 4.35. Bond graf model pogonskog sustava HEV[126]

Hu i dr. [127] su razvili kompleksan i nelinearan bond graf model sustava hidrauličnih upravljačkih ventila. Pri stvaranju modela uzeli su u obzir dinamičko ponašanje pojedinih ventila u sustavu. Proveli su više eksperimenata kako bi kvalitetno valorizirali predstavljeni model. Otkrili su da curenje fluida unutar pumpe ima glavni utjecaj na dinamičke karakteristike ovog hidrauličnog sustava i to primarno na koeficijent prigušenja. Rezultati

analize modela potvrdili su pretpostavku da opis dinamike hidraulične pumpe diferencijalnom jednačkom četvrtog reda daje dovoljno dobre vrijednosti pri simuliranju ovakvih sustava. Cheng i dr. [128] su predstavili novi pristup modeliranju industrijske robotske ruke. Njihov cilj bio je napraviti kompromis garancije ljudske sigurnosti u pogonu uz održavanje brzine rada robotskih ruku kako bi se postigla zadovoljavajuća razina učinkovitosti proizvodnje. Razvili su takve kontrolne modele koji mogu omogućiti izbjegavanje ljudskih ozljeda čak i kada dođe do kontakta između ljudi i robotske ruke u pogonu. Model upravljanja robotskom rukom razvili su pomoću bond grafova. Zhang i dr. [129] su predstavili univerzalni bond graf model paralelnog manipulatora. Paralelni manipulator je mehanički sustav koji koristi nekoliko kompjuterski kontroliranih pokretača za upravljanje jednom platformom. Najpoznatiji paralelni manipulator sastoji se od šest linearnih pokretača koji služe za pomicanje pokretne baze (takav uređaj često se naziva Stewartova platforma). Ovaj uređaj se najčešće koristi prilikom simulacija letova zrakoplova. Autori rada napravili su zasebne bond graf modele vijčanih spojeva i električno-hidrauličnih elemenata paralelnog manipulatora koje su kasnije povezali u jedan cjeloviti model. Napravili su simulacijsku i eksperimentalnu analizu pokretačkih sila, tlakova i volumenskih protoka. Analiza je pokazala vrlo dobra slaganja između empirijskih i numeričkih rezultata. Prikaz prototipa paralelnog manipulatora kojeg su modelirali bond grafovima dat je na slici 4.36.

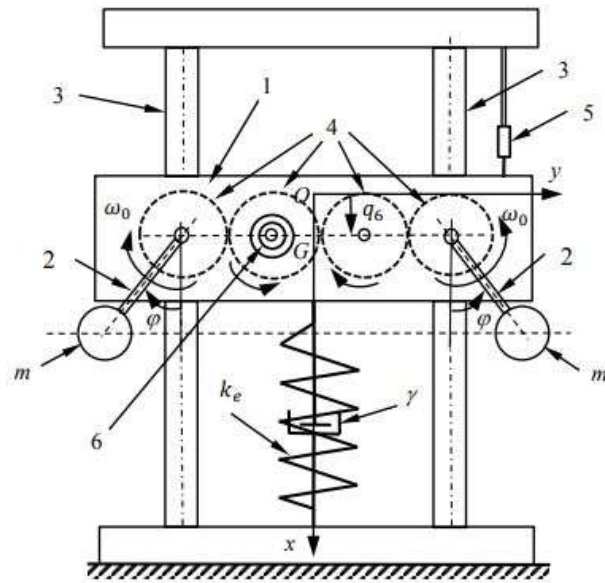


Slika 4.36. Prototip paralelnog manipulatora[129]

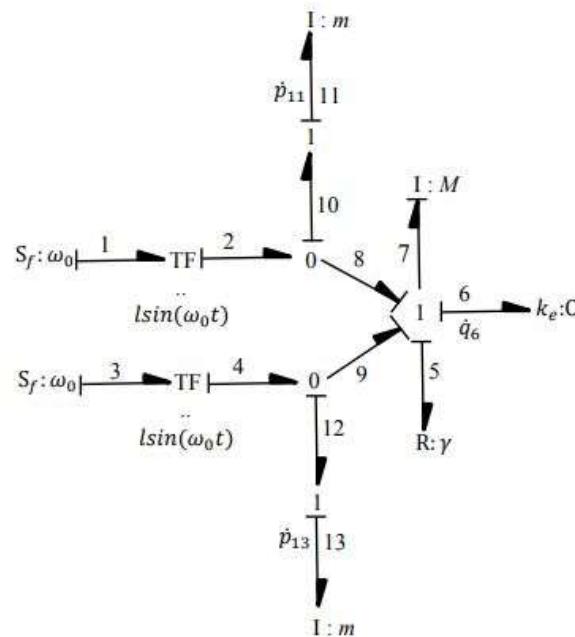
Song i dr. [130] su istražili dobavu i performanse Truningerove zupčaste pumpe za različite geometrijske parametre. Obzirom na nelinearnu matematičku vezu, teško je riješiti jednačbu za volumensku dobavu i zarobljeni fluid unutar pumpe ovakvog tipa pa su problem riješili numeričkim putem pomoću bond grafova. Analizom modela zupčaste pumpe, otkrili su da je za kvalitetnu dobavu pumpe poželjno odabrati manju debljinu zuba zupčanika, veći broj zubi

manjeg zupčanika i veći kut profila. Wang i dr. [131] su konstruirali električni elevatorski mehanizam koji je baziran na radnom principu popularnih viljuškara. Napravili su bond graf modele toka snage električnog i hidrauličnog elevatorskog sustava. Na bazi tih modela, proveli su simulacije i analizu za procese startanja, podizanja i kočenja elevatorskog mehanizma. Iz rezultata simulacije, izveli su odgovarajuće matematičke modele i dobili krivulju brzine gibanja mehanizma za električni i hidraulični elevatorski sustav. Lin i dr. [132] su napravili bond graf model mikro-hvataljke. Karakteristične jednačbe i jednačbe stanja mikro-hvataljke izveli su pomoću bond graf teorije. Stvarni prototip mikro-hvataljke izradili su korištenjem 3D printera i to laserskom tehnologijom brze izrade prototipova. Napravili su još dvije dodatne simulacijske analize modela, analizu u MATLAB-u i analizu metodom konačnih elemenata. Napravili su usporedbu između eksperimentalnih vrijednosti, i vrijednosti koje su dobili simulacijom na numeričkim modelima. Kao rezultat, uspjeli su verificirati bond graf model hvataljke kao dovoljno točan, uz uočenu mogućnost korištenja teorije bond grafova za fleksibilnu analizu mehanizama. Bai i dr. [133] su predstavili bond graf model brizgalica sa zajedničkom sabirnicom. Prilikom modeliranja uzeli su u obzir različita fizička svojstva goriva i različite karakteristike brizgalica. Izveli su jednačbe stanja na bazi bond graf modela, koje su numerički riješili u MATLAB-u. Usporedba između simulacijski rezultata i eksperimentalnih podataka pokazala je da numerički bond graf model može učinkovito predvidjeti količinu ubrizganog goriva u sustava. Pedchenko i dr. [134] su predstavili linearnu metodologiju koja opisuje kako izbor električnog opterećenja utječe na stabilnost i prosječnu razinu generirane energije u elektromagnetskom vibracijskom iskorištavaču energije. Korištenjem bond graf tehnike modelirali su ovaj elektromehanički uređaj kao ekvivalentni dinamički strujni krug. Predstavljeni pristup modeliranju omogućio im je razvoj analitičke metode za određivanje omjera iskorištene (generirane) snage u regenerativnom sustavu. Poznavanjem omjera generirane snage uspjeli su kvantificirati generiranu snagu u uređaju za signal pobude sa različitim frekvencijama. Konstruirali su poseban uređaj za eksperimentalno dobivanje omjera generirane snage varijacijom električnog opterećenja i varijacijom frekvencije vibracijske pobude. Samarakoon i dr. [135] su predstavili novi pristup konstruiranju inženjerskih sustava iz različitih energetske domena. Opisani pristup integrira modeliranje bond grafovima i optimizaciju genetskim programiranjem. Njihovo istraživanje pokazalo je primjenjivost predloženog pristupa na već postojeće inženjerske sustave zbog mogućnosti testiranja inicijalnog modela na stvarnim fizičkim sustavima. Guan i dr. [136] su napravili nelinearni bond graf model aktivnog hidropneumatskog ovjesa. Prilikom modeliranja ovog sustava, uzeli su u obzir nelinearne

karakteristike trenja i krutosti opruge hidro-pneumatskog pokretača, kao i mogućnost kompresije ulja u ovjesu. Predstavili su novu kliznu kontrolnu metodu sa dvije zatvorene upravljačke petlje radi postizanja željene sile u pokretaču i udobnosti vožnje. Sahoo i Chiddarwar [137] su predstavili bond graf model pokretnog robotskog sustava sa četiri kotača. Predloženu metodu u ovome radu koristili su za opisivanje dinamike sustava u različitim fizičkim domenama. Dinamički model su simulirali u alatu BGV_20 koji je dio MATLAB/Simulink-a. Kako bi potvrdili učinkovitost i točnost bond graf modela, simulacijske rezultate su provjerili sa klasičnom Newton-Euler metodom. Zanj i dr. [138] su napravili novi energetska neovisni nelinearni termo-elastični model koji je prikladan za aero-termo-elastična istraživanja. Kontinuiranu transformaciju snage između elastične i termalne domene modelirali su pomoću bond grafova. Model koji su generirali neovisan je o vrsti energetske domene i može se koristiti za razvoj prikladnih kontrolnih shema za vibracije sustava pri aero-termalnim opterećenjima. Chu i dr [139] su modelirali termodinamičke procese akumulatorskog sustava za uređaj koji kompenzira relativne vertikalne pomake plovila na moru. Akumulatorski sustav je osnovni dio pogonskog sustava, koji obično može biti hidraulični sustav (za hidraulične cilindre dizalica) ili motor brodskog vitla. Autori su opisali konstitucijsku formulu dinamike akumulatora, dok su model prezentirali pomoću bond graf metode u programu 20-sim. Razmotrili su varijaciju temperature i tlaka akumulatora prilikom procesa kompenzacije. Usporedba eksperimentalnih podataka i simulacijskih rezultata pokazala je da predstavljeni bond graf model može realistično opisati procese koji se odvijaju u ovakvim uređajima. Ibanescu, R. i Ibanescu, M. [140] su prezentirali mehanički uređaj za određivanje osnovnih parametara ovjesa kao što su krutost opruge i viskozni koeficijent trenja. Prednost koju su istaknuli je ta da se ispitivanje parametara na ovakvom uređaju može napraviti bez da se ispitivani ovjes mora rastaviti. Predstavljeni mehanički uređaj može proizvesti oscilacijska gibanja ovjesa i mjeriti njegove amplitude i kutne brzine. Dinamički model sustava koji se sastoji od mehaničkog uređaja i ovjesa, modelirali su uz korištenje bond graf metode. Na temelju bond graf modela dobili su jednadžbe gibanja sustava, a njihovom integracijom uspjeli su zapisati zakonitost ovakvog gibanja. Pomoću izvedenih zakona gibanja i prikupljenih mjernih podataka za amplitude i kutne brzine ovjesa, uspjeli su odrediti krutost i viskozni koeficijent trenja ispitivanog ovjesa. Shematski prikaz mehaničkog uređaja za ispitivanje parametara ovjesa dat je na slici 4.37., a bond graf model istog dat je na slici 4.38. Liu i dr. [141] su napravili teoretsku analizu hibridnog prijenosnika snage na temelju bond graf metode. Predstavili su bond graf model kontrolne strategije za upravljanje hibridnim prijenosnikom i model vozila koje je pogonjeno takvim hibridnim su-



