

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

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
STROJARSTVA**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**REGENERATIVNI SUSTAVI ZA
PRIKUPLJANJE KINETIČKE ENERGIJE**

Stipe Pleština

Split, lipanj 2025.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. METODE PRETVORBE MEHANIČKE ENERGIJE U ELEKTRIČNU ENERGIJU	3
2.1. Elektromagnetska indukcija.....	3
2.2. Piezoelektricitet	7
2.3. Triboelektricitet.....	12
3. SUSTAVI ZA PRIKUPLJANJE KINETIČKE ENERGIJE – PREGLED ISTRAŽIVANJA.....	17
3.1. Elektromagnetski uređaji za prikupljanje energije	17
3.2. Piezoelektrični uređaji za prikupljanje energije.....	88
3.3. Triboelektrični uređaji za prikupljanje energije	103
4. ZAKLJUČAK	114
LITERATURA.....	116
POPIS OZNAKA I KRATICA	125
SAŽETAK	127

1. UVOD

Prelazak na obnovljive izvore energije sve je važnija tema u globalnoj borbi protiv klimatskih promjena i negativnog utjecaja fosilnih goriva na okoliš. Kako bi se osigurao održiv razvoj i smanjila emisija stakleničkih plinova, nužan je prelazak na obnovljive izvore poput energije sunca, vjetra i vode. Međutim, osim već navedenih obnovljivih izvora energije, prisutan je i značajan potencijal u iskorištavanju drugih oblika energije gdje posebnu pažnju zaslužuju vibracijska i kinetička energija, a koja često ostaje neiskorištena i rasipa se u okoliš. Vibracijska energija, koja nastaje uslijed vibracija različitih objekata, i kinetička energija, povezana s pokretom objekata, predstavljaju neiskorištene resurse koji se mogu koristiti za regeneriranje električne energije u malim uređajima poput senzora ili bežičnih uređaja. Tehnologije poput kinetičkih cesta i nogostupa, uređaja za prikupljanje energije iz pokreta ljudi ili vozila, nude mogućnosti za prikupljanje energije koja se inače gubi u svakodnevnim aktivnostima.

Vibracijski i kinetički uređaji za prikupljanje energije predstavljaju obećavajuću tehnologiju koja omogućava regeneriranje energije iz okoliša, čime se smanjuje potreba za vanjskim izvorima energije. Ovi uređaji koriste mehaničke vibracije i gibanja za pretvaranje mehaničke energije u električnu energiju. Jedna od najvećih pogodnosti vibracijskih uređaja za prikupljanje energije je njihova sposobnost prikupljanja energije iz većine industrijskih i okolišnih vibracija koje su prisutne u svakodnevnom životu, uključujući vibracije u zgradama, mostovima, vozilima, industrijskim strojevima itd. Prikadna primjena ovih uređaja omogućava rad autonomnih senzorskih sustava što smanjuje potrebu za redovitim održavanjem i ukida nužnost zamjene baterija čime se smanjuje operativni trošak i povećava životni vijek sustava. U industrijskim postavkama, vibracijski uređaji za prikupljanje energije mogu pomoći u održavanju i praćenju stanja strojeva jer omogućuju kontinuirano napajanje senzora bez potrebe za vanjskim izvorima energije. Slično tome, uređaji za prikupljanje energije koji se oslanjaju na pokret mogu se koristiti u nosivim uređajima poput pametnih satova, fitness narukvica ili medicinskih implantata čime omogućuju regeneriranje energije iz svakodnevnih pokreta korisnika.

Međutim, vibracijski i kinetički uređaji za prikupljanje energije imaju i nekoliko ograničenja koja mogu smanjiti njihovu primjenjivost u određenim situacijama. Vibracijski uređaji za prikupljanje energije su najefikasniji kada su podvrgnuti vibracijama na rezonantnim

frekvencijama. Ako se frekvencija vibracija u okolini značajno razlikuje od rezonantne, učinkovitost uređaja značajno opada. Osim toga, u mnogim situacijama, intenzitet vibracija u okolišu može biti nedovoljan da bi omogućio dovoljno visoke prinose energije za napajanje većih uređaja, čime se ograničava primjena u slučajevima koji zahtijevaju velike količine energije. Slično tome, uređaji za prikupljanje energije koji koriste pokret, mogu generirati energiju samo kada se pokret događa, a njihova učinkovitost može ovisiti o intenzitetu i učestalosti tih pokreta. Praktično, ovo bi značilo da u situacijama u kojima se pokreti javljaju rijetko ili su vrlo slabi uređaj možda neće generirati dovoljnu količinu energije za trajno napajanje ciljanih uređaja (primjer ovoga je slučaj u nekim zdravstvenim uređajima ili nosivim tehnologijama). Pored toga, prisutni su i tehnički izazovi u dizajnu jer zahtijevaju izuzetno preciznu konstrukciju kako bi postigli najveću moguću učinkovitost. Mnogi vibracijski i kinetički uređaji za prikupljanje energije koriste komponente poput piezoelektričnih materijala i elektromagnetskih sustava za pretvaranje mehaničke energije u električnu energiju, a te komponente moraju biti dizajnirane tako da budu izdržljive, učinkovite i jeftine. Da bi se savladali izazovi konstrukcije uređaja za prikupljanje energije, potrebno je poznavati i razumjeti uvjete rada u kojima se uređaj nalazi, odabrati prikladnu metodu pretvorbe mehaničkog gibanja kao i prikladan način pretvorbe mehaničke energije u električnu energiju.

2. METODE PRETVORBE MEHANIČKE ENERGIJE U ELEKTRIČNU ENERGIJU

U nastavku su kratko prikazani i objašnjeni osnovni principi pretvorbe mehaničke energije u električnu koji se najučestalije koriste kod uređaja za prikupljanje energije. Elektromagnetska indukcija je najranije otkriveni fenomen koji ima široku primjenu od njegovog otkrića do danas. Kako se radi o fenomenu koji je najpoznatiji znanstvenicima, tako su i uređaji za prikupljanje energije bazirani na elektromagnetskoj indukciji najpopularniji i najraznovrsniji. Piezoelektricitet je relativno „mlad“ fenomen koji ima najširu upotrebu kod senzora i mikroelektromehaničkih sustava. Triboelektricitet je pojava poznata iz antičkog doba, ali primjena triboelektriciteta u kontekstu prikupljanja energije počinje u prošlom desetljeću i još nije potpuno istraženo područje .

2.1. Elektromagnetska indukcija

Pojmovi elektromagnetizam i elektromagnetska indukcija po prvi put se javljaju 1600. godine u djelu De Magnete znanstvenika Williama Gilberta koji postavlja temelje za razumijevanje magnetskih i električnih fenomena. Slijedeći značajni pomak u toj grani istraživanja se javlja dvjesto godina kasnije kada je fizičar Hans Christian Orsted otkrio da električna struja stvara magnetsko polje primijetivši pomicanje igle kompasa uslijed prolaska električne struje kroz žicu. Godine 1831. dolazi do najvećeg napretka u elektromagnetizmu kada engleski znanstvenik Michael Faraday otkriva fenomen elektromagnetske indukcije provodeći eksperimente gdje je pomicao magnet u odnosu na položaj žice. Uočeno je da se promjenom u magnetskom polju generira električna struja što je osnovni princip rada i današnjih generatora i transformatora.

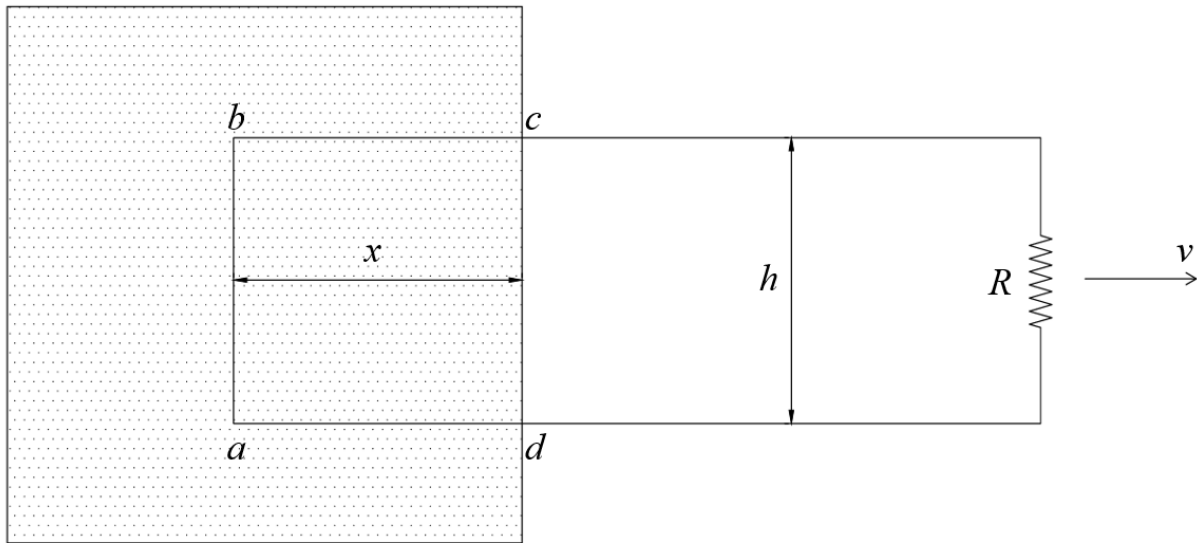
Da bi se opisali Faradayevi eksperimenti i magnetska indukcija, potrebno je definirati elektromotornu silu. Tok električne struje kroz strujni krug omogućavaju dvije sile. Prva je sila f_s uzrokovana izvorom električne energije i bitno je različite prirode ovisno o izvoru energije gdje na primjer, ukoliko je izvor baterija tada se radi o kemijskoj sili, kod piezoelektričnih kristala radi se o mehaničkom pritisku na kristal, dok je kod fotonaponskih ćelija uzrok elektromotorne sile svjetlost. Druga sila je elektrostatska sila E koja omogućava utjecaj izvora električne struje na ostale komponente strujnog kruga i ujednačava tok struje. Poznavanjem tih dviju sila, njihov zbroj daje ukupnu silu po jedinici naboja f u strujnom krugu:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_s + \mathbf{E} \quad (2.1)$$

Sada se elektromotorna sila definira kao zatvoreni integral po promjeni jačine električne struje u strujnom krugu $\mathbf{I}$:

$$\varepsilon = \oint \mathbf{f} \cdot d\mathbf{I} \quad (2.2)$$

Iako su prvotne definicije elektromotorne sile proizašle iz konteksta izvora električne energije, danas je najčešća pojava elektromotorne sile kod generiranja električne energije. Generatori zapravo eksploatiraju elektromotornu silu koja se javlja kada se pomiče žica kroz magnetsko polje. Na slici 2.1 prikazan je konceptualni model generatora. Zasjenjeno područje prikazuje ujednačeno magnetsko polje veličine $\mathbf{B}$. Simbol R označava otpor otpornika koji u ovom slučaju predstavlja trošilo. Ako se strujni krug sa slike pomakne brzinom v , naboji u segmentu ab su opterećeni silom magnetskom polja čija vertikalna komponenta uzrokuje tok struje u smjeru kazaljke na satu, dok segmenti bc i ad ne sudjeluju u generaciji električne struje jer je sila okomita na žicu.



Slika 2.1 Primitivni model generatora električne energije

Sada se elektromotorna sila u slučaju generatora može definirati kao:

$$\varepsilon = \oint \mathbf{f} \cdot d\mathbf{I} = vBh \quad (2.3)$$

gdje je h širina strujnog kruga. Iako je u ovom slučaju magnetska sila uzrok pojave elektromotorne sile, ona ne obavlja nikakav rad. Rad za generaciju električne energije obavlja

sila koja je uzrokovala pomak žice u magnetnom polju. U kontekstu uređaja za prikupljanje energije, to bi bila kinetička energija od pokreta ljudi, vibracije ovjesa i sl. ovisno o primjeni. U slučaju pomicanja žice kroz magnetsko polje, elektromotorna sila se može također definirati kroz magnetski tok Φ koji se računa integriranjem jačine magnetskog polja po površini pomaka žice $\mathbf{a}$:

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (2.4)$$

gdje za strujni krug sa slike 2.1 magnetski tok je $\Phi = Bhx$ gdje je x prijeđeni put uslijed pomaka žice. Vrijedi da pomicanjem žice, tok magnetskog polja opada. Stoga, promjena toka magnetskog polja u vremenu može se izraziti [1]:

$$\frac{d\Phi}{dt} = Bh \frac{dx}{dt} = -Bhv \quad (2.5)$$

Uvrštavanjem izraza (2.5) u izraz (2.3), dobije se da se elektromotorna sila može definirati kao negativna promjena magnetskog toka u strujnom krugu po jedinici vremena:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.6)$$

Prednost ovog načina definicije elektromotorne sile (iako je definirana kroz pravokutni strujni krug) je ta što je izraz (2.6) primjenjiv za strujne krugove koji nisu pravokutnog oblika i za neujednačena magnetska polja.