Slika 4.37. Shematski prikaz mehaničkog uređaja i ovjesa: 1. Kutija mase M , 2. Štapovi mase m , 3.Paralelne vodilice, 4. Četiri identična zupčana kola, 5. Senzor pomaka[140]

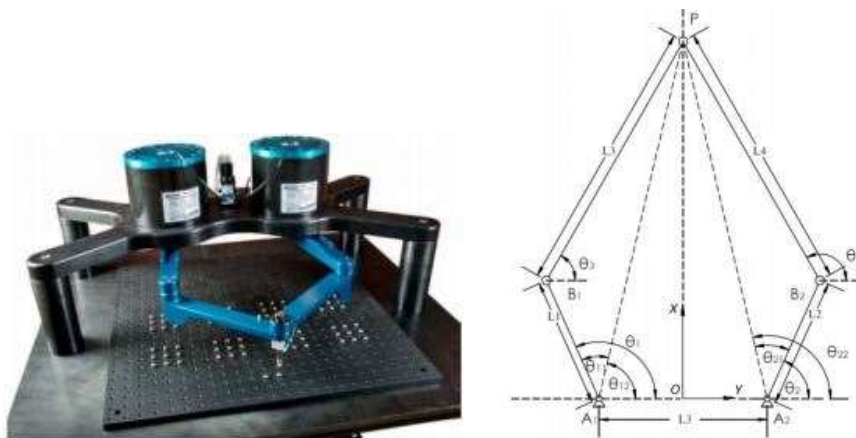


Slika 4.38. Bond graf model mehaničkog uređaja i ovjesa [140]

stavom. Analizom rezultata simulacije, zaključili su da predstavljena kontrolna strategija daje dobre rezultate u vidu optimalne potrošnje goriva i raspodjele snage u sustavu. Modeli koje su postavili mogu poslužiti drugim istraživačima kao teoretska osnova za analizu i konstrukciju hibridnih prijenosnika snage u budućnosti. Doan i dr. [142] su razvili i predstavili autonomno vibracijsko nano-vozilo (letjelicu) sa rasponom krila od približno 3cm. Model cijelog sustava zajedno sa kontrolnim strategijama zatvorene petlje napravili su pomoću bond grafova.

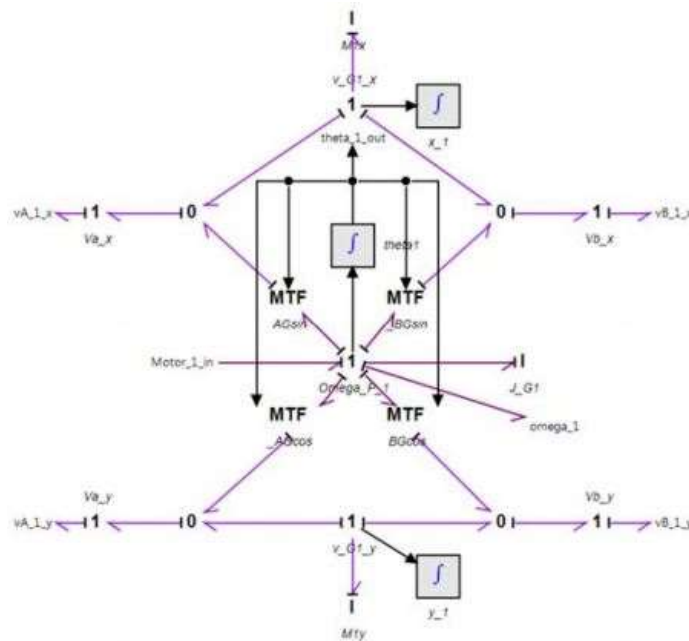
Koristeći predloženu kontrolnu strategiju uspjeli su zadržati letjelicu u željenom položaju. Pomoću bond graf modela zračnog vozila, uspjeli su objasniti prijenos energije od izvora energije do krila (ponor energije) letjelice. Drewniak i dr. [143] su usporedili tri različite graf metode (metodu mješovitih grafova, metodu rubnih grafova i bond graf metodu) modeliranja koje su primijenili na modeliranje zupčanika u planetarnom prijenosniku. Najrealnije rezultate i vrijednosti efikasnosti planetarnog prijenosnika dobili su modeliranjem bond grafovima. Gupta i Rastogi [144] su analizirali dinamičko ponašanje vibracija kamiona za različita stanja na cesti. Integrirani proračunski model teškog vozila napravili su pomoću bond graf tehnike. Saad i dr. [145] su istražili kako krutost gume i ovješena masa vozila utječu na udobnost i kvalitetu vožnje. Idealiziranu četvrtinu vozila modelirali su bond grafovima kako bi proveli numeričke simulacije za različite parametre. Analizom rezultata zaključili su da smanjenje parametra krutosti gume snižava vrijednost frekvencije odziva sustava koji se javlja zbog vanjskog djelovanja sile. U ovome slučaju vlastita frekvencija sustava ostaje nepromijenjena. Autori su primijetili da povećanje vrijednosti ovješene mase snižava vrijednost vlastite frekvencije sustava. Zaključili su da promjena parametra ovješene mase ne utječe na promjenu frekvencije odziva sustava zbog vanjskog djelovanja sile. Hussain i dr. [146] su razvili simulacijski bond graf model koji se može koristiti za predviđanje karakteristike protoka hidraulične pumpe. Model su razvili i napravili u AMESim i MATLAB programima. Analizirali su utjecaj konstrukcijskih i geometrijskih parametara pumpe na njezinu karakteristiku. Izradili su prototip pumpe na kojem su proveli testiranja kako bi dobili karakteristiku protoka. Usporedbom rezultata testiranja na prototipu sa rezultatima simulacije modela, uočili su dobra slaganja između podataka. Predstavljeni model može biti koristan za konstrukciju i analizu pumpe za podmazivanje u motoru sa plinskom turbinom. Vaz i dr. [147] su razvili bio-mehanički bond graf model mehanizma prsta ljudske šake. Prilikom modeliranja uzeli su u obzir gubitke zbog trenja kao i efekt rastezanja mišića u dlanu. Pomoću bond graf modela uspjeli su napraviti studiju gibanja prsta i dobiti vrijednost vlačnog naprezanja u mišićima. Chu i Aesoy [148] su predstavili bond graf model sustava brodske dizalice. Model se sastojao od dizalice sa tri stupnja slobode gibanja (tri zglobova oslonca), vitla, žičanog segmenta i opterećenja. Pomoću Lagrangeove metode izveli su dinamičke jednadžbe gibanja dizalice. Bond graf model cijelog sustava sadržavao je i dodatne modele iz drugih energetske domena kao što su primjerice modeli ulaznih uređaja, kontrolnih sustava, hidrauličnih pokretača i senzora. Analizom simulacije bond graf modela, zaključili su da je moguće povećati učinkovitost dizalice, a predložili su i smjernice za konstrukciju ovakvog sustava. Jian i dr. [149] su predstavili bond graf model robota koji se sastoji od četiri ruke,

dva zglobna pokretača i pet zglobnih veza. Problem su modelirali u Kartezijevom koordinatnom sustavu, a robot je trebao biti namijenjen za uzimanje i premještanje nekog tereta. Prikaz prototipa robota sa pet štapova i shematski prikaz pokretnih dijelova dat je na slici 4.39.



Slika 4.39 Prototip robota (lijevo) i shematski prikaz pokretnih dijelova (desno)[149]

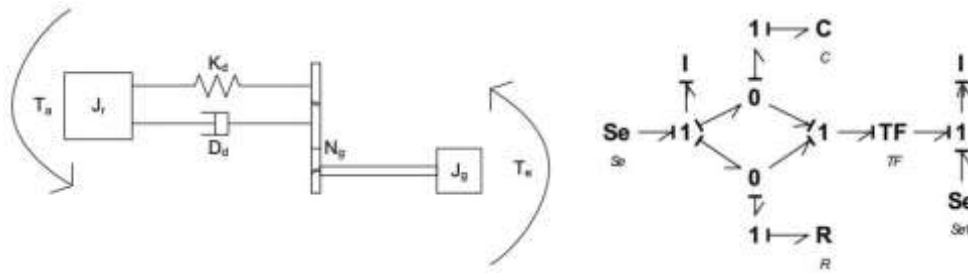
Bond graf model jedne ruke robota (štap A_1B_1 sa slike 4.39. - desno) prikazan je na slici 4.40.



Slika 4.40. Bond graf model ruke A_1B_1 sa slike 4.39. (desno)[149]

Matematičke odnose između dva promjenljiva kuta i željene pozicije štapova izveli su pomoću inverzne kinematike. Inverzna kinematika predstavlja matematički proces dobivanja zakonitosti gibanja nekog objekta u stvarnome svijetu iz nekih drugih podataka o tom gibanju kao što je to npr. filmski snimak gibanja. Autori su bond grafove koristili za opisivanje

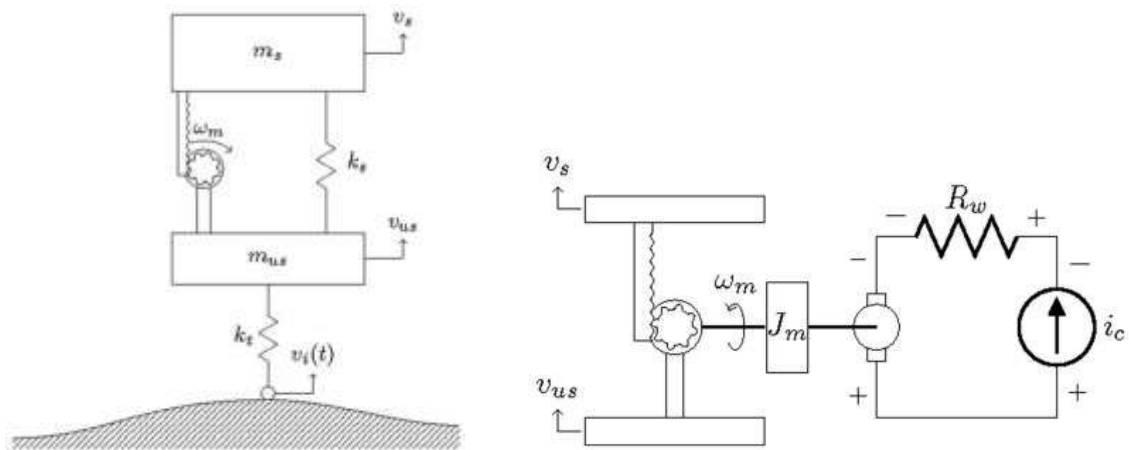
među njima kako bi se učinkovitije mogla provesti simulacija bond graf modela. Definicije koje su postavili omogućavaju lakše korištenje bond graf modela u inženjerskoj praksi. Narwal i Vaz [154] su napravili dinamički bond graf model kontakta između krutog tijela i mekanog materijala po kojem se to tijelo kotrlja. Dinamiku kontakta modelirali su korištenjem bond graf pristupa koji su integrirali zajedno sa metodom konačnih elemenata. Prezentirali su i objasnili primjer dinamičkog kontakta cilindričnog diska koji se kotrlja po mekanom materijalu. Iz bond graf modela izveli su simulacijski kod u MATLAB-u koji može biti koristan za buduća istraživanja u ovom području mehanike. Polic i dr. [155] su napravili bond graf model propulzijskog broskog sustava koji su iskoristili za analizu svih elemenata propulzijskog mehaničkog sustava od propelera do dizelskog motora. Preko simulacija na bond graf modelu, dobili su dinamički odziv propulzijskog sustava. Predloženim pristupom uspjeli su odrediti opterećenja na broskom propeleru. Schaep i dr. [156] su napravili bond graf model teškog vozila koji služi za prenošenje velikih metalnih kontejnera (primjerice na odlagalištima ili u brodogradilištu). Cilj ovog istraživanja bio je procijeniti potrošnju energije u pogonskom sustavu i pokretačkom sistemu ovakvog tipa vozila. Simulacijske rezultate usporedili su sa izmjerenim podacima na stvarnom teškom vozilu. Analizom i usporedbom navedenih tipova rezultata, uspjeli su identificirati određene parametre kao što su primjerice koeficijenti trenja, učinkovitost pojedinih elemenata vozila i glavne ponore energetske gubitaka. Ramakrishnan i dr. [157] su iskoristili bond graf pristup kako bi modelirali dinamiku serijskog hidrauličnog hibridnog sustava. Pomoću predstavljenog modela, uspjeli su prikazati dinamički odziv hidro-pneumatskog akumulatora i izlazne brzine vozila. Napravili su konstrukcijsku optimizaciju sustava kako bi ostvarili optimalne parametre fizičkih procesa radi dobivanja maksimalne energije na izlazu što u konačnici vodi ka većoj energetskoj učinkovitosti i ekološki prihvatljivom sustavu. Bakka i Karimi [158] su primijenili bond graf metodologiju kao grafički pristup pri modeliranju vjetrenjače za generiranje energije. Predstavili su nelinearni model vjetrenjače koji se sastoji od modela lopatice, pogonskog sustava, gibanja tornja i generatora. Posebno su analizirali pogonski sustav kako bi pokazali razliku između modeliranja klasičnim mehaničkim metodama i bond graf metodom. Simulacije su proveli u bond graf simulacijskom programu 20-sim. Shematski prikaz pogonskog sustava vjetrenjače i njegov bond graf model dati su na slici 4.42. Li i dr. [159] su predstavili bond graf model piezoelektričnog vibracijskog iskorištavača energije. Analizirali su utjecaje različitih parametara ovog uređaja na performanse generiranja, konverzije i spremanja energije. Piezoelektrični iskorištavač energije modelirali su kao dva odvojena mehanička i električna sustava koje su kasnije integrirali u jedinstveni bond graf model. Pro-



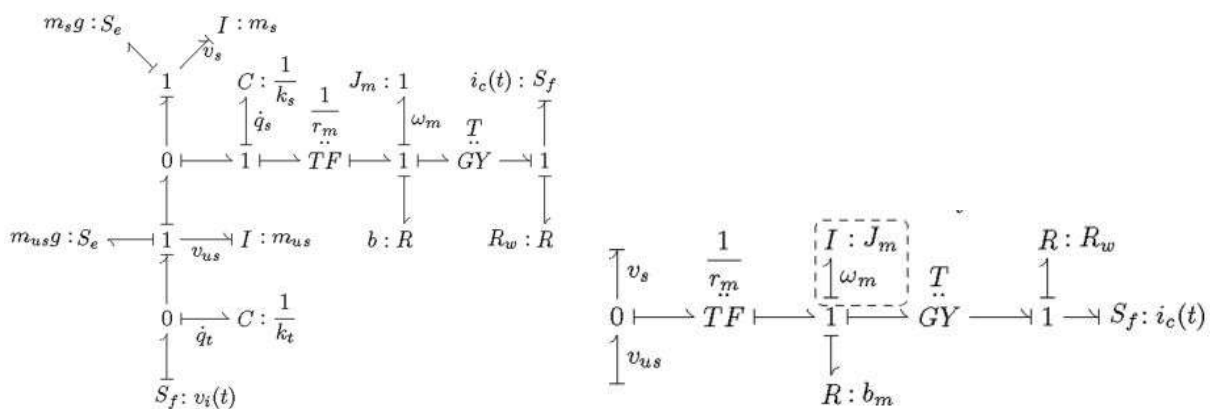
Slika 4.42. Pogonski sustav vjetrenjače: shematski prikaz (lijevo) i bond graf model (desno)
[158]

totip uređaja testirali su na eksperimentalnoj platformi. Analizom rezultata, pokazalo se da predstavljena metoda u ovome radu može olakšati optimizaciju konstrukcije piezoelektričnog vibracijskog iskorištavača energije. Movaghar i Novinzadeh [160] su modelirali turbopunjač radi simulacije njegovih performansi. Pronašli su i izveli diferencijalne jednadžbe stanja prostora sustava koji sadrži različite elemente kao što su kompresor, motor sa unutrašnjim izgaranjem, turbina, elemente ubrizgavanja goriva i sustav dinamike vratila. Za valorizaciju i procjenu svojih rezultata koristili su rezultate iz drugih znanstvenih radova. Bryant i Choi [161] su predstavili dijagnostički bond graf model za detekciju i analizu pogrešaka u reduktorima. Podatke koje su izmjerili u stvarnom reduktoru usporedili su sa podacima koje su dobili simulacijom. Simulacijski bond graf model reduktora uključivao je dinamiku ulaznog, prijenosnog i izlaznog vratila, tijela zupčanika, ležajeva i kinematiku i tribologiju kontakta u zupčanom prijenosniku. Nakon provedene analize rezultata, iz podataka koje su dobili mjerenjem napravili su ugađanje bond graf modela kako bi dobili zadovoljavajuća slaganja. Zhao i Gao [162] su predstavili Stewartov simulator gibanja sa šest stupnjeva slobode gibanja. Simulator su modelirali pomoću bond graf pristupa i to zasebnim modeliranjem mehaničkih, hidrauličnih i električnih komponenti. Simulacije su proveli u programu 20-Sim. Izveli su dinamičke jednadžbe platforme simulatora preko Newton-Eulerove metode. Posebno su istražili inercijske efekte koji se mogu pojaviti u svakom od hidrauličnih cilindara Stewartove platforme. Zhao i dr. [163] su predstavili modalnu analizu ekscentričnog rotora visokobrzinskog stroja za obradu odvajanjem čestica. Analizu su proveli na temelju bond grafova kako bi dobili cjelovite modalne parametre. Pomoću bond graf teorije izveli su vibracijski matematički model ekscentričnog rotora. Rezultati provedenih simulacija pokazali su da bond graf model rješava ovaj problem lakše i brže nego Newtonova teorija. Uspjeli su dobiti dva tipa formi vibriranja ekscentričnog rotora uz relativnu pogrešku koja je bila manja od 0,4%. Cervantes-Sanchez i dr. [164] su predstavili novi bond graf model planetarnog prijenosnika snage. Cijeli prijenosnik su modelirali modularno od tri zasebna

modela: model jednog tijela u gibanju, model koji opisuje zglobnu ili ležajnu vezu i model koji opisuje zupčani par. Napravili su analizu toka snage iz izvedenih kinematskih i kinetičkih jednadžbi. Predstavljeni pristup omogućava proračun dinamičkih opterećenja ležajeva i zubi zupčanika. Nove modele su numerički valorizirali usporedbom simulacijskih rezultata sa onima koje su dobili Lagrangeovim jednadžbama i Eulerovim zakonima gibanja. Clemen i dr. [165] su napravili bond graf model elektrodinamičkog ovjesa koji bi se mogao koristiti u regenerativne svrhe. Shematski prikaz četvrtine automobila i elektrodinamičkog pokretača dati su na slici 4.43., a njihovi bond graf modeli dati su na slici 4.44.



Slika 4.43. Shematski prikaz: četvrtine automobila (lijevo) i elektrodinamičkog pokretača (desno)[165]



Slika 4.44. Bond graf model: cijeli sustav (lijevo) i elektrodinamički pokretač (desno)[165]

Napravili su dva predviđajuća upravljačka sustava: standardni upravljački sustav i frekvencijski upravljački sustav. Upravljačke sheme testirali su za poznate cestovne profile A – D koje propisuje ISO standard. Ovjes koji su predstavili uspio je regenerirati više energije nego što se iste potroši na aktivno upravljanje ovjesom. Analiza i usporedba rezultata

pokazala je da frekvencijski upravljački sustav može regenerirati 3-12% više energije u odnosu na standardni upravljački sustav.