Michael Faraday proveo je tri eksperimenta gdje prvi eksperiment odgovara slici 2.1, drugi eksperiment odgovara prvom s jedinom razlikom gdje se umjesto žice pomiče magnetskog polje i treći eksperiment gdje su i magnetsko polje i žica nepomični, samo se mijenja jačina magnetskog polja. U sva tri slučaja javljala se elektromotorna sila u strujnom krugu što je dovelo do zaključka da se promjenom intenziteta magnetskog polja inducira električno polje odnosno elektrostatska sila $\mathbf{E}$. Otkrićem elektromagnetske indukcije došlo je do spoznaje da postoje dvije vrste električnog polja. Prva vrsta je već poznato električno polje nastalo uslijed djelovanja električnih naboja i struja, a druga vrsta je električno polje nastalo uslijed promjene magnetskog polja. Stoga se kod elektromagnetske indukcije elektromotorna sila može zapisati kao:

$$\varepsilon = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.7)$$

Odnosno uvrštavanjem izraza (2.4) u izraz (2.7), proizlazi definicija Faradayevog zakona u integralnom obliku:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{a} \quad (2.8)$$

Razumijevanjem elektromagnetske indukcije dolazi se do spoznaje da se mijenjanjem jačine električne struje u strujnom krugu (osim induciranja elektromotorne sile u obližnjim strujnim krugovima) inducira i elektromotorna sila u samom strujnom krugu gdje je mijenjana jačina električne struje. Kolika će se elektromotorna sila inducirati ovisi o veličini i obliku strujnog kruga i to svojstvo se zove induktivnost L . Poznavanjem induktivnosti tok magnetskog polja se može definirati kao:

$$\Phi = LI \quad (2.9)$$

Uvrštenjem izraza (2.9) u izraz (2.6) dobije se da generirana elektromotorna sila iznosi:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt} \quad (2.10)$$

Pošto je induktivnost pozitivna vrijednost, negativan predznak u izrazu (2.10) govori o prirodi elektromotorne sile, a to je da se ona opire svakoj promjeni u jačini toka električne struje. Prema tome, induktivnost je električni ekvivalent mase kod mehaničkih sustava u tome da na veću masu treba djelovati veća sila za promjenu brzine gibanja mase.

Da bi se električna struja generirala u strujnom krugu potrebno je savladati gubitke energije uslijed otpora koji se pretvaraju u toplinu i povratnu elektromotornu silu konstantne vrijednosti koja želi održati jednaku jačinu toka struje. Vrijednost energije savladavanjem povratne elektromotorne sile se vraća kod pada jačine toka struje jer se elektromotorna sila opire bilo kakvim promjenama jačine toka struje. Količina rada kojeg je potrebno utrošiti po jedinici vremena za svladavanje povratne elektromotorne sile je:

$$\frac{dW}{dt} = -\varepsilon I = LI \frac{dI}{dt} \quad (2.11)$$

Kod generatora je obično slučaj da je na početku jačina toka struje nula, tada se integriranjem izraza (2.11) dobije potrebni rad:

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2.12)$$

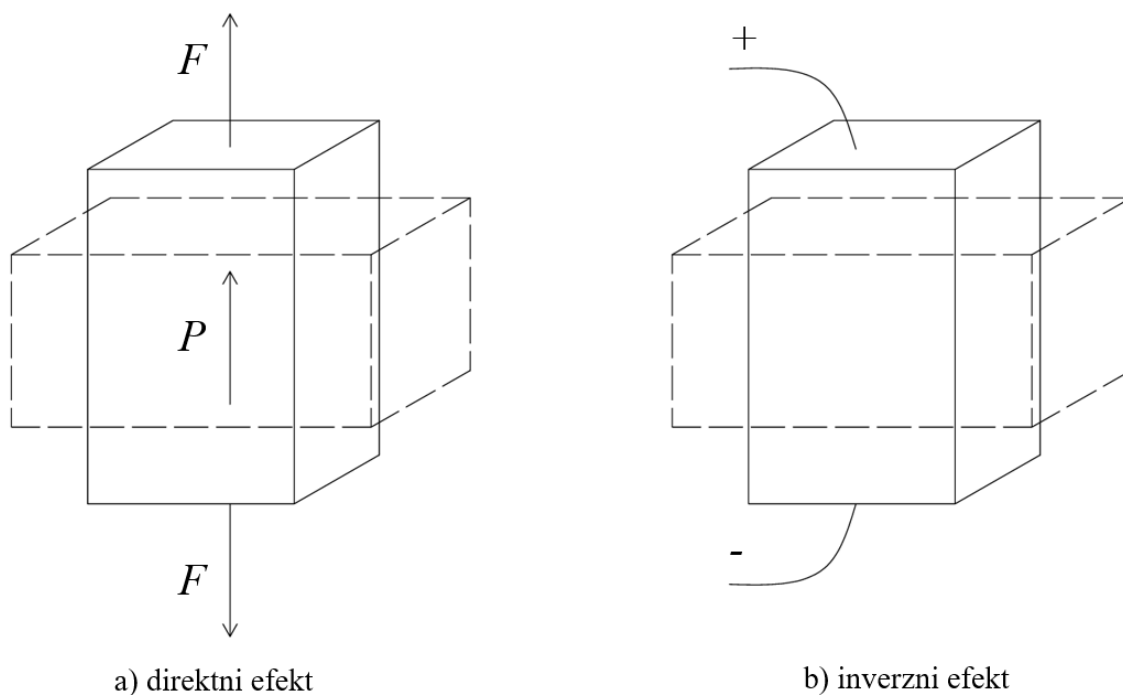
Iz izraza (2.12) zaključuje se da je potrebno dovesti energiju u sustav da se generira magnetsko polje što uzrokuje samu promjenu jačine magnetskog polja, a time i induciranje električnog polja u vodičima (namotajima generatora). Kod uređaja za prikupljanje energije, energiju se u sustav dovodi preko gibanja i/ili vibriranja pomične komponente uređaja čija bi mehanička energija inače bila potrošena u okolinu kroz toplinu. Elektromagnetski uređaji za prikupljanje energije su najzastupljeniji jer su sposobni prikupiti najviše energije u odnosu na ostale tipove uređaja zbog mogućnosti izrade većih uređaja. Imaju bolju učinkovitost pri nižim frekvencijama vibracija, širi raspon vibracija od kojih mogu prikupljati energiju kao i veći vijek trajanja jer nema kontakta između magneta i namotaja kod rada uređaja. Nedostatak elektromagnetskih uređaja za prikupljanje energije je što zahtijevaju veći prostor za istu generiranu energiju u odnosu na druge uređaje i imaju složeniju konstrukciju, pa su i samim time skuplji za izradu i montažu.

2.2. Piezoelektricitet

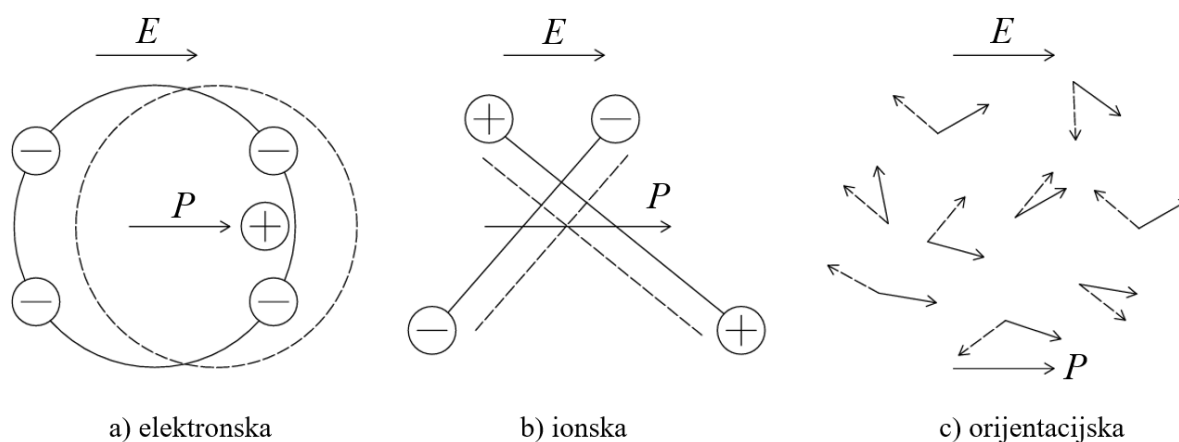
Istraživanje piezoelektričnog efekta i piezoelektričnih kristala ima dugu povijest koja se kreće od kraja 19. stoljeća do danas. Prvi značajan iskorak u otkrivanju piezoelektričnog efekta dogodio se 1880. godine kada su Pierre i Jacques Curie otkrili da određeni kristali proizvode električni naboj kada su podvrgnuti mehaničkom naprezanju. Promatrajući ovaj fenomen, braća Curie su razvili teoriju piezoelektričnog efekta s fokusom na simetriju kristalne strukture. Otkriće ovih dvaju znanstvenika pokreće val istraživanja piezoelektričnih kristala gdje su utvrđeni prvi prirodni piezoelektrični kristali (kvarc, turmalin, rutil i sodalit). Japanski znanstvenik Takamine sa svojim timom istraživača 1910. godine po prvi puta koristi piezoelektrični kristal u praktičnoj primjeni gdje je izradio uređaj za generiranje zvučnih valova pomoću piezoelektričnih kristala. Tijekom 20. stoljeća do danas, istraživanja su napredovala u smjeru razvoja sintetičkih piezoelektričnih kristala koji imaju bolje piezoelektrične karakteristike poput keramika na bazi titanata olova (PZT) koje su danas jedan od najčešće korištenih piezoelektričnih materijala. Piezoelektrični kristali imaju razne primjene, sve od senzora, mikroelektromehaničkih sustava do medicinskih ultrazvučnih uređaja.

Svojstvo piezoelektriciteta u materijalima je mogućnost materijala da se mehanički deformira kada se na njegovu površinu dovede naboj (inverzni piezoelektrični efekt) ili postane električki polariziran pod mehaničkim opterećenjem (direktni piezoelektrični efekt) što je princip rada piezoelektričnih uređaja za prikupljanje energije. Tada se električni naboji u

molekulama redistribuiraju mikroskopski što čini onda i makroskopsku polarizaciju koja je prikazana na slici 2.2 gdje oznaka F predstavlja silu koja djeluje na piezoelektrični materijal, a P je polarizacija sa svojim pripadnim smjerom. Na slici 2.3 prikazana su tri načina mikroskopske redistribucije elektrona (elektronski, ionski i orijentacijski) gdje je E jakost električnog polja. Najveća polarizacija se postiže kada je naprezanje usmjereno u pravcu piezoelektrične osi kristala.



Slika 2.2 Prikaz makroskopske redistribucije elektrona



Slika 2.3 Načini mikroskopske redistribucije elektrona

Mehaničke i električne veličine piezoelektričnih kristala imaju nelinearna svojstva kod velikih pomaka i deformacija. Kod piezoelektričnih uređaja za prikupljanje energije, deformacije piezoelektričnih elemenata su niske, pa se tada zakonitosti između mehaničkih i električnih veličina mogu linearizirati. Lineariziranjem svojstava piezoelektrika, njegova mehanička svojstva se mogu opisati Hookovim zakonom. Tada izraz za polarizaciju piezoelektrika koja se mjeri u amper sekundama po metru kvadratnom poprima oblik:

$$\mathbf{P} = \mathbf{d} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\varepsilon}_d \cdot \mathbf{E} \quad (2.13)$$

gdje je σ naprezanje piezoelektričnog elementa, d je piezoelektrična nabojna konstanta, E je jakost električnog polja i ε_d je dielektrička konstanta. Konstanta piezoelektričnog naboja je polarizacija koja se stvara po jedinici mehaničkog naprezanja primijenjenog na piezoelektrični materijal. Dielektrička konstanta predstavlja dielektrični pomak po jedinici električnog polja i ona ovisi isključivo o materijalu.

Izraz (2.13) se može zapisati i matrično gdje različiti materijali sadrže različita fizikalna svojstva. Tako je raspisani izraz (2.13) za piezoelektričnu keramiku (PZT kristal) dan u nastavku [2]:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Inducirani naboj na površinama piezoelektričnog kristala računa se s izrazom:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{d} \quad (2.15)$$

gdje je F sila koja djeluje na kristal. Svaki odvojeni naboj rezultirat će električnim poljem, a time i električnim potencijalom. U piezoelektričnom uređaju mehaničko naprezanje uzrokuje odvajanje naboja u atomima materijala gdje kod standardnih dielektrika odvajanje uzrokuje vanjski napon. Tako kod piezoelektričnih uređaja poznavanjem kapaciteta i veličine sile djelovanja na kristal, moguće je odrediti generirani električni napon. Kapacitet između elektroda može se izračunati izrazom za pločasti kondenzator:

$$C = \frac{\varepsilon S}{l} \quad (2.16)$$

gdje je S površina kontaktnih površina i l je udaljenost između kontaktnih površina. Konstanta piezoelektričnog napona, g je električno polje koje stvara piezoelektrični materijal po jedinici primijenjenog mehaničkog naprezanja. Budući da je jakost induciranog električnog polja koju

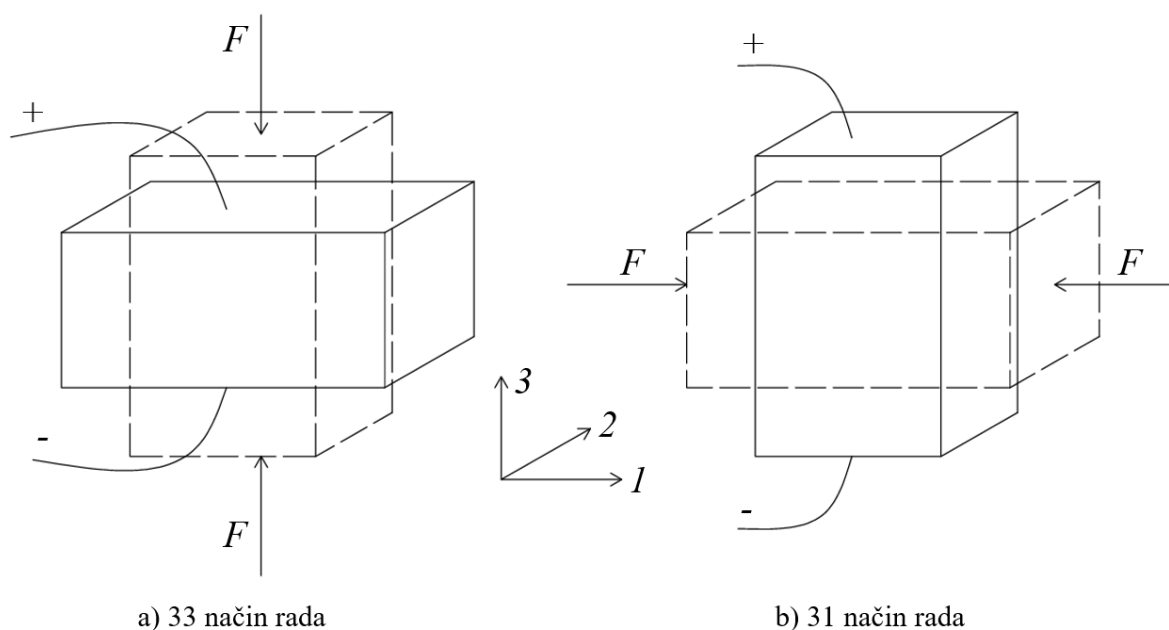
proizvodi piezoelektrični materijal kao odgovor na primijenjeno fizičko naprezanje umnožak vrijednosti primijenjenog naprezanja i konstante piezoelektričnog napona, tada se ona može definirati kao:

$$g = \frac{E}{\sigma} \quad (2.17)$$

Sada se generirani napon može dobiti iz zavisnosti kapaciteta i generiranog naboja:

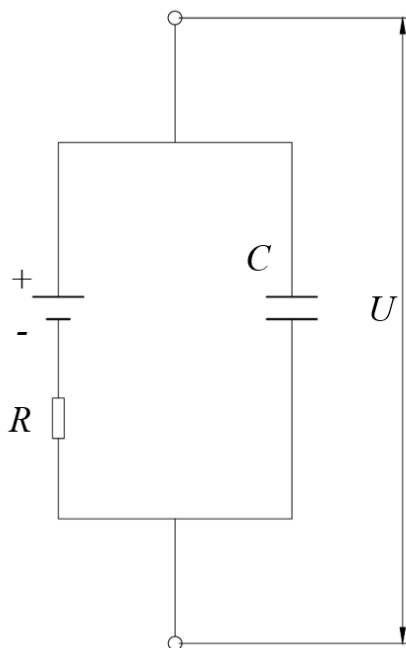
$$U = \frac{Q}{C} \quad (2.18)$$

Kako su piezoelektrični kristali anizotropni, fizikalna svojstva su različita zavisno o smjeru djelovanja opterećenja. Matematički se fizikalne konstante tada zapisuju s dva indeksa koji označavaju smjer naprezanja gdje indeksi 1, 2 i 3 podrazumijevaju normalno naprezanje duž X, Y i Z osi dok indeksi 4, 5 i 6 označavaju tangencijalno naprezanje duž X, Y i Z osi. U praktičnim primjenama kod konstruiranja piezoelektričnih elemenata smjer pozitivne polarizacije se podudara s pozitivnom Z osi što predstavlja prvi indeks dok drugi indeks označava smjer djelovanja opterećenja. Kod piezoelektričnih generatora električne energije najčešće se primjenjuju dvije kombinacije smjerova opterećenja i polarizacije prikazanih na slici 2.4. Prva kombinacija predstavlja slučaj kada su smjer normalnog naprezanja i smjer polarizacije jednaki i tada njihove oznake i popratne fizikalne konstante sadrže indeks 33. Druga kombinacija je slučaj kada naprezanje djeluje u smjeru okomitom na smjer polarizacije kristala (najčešće X osi) gdje su indeksi popratnih veličina 31.



Slika 2.4. Načini rada piezoelektričnih uređaja za prikupljanje energije

Kontinuiranom promjenom opterećenja piezoelektričnog materijala dolazi do generacije električne energije. U tu svrhu kod konstrukcije modela piezoelektričnih uređaja za prikupljanje energije, piezoelektrične komponente se prikazuju električnom shemom kao paralelni spoj istosmjernog izvora, kondenzatora kapaciteta s odgovarajuće definiranim izrazom (2.16) i popratnim unutarnjim otporom (vidjeti sliku 2.5).



Slika 2.5 Unutarnja električna shema piezoelektričnog generatora električne energije

Piezoelektrični uređaji za prikupljanje energije primarno se koriste kod relativno malih opterećenja gdje su prikladni uređaji za prikupljanje energije manjih veličina. Piezo materijali mogu se proizvesti u vrlo malim dimenzijama bez značajnog gubitka efikasnosti. To ih čini povoljnima za integraciju u MEMS uređaje (mikroelektromehanički sustavi), nosive uređaje i Internet stvari (IoT). Osim toga, mogu se oblikovati u razne geometrije kako bi se što bolje prilagodili aplikaciji. Prednost piezoelektričnih uređaja je jako brz odaziv na promjene u opterećenju što povećava njihovu učinkovitost u tim okolnostima. Piezoelektrični uređaji proizvode vrlo male količine energije (od nekoliko mikrovata do milivata) što nije dovoljno za veće potrošače (npr. mobilne telefone ili laptape), već samo za uređaje s niskom potrošnjom. Maksimalna učinkovitost piezoelektričnog uređaja postiže se samo kada je rezonantna frekvencija uređaja usklađena s frekvencijom izvora vibracija što zahtijeva pažljivo projektiranje i često ograničava primjenu. Napon koji generira piezoelektrični materijal je

promjenjiv i pulsirajući, a to uzrokuje potrebu za dodatnom elektronikom za ispravljanje, stabilizaciju i pohranu energije što povećava kompleksnost sustava.

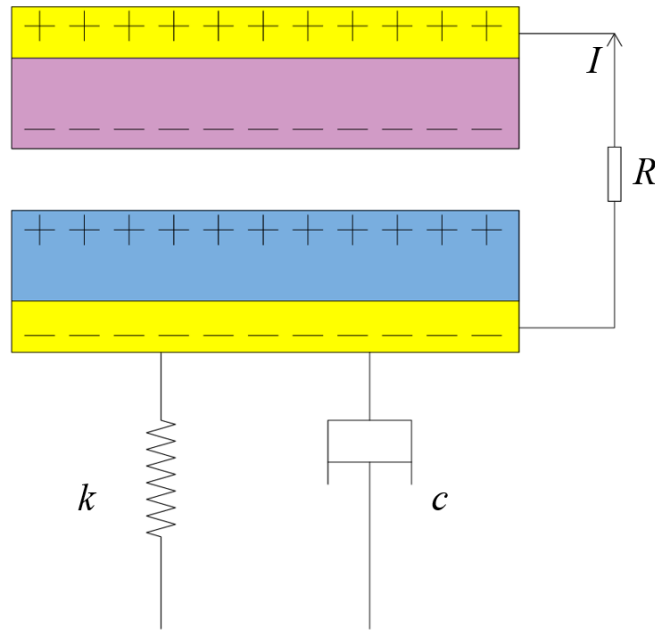
2.3. Triboelektricitet

Prve zabilježene opservacije triboelektriciteta potječu iz antičke Grčke. Oko 600. godine prije nove ere, filozof Tales iz Mileta primijetio je da jantar nakon trljanja o tkaninu privlači lagane predmete poput perja, slamki i prašine. Ovo je bio prvi opis fenomena koji danas nazivamo triboelektricitetom. Iako tada nije bilo jasno zašto do toga dolazi, zapažanje je ostavilo snažan dojam i služilo je kao temelj za kasnija istraživanja prirode elektriciteta. U 17. stoljeću, engleski znanstvenik William Gilbert eksperimentirao je s raznim materijalima i opisao sposobnost nekih tijela da privlače lagane predmete nakon trenja. On je uveo termin „električni” za tijela koja su pokazivala takva svojstva. U 18. stoljeću, francuski znanstvenik Charles François de Cisternay du Fay otkriva da postoje dvije vrste električnog naboja koje je nazvao „staklena” i „smolasta” električnost (kasnije će se nazvati pozitivni i negativni naboj). Time su postavljeni temelji za razumijevanje interakcije električnih naboja, a to je da se suprotni naboji privlače, a isti odbijaju. Iako je tadašnje razumijevanje bilo ograničeno, mnogi su eksperimentirali s elektrostatskim generatorima, što je pridonijelo razvoju elektrostatičke kao znanstvene grane. S razvojem kvantne fizike, teorije materijala i elektronike, znanstvenici su se mogli detaljnije baviti mikroskopskim mehanizmima triboelektriciteta. Otkriveno je da do prijenosa naboja ne dolazi isključivo zbog elektrona, već i zbog ionske razmjene i utjecaja površinske topografije, kemijske strukture te vlažnosti i temperature okoline. Unatoč tome, triboelektricitet i dalje je djelomično nepredvidiv i teško ga je točno kvantificirati zbog različitih materijala koji se mogu ponašati drukčije ovisno o čistoći, hrapavosti površine, brzini trenja i drugim čimbenicima. Među tradicionalnim primjenama triboelektriciteta ističe se njegova uloga u industriji kroz različite praktične tehnologije. Jedna od najranijih i najčešćih primjena su elektrostatski separatori koji se koriste za razdvajanje tvari na temelju njihovih različitih triboelektričnih svojstava. Ova tehnologija nalazi primjenu osobito u rudarskoj industriji gdje omogućuje učinkovito razdvajanje rude od neželjenih materijala čime se povećava učinkovitost i smanjuju troškovi prerade. Također, triboelektricitet se iskorištava i u svakodnevnim uređajima poput laserskih printera i kopirnih uređaja gdje se elektrostatski naboj koristi za prijenos tonera na papir. U elektroničkoj i proizvodnoj industriji važnu ulogu ima antistatička zaštita gdje se primjenjuju posebni materijali i premazi koji sprječavaju nakupljanje statičkog elektriciteta čime se štite osjetljive elektroničke komponente od mogućih oštećenja ili iskrenja.

Prekretnica u razumijevanju i primjeni triboelektriciteta dogodila se 2012. godine, kada kineski znanstvenik Zhong Lin Wang sa suradnicima razvija triboelektrični nanogenerator (TENG). Ovaj uređaj koristi triboelektricitet za pretvaranje mehaničke energije poput dodira, vibracija, pokreta zraka ili vode u električnu energiju. Otkriće TENG-a otvorilo je vrata novoj eri razvoja samonapajajućih sustava, posebno korisnih u području senzora, prijenosne elektronike i energetske autonomnih uređaja. TENG sustavi posebno su korisni za napajanje senzora u udaljenim ili teško dostupnim područjima gdje je pristup tradicionalnim izvorima energije ograničen. Također, mogu služiti za napajanje malih elektroničkih uređaja poput LED lampica, ručnih satova, pa čak i senzora integriranih u pametne tkanine. Jedno od najzanimljivijih područja primjene je nosiva tehnologija gdje se TENG-ovi ugrađuju u obuću, odjeću ili narukvice. Na taj način omogućuju generiranje energije tijekom svakodnevnih aktivnosti korisnika čineći uređaje energetske samoodrživima. U području zdravstvene tehnologije, triboelektrični sustavi sve se više primjenjuju u razvoju samonapajajućih senzora za praćenje vitalnih funkcija poput otkucaja srca, krvnog tlaka ili pokreta pacijenata što otvara mogućnosti za stalni zdravstveni nadzor bez potrebe za baterijama ili vanjskim izvorima napajanja. Osim u nosivoj i biomedicinskoj tehnologiji, TENG-ovi se istražuju i u kontekstu energetske održivosti. U urbanim sredinama nude mogućnost iskorištavanja mikroenergije iz okoline poput koraka prolaznika, kretanja vozila, kišnih kapi ili strujanja zraka kao alternativnog obnovljivog izvora električne energije.

Pretvorbu i prijenos energije u TENG sustavu je iznimno teško potpunosti prikazati zbog složenosti kontaktne elektrifikacije površina. Osnovni TENG uređaj se sastoji od dvije elektrode i dva različita dielektrična materijala kako je prikazano na slici 2.6 gdje žuta boja predstavlja elektrode, a plava i ljubičasta boja prikazuju dielektrične materijale. Gornja elektroda je nepomična dok je druga pomična pod djelovanjem vanjske mehaničke sile. Kada se kontaktna elektrifikacija pojavi između dva dielektrična materijala, na dodirnim površinama nastaju tribonaboji. Kao rezultat toga, dielektrični materijali se polariziraju zbog stvaranja električnog polja koje potječe iz generirane raspodjele naboja. Na taj se način mehanička energija pretvara i pohranjuje u TENG uređaj. Zbog konstantnog i relativno sporog kretanja TENG-a, pohranjena energija može se tretirati na kvazi-elektrostatički način. Kako se relativni pomak pokretne elektrode mijenja, kvazi-elektrostatska energija se mijenja. Predstavljeni osnovni sustav je klasični sustav masa-opruga-prigušivač. Pokretni dio TENG-a je obješen na oprugu i služi kao masa. Opruga je pričvršćena na vanjski okvir postavljen u okolinu iz koje dolazi podražaj u obliku mehaničke energije. U realnom mehaničkom sustavu određeni dio energije se uvijek gubi zbog rasipanja (kao što je prigušivanje zraka i kroz toplinu), stoga je prisutan i model prigušivača. Pomična elektroda (masa) dio je

rezonatora i TENG pretvarača. Generirana električna energija je kontrolirana sklopom za upravljanjem napajanjem.