5. ZAKLJUČAK

HHV predstavljaju potencijalno dobro rješenje u transportnom sektoru (u kategoriji teških vozila) kao zamjenu za konvencionalna vozila sa relativno neučinkovitim dizelskim i benzinskim motorima. Osnovne konfiguracije HHV koje su predmet istraživanja znanstvenika su PHHV, SHHV i HHVPS. Najvažnije prednosti HHV u odnosu na HEV su: vrlo visoka gustoća snage, visoka efikasnost regenerativnog kočenja, velika brzina regenerativnog punjenja, razmjerno velik omjer snage hidrauličnih komponenti u odnosu na masu istih, relativno niža početna ulaganja i manji troškovi održavanja komponenti HHV u odnosu na troškove održavanja električnih komponenti kod HEV. Znanstvenici u ovom području istraživanja uglavnom predlažu nove strategije upravljanja energijom i nove složene konfiguracije HHV s konačnim ciljem povećanja globalne energetske učinkovitosti kod ovakvog tipa vozila. Pregledom i analizom znanstveno istraživačkih radova iz navedenog područja, uočen je problem postavljanja optimalne strategije upravljanja energijom kod HHV (kao što su primjerice algoritmi DP, fuzzy logički sustavi, MPC strategije i druge upravljačke metode). Manji broj radova koji su vezani uz tematiku HHV objašnjava i analizira utjecaj regenerativnog kočenja na efikasnost čitavog sustava ovakve vrste HV. Također, ovim istraživanjem uočena je potencijalna mogućnost povećanja učinkovitosti HHV, kada bi se u takvim hibridnim sustavima koristio regenerativni hidraulični ovjes koji se planira osmisлити, konstruirati i modelirati u okviru doktorske disertacije.

U posljednje vrijeme sve veći broj znanstvenika istražuje područje regenerativnih ovjesa koji imaju određeni potencijal za buduću primjenu u svim vrstama HV. Regenerativni ovjes je takav uređaj odnosno vrsta ovjesa koja može pretvoriti energiju linearnog vibracijskog gibanja u korisnu energiju. Najčešće se takva energija sprema u obliku električne energije unutar različitih uređaja kao što su to primjerice električne baterije ili superkondenzatori (električne komponente vrlo velikog kapaciteta koje služe za pohranu električne energije). Dosada su razvijeni različiti tipovi ovakvih regenerativnih uređaja od kojih su najpoznatiji i najčešće istraživani: električni, elektromehanički, elektromagnetski, elektro-hidraulični, magnetoreološki i elektrotreološki regenerativni ovjesi. Pregledom znanstveno istraživačkih radova iz ovog područja, uočeno je da većina analiziranih radova obuhvaća problematiku razvoja, konstruiranja i modeliranja električnih i elektromagnetskih regenerativnih ovjesa. Kod ovakve vrste regenerativnih ovjesa najčešće se za generiranje električne struje koristi linearni elektromagnetski generator koji magnetski tok (koji se javlja zbog relativnog gibanja magneteta unutar elektromagnetskog namotaja) pretvara u električnu struju. Prema provedenim

statističkim analizama, hidraulični regenerativni ovjesi su rjeđi predmet istraživanja znanstvenika zbog toga što se manji broj suvremenih istraživača bavi specijalizacijom u hidrauličnoj energetskej domeni, a i sama HHV su trenutno manje zastupljena u znanstvenim i industrijskim krugovima u odnosu na HEV. Pregledom radova iz ovog područja istraživanja uočen je prostor za mogući znanstveni doprinos u vidu osmišljavanja i numeričko matematičke analize novog prototipa regenerativnog hidrauličnog ovjesa.

Za modeliranje i analizu procesa u hidrauličnom regenerativnom ovjesu potreban je prikladan numerički alat. Kao takav alat odabrana je teorija bond grafova koja omogućava stvaranje složenih matematičkih modela u više različitih hijerarhijskih razina. Napravljen je pregled znanstvenih istraživanja u kojima se navedena metoda koristila za modeliranje različitih složenih fizičkih sustava, kao što su to primjerice bond graf modeli: suhe tarne spojke, hidrauličnih pogonskih jedinica, zupčanog prijenosnika s vratilima čije se osi sijeku, planetarnog vijčanog mehanizma, elektromehaničkog pretvarača i drugih različitih modela. Istraživanjem bond graf metode, uočena je njezina najveća prednost, a to je poopćenost energetskih domena. Pod pojmom poopćenosti podrazumijeva se kompatibilnost i mogućnost modeliranja stvarnih fizičkih problema istovremeno u više različitih energetskih domena kao što su to primjerice linearna i rotacijska mehanika, elektromagnetizam i mehanika fluida. Navedeno svojstvo bond graf metodu čini primjenljivom na rješavanje problema modeliranja i korisnom za numeričko matematičku analizu novog regenerativnog hidrauličnog ovjesa, obzirom da se u takvoj vrsti regenerativnog uređaja javlja višestruka promjena tipa energije. Iz pregleda dosadašnjih znanstvenih istraživanja uočila se i mogućnost stvaranja univerzalnog bond graf modela regenerativnog hidrauličnog ovjesa u okviru budućeg znanstvenog djelovanja na doktorskom studiju, obzirom da znanstveni rad s tako postavljenom numeričkom analizom nije pronađen u važnijim znanstveno istraživačkim bazama podataka.

Iz svega navedenog mogu se postaviti slijedeći koraci budućeg istraživanja: osmišljavanje i razrada prethodnog (prvobitnog) konstrukcijskog rješenja novog regenerativnog hidrauličnog ovjesa, proračun dinamičke čvrstoće komponenti istog i stvaranje bond graf modela prethodnog konstrukcijskog rješenja na temelju kojeg će se izraditi stvarno konstrukcijsko rješenje za eksperimentalnu analizu regenerativnog hidrauličnog ovjesa. Empirijskom analizom planira se napraviti ugađanje matematičkog bond graf modela s konačnim ciljem istraživanja utjecaja različitih konstrukcijskih parametara uređaja na regenerativno-energetski potencijal istog.

LITERATURA

- [1] Meyer, J.: “The development of a power management strategy for a hydraulic hybrid passenger vehicle“, dissertation for the degree of doctor of philosophy, 2014.
- [2] Karbaschian, M.: “Improving system design and power management for hybrid hydraulic vehicles minimizing fuel consumption“, dissertation for the degree of doctor of philosophy, 2014.
- [3] Mingwei, S.: „Modeling and control strategy for series hydraulic hybrid vehicles“, dissertation for the degree of doctor of philosophy, 2009.
- [4] Wu, B.; Lin, C; Filipi, Z; Peng, H.; Assanis, D.: “Optimization of Power Management Strategies for a Hydraulic Hybrid Medium Truck“, Proceedings of the 2002 Advanced Vehicle Control Conference, Hiroshima - Japan, 2002.
- [5] Stelson, K; Meyer, J; Alleyne, A; Hencsey, B: “Optimization of a passenger hydraulic hybrid vehicle to improve fuel economy”, Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, Toyama, 2008.
- [6] Sakota, Z.; Jovanovic, Z.; Diligenski, DJ.; Zivanovic, Z.; Nikolic, D.: “Improving the fuel economy by using hydraulic hybrid powertrain in passenger cars”, Machines, technologies, materials. ISSN 1313-0226. ISSUE 4/2013.
- [7] Liu, T.; Zheng, J.; Su, Y.; Zhao, J.: “A Study on Control Strategy of Regenerative Braking in the Hydraulic Hybrid Vehicle Based on ECE Regulations”, Mathematical Problems in Engineering Volume 2013, Article ID 208753, 9 pages
- [8] Hilman, N.; Saw, L.; Hamdi, M.; Norhirni, M.: “Performance Evaluation of Parallel Hydraulic Hybrid Vehicle using EPA US06 Aggressive Drive Cycle Simulation”, International Postgraduate Students Conference on Engineering Bandung, Indonesia, 1-2 November 2010.
- [9] Mrdja, P.; Miljic, N.; Popovic, S.: “Assessment of Fuel Economy Improvement Potential for a Hydraulic Hybrid Transit Bus”, GDC2012 Conference, 2012.
- [10] Deppen T.O.; Alleyne, A.; Stelson, K.; Meyer, J: “A Model Predictive Control Approach for a Parallel Hydraulic Hybrid Powertrain”, American Control Conference, 2011.

- [11] Wu, B.; Lin, C.; Filipi, Z.; Peng, H.; Assanis, D.: “Optimal power management for a hydraulic hybrid delivery truck“, *Vehicle System Dynamics*, Volume 42, Nos. 1-2, pp. 23-40, 2004.
- [12] Tao, L.; Jincheng, Z.; Shuwen, W.; Fangde, Gu.: “Logic threshold based energy control strategy for parallel hydraulic hybrid vehicles“, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Volume 6, 2339-2344, 2013.
- [13] Hatti, R.: “Hydraulic Hybrid Vehicle“, *International Journal of Engineering Research and General Science*, Volume 3, Issue 1, 85-90, 2015.
- [14] Vien Vu.; i dr.: “Different Rule-based Control Schemes for a Series Hydraulic Hybrid Vehicle“, *Studies in Engineering and Technology*, Volume 3, No. 1., 101-108, 2016.
- [15] Chen, C.; Vien Vu.; Hung, C.: “System Modeling and Control Strategy Development for a Series Hydraulic Hybrid Vehicle“, *Proceedings of the International MultiConference of engineers and Computer Scientists 2013*, Hong Kong, 2013.
- [16] Chen, Y.; Liu, S.; Jiang, J.; Shang, T.; Zhang, Y.; Sui, H.: “Pulsating characteristic of the hydraulic hybrid vehicle system with pipeline effect“, *Mechanical Engineering Science* 2015, Volume 229, 2015.
- [17] Baer, K.; Ericson, L.; Kraus, P.: “Component sizing study for a light-duty series hydraulic hybrid vehicle in urban drive cycles“, *ABCM Symposium Series in Mechatronics, Ribeirao Preto - Brazil*, 2014.
- [18] Feng, D.; Huang, D.: “Modeling and Control of a Series Hydraulic Hybrid Vehicle“, *Journal of Computational Information Systems*, Volume 5, 1805–1819, 2012.
- [19] Filipi, Z.; Kim, Y.: “Hydraulic Hybrid Propulsion for Heavy Vehicles: Combining the Simulation and Engine-In-the-Loop Techniques to Maximize the Fuel Economy and Emission Benefits“, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Volume 65, No. 1, 155-178, 2010.
- [20] Payeganeh, G.; Esfahanian, M.; Bonab, S.: “Modeling and Fuzzy Control Strategy Design for the Hydraulic Hybrid Refuse Truck“, *International Journal of Automotive Engineering*, Volume 4, Issue 2. 685-698, 2014.
- [21] Li, S.; Liu, D.; Xie, B.: “The Control System Design of Hydraulic Hybrid Vehicle Based on CAN Bus“, *The Open Mechanical Engineering Journal*, Volume 8, 739-743, 2014.

- [22] Hiremath, S.; Ramarkrishnan, R.; Singaperumal: "Optimization of process parameters in series hydraulic hybrid system through multi-objective function", The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power - SICFP2013, Linköping - Sweden, 2013.
- [23] Mahmoodi, S.; Guoqing, H.; Khajavi, M.: "Investigation of control model in a series hybrid hydraulic/electric system for heavy vehicles based on energy efficiency", Chinese Journal of Engineering, Volume 2016, Article ID 2417946, 9 pages, 2016.
- [24] Chen, C.; Vu, T.; Hung, C.: "Control strategy development and optimization for a series hydraulic hybrid vehicle", Engineering letters - Advance online publication, 2013.
- [25] Li, X.; Qu, J.; Wei, W.; Tian, X.: "Modeling and Simulation of Power Coupling System in Hydraulic Hybrid City Bus", Energy and Power Engineering, Volume 6, 119-132, 2014.
- [26] Cheong, K.; Li, P.; Chase, T.: "Optimal Design of Power-Split Transmissions for Hydraulic Hybrid Passenger Vehicles", Energy and Power Engineering, 2010.
- [27] Rydberg, K.: "Energy Efficient Hydraulic Hybrid Drives", The 11:th Scandinavian International Conference on Fluid Power - SICFP'09, Linköping - Sweden, 2009.
- [28] Chen, J.: "Energy Efficiency Comparison between Hydraulic Hybrid and Hybrid Electric Vehicles", Energies, Volume 8, 4697-4723, 2015.
- [29] Louvigny, Y.; Nzisabira, J.; Duysinx, P.: "Analysis of hydraulic hybrid vehicles and economical comparison with hybrid electric vehicles", EET-2007 European Ele-Drive Conference, Brussels - Belgium, 2007.
- [30] Louvigny, Y.; Nzisabira, J.; Duysinx, P.: "Analysis of hybrid hydraulic vehicles and comparison with hybrid electric vehicles using batteries or super capacitors", EET-2008 European Ele-Drive Conference International Advanced Mobility Forum, Geneva - Switzerland, 2008.
- [31] Li, P.; Zuo, L.: "Influences of the electromagnetic regenerative dampers on the vehicle suspension performance", Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part D-Journal Of Automobile Engineering, Volume 231, Issue 3, 383-394, London - England, 2017.
- [32] Mi, J.; Xu, L.; Guo, SJ.; Meng, LS.: "Energy harvesting potential comparison study of a novel railway vehicle bogie system with the hydraulic-electromagnetic energy-

- regenerative shock absorber“, ASME Joint Rail Conference (JRC 2017), Philadelphia, 2017.
- [33] Algethami, AA.; Kim, WJ.: “Energy harvesting and damping capability of quarter-car test bed“, 9th ASME Annual Dynamic Systems and Control Conference, Minneapolis, 2017.
- [34] Chen, CA.; Ngo, KDT.; Zuo, L.: “Energy-harvesting shock absorbers with ride comfort controller on vehicle“, 9th ASME Annual Dynamic Systems and Control Conference, Minneapolis, 2017.
- [35] Mucka, P.: “Energy-harvesting potential of automobile suspension“, Vehicle system dynamics, Volume 54, Issue 12, 1651-1670, Abingdon - England, 2016.
- [36] Guo, SJ. i dr.: “Modeling, experiments, and parameter sensitivity analysis of hydraulic electromagnetic shock absorber“, ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE), Charlotte, 2016.
- [37] Xu, L. i dr.: “Damping characteristics of a hydraulic electric rectifier shock absorber and its effect on vehicle dynamics“, ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Boston, 2016.
- [38] Guo, SJ. i dr.: “Performances of energy-harvesting shock absorbers on various types of vehicles“, 8th ASME Annual Dynamic Systems and Control Conference (DSCC 2015), Columbus, 2016.
- [39] Zhang, ZT.; i dr.: “A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle“, Applied Energy, Volume 178, 177-188, England, 2016.
- [40] Aksekili, AA.; Topaloglu, N.: “Design and Experimental Verification of Position-Dependent Passive Electromagnetic Damping“, Journal Of Dynamic Systems Measurement And Control-Transactions Of The ASME, Volume 138, Issue 6, New York – USA, 2016.
- [41] Wang, RC.; Gu, FS.; Cattley, R.; Ball, AD.: “Modelling, Testing and Analysis of a Regenerative Hydraulic Shock Absorber System“, Energies, Volume 9, Issue 5, Basel – Switzerland, 2016.

- [42] Wang, RC.; Gu, FS.; Cattley, R.; Ball, AD.: “Research On Effect Of Gas-Charged Accumulator Capacity On Hydraulic Regenerative Shock Absorber System“, International Conference on Energy and Mechanical Engineering (EME), Wuhan – China, 2016.
- [43] Huang, B.; Hsieh, CY.; Golnaraghi, F.; Moallem, M.: “ Regenerative Shock Absorber Using a Two-Leg Motion Conversion Mechanism“, Journal Of Sound And Vibration, Volume 357, 16-34, London - England, 2015.
- [44] Maravandi, A.; Moallem, M.: “Development and optimization of an energy-regenerative suspension system under stochastic road excitation“, IEEE-ASME Transactions on mechatronics, Volume 20, Issue 6, 2853-2861, USA, 2015.
- [45] Khoshnoud, F. i dr.: “ Energy Regeneration From Suspension Dynamic Modes and Self-Powered Actuation“, IEEE-ASME Transactions on mechatronics, Volume 20, Issue 5, 2513-2524, USA, 2015.
- [46] Huang, B.; Hsieh, CY.; Golnaraghi, F.; Moallem, M.: “A Methodology for Optimal Design of a Vehicle Suspension System With Energy Regeneration Capability“, Journal Of Vibration And Acoustics-Transactions Of The ASME, Volume 137, Issue 5, USA, 2015.
- [47] Abdullah, MA.; Jamil, JF.; Muhammad, NS.: “Energy regenerative suspension test for EEV and hybrid vehicle“, 3rd International Conference of Mechanical Engineering Research (ICMER), Kuantan - Malaysia 2015.
- [48] Chen, C.; Zou, L.; Liao, WH.: “Regenerative Magnetorheological Dampers for Vehicle Suspensions“, Conference on Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, San Diego – USA, 2015.
- [49] Asadi, E.; Riberio, R.; Khamesee, MB.; Khajepour, A.: “A new adaptive hybrid electromagnetic damper modelling, optimization, and experiment“, Smart Materials and Structures, Volume 24, Issue 7, Bristol – England, 2015.
- [50] Zhang, YX.; i dr.: “Study on a novel hydraulic pumping regenerative suspension for vehicles“, Journal Of The Franklin Institute-Engineering And Applied Mathematics, Volume 352, Issue 2, 485-499, England, 2015.

- [51] Shi, DH.; i dr.: “Design and experiment study of a semi-active energy-regenerative suspension system“, *Smart Materials and Structures*, Volume 24, Issue 1, Bristol – England, 2015.
- [52] Catanescu, AL.; Ion, T.: “Analysis Of Electromagnetic Regenerative Shock Absorber“, *University Politehnica Of Bucharest Scientific Bulletin Series C-Electrical Engineering And Computer Science*, Volume 77, Issue 4, 297-304, Bucharest – Romania, 2015.
- [53] Sabzehgar, R.; Maravandi, A.; Moallem, M.: “Energy Regenerative Suspension Using an Algebraic Screw Linkage Mechanism“, *IEEE-ASME Transactions on mechatronics*, Volume 19, Issue 4, 1251-1259, USA, 2014.
- [54] Montazeri-Gh, M.; Kavianpiour, O.: “Investigation of the active electromagnetic suspension system considering hybrid control strategy“, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part C-Journal Of Mechanical Engineering Science*, Volume 228, Issue 10, 1658-1669, London-England, 2014.
- [55] Tang, XD.; Lin, T.; Zuo, L.: “Design and Optimization of a Tubular Linear Electromagnetic Vibration Energy Harvester“, *IEEE-ASME Transactions on mechatronics*, Volume 19, Issue 2, 615-622, USA, 2014.
- [56] Li, P.; Zou, L.: “Equivalent Circuit Modeling Of Vehicle Dynamics With Regenerative Shock Absorbers“, *ASME International Design Engineering Technical Conferences / Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)*, Portland – USA, 2014.
- [57] Guntur, HL.; Hendrowati, W.; Budiarto, T.: “Modeling and Analysis of Hybrid Shock Absorber for Military Vehicle Suspension“, *International Conference on Mechanical Engineering (ICOME 2013)*, Mataram – Indonesia, 2013.
- [58] Sultoni, AL.; Sutantra, IN.; Pramono, AS.: “Modeling, Prototyping and Testing of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber“, *International Conference on Mechanical Engineering (ICOME 2013)*, Mataram – Indonesia, 2013.
- [59] Zhang, H.; i dr.: “Parameters Analysis of Hydraulic-Electrical Energy Regenerative Absorber on Suspension Performance“, *Advances In Mechanical Engineering*, USA, 2014.