Slika 2.6 Osnovni TENG sustav masa-opruga-prigušivač

Razvijeno je nekoliko tipova modela za TENG uređaj. Jedan od tipova je formalni fizički model kao što su kvazi-elektrostatički modeli, koji se temelje na klasičnoj elektromagnetskoj teoriji. Druga kategorija je model ekvivalentnog električnog kruga koji sadrži CA model i Nortonov model ekvivalentnog strujnog kruga. Formalni fizički model i model ekvivalentnog električnog kruga međusobno su povezani i opisani prijenosnom jednačinom [3]:

$$\phi_{AB} = \int_B^A E dL = \frac{\partial I}{\partial t} L \quad (2.19)$$

Lijeva strana jednačine predstavlja pad potencijala TENG uređaja, dok je desna strana napon preko vanjskog opterećenja. Prema Kirchhoffovom zakonu, razlika potencijala između dviju elektroda TENG-a jednaka je naponu preko otpora opterećenja čime se dobiva prijenosna jednačina. Fizika TENG-a određena je varijacijom potencijala, jakosti električnog polja, polarizacije dielektričnog materijala i Maxwellove struje pomaka. Modeli strujnih krugova određuju izlaze iz vanjskog kruga kao što su varijacije napona, struje, snage i prikupljene električne energije [4]. Maxwellove jednačine proširene su primarno kroz dodatni član P_s koji se naziva Wangov član. Wangov član potječe od prisutnosti elektrostatičkih površinskih naboja i stoga nije rezultat polarizacije materijala inducirane električnim poljem nego uslijed kontaktne elektrifikacije. Stoga, dodavanjem Wangovog člana za izračun gustoće električnog toka D slijedi:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} + \mathbf{P}_s \quad (2.20)$$

gdje su ε_0 permitivnost u vakuumu, E jakost električnog polja, P polarizacija i P_s je Wangov član. Tada je gustoća struje pomaka:

$$\mathbf{J}_D = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}_s}{\partial t} = \varepsilon_m \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}_s}{\partial t} \quad (2.21)$$

gdje je ε_m permitivnost materijala. Postoji jasna razlika u fizičkom podrijetlu između P i P_s gdje je P polarizacija u materijalu nastala zbog prisutnosti električnog polja. Nadalje, dok je prvi član važan na visokim frekvencijama, drugi član daje važan doprinos proizvodnji energije na niskim frekvencijama gdje TENG uređaji imaju široku primjenjivost. Sada se gustoća naboja i gustoća električne struje definira kao:

$$\rho' = \rho - \nabla \cdot \mathbf{P}_s \quad (2.22)$$

$$\mathbf{J}' = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{P}_s}{\partial t} \quad (2.23)$$

koji zadovoljavaju jednadžbu kontinuiteta:

$$\nabla \cdot \mathbf{J}' + \frac{\partial \rho'}{\partial t} = 0 \quad (2.24)$$

na temelju izraza (2.22), (2.23) i (2.24) sada se Maxwellove jednadžbe definiraju kao:

$$\nabla \cdot \mathbf{D}' = \rho' \quad (2.25)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.26)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.27)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}' + \frac{\partial \mathbf{D}'}{\partial t} \quad (2.28)$$

Gornje četiri jednadžbe opisuju odnose među elektromagnetskim poljima i nabojima kao i raspodjele struje u TENG-ovima. Iz generaliziranih Maxwellovih jednadžbi dobivena je pogonska sila i jednadžba upravljanja TENG uređajem. Izlazne karakteristike TENG-a mogu se u potpunosti predvidjeti putem formalnih fizičkih i ekvivalentnih modela električnog kruga [3].

Jedna od glavnih prednosti TENG-a je mogućnost iskorištavanja raznih izvora mehaničke energije poput vibracija, pokreta tijela, vjetra, kiše ili trenja između površina. To ih čini

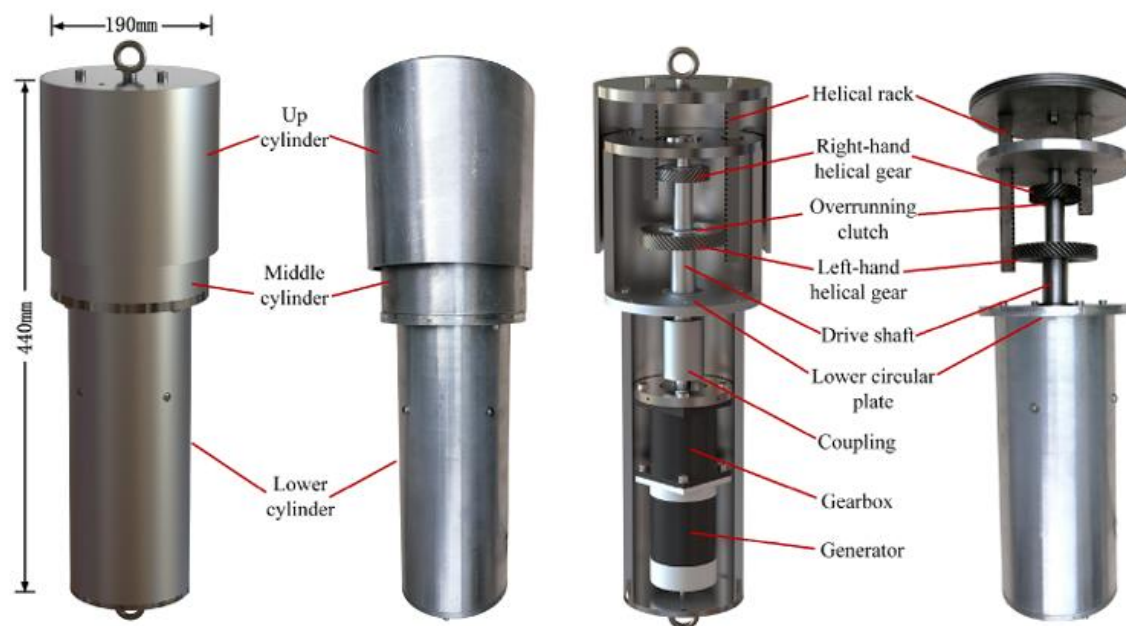
idealnima za napajanje malih elektroničkih uređaja, senzora, pametne odjeće te za primjenu u Internetu stvari (IoT). TENG-ovi se izrađuju od jednostavnih, jeftinih i lako dostupnih materijala što ih čini ekonomičnim. Također, ne zahtijevaju kompleksnu infrastrukturu što dodatno smanjuje cijenu proizvoda. Još jedna prednost je visoka učinkovitost pri pretvorbi energije kod niskofrekventnih pokreta gdje su druge tehnologije poput piezoelektričnih generatora često manje učinkoviti. Jedan od glavnih nedostataka TENG-a je niska izlazna električna struja. Iako mogu generirati visoki napon, količina proizvedene struje često nije dovoljna za uređaje koji zahtijevaju veću snagu. Također, učinkovitost TENG-a može ovisiti o uvjetima iz okoline kao što su vlaga i temperatura što može utjecati na stabilnost i dugoročnu pouzdanost uređaja. Materijali koji se koriste skloni su trošenju zbog stalnog trenja što smanjuje trajnost sustava. Osim toga, tehnologija još uvijek nije u potpunosti razvijena za masovnu komercijalnu upotrebu, pa su potrebna dodatna istraživanja i optimizacije kako bi se povećala njezina primjena u praksi.

3. SUSTAVI ZA PRIKUPLJANJE KINETIČKE ENERGIJE – PREGLED ISTRAŽIVANJA

Uređaji za prikupljanje kinetičke energije predstavljaju suvremeno tehnološko rješenje usmjereno prema održivom i autonomnom napajanju elektroničkih uređaja. Primjenjuju se najčešće u kontekstu uređaja male potrošnje, posebno tamo gdje je redovita zamjena baterija nepraktična ili nemoguća. Njihove prednosti očituju se u njihovoj sposobnosti iskorištavanja energije iz neposrednog okoliša čime se smanjuje ovisnost o konvencionalnim izvorima napajanja. Ovim procesima se produljuje vijek trajanja elektroničkih uređaja i smanjuju se troškovi održavanja. Dodatno, ovakva tehnologija pridonosi razvoju ekološki prihvatljivih i energetske učinkovitih rješenja. Ovi uređaji također se suočavaju s određenim ograničenjima. Najveći izazov predstavlja varijabilnost i nepouzdanost izvora kinetičke energije, obzirom da dostupnost takve energije ovisi o vanjskim faktorima poput intenziteta gibanja ili vibracija. Posljedično, ovakvi sustavi često nisu u mogućnosti osigurati kontinuiranu ili dostatnu razinu energije za uređaje veće potrošnje. Složenost tehnologije i potreba za specijaliziranim materijalima mogu rezultirati povećanim troškovima proizvodnje i montaže. Unatoč tim izazovima, kontinuirani tehnološki napredak, posebice u području naprednih materijala i optimizacije učinkovitosti sustava pridonosi širenju primjene uređaja za prikupljanje električne energije. Očekuje se da će njihova uloga biti sve značajnija u razvoju autonomnih elektroničkih sustava, posebice u kontekstu Interneta stvari (IoT), pametnih gradova i održive elektronike.

3.1. Elektromagnetski uređaji za prikupljanje energije

Regenerativni prigušivači udaraca najčešće koriste elektromagnetske uređaje za prikupljanje energije. Li i dr. [5] numerički i eksperimentalno su ispitali regenerativni prigušivač udaraca ovjesa vozila. Konstrukciju su podijelili u četiri dijela: dio za prikupljanje mehaničke energije vibracija (unutarnji i vanjski cilindar s prihvatom na ovjes), dio za pretvorbu pravocrtnog gibanja u rotacijsko (sparena zupčasta letva i cilindrični zupčanik), generator s planetarnim prijenosnikom u svrhu povećanja brzine vrtnje rotora i električni sklop za pohranu prikupljene električne energije. Slika 3.1 prikazuje izrađeni prototip regenerativnog prigušivača udaraca na kojem su prikazani svi dijelovi osim sklopa za pohranu prikupljene energije.

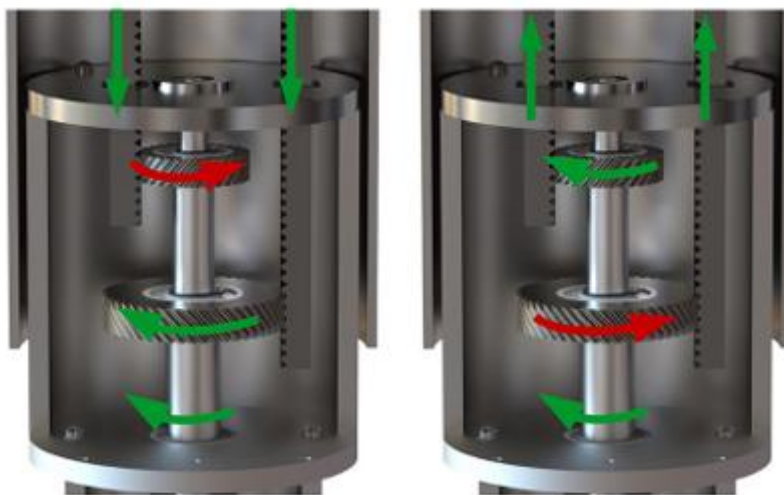


Slika 3.1 Prototip regenerativnog prigušivača udaraca [5]

Dio za pretvorbu gibanja transformira dvosmjerne pravocrtnne vibracije u jednosmjerno rotacijsko gibanje. Sastoji se od dvije zupčaste letve sa suprotnim nagibima zubi, dva cilindrična zupčanika sa suprotnim nagibima zubi koji su zavareni na jednosmjerne spojke i montirani na vratilo. Cijeli mehanizam prijenosa spojen je s gornjim i srednjim cilindrom putem matica. Donji kraj jednosmjerne spojke pričvršćen je na glavno vratilo preko ramena vratila, a gornji kraj je pričvršćen na glavno vratilo preko sigurnosnog prstena. Dva kraja glavnog vratila spojena su s gornjom pločom i donjom pločom srednjeg cilindra putem ležajeva. Kada se gornji cilindar pomiče prema dolje, zupčaste letve se pomiču prema dolje. U tom trenutku, zupčanik s desnim zubima okreće se suprotno od kazaljke na satu, a zupčanik s lijevim zubima u smjeru kazaljke na satu. Jednosmjerna spojka unutar zupčanika s desnim zubima je isključena, a jednosmjerna spojka unutar zupčanika s lijevim zubima je u uključenom stanju i prenosi okretni moment i tada se glavno vratilo okreće suprotno od kazaljke na satu. Kada se zupčaste letve pomiču prema gore, tada je jednosmjerna spojka zupčanika s desnim zubima uključena, dok je kod zupčanika s lijevim zubima spojka isključena što uzrokuje da se vratilo uvijek vrti u jednom smjeru kao što je prikazano na slici 3.2.

Numerički model prigušivača izrađen je u MATLAB Simulink programskom paketu gdje je utvrđeno da amplituda i posebno frekvencija vibracija značajno utječu na dobivenu snagu. Kada je amplituda 9 mm, povećanje frekvencije s 1 Hz na 5 Hz povećat će regeneriranu snagu s 1,6 W na 40 W. Za frekvenciju od 5 Hz, povećanje amplitude s 4 mm na 9 mm povećat će regeneriranu snagu s 8 W na 40 W. Eksperiment je proveden pomoću servo-hidrauličkog

sustava za mehaničko ispitivanje i očitavanje (MTS). Prototip je testiran pod sinusoidnom pobudom s različitim amplitudama od 3 mm do 7 mm i različitim frekvencijama od 1 Hz do 2,5 Hz. Prema rezultatima ispitivanja, mehanička učinkovitost regenerativnog prigušivača raspoređena je između 17,29 % i 65,02 %, što se povećava s povećanjem frekvencije, uz istu amplitudu. Stoga je prosječna mehanička učinkovitost 39,46 %. Pri frekvenciji od 2,5 Hz i amplitudi od 7 mm, prigušivač proizvodi 4,25 W električne energije.



Slika 3.2 Princip rada dijela za pretvorbu gibanja [5]

Salman i dr. [6] izradili su regenerativni apsorber temeljen na zupčanicima s kosim unutarnjim ozubljenjem i vanjskim ozubljenim vratilom gdje su zupčanci spojeni s jednosmjernim spojka pomoću kojih dvosmjerno pravocrtno gibanje se transformira u jednosmjerno rotacijsko gibanje zbog suprotno usmjerenih zubi na gornjem i donjem kraju ozubljenog vratila (slika 3.3). Strelice označene žutom predstavljaju gibanja koja prenose moment, dok bijele strelice pokazuju dijelove koji ne prenose moment. Eksperiment je proveden na MTS uređaju sa sinusoidnom pobudom amplitude od 1 mm do 5 mm i rasponom frekvencija od 1 Hz do 2.5 Hz. Ispitivana su dva prototipa s nagibima zuba od 30 i 45 stupnjeva. Držeći amplitudu konstantnom, učinkovitost raste od 10 % do 58 % s povećavanjem frekvencije podražaja. Eksperimentom je utvrđeno da je prototip s nagibom zuba od 30 stupnjeva prikupio snagu od 105.4 W pri amplitudi od 5 mm i frekvenciji od 2.5 Hz, dok je prototip s nagibom zuba od 45 stupnjeva prikupio snagu od 270 W.