- [60] Casavola, A.; Di Iorio, F.; Tedesco, F.: “Gain-Scheduling Control of Electromagnetic Regenerative Shock Absorbers for Energy Harvesting by Road Unevenness“, American Control Conference, Portland – USA, 2014.
- [61] Wang, RC.; i dr.: “Modelling and Validation of a Regenerative Shock Absorber System“, 20th International Conference on Automation and Computing (ICAC), Cranfield – England, 2014.
- [62] Li, P.; i dr.: “Buck-boost Converter for Simultaneous Semi-active Vibration Control and Energy Harvesting for Electromagnetic Regenerative Shock Absorber“, Conference on Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, San Diego – USA, 2014.
- [63] Zhang, CX.; i dr.: “Integration of Regenerative Shock Absorber into Vehicle Electric System“, Conference on Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, San Diego – USA, 2014.
- [64] Sabzehgar, R.; Moallem, M.: “A Boost-Type Power Converter for Energy-Regenerative Damping“, IEEE-ASME Transactions on mechatronics, Volume 18, Issue 2, 725-732, USA, 2013.
- [65] Zuo, L.; Zhang, PS.: “Energy Harvesting, Ride Comfort, and Road Handling of Regenerative Vehicle Suspensions“, Journal Of Vibration And Acoustics-Transactions Of The ASME, Volume 135, Issue 1, USA, 2013.
- [66] Zhang, JQ.; i dr.: “A Review on Energy-Regenerative Suspension Systems for Vehicles“, World Congress on Engineering (WCE 2013), London – England, 2013.
- [67] Li, ZJ.; i dr.: “Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests“, IEEE Transactions On Vehicular Technology, Volume 62, Issue 3, 1065-1074, USA, 2013
- [68] Fang, ZG; Guo, XX.; Xu, L.; Zhang, H.: “ Experimental Study of Damping and Energy Regeneration Characteristics of a Hydraulic Electromagnetic Shock Absorber“, Advances In Mechanical Engineering, USA, 2013.
- [69] Yu, CM.; i dr.: “Analysis of an 'on-off' regenerative electromechanical damper“, Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part D-Journal Of Automobile Engineering, Volume 227, Issue 5, 704-722, London – England, 2013.

- [70] Li, ZJ.; Zuo, L.; Kuang, J.; Luhrs, G.: “Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier“, *Smart Materials and Structures*, Volume 22, Issue 2, England, 2013.
- [71] Zi, XL.; Guo, SJ.; Guo, XX.; Pan, J.: “A study on the theory and performance simulation of the hydraulic electromagnetic energy-regenerative shock absorber“, *International Forum on Materials Science and Industrial Technology (IFMSIT 2013)*, Qingdao – China, 2013.
- [72] Wai, CK.; Rong, YY.: “Electric Vehicle Energy Harvesting System Regenerative Shock Absorber For Electric Vehicle“, *IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (CSUDET)*, Cyberjaya – Malaysia, 2013.
- [73] Maravandi, A.; Moallem, M.: “Modeling and Design of a Motion Converter for Utilization as a Vibration Energy Harvester“, *39th Annual Conference of the IEEE Industrial-Electronics-Society (IECON)*, Vienna – Austria, 2013.
- [74] Zhang, CC.; Xiong, Z.; Fang, ZG.; Guo, XX.: “The operating principle and experimental verification of the hydraulic electromagnetic energy-regenerative shock absorber“, *3rd International Conference on Advances in Materials Manufacturing (ICAMMP 2012)*, Beihai – China, 2013.
- [75] Yu, CM.; i dr.: “Property Analysis of an Electro-Mechanical Regenerative Damper Concept“, *ASME International Design Engineering Technical Conferences / Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)*, Washington – USA, 2012.
- [76] Li, ZJ.; Brindak, Z.; Zuo, L.: “Modeling Of An Electromagnetic Vibration Energy Harvester With Motion Magnification“, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE)*, Denver – USA, 2012.
- [77] Li, ZJ.; Zuo, L.; Kuang, J.; Luhrs, G.: “Mechanical Motion Rectifier Based Energy-Harvesting Shock Absorber“, *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago – USA, 2012.
- [78] Cai, ZZ.; Li, HM.; An, G.: “Vibration Simulation of Tracked Vehicle Suspension and Damper Consumption Analysis“, *International Conference on Frontiers of Mechanical Engineering and Materials Engineering (MEME 2012)*, Hong Kong – China, 2012.

- [79] Crolla, DA.; Cao, DP.: “The impact of hybrid and electric powertrains on vehicle dynamics, control systems and energy regeneration“, *Vehicle System Dynamics*, Volume 50, 95-109, England, 2012.
- [80] Huang, K.; Yu, F.; Zhang, Y.: “Active controller design for an electromagnetic energy-regenerative suspension“, *International Journal Of Automotive Technology*, Volume 12, Issue 6, 877-885, South Korea, 2011.
- [81] Shen, JS.; Ye, XM.; Ning, XB.: “Dynamic Analysis of Self-energizing Shock Absorber of Suspension for Energy-regenerative“, *International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials (ICIMM 2011)*, Shanghai – China, 2011.
- [82] Fang, ZG.; Guo, XX.; Xu, L.; Zhang, J.: “Researching on Valve System of Hydraulic Electromagnetic Energy-regenerative Shock Absorber“, *International Conference on Mechatronics and Applied Mechanics (ICMAM 2011)*, Hong Kong – China, 2011.
- [83] Xu, L.; Guo, XX.; Yan, J.: “Feasibility Study on Active Control of Hydraulic Electromagnetic Energy-regenerative Absorber“, *International Conference on Manufacturing Engineering and Automation*, Guangzhou – China, 2011.
- [84] Tang, XD.; Zuo, L.; Lin, T.; Zhang, PS.: “Improved Design of Linear Electromagnetic Transducers for Large-Scale Vibration Energy Harvesting“, *Conference on Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*, San Diego – USA, 2011.
- [85] Ning, XB.; Zhao, CL.; Shen, JS.: “Simulation Research for Self-Energizing Leveling Systems“, *International Conference on Mechatronics and Intelligent Materials*, Lijiang – China, 2011.
- [86] Zuo, L.; i dr.: “Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions“, *Smart Materials & Structures*, Volume 19, Issue 4, Bristol – England, 2010.
- [87] Song, XB.; Cao, DP.: “Novel Transmissibility Shaping Control For Regenerative Vehicle Suspension Systems“, *ASME International Design Engineering Technical Conferences / Computers and Information in Engineering Conference*, Montreal – Canada, 2010.
- [88] Nagode, C.; Ahmadian, M.; Taher, S.: “Effective energy harvesting devices for railroad applications“, *Conference on Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*, San Diego – USA, 2010.

- [89] Choi, SB.; Seong, MS.; Kim, KS.: “Vibration control of an electrorheological fluid-based suspension system with an energy regenerative mechanism“, Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part D-Journal Of Automobile Engineering, Volume 223, Issue D4, 459-469, London – England, 2009.
- [90] Okada, Y.; Suzuki, KI; Kondo, R: “Energy regenerative and active control of automobile suspension“, ASME International Design Engineering Technical Conferences/Computers and Information in Engineering Conference, Las Vegas – SAD, 2008.
- [91] Ebrahimi, B.; Khamesee, MB.; Golnaraghi, MF.: “Design of an electromagnetic shock absorber“, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Seattle – USA, 2008.
- [92] Graves, KE.; Toncich, D.; Iovenitti, PG.: “Theoretical comparison of motional and transformer EMF device damping efficiency“, Journal Of Sound And Vibration, Volume 233, Issue 3, 441-453, England, 2000.
- [93] Graves, KE.; Iovenitti, PG.; Toncich, D.: “Electromagnetic regenerative damping in vehicle suspension systems“, International Journal Of Vehicle Design, Volume 24, Issue 2-3, 182-197, Geneva – Switzerland, 2000.
- [94] Suda, Y.; Nakadai, S.; Nakano, K: “Hybrid suspension system with skyhook control and energy regeneration (Development of self-powered active suspension)“, Vehicle System Dynamics, Volume 29, 619-634, Netherlands, 1998.
- [95] Jolly, MR.; Margolis, DL.: “Regenerative systems for vibration control“, Journal Of Vibration And Acoustics-Transactions Of The ASME, Volume 119, Issue 2, 208-215, New York – USA, 1997.
- [96] Fodor, MG.; Redfield, R.: “The Variable Linear Transmission For Regenerative Damping In Vehicle Suspension Control, Vehicle System Dynamics, Volume 22, Issue 1, 1-20, Netherlands, 1993.
- [97] Damić, V.; Montgomery, J.: „Mechatronics by Bond Graphs“, Springer, Berlin, 2015.
- [98] Skupina autora: „Bond graph“, s Interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Bond_graph , nepoznat datum.
- [99] Hoic, M.; Kranjcevic, N.; Herold, Z.; Deur, J.; Ivanovic, V.: „Modeling of dry dual-clutch axial dynamics“, Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part D-

Journal Of Automobile Engineering, Volume 232, Issue 2, 220-237, London – England, 2018.

- [100] Jain, AK.; Rastogi, V.; Agrawal, AK.: „A novel approach to study effects of asymmetric stiffness on parametric instabilities of multi-rotor-system“, Journal Of Sound And Vibration, Volume 413, 159-172, London – England, 2018.
- [101] Pradhan, S.; Samantaray, AK.: „Integrated modeling and simulation of vehicle and human multi-body dynamics for comfort assessment in railway vehicles“, Journal Of Mechanical Science And Technology, Volume 32, Issue 1, 109-119, Seoul – South Korea, 2018.
- [102] Tripathi, JP.; Ghoshal, SK.; Dasgupta, K.; Das, J.: “Bond graph modelling of a hydraulic cylinder-actuated planar manipulator”, Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering, Volume 39, Issue 11, 4275-4287, Germany, 2017.
- [103] Munari, E.; Morini, M.; Pinelli, M.; Brun, K.; Simons, S.; Kurz, R.: “Measurement and Prediction of Centrifugal Compressor Axial Forces During Surge-Part II: Dynamic Surge Model”, Journal Of Engineering For Gas Turbines And Power-Transactions Of The Asme, Volume 140, Issue 1, New York – USA, 2018.
- [104] Kazemi, MG.; Montazeri, M: “A new robust fault diagnosis approach based on bond graph method”, Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering, Volume 39, Issue 11, 4353-4365, Germany, 2017.
- [105] Mishra, N.; Vaz, A.: “Bond graph modeling of a 3-joint string-tube actuated finger prosthesis”, Mechanism And Machine Theory, Volume 117, 1-20, England, 2017.
- [106] Geitner, GH.; Komurgoz, G.: “Generic power split modelling for compound epicyclic four-speed gears”, Mechanism And Machine Theory, Volume 116, 50-68, England, 2017.
- [107] Mashayekhi, MJ.; Behdinin, K.: “Analytical transmissibility based transfer path analysis for multi-energy-domain systems using four-pole parameter theory”, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 95, 122-137, London – England, 2017.

- [108] Ranogajec, V.; Deur, J.: “Bond graph analysis and optimal control of the hybrid dual clutch transmission shift process”, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part K-Journal Of Multi-Body Dynamics*, Volume 231, Issue 3, 480-492, London – England, 2017.
- [109] Jha, MS.; Chatti, N.; Declerck, P.: “Robust fault detection in bond graph framework using interval analysis and Fourier-Motzkin elimination technique”, *Mechanical Systems And Signal Processing*, Volume 93, 494-514, London – England, 2017.
- [110] Conti, R.; i dr.: “Control design, simulation and validation of a turbo-machinery auxiliary plant”, *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part E-Journal Of Process Mechanical Engineering*, Volume 231, Issue 4, 849-863, London – England, 2017.
- [111] Mishra, C.; Samantaray, AK.; Chakraborty, G.: “Ball bearing defect models: A study of simulated and experimental fault signatures”, *Journal Of Sound And Vibration*, Volume 400, 86-112, London – England, 2017.
- [112] Paul, S.; Ghoshal, SK.; Samanta, S.; Das, J.: “Model-based single fault disambiguation and fault tolerant control for a hydraulic drive using receding horizon”, *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, Volume 39, Issue 7, 2405-2419, Germany, 2017.
- [113] Mahato, AC.; Ghoshal, SK.; Samantaray, AK.: “Energy saving of a hydrostatic drive system by incorporating soft switch”, *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, Volume 39, Issue 6, 1929-1945, Germany, 2017.
- [114] Bisoi, A.; Samantaray, AK.; Bhattacharyya, R.: “Sommerfeld effect in a gyroscopic overhung rotor-disk system”, *Nonlinear Dynamics*, Volume 88, Issue 3, 1565-1585, Netherlands, 2017.
- [115] Balino, JL.; Pellegrini, SD.: “True bond graph formulation for one-dimensional incompressible pipe flows: modeling and analytical benchmarks”, *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, Volume 39, Issue 4, 1297-1312, Germany, 2017.
- [116] Cai, ZQ.; Lin, C.: “Dynamic Model and Analysis of Nonlinear Vibration Characteristic of a Curve-Face Gear Drive”, *Strojnicki Vestnik-Journal Of Mechanical Engineering*, Volume 63, Issue 3, 161-170, Ljubljana – Slovenia, 2017.

- [117] Ma, S.J.; Peng, C.; Li, X.F.; Liu, G.: “Dynamic Stiffness Model Of Planetary Roller Screw Mechanism With Clearance, Geometry Errors And Rolling-Sliding Friction”, Proceedings Of The Asme International Design Engineering Technical Conferences And Computers And Information In Engineering Conference, Cleveland – USA, 2017.
- [118] Gonzalez, C.: “Creating larger forces with differential roller screws”, s Interneta, <http://www.machinedesign.com/fasteners/creating-larger-forces-differential-roller-screws> , 26.09.2016.
- [119] Nedic, N.; Prsic, D.; Fragassa, C.; Stojanovic, V.; Pavlovic, A.: “Simulation of hydraulic check valve for forestry equipment”, International Journal Of Heavy Vehicle Systems, Volume 24, Issue 3, 260-276, Geneva – Switzerland, 2017.
- [120] Ibanescu, R.: “Bond Graphs in System Modelling”, Mechanism and Machine Science, Volume 42, 3-23, Switzerland, 2017.
- [121] Gola, B.; Kopec, J.; Rysinski, J.; Zawislak, S.: “Bond Graph Model of a Robot Leg”, Mechanism and Machine Science, Volume 42, 69-80, Switzerland, 2017.
- [122] Montazeri-Gh, M; Fashandi, SAM.: “Application of Bond Graph approach in dynamic modelling of industrial gas turbine”, Mechanics & Industry, Volume 18, Issue 4, France, 2017.
- [123] Tan, D.; Wang, Q.; Wu, Y.S.: “Modal Analysis of In-Wheel Motor-Driven Electric Vehicle Based on Bond Graph Theory”, Shock And Vibration, broj članka 6459154, London – England, 2017.
- [124] Fu, J.; Mare, J.C.; Fu, Y.L.: “Incremental Modeling And Simulation Of Mechanical Power Transmission For More Electric Aircraft Flight Control Electromechanical Actuation System Application”, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2016), Phoenix – USA, 2016.
- [125] Ojinnaka, M.A.; Beaman, J.J.; Fish, S.: “Early Kick Detection Using Real-Time Data Analysis With A Lumped Parameter Model”, 9th ASME Annual Dynamic Systems and Control Conference, Minneapolis – USA, 2016.
- [126] Alcantar, J.V.; Assadian, F.; Kuang, M.; Tseng, E.: “Optimal Longitudinal Slip Ratio Allocation & Control Of A Hybrid Electric Vehicle With eAWD Capabilities”, 9th ASME Annual Dynamic Systems and Control Conference, Minneapolis – USA, 2016.

- [127] Hu, QY.; Zhang, H.; Tian, SJ.; Qin, XX.: “Model Reduction of a Load-Sensing Hydraulic System via Activity Index Analysis”, *Strojniski Vestnik – Journal Of Mechanical Engineering*, Volume 63, Issue 1, 65-77, Ljubljana – Slovenia, 2017.
- [128] Cheng, PJ.; Ting, HY.; Huang, HP.: “Safe Human Robot Interaction using Model Matching Control”, *Journal Of The Chinese Society Of Mechanical Engineers*, Volume 37, Issue 6, 587-596, Taiwan, 2016.
- [129] Zhang, LJ.; Guo, F.; Li, YQ.; Lu, WJ.: “Global Dynamic Modeling of Electro-Hydraulic 3-UPS/S Parallel Stabilized Platform by Bond Graph”, *Chinese Journal Of Mechanical Engineering*, Volume 29, Issue 6, 1176-1185, China, 2016.
- [130] Song, W.; Chen, YL.; Zhou, H.: “Investigation of fluid delivery and trapped volume performances of Truninger gear pump by a discretization approach”, *Advances In Mechanical Engineering*, Volume 8, Issue 10, London – England, 2016.
- [131] Wang, Y.; Zhao, DX.; Wang, L.; Zhang, ZX.; Wang, LL.; Hu, YJ.: “Dynamic simulation and analysis of the elevating mechanism of a forklift based on a power bond graph”, *Journal Of Mechanical Science And Technology*, Volume 30, Issue 9, 4043-4048, Seoul – South Korea, 2016.
- [132] Lin, C.; Ren, YH.; Ji, JX.; Cai, LZ.; Shao, JM.: “The Bond Graph Method for Analysis of the Micro-Motion Characteristics of a Micro Gripper”, *Strojniski Vestnik – Journal Of Mechanical Engineering*, Volume 62, Issue 9, 494-502, Ljubljana – Slovenia, 2016.
- [133] Bai, Y.; Fan, LY.; Ma, XZ.; Peng, HL.; Song, EZ.: “Effect Of Injector Parameters On The Injection Quantity Of Common Rail Injection System For Diesel Engines”, *International Journal Of Automotive Technology*, Volume 17, Issue 4, 567-579, Seoul – South Korea, 2016.
- [134] Pedchenko, AV.; Pitt, EB.; Barth, EJ.: “Analytical Tools for Investigating Stability and Power Generation of Electromagnetic Vibration Energy Harvesters”, *IEEE-ASME Transactions On Mechatronics*, Volume 21, Issue 2, 717-726, USA, 2016.
- [135] Samarakoon, BL.; Gamage, LB.; de Silva, CW.: “Design evolution of engineering systems using bond graphs and genetic programming”, *Mechatronics*, Volume 33, 71-83, England, 2016.

- [136] Guan, JF.; Huo DD.; Ji, XX.: “Sliding mode force tracking control for active hydro-pneumatic suspension”, *Journal Of Vibroengineering*, Volume 18, Issue 1, 458-475, Kaunas – Lithuania, 2016.
- [137] Sahoo, SR.; Chiddarwar, SS.: “Dynamic modelling of four wheel skid mobile robot by unified bond graph approach”, *International Conference on Robotics - Current Trends and Future Challenges (RCTFC)*, Thanjavur – India, 2016.
- [138] Zanj, A.; He, FP.; Breedveld, PC.: “Domain-Independent Thermoelastic Coupling Suitable For Aero-Thermoelastic Modeling”, *23rd International Congress on Sound and Vibration (ICSV)*, Athens – Greece, 2016.
- [139] Chu, YG.; Aesoy, V.; Bunes, O.; Pedersen, E.: “Modeling And Simulation Of The Accumulator During Active Heave Compensation Operations”, *35th ASME International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Busan – South Korea, 2016.
- [140] Ibanescu, R.; Ibanescu, M.: “Mechanical device for determining the stiffness and the viscous friction coefficient of shock absorber elements modelled by bond graph”, *20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference (IManEE)*, Kallithea – Greece, 2016.
- [141] Lin, CF.; Zhang, YS.; Wang, YS.: “Research on Control Strategy of Super-Mild Hybrid Transmission System”, *International Conference on Mechanical Engineering and Control Automation (ICMECA)*, Wuhan – China, 2016.
- [142] Doan, LA.; Faux, D.; Dupont, S.; Cattan, E.; Grondel, S.: “Modeling and simulation of the vertical take off and energy consumption of a vibrating wing nano air vehicle”, *11th France-Japan Congress / 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Compiègne – France, 2016.
- [143] Drewniak, J.; Kopec, J.; Zawislak, S.: “Kinematical and Efficiency Analysis of Planetary Gear Trains by Means of Various Graph-Based Approaches”, *International Symposium on Theory and Practice of Gearing*, Izhevsk – Russia, 2016.
- [144] Gupta, A.; Rastogi, V.: “Effects of Various Road Conditions on Dynamic Behaviour of Heavy Road Vehicle”, *12th International Conference on Vibration Problems (ICOVP)*, Guwahati – India, 2016.