Slika 3.3 Pretvorba dvosmjernog pravocrtnog gibanja u jednosmjerno rotacijsko [6]

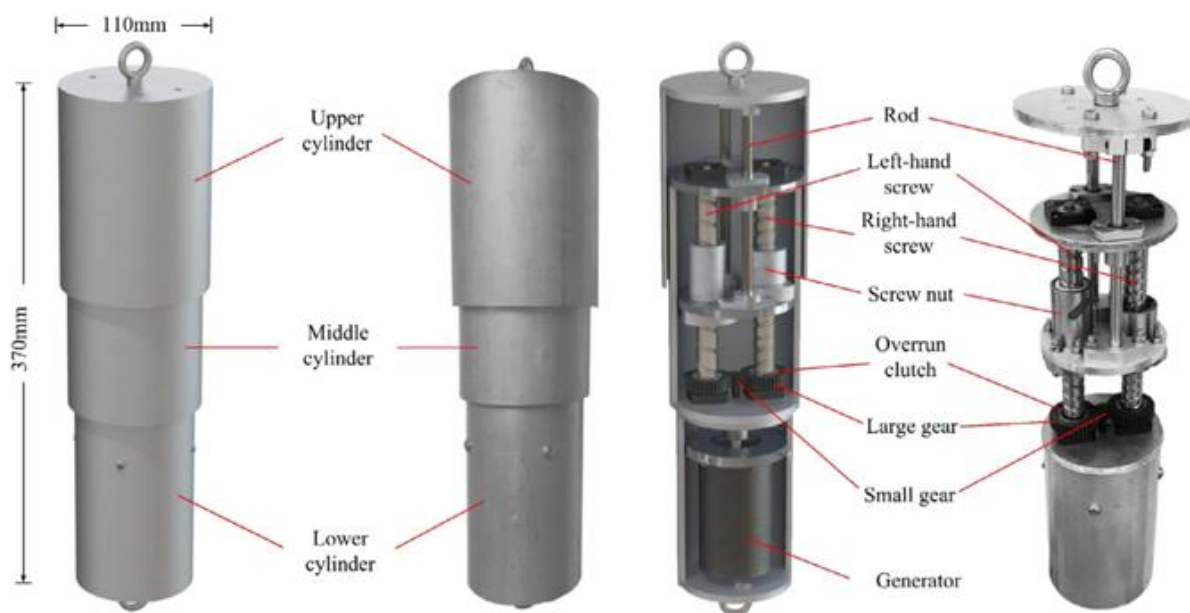
Zhang i dr. [7] su numerički i eksperimentalno ispitali prototip regenerativnog ovjesa za električna vozila. Prototip predstavlja novu konstrukciju gdje je dvosmjerno pravocrtno gibanje pretvoreno u jednosmjerno rotacijsko pomoću parova zupčanika s ravnim zubima i zupčastih letvi (slika 3.4). Sparivanjem zupčanika sa zupčastim letvama promijenjen je smjer izlazne snage što je konstrukcijski nepovoljno, pa je dodan par koničnih zupčanika u svrhu ponovne promjene smjera izlazne snage. Eksperiment je proveden na MTS sustavu sa sinusoidnom pobudom s frekvencijama koje se kreću od 1 Hz do 2,5 Hz i amplitudama od 2,5 mm do 7,5 mm. Prikupljena snaga dobivena simulacijom za amplitudu od 7,5 mm i frekvenciju 2,5 Hz iznosi 3,12 W, dok snaga prikupljena eksperimentalnim putem iznosi 4,302 W. Učinkovitost uređaja se kreće od 22,51 % do 54,98 % ovisno o frekvenciji uzbude s konstantom amplitudom.

Wang i dr. [8] predložili su regenerativni prigušivač za električna vozila prikazan na slici 3.5 koji pretvara pravocrtno gibanje u rotacijsko s dva navojna kuglična vretena. Pravocrtna vibracija pretvaraju se u jednosmjernu rotaciju generatora pomoću para kugličnih navojnih vretena, zupčanika i jednosmjerne spojke. Korištenje različitih koraka navoja omogućava postizanje različitih koeficijenata prigušenja za kretanje prema gore i prema dolje što omogućuje prigušivaču da u potpunosti iskoristi oprugu za poboljšanje udobnosti vozila pri kompresiji i brzo apsorbira vibracije pri ekspanziji. Mehanička svojstva prototipa u punoj veličini proučavana su korištenjem MTS uređaja. Prosječna izlazna snaga od 3,701 W je prikupljena pri sinusoidnom vibracijskom ulazu frekvencije od 1 Hz i amplitudi od 6 mm. Najveća učinkovitost od 51,1 % i prosječna učinkovitost od 36,4 % postignuti su u testovima.

Domet električnog osobnog automobila se može produžiti za 1 milju na 100 milja kada se električno vozilo giblje cestom klase B pri brzini od 60 km/h.



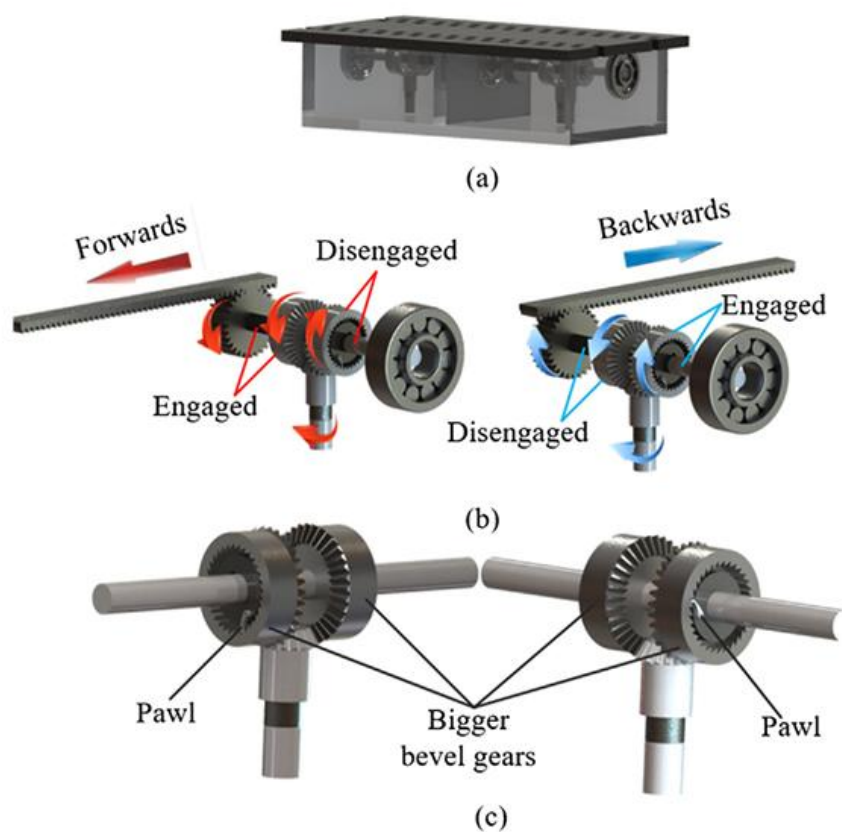
Slika 3.4 3D CAD model i izrađeni prototip regenerativnog apsorbera [7]



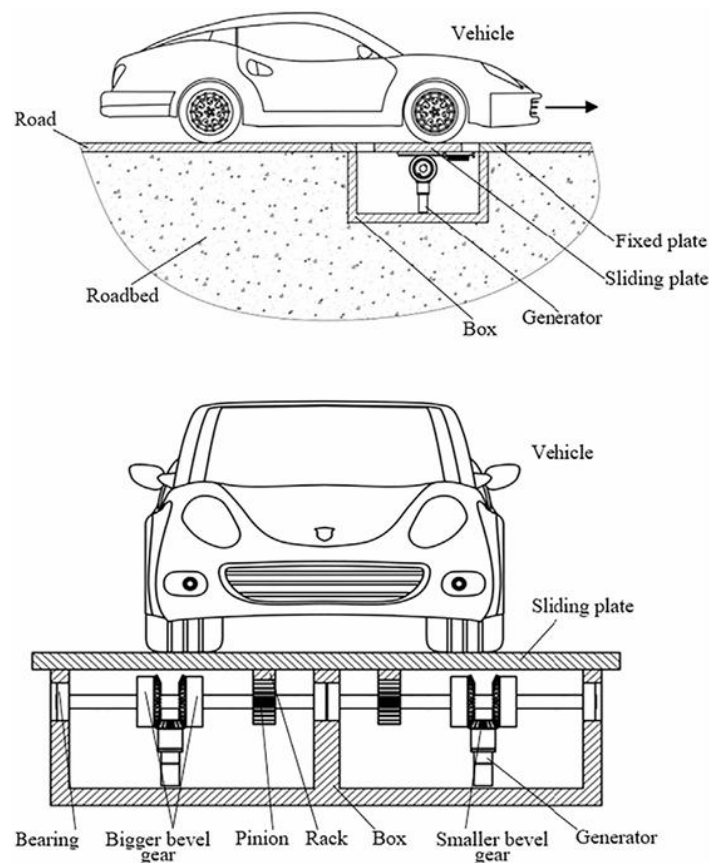
Slika 3.5 Prototip regenerativnog prigušivača udaraca [8]

Qi i dr. [9] izradili su i numerički i eksperimentalno ispitali sustav za prikupljanje energije vozila u gibanju koji se temelji na kliznoj ploči. Kako bi se osiguralo da ne dolazi do relativnog klizanja između gume vozila i klizne ploče, za izradu klizne ploče koriste se SMFM materijali. SMFM materijali su polumetalni tarni materijali koji su izrađeni kombiniranjem sinteriranih metala i sintetičkih materijala. Posjeduju tražena svojstva kao što su otpornost na koroziju, visoka čvrstoća, stabilan koeficijent trenja i otpornost na habanje. Ovakvi materijali mogu

dobro apsorbirati kinetičku energiju koju proizvodi vozilo u gibanju čime omogućuju značajno povećanje učinkovitosti pretvorbe energije. Uređaj je primjenjiv za upotrebu na autocestama i manje prometnim područjima gdje nedostaje pouzdanog napajanja i može osigurati lokalno napajanje električne opreme koja se nalazi uz cestu. Kada vozilo prolazi preko klizne ploče, sila trenja između gume vozila i klizne ploče pomiče kliznu ploču. Sukladno tome, zupčasta letva pričvršćena na kliznu ploču pomiče se na istu stranu. Istovremeno, opruge koje su pričvršćene na okvir i kliznu ploču se sabijaju. Nakon što se vozilo udalji od klizne ploče, sabijene opruge vraćaju kliznu ploču i letvu natrag u prvobitni položaj. Kretanje klizne ploče naprijed-natrag pretvara se u jednosmjernu rotaciju ulaznog vratila generatora pomoću zapinjača koji dopušta vrtnju u jednom smjeru (slika 3.6). Slika 3.7 prikazuje poglede u presjeku dijela pretvorbe gibanja koji se sastoji od dvije zupčaste letve, dva cilindrična zupčanika s ravnim zubima spojenim na vratilo i dva para koničnih zupčanika koji osiguravaju promjenu smjera izlaznog vratila i osiguravaju jednosmjernu vrtnju vratila generatora.



Slika 3.6 Sustav pretvorbe gibanja; a) prikaz uređaja, b) smjer gibanja komponenti za oba pomaka klizne ploče, c) mehanizam za postizanje jednosmjerne vrtnje [9]



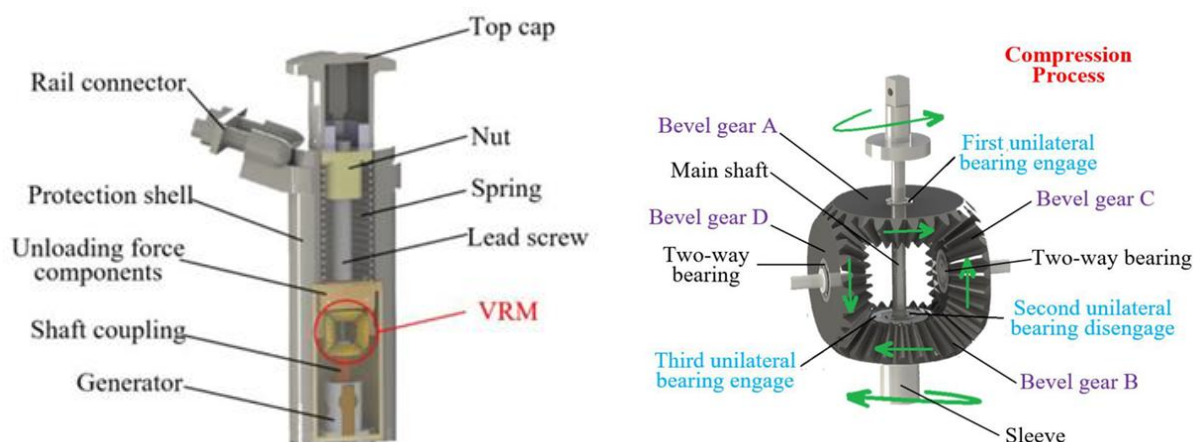
Slika 3.7 Nacrt i bokocrt uređaja [9]

Eksperiment je proveden na MTS uređaju gdje je za prvotno pomicanje ploče razmatrano jednoliko gibanje, dok je za povratak ploče uslijed akumulirane energije u oprugama razmatrano sinusoidno gibanje amplitude 10 mm prvi frekvencijama od 0,5 Hz, 1 Hz, 1,5 Hz i 2 Hz. Učinkovitost uređaja pokazala se najviša pri frekvenciji od 0,5 Hz gdje iznosi 62,38 %, a najmanja pri frekvenciji od 2 Hz s iznosom od 51,31 %. U ovom eksperimentu uređaj je prikupio najviše snage (63,719 W) pri frekvenciji od 2 Hz. Simulacijom su dobiveni slični rezultati gdje se učinkovitost uređaja kretala od 67,42 % do 53,16 %, a prikupljena snaga iznosila je 66,025 W.

Zhang i dr. [10] predstavili su regenerativni prigušivač s indirektnim pogonom koji koristi mehanizam zupčanika za pretvorbu linearnog gibanja u rotacijsko. Zupčanici služe i za povećanje ulazne brzine vrtnje s ciljem dobivanja veće količine prikupljene energije. Uređaj sadrži zamašnjak u svrhu smanjenja fluktuacija brzine vrtnje zbog nepravilnosti pobude. Predložena konstrukcija ima prednost u tome što sadrži manji broj komponenti nego ostali relevantni prigušivači. Autori su usporedili radne značajke novog sustava indirektnog pogona eksperimentalnim ispitivanjem, analitičkim modeliranjem i Monte Carlo simulacijom s radnim

značajkama konvencionalnog sustava s izravnim pogonom iste konfiguracije generatora. Rezultati su pokazali da sustav indirektnog pogona može postići veću maksimalnu snagu, ali i uži frekvencijski interval od sustava s izravnim pogonom. Sustav indirektnog pogona također pruža bolju udobnost vožnje do 13 Hz. Pravi izbor prijenosnog omjera može dodatno poboljšati omjer maksimalne snage sustava s indirektnim pogonom.

Wu i dr. [11] iskoristili su Dowtyevu kočnicu za usporavanje vagona šinskih vozila kao uređaj za prikupljanje energije. Prelaskom kotača vagona preko Dowtyeve kočnice uređaj prima pobudu u obliku pravocrtnog gibanja. Poklopac se pomiče prema dolje s maticom koja s vretenom pretvara pravocrtno gibanje u rotacijsko, a opruga se sabija. Rotacijsko gibanje vretena zatim se prenosi na mehanizam za prijenos gibanja. U početku se konični zupčanik A koji je u zahvatu s prvim jednosmjernim ležajem, okreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, dok se drugi jednosmjerni ležaj isključuje. Konični zupčanik B okreće se u smjeru kazaljke na satu nakon prijenosa gibanja koničnih zupčanika C i D. Čahura se okreće zbog trećeg jednosmjernog ležaja s kojim je u zahvatu. Ulazno vratilo generatora koje je spojeno s čahurom putem spojke okreće se u smjeru kazaljke na satu. Proces kompresijskog hoda prikazan je na slici 3.8.



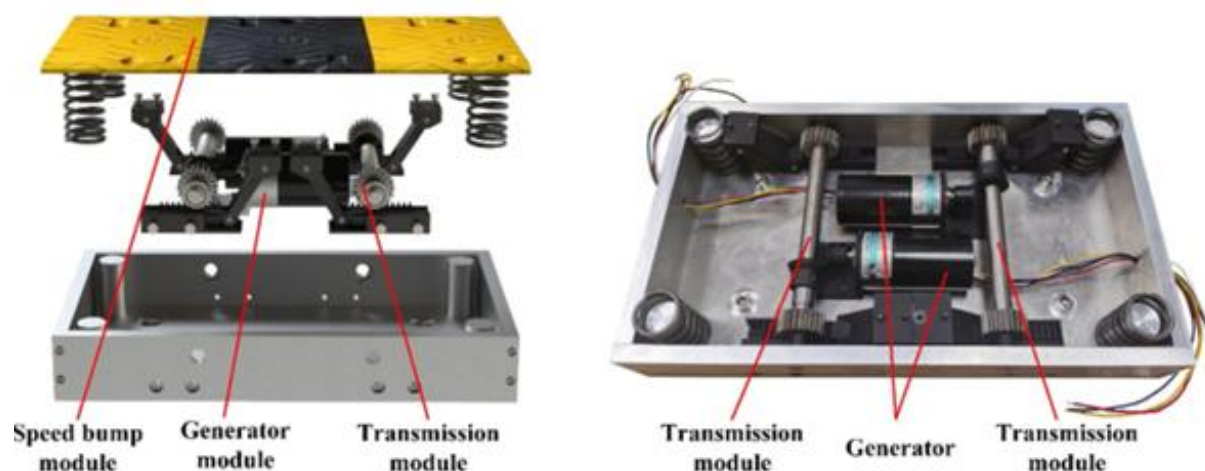
Slika 3.8 Osnovni dijelovi uređaja sa smjerovima gibanja mehanizma za pretvorbu gibanja u kompresijskom hodu [11]

Eksperimentalnim putem autori su testirali uređaj uz sinusoidnu pobudu s frekvencijama od 1 Hz do 2 Hz i amplitudama od 2,5 mm do 7,5 mm. Za amplitudu od 7,5 mm i frekvenciju 2 Hz, učinkovitost uređaja iznosi 51,9 %, a prikupljena snaga 5,3 W.

Zhang i dr. [12] projektirali su i izradili regenerativni prigušivač udara. Novitet predstavljenog uređaja je primjena mehanizma zupčanika i zupčaste letve pomoću kojeg se

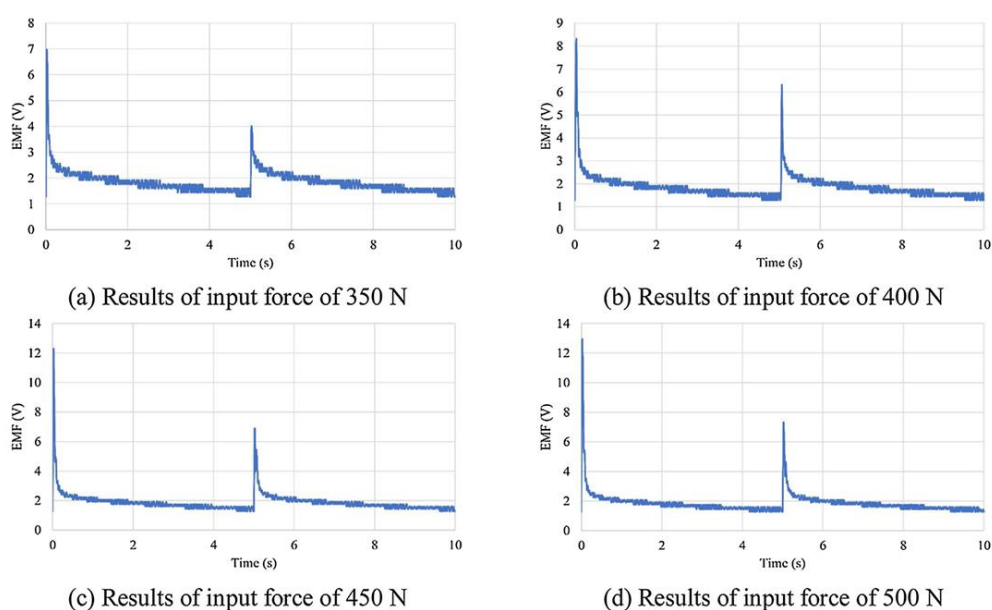
udvostručuje brzina magneta u svrhu povećavanja količine prikupljene energije. Razvijeni su simulacijski modeli s parametrima identificiranim analizom konačnih elemenata i eksperimentima. Konstruirani regenerativni uređaj uspoređen je s konvencionalnim regenerativnim ovjesom. Kao aproksimacija pomaka profila ceste korištena je sinusoidna pobuda s amplitudom od 0,035 m u frekvencijskom rasponu od 0 Hz do 25 Hz. Autori su utvrdili da predložena konstrukcija može povećati prikupljenu snagu za četiri puta u usporedbi s konvencionalnim uređajem. Monte Carlo simulacijom, autori su dobili da je predloženi regenerativni ovjes osjetljiviji na nepravilnosti profila ceste od konvencionalnog regenerativnog ovjesa.

Sun i dr. [13] izradili su i ispitali radne značajke regenerativnog ležećeg policajca za napajanje malih elektroničkih uređaja na naplatnim postajama. Mehanizam korišten za pretvorbu gibanja je dvostruki prostorni V mehanizam prikazan na slici 3.9. Predstavljeni mehanizam pretvara dvosmjerno linearno gibanje u jednosmjerno rotacijsko gibanje vratila generatora. Mehanizam V oblika se može razdvojiti u dva dijela. Svaki dio sadrži dvije klizne vodilice, dva para zupčanika i zupčaste letve, par koničnih zupčanika, dvije čahure, dva kotrljajuća ležaja, dva jednosmjerna ležaja i glavno vratilo. Kraj radilice spojen je na donju površinu elementa za smanjenje brzine, a zupčaste letve koje klize u kliznim vodilicama, spojene su s obje strane radilice pomoću zatika. Dva jednosmjerna ležaja ugrađena su u zupčanike s istim smjerom zahvata pomoću čvrstog dosjeda. Oba kraja glavnog vratila spojena su s kućište uz korištenje kotrljajućih ležajeva. Čahure su sastavljene na glavnom vratilu između kotrljajućih i jednosmjernih ležajeva. Veći konični zupčanic ugrađen je na glavno vratilo dok je manji konični zupčanic ugrađen na vratilo generatora.



Slika 3.9 Dijelovi i prototip regenerativnog ležećeg policajca [13]

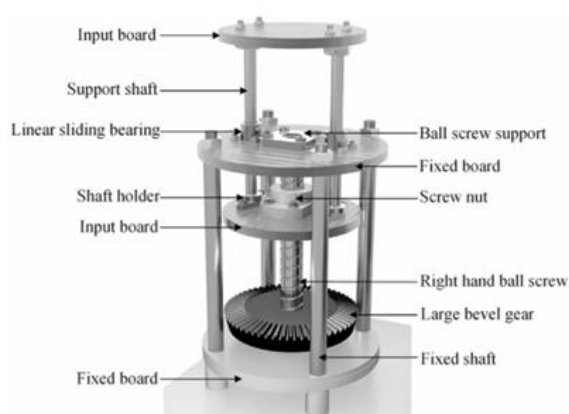
Simulacija je izvršena u programskom paketu MATLAB gdje je ostvarena učinkovitost uređaja od 62,32 % pri vrijednosti ulazne sile od 1100 N, a prikupljena snaga iznosila je 48,688 W. Izrađeni prototip je eksperimentalno ispitan podražajem oblika pravokutnog vala pri frekvenciji od 0,1 Hz, amplitudi 10 mm i silama od 350 N do 500 N. Pokazano je da se povećanjem ulazne sile, povećava i vrijednost elektromotorne sile (slika 3.10). Maksimalna prikupljena snaga pri ulaznoj sili od 500 N je 1,1 W. Testovima je također pokazano da učinkovitost uređaja opada povećanjem ulazne sile gdje pri sili od 350 N učinkovitost iznosi 71,46 % što je veća učinkovitost nego pri simulaciji, dok je pri ulaznoj sili od 500 N, učinkovitost 49,47 %.



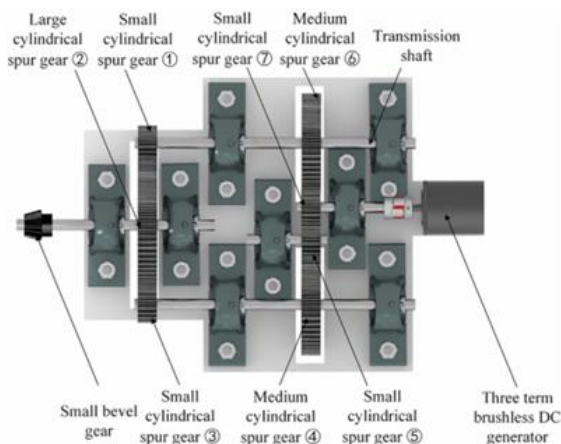
Slika 3.10 Grafovi izlazne elektromotorne sile pri različitim ulaznim silama [13]

Zhang i dr. [14] ispitali su numerički i eksperimentalno uređaj za prikupljanje energije vibracija tračnica. Zupčasta letva je kod ovog uređaja pričvršćena za dio koji preuzima vibracije i kreće se s istom amplitudom i frekvencijom kao i tračnica. Gibanje zupčaste letve pretvara se u rotacijsko uz korištenje zupčanika i to s visokim prijenosnim omjerom. Dva jednosmjerna ležaja postavljena na vratilo pretvaraju dvosmjerni ulazni pomak u jednosmjernu rotaciju. Simulacija je izvršena u programskom paketu MATLAB gdje je izabrana sinusoidna pobuda s amplitudom od 10 mm u frekvencijskom rasponu od 1 Hz do 4 Hz što je tipično za vibracije tračnica. Simulacijom je pokazano da uređaj ima prihvatljiv dinamički odziv na razmatrane vibracije. Za eksperiment je izabrana sinusoidna uzbuda amplitude 6 mm i frekvencije 1 Hz i 2 Hz. Autori su ustanovili da je pri frekvenciji od 2 Hz učinkovitost uređaja 55,5 % i maksimalna elektromotorna sila 6,45 V.

Liu i dr. [15] također su predstavili uređaj za prikupljanje energije vibracija tračnica. Novost autorove konstrukcije u odnosu na prethodne je dio koji prihvaća vibracije tračnica kao i dio koji pretvara dvosmjerno pravocrtno gibanje u jednosmjerno rotacijsko. Prvi dio je prikazan na slici 3.11 i sastoji se od dvije ulazne ploče za kretanje s jednim stupnjem slobode, dvije fiksne ploče, četiri fiksne osovine, set kugličnih navojnih vretena s desnim navojem i velikog koničnog zupčanika. Gornja ulazna ploča prikuplja vibracije tračnica putem držača osovina, aksijalnog ležaja i dvaju potpornih osovina. Kada je tračnica u kontaktu s gornjom ulaznom pločom, ulazne ploče pomiču maticu prema dolje, a vreteno pokreće veliki konični zupčanik koji rotira u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Veliki konični zupčanik ulazi u zahvat s malim koničnim zupčanicom koji prenosi gibanje na dio uređaja za pretvorbu dvosmjernog rotacijskog gibanja u jednosmjerno preko jednosmjernih ležaja (slika 3.12). Osim pretvorbe gibanja povećava se i brzina vrtnje vratila generatora kroz prijenosne omjere zupčanika.

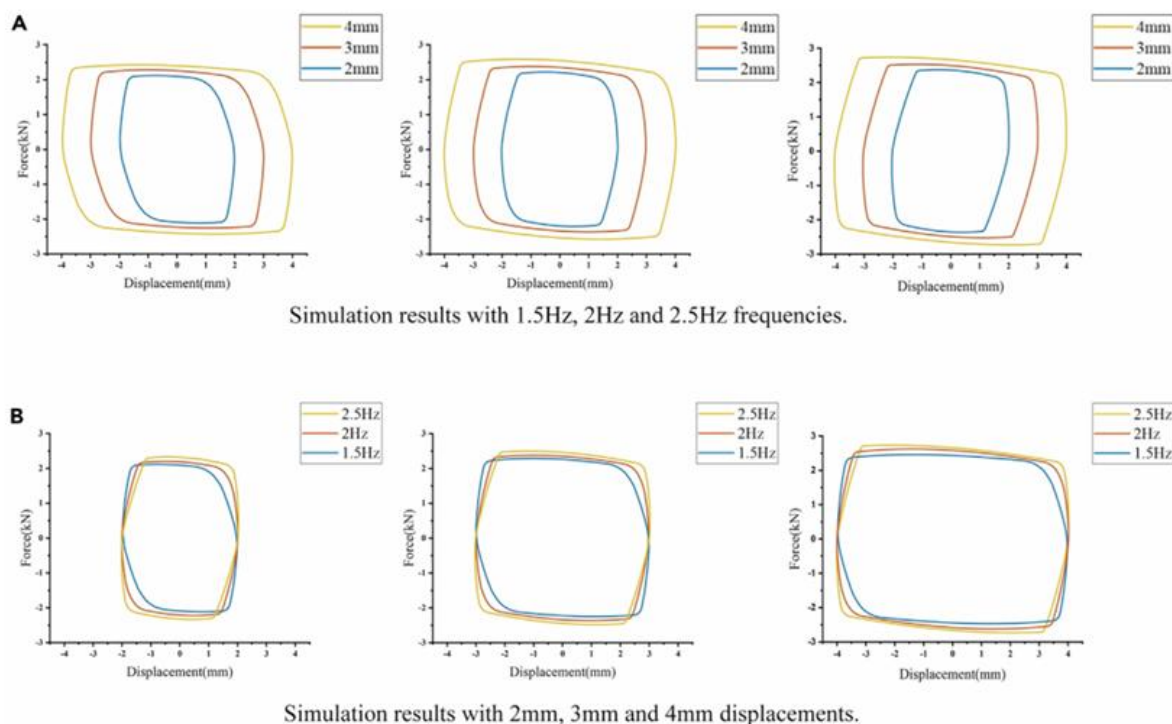


Slika 3.11 Konstrukcija dijela uređaja za prihvat vibracija tračnica [15]



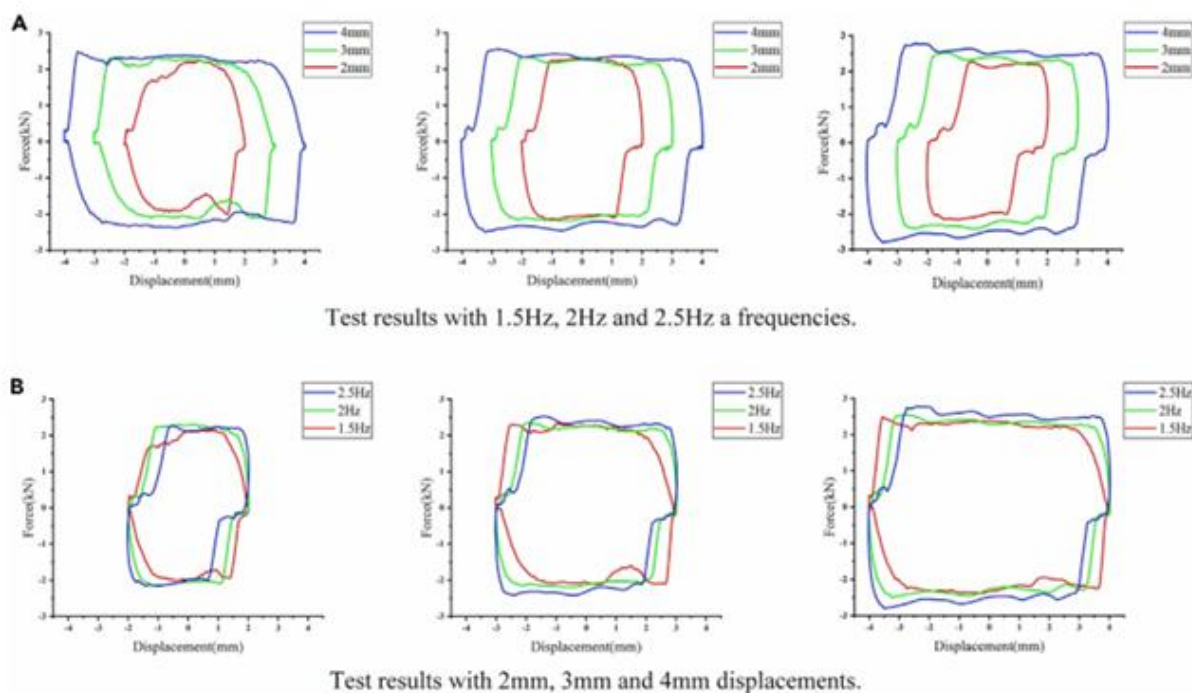
Slika 3.12 Konstrukcija dijela uređaja za pretvorbu dvosmjernog rotacijskog gibanja u jednosmjerno [15]

Numeričkim ispitivanjem uređaja, dobivene su petlje sila-pomak za vanjski otpor od $3\ \Omega$ što je prikazano na slici 3.13. Istraživanjem se prvo pokazalo da pri konstantnoj frekvenciji sila prigušenja raste s amplitudom. Autori su u nastavku ispitivanja zaključili da pri konstantnoj amplitudi također dolazi do porasta sile prigušenja, ali uz nužno povećanje frekvencije.



Slika 3.13 Petlje sila-pomak pri vanjskom otporu od $3\ \Omega$ [15]

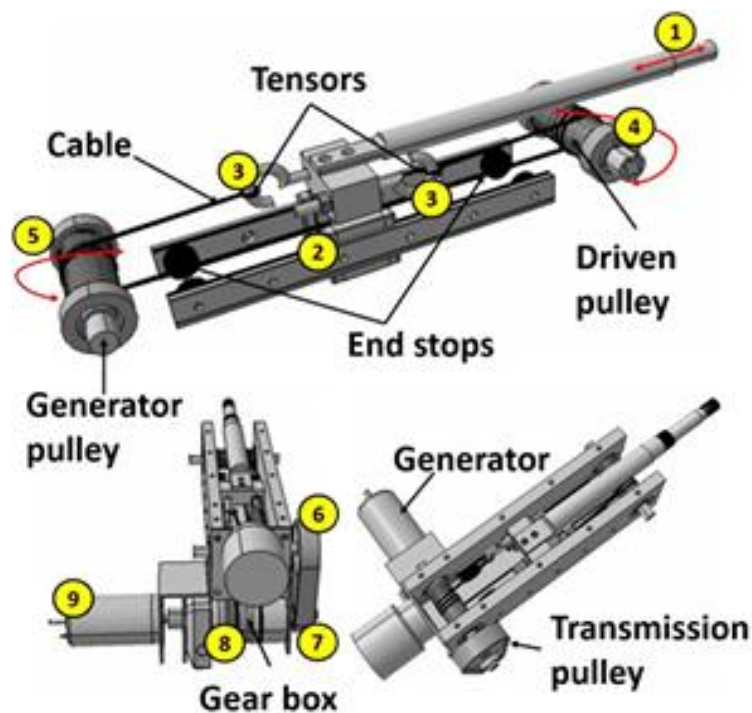
Eksperimentalno ispitivanje provedeno je na MTS uređaju s ulaznim parametrima amplitude od 2 mm do 4 mm i frekvencije od 1,5 Hz do 2,5 Hz sinusoidne pobude. Također je variran vanjski otpor od $1\ \Omega$ do $5\ \Omega$. Slika 3.14 prikazuje petlje sila-pomak dobivene eksperimentalnim putem za zadane amplitude i frekvencije. Uspoređujući petlje dobivene simulacijom i eksperimentom primijećene su oscilacije u eksperimentalnim petljama. Do oscilacija dolazi zbog nesavršenosti pri izradi i montaži dijelova uređaja, procesa uključivanja i isključivanja dijelova preko jednosmjernog ležaja, tromosti dijelova pri njihovom pokretanju i zaustavljanju i udarima. Variranjem ovih triju ulaznih varijabli, autori su eksperimentalnim putem dobili da je najveća prikupljena snaga 28,05 W i to pri amplitudi od 4 mm, frekvenciji od 2 Hz i vanjskom otporu od $1\ \Omega$. Istraživanja su također pokazala da učinkovitost uređaja raste sa smanjenjem amplitude, frekvencije i vanjskog otpora. Nadalje, učinkovitost uređaja raste što je vanjski otpor bliži unutarnjem otporu generatora. Najveća izračunata učinkovitost s mjerenim podacima iznosi 75,92 % pri amplitudi od 2 mm, frekvenciji od 1,5 Hz i vanjskom otporu od $1\ \Omega$, a prosječna učinkovitost iznosi 42,73 %.



Slika 3.14 Petlje sila-pomak dobivene eksperimentom pri vanjskom otporu od 3 Ω [15]

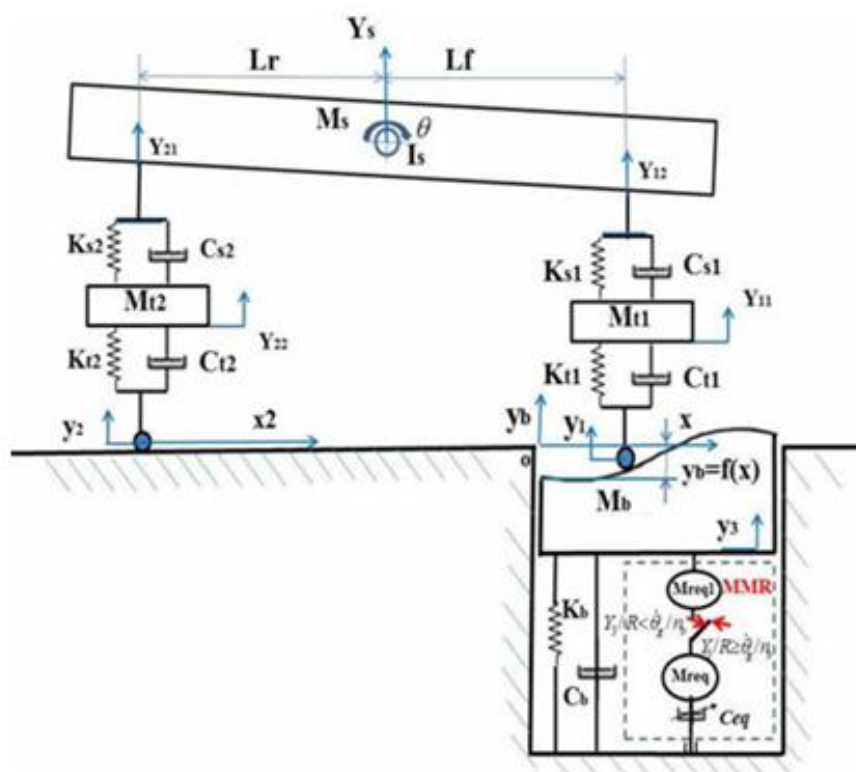
Bowen i dr. [16] konstruirali su regenerativni uređaj koji prenosi gibanje pomoću metalnog užeta. Translacijsko gibanje u ovjesu prenosi se pomoću klipa na pomični klizač koji se giba po vodilicama. Klizač ima dva zateznika koji povlače metalno uže ovisno o kretanju. Metalno uže je namotano u dva navojna bubnja smještena na krajevima gdje pogonski bubanj ima slobodnu rotaciju, a generatorski bubanj je spojen na remenicu većeg promjera. Remenica većeg promjera prenosi gibanje pomoću remena na manju remenicu u svrhu povećanja brzine vrtnje. Manja remenica je spojena na multiplikator koji je onda spojen na električni generator. Model regenerativnog uređaja prikazan je na slici 3.15 gdje broj 1 označava klip, broj 2 označava vodilice, broj 3 označava zateznik, broj 4 označava pogonski bubanj, broj 5 označava generatorski bubanj, broj 6 označava veću remenicu, broj 7 označava manju remenicu, broj 8 označava multiplikator i broj 9 predstavlja generator. Testovi na ispitnom stolu su provedeni na MTS uređaju pri amplitudi od 15 mm, intervalu frekvencija od 0,5 Hz do 4 Hz i vanjskim električnim otporima od 15 Ω , 47 Ω , 62 Ω , 94 Ω i 109 Ω . Autori su zapazili da je došlo do dodatnih vibracija zbog nepreciznosti u montaži generatora s manjom remenicom što bi moglo umanjiti ugodnost vožnje s predloženim ovjesom. Pri frekvenciji od 1 Hz i električnom otporu od 15 Ω i 109 Ω , uređaj je na ispitnom stolu prikupio snagu od 1,4 W odnosno 0,5 W uz mehaničku učinkovitost od 4 % do 22 % u ovisnosti o frekvenciji i vanjskom električnom otporu. Autori su također eksperimentalnim putem dobili sila-brzina petlje od modela automobila Renault Twizy pri brzini kretanja od 20 km/h do 30 km/h čime su odredili

koeficijent prigušenja ovjesa. Poznavanjem uvjeta rada ovjesa, rad predloženog uređaja je simuliran čime se pokazalo da četiri uređaja prelaskom preko uspornika mogu generirati prosječnu snagu od 105 W. Također je ustanovljeno da uređaj može imati učinkovitost do 26 %.



Slika 3.15 Prikaz modela regenerativnog uređaja [16]

Wang i dr. [17] razvili su regenerativni ležeći policajac koji prikuplja energiju prelaskom automobila preko njegovog nagiba. Dio uređaja za pretvorbu gibanja transformira nepravilni impuls prelaska vozila u jednosmjernu rotaciju vratila generatora pomoću spoja zupčaste letve sa zupčanicom i jednosmjernih ležaja. Zbog periodičnog podražaja uređaja, vratilo generatora je spojeno sa spojkom koja se isključuje pri određenom smanjenju brzine vrtnje tako da se smanji tromost sustava i duže održi veća brzina vrtnje. Također, dio za pretvorbu gibanja sadrži samo jedno vratilo što pojednostavljuje konstrukciju i smanjuje potencijalnu cijenu uređaja. Uz model regenerativnog uređaja, autori su također predstavili interakciju modela uređaja i modela automobila što je prikazano na slici 3.16. Uređaj je ispitan na terenu prelaskom automobila (Honda Civic) preko predloženog uspornika pri vanjskom električnom otporu od 1Ω . Izmjerena maksimalna snaga dobivena ispitivanjem (541-646 W) bila je vrlo blizu predviđene maksimalne snage dobivene simulacijom (540 W). Predloženi sustav uspoređen je u odnosu na druge osmišljene i prezentirane uređaje gdje je novi uspornik pokazao stabilniji i mirniji rad u istraživanju i primjeni.



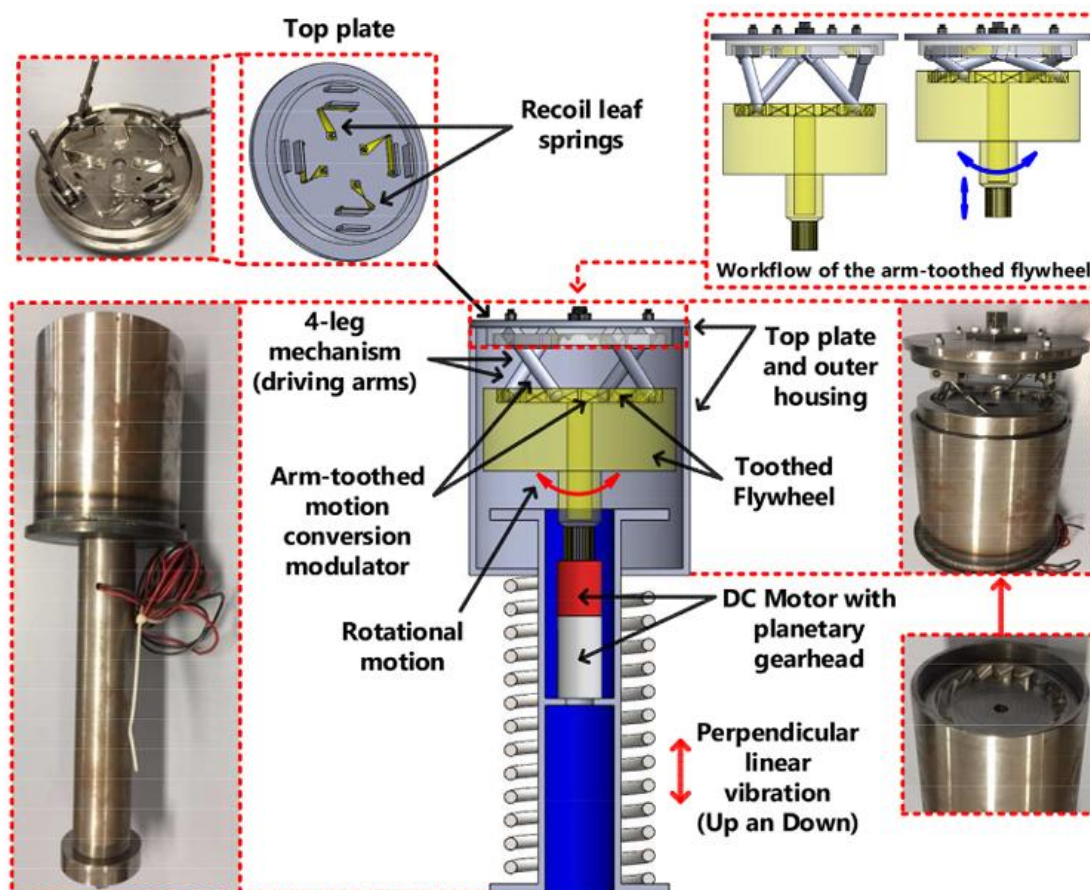
Slika 3.16 Model automobila i regenerativnog uspornika [17]

Zhang i dr. [18] modelirali su i ispitali uređaj za prikupljanje energije vibracija tračnica. Uređaj pretvara dvosmjerne vibracije tračnica u jednosmjernu rotaciju pomoću zupčanika i jednosmjernih ležaja zbog poboljšanja učinkovitosti uređaja i povećanja količine prikupljene energije. Autori su simulirali kontakt vozila i tračnica (samim time i vibracije tračnica) kao i dinamički odziv uređaja. Pomaci tračnica uslijed vibracije imaju mali iznos, ali prenose visoku silu. Iz tog razloga, dio uređaja za pretvorbu gibanja je konstruiran na takav način da osim postizanja jednosmjerne rotacije, istovremeno i prikladnim prijenosnim omjerom povećava brzinu vrtnje vratila generatora. Modeliranjem i simulacijom uređaja dobivena je prosječna prikupljena snaga od 12,07 W. Uređaj je također eksperimentalno testiran na ispitnom stolu (MTS). Korištena je sinusoidna pobuda amplitude 2,5 mm i frekvencija 0,5 Hz i 1 Hz s vanjskim električnim otporom od 0,1 Ω i 3 Ω . Testiranjem je ustanovljeno da vanjski električni otpor u ovom slučaju ima slab utjecaj na elektromotornu silu. Pokazano je i da elektromotorna sila ovisi o frekvenciji pobude gdje njen iznos raste s povećanjem frekvencije. Fang i dr. [19] razvili su algoritam za optimizaciju parametara hidrauličnog regenerativnog ovjesa primjenjujući sinusoidnu pobudu i model četvrtine automobila. Frekvencija primijenjene pobude je u intervalu od 0,3 Hz do 30 Hz. Simulacijom je dobiven graf s optimalnim vanjskim otporima pri rezonantnim frekvencijama kotača za maksimalno prikupljenu energiju. Prateći trendove

dobivenih grafova ustanovljeno je da se pri bilo kojoj frekvenciji količina prikupljene energije povećava s porastom vanjskog otpora do kritične vrijednosti nakon čega količina prikupljene energije opada s dodatnim povećanjem otpora. Uveden je i parametar omjera prigušenja koji uzima u obzir ugodnost vožnje gdje je ustanovljeno da je moguće postići zadovoljavajuću ugodnost vožnje uz postizanje uvjeta rada za maksimalno prikupljanje snage. Uspoređujući omjer prigušenja i frekvenciju pobude, zaključeno je da frekvencija pobude ima puno veći utjecaj na količinu prikupljene energije od omjera prigušenja.

Abdelkareem i dr. [20] ispitali su uređaj za prikupljanje energije vibracija ovjesa teretnog vozila. Uređaj se sastoji od vanjskog kućišta, gornje ploče, četiri kraka, nazubljenog zamašnjaka i generatora integriranog s planetarnim prijenosnikom. Pretvarač gibanja sastoji se od četiri pogonska kraka učvršćena na gornju ploču i pričvršćena s četiri seta povratnih opruga kako bi se pogonski krakovi vratili u ravnotežno stanje kod isključenja zamašnjaka. Pogonski krakovi se putem vratila spajaju i isključuju s nazubljenim zamašnjakom koji je spojen na generator s planetarnim prijenosnikom. Duljina kraka određena je na način da su krakovi (kada su uključeni) dovoljno dugi da rotiraju zamašnjak u sljedeći položaj uključenja. Regenerativni uređaj je montiran paralelno s prigušivačem i oprugom teretnog vozila kako bi se osiguralo da se maksimalna amplituda i primijenjeno opterećenje neće prekoračiti. Kada uređaj vibrira okomito, zamašnjak se giba okomito i to omogućava pogonskim krakovima (koji se mogu pomicati samo kružno) da se spoje s nazubljenim zamašnjakom uzrokujući rotaciju zamašnjaka. Konstrukcija regenerativnog uređaja prikazana je na slici 3.17. Razvijen je analitički model teretnog vozila s prikolicom s 23 stupnja slobode s 12 ugrađenih uređaja za koje je također razvijen analitički model. Simulacijom su uspoređene radne značajke uređaja s i bez ugrađenog predloženog regenerativnog sustava. Uspoređena je gustoća prikupljene snage i snage koja se gubi u okolinu pri amplitudi od 0,035 m. Maksimalna potencijalna izgubljena gustoća snage iznosi $4,2 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$, dok maksimalna potencijalna prikupljena gustoća snage iznosi $3,5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$. Ustanovljeno je da je najpovoljniji raspon frekvencija podražaja između 1,3 Hz i 8,6 Hz jer su rezonantne frekvencije uređaja 1,4 Hz i 8,5 Hz gdje u tim režimima rada s amplitudom 0,035 m i unutarnjem/vanjskom električnom otporu od 113Ω , uređaj može prikupiti gustoću snage od $0,2 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ odnosno $1,37 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$. Autori su pokazali da se najviše snage može prikupiti kada su unutarnji i vanjski električni otpor jednaki. Za takav slučaj istraživanja uređaj ima učinkovitost konverzije energije 2,3 %. Također je ustanovljeno da sposobnost prikupljanja energije uređaja uvelike zavisi o prijenosnom omjeru planetarnog prijenosnika i masi kotača teretnog vozila. Kada se prijenosni omjer poveća za 30 %, prosječna prikupljena snaga raste za

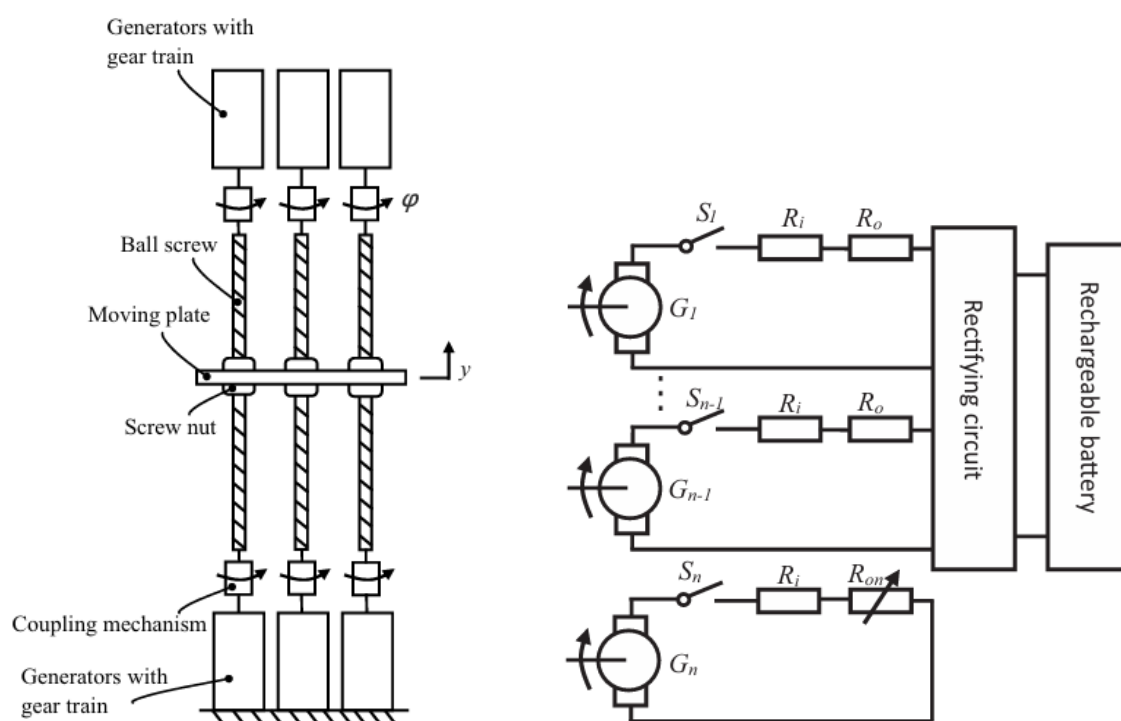
70 %. Nadalje, ako se masa kotača poveća za 30 %, prikupljena snaga se također povećava za 65 %. Unutarnji električni otpor je još jedna veličina koja ima velik utjecaj na prikupljenu snagu gdje se povećanjem unutarnjeg otpora smanjuje količina prikupljene snage. Pri sinusoidnoj pobudi s amplitudom 0,035 m i frekvencijom 7 Hz, prosječna prikupljena snaga je 17 W (pri vanjskom električnom otporu od 113 Ω). Uspoređene su i radne značajke uređaja s razredima kvalitete ceste gdje su dobivene prikupljene snage od 0,33 W, 1,33 W, 5,24 W i 21,3 W za razrede kvalitete ceste B, C, D i E pri brzini kretanja teretnog vozila od 120 km/h.



Slika 3.17 CAD model i izrađeni prototip regenerativnog uređaja [20]

Xie i dr. [21] predložili su regenerativni prigušivač udaraca koji ima funkciju promjene koeficijenta prigušenja tijekom rada ovisno o uvjetima na cesti. Uređaj za prikupljanje energije sadrži više generatora koji su neovisno kontrolirani prekidačima. Jedan od ovih generatora spojen je na podesivi