- [145] Saad, AM.; Salim, MA.; Harun, MH.; Mansor, MR.; Akop, MZ., Musthafah, MT.: “Influence of tire stiffness and sprung mass on ride quality”, Mechanical Engineering Research Day (MERD), Melaka – Malaysia, 2016.
- [146] Hussain, T.; Sivaramakrishna, M.; Kumar, SPS.: “In House Development Of Gerotor Pump For Lubrication System Of A Gas Turbine Engine”, ASME Gas Turbine India Conference, Hyderabad – India, 2016.
- [147] Vaz, A.; Singh, K.; Dauphin-Tanguy, G.: “Bond Graph Model Of Extensor Mechanism Of Finger Based On Hook-String Mechanism”, Mechanism And Machine Theory, Volume 91, 187 – 208, Kidlington – England, 2015.
- [148] Chu, Y.; Aesoy, V.: “A Multi-Body Dynamic Model Based On Bond Graph For Maritime Hydraulic Crane Operations”, 34th ASME International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, St John’s – Canada, 2015.
- [149] Jian, SQ.; Yin, C.; Rolland, L.; James, L.: “Five Bar Planar Manipulator Simulation And Analysis By Bond Graph”, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE), Montreal – Canada, 2015.
- [150] Liu, HL.; Wang, TY.; Wang, D.: “Constant Cutting Force Control for CNC Machining Using Dynamic Characteristic-Based Fuzzy Controller”, Shock And Vibration, Article Number 406294, New York – USA, 2015.
- [151] Niu, G.; Zhao, YJ.; Defoort, M.; Pecht, M.: “Fault diagnosis of locomotive electro-pneumatic brake through uncertain bond graph modeling and robust online monitoring”, Mechanical Systems And Signal Processing, Volume 50-51, 676-691, London – England, 2015.
- [152] Silva, LI.; Bouscayrol, A.; De Angelo, CH.; Lemaire-Semail, B.: “Coupling Bond Graph and Energetic Macroscopic Representation for Electric Vehicle Simulation”, Mechatronics, Volume 24, Issue 7, 906-913, Kidlington – England, 2014.
- [153] Li, XT.; Wang, AL.: “Definitions of causality in bond graph model for efficient simulation mechanism”, Mechanism And Machine Theory, Volume 80, Pages 112-124, Kidlington – England, 2014.
- [154] Narwal, AK.; Vaz, A.; Gupta, KD.: “Study of dynamics of soft contact rolling using multibond graph approach”, Mechanism And Machine Theory, Volume 75, Pages 79-96, Kidlington – England, 2014.

- [155] Polic, D.; Ehlers, S.; Aesoy, V.; Pedersen, E.: “Shaft Response As A Propulsion Machinery Design Load”, 33rd ASME International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco – USA, 2014.
- [156] Schaep, T.; Marquis-Favre, W.; Bideaux, E.; Noppe, E.; Radot, P.; Bernigaud, JC.; Langlois, V.: “Bond Graph Modelling And Energy Flow Analysis Of A Reach Stacker”, 8th FPNI Ph D Symposium on Fluid Power, Lappeenranta – Finland, 2014.
- [157] Ramakrishnan, R.; Hiremath, SS.; Singaperumal, M.: “Modeling, Simulation and Design Optimization of a Series Hydraulic Hybrid Vehicle”, 5th International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Technologies (MIMT), Penang – Malaysia, 2014.
- [158] Bakka, T.; Karimi, HR.: “Bond Graph Modeling And Simulation Of Wind Turbine Systems”, Journal Of Mechanical Science And Technology, Volume 27, Issue 6, 1843-1852, Seoul – South Korea, 2013.
- [159] Li, C.; Hong, D.; Kwon, KH.; Jeong, J.: “Bond Graph-Based Analysis Of Energy Conversion In Vibration-Piezoelectricity Coupling And Its Application To A Cantilever Vibration Energy Harvester”, Journal Of Vibroengineering, Kaunas – Lithuania, 2012.
- [160] Movaghar, ARS.; Novinzadeh, A.: “Ideal Turbo charger Modeling and Simulation using Bond Graph Approach”, ASME Turbo Expo 2011, Vancouver – Canada, 2012.
- [161] Bryant, MD.; Choi, J.: “Model Based Diagnostics For Gearboxes”, ASME/STLE International Joint Tribology Conference, Los Angeles – USA, 2011.
- [162] Zhao, Q.; Gao, F.: “Bond Graph Modelling Of Hydraulic Six-Degree-Of-Freedom Motion Simulator”, Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part C- Journal Of Mechanical Engineering Science, Volume 226, Issue C12, 2887-2901, London – England, 2012.
- [163] Zhao, YW.; Li, JW.; Wang, H.; Yu, ZS.: “Modal Analysis Of Eccentric Rotor For Multi-Layer Leather High-Speed Cutting Machine Based On Bond Graph Method”, International Conference on Frontiers of Mechanical Engineering and Materials Engineering (MEME 2012), Hong Kong – China, 2012.
- [164] Cervantes-Sanchez, JJ.; Rico-Martinez, JM.; Ledesma-Jaime, R.; Barroso-Hernandez, JL.: “Simulation of planetary gear trains, modelling and numerical

validation”, Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part K-Journal Of Multi-Body Dynamics, Volume 223, Issue 1, 53-71, London – England, 2009.

- [165] Clemen, L.; Anubi, OM.; Margolis, D.: “On the Regenerative Capabilities of Electrodynamic Dampers Using Bond Graphs and Model Predictive Control”, Journal Of Dynamic Systems Measurement And Control-Transactions Of The ASME, Volume 138, Issue 5, New York – USA, 2016.

POPIS OZNAKA I KRATICA

b	konstanta prigušenja
B	kutno prigušenje
c	kontrolna varijabla
C	kapacitet, električni kapacitet, kapacitetne komponente
CC	Core Collection
C_f	kapacitet fluida
CAN	controller area network
DC	direct current
$\frac{dE}{dt}$	tok energije
$\frac{dP}{dt}$	tok snage
DP	dinamičko programiranje
e	napor
$e(t)$	opći napor
e_i	napor na i -tom priključku
e_j	napor na j -tom priključku
e_0	napor na ulaznom priključku snage
e_1	napor na izlaznom priključku snage
E	energija
E_0	prikladni parametar, početna energija
$E(p)$	energija ovisna o općem momentumu
$E(q)$	energija ovisna o općem pomaku
EIL	engine in the loop
EMS	energy management strategy
engl.	engleski

EEV	energetski efikasno vozilo
EV	električna vozila
f	tok
$f(t)$	opći tok
f_i	tok na i-tom priključku
f_j	tok na j-tom priključku
f_0	tok na ulaznom priključku snage
f_1	tok na izlaznom priključku snage
$F(t)$	sila
F_0	prikladni parametar
FEM	finite element analysis
FUDS	Federal urban driving schedule
GA	genetski algoritam
GY	žirator
HEV	hibridno električno vozilo
HHV	hidraulično hibridno vozilo
HHVPS	hidraulično hibridno vozilo podijeljene snage
HV	hibridno vozilo
i	i-ti broj priključka
I	inercija, inercijske komponente, parametri
$I(t)$	električna struja
I_f	inercija fluida
ISO	International organization for standardization
j	j-ti broj priključka
J	moment tromosti
k	recipročan omjer transformacije, recipročan omjer žiracije

$\frac{1}{k}$	recipročna krutost
$\frac{1}{k_r}$	recipročna kutna krutost
L	induktivitet
m	masa, omjer transformacije, omjer žiracije
$m(c)$	varijabilni omjer transformacije i žiracije
MBS	multibody system
MPC	model predictive control
n	broj priključaka
p	opći momentum
$p(t)$	opći momentum, linearni momentum, tlak
$p_f(t)$	fluidni momentum
p_i	opći momentum na i-tom priključku
p_j	opći momentum na j-tom priključku
$p_r(t)$	kutni momentum
\dot{p}	derivacija općeg momentuma
par	parametri
PHHV	paralelno hidraulično hibridno vozilo
q	opći pomak
$q(t)$	opći pomak, naboj
q_i	opći pomak na i-tom priključku
q_j	opći pomak na j-tom priključku
\dot{q}	derivacija općeg pomaka
$Q(t)$	volumni protok
R	otpor, električni otpor, otporne komponente,
R_f	otpor strujanju

RSA	regenerative semi active
SE	izvor napora
SF	izvor toka
SHHES	serijski hibridni hidraulično/električni sustav
SHHV	serijsko hidraulično hibridno vozilo
SoC	state of charge
t	vrijeme
$T(t)$	okretni moment
TF	transformator
$U(t)$	električni napon
$v(t)$	brzina
$V(t)$	volumen
$x(t)$	pomak
$\lambda(t)$	elektromagnetski tok
ϕ	prikladna nelinearna funkcija
ϕ_i	prikladna više-varijabilna funkcija
$\varphi(t)$	kutni pomak
$\omega(t)$	kutna brzina
0	čvorište toka
1	čvorište napora

SAŽETAK

U ovome kvalifikacijskom radu obrađena su tri različita znanstvena područja: hidraulična hibridna vozila (HHV), regenerativni ovjesi i modeliranje bond graf teorijom. Predstavljene su tri osnovne konfiguracije HHV: serijska konfiguracija, paralelna konfiguracija i konfiguracija HHV sa podjelom snage. Napravljena je usporedba između predstavljenih konfiguracija sa naglaskom na njihove prednosti i nedostatke. Analizom i komparacijom HHV sa HEV istaknute su glavne prednosti HHV kao što su: visoka gustoća snage, visoka efikasnost regenerativnog kočenja, brzo regenerativno punjenje, veliki omjer snage prema masi uz relativno niska početna ulaganja i troškove održavanja. Napravljen je pregled literature od oko 30 različitih doktorskih disertacija, izvornih i konferencijskih znanstvenih radova. Iz analize ove literature, javila se ideja razvoja regenerativnog hidrauličnog ovjesa u okvirima dokorskog studija.

Radi upoznavanja sa problematikom modeliranja i ispitivanja regenerativnih ovjesa, napravljeno je istraživanje CC baze podataka vezano za tu tematiku. Istraživanjem je obuhvaćen veći broj znanstvenih i konferencijskih radova (oko 65 radova koji su navedeni u popisu literature). Stekla su se određena znanja o osnovnim vrstama regenerativnih ovjesa kao što su električni, elektromagnetski, elektromehanički, elektro-hidraulični, magnetoreološki i elektoreološki regenerativni ovjesi. Uočen je manji broj radova iz područja razvoja i modeliranja hidrauličnih regenerativnih ovjesa, te se u tom smjeru planira daljnji znanstveni rad autora ovog kvalifikacijskog ispita.

Kao alat za analizu i modeliranje ovakvih sustava odabrala se teorija bond grafova. Radi dobivanja određenih teoretskih znanja iz same metode, proučeni su određeni izvori na internetu, različite knjige i veći broj značajnih znanstvenih radova iz CC baze podataka (oko 65 radova koji su navedeni u popisu literature). U radu su objašnjeni osnovni pojmovi četverokuta stanja, elementarnih komponenti i varijabli stanja prostora teorije bond grafova. Predstavljene pojmovi omogućavaju lakše razumijevanje pregleda istraživačkih radova koji su vezani za modeliranje ovom metodom.

Analizom trenutnog stanja literature iz ova tri različita područja istraživanja, uočen je potencijalni prostor za razvoj hidrauličnog regenerativnog ovjesa i njegovog univerzalnog bond graf matematičkog modela koji bi mogao služiti drugim znanstvenicima u budućim znanstvenim istraživanjima iz ovoga područja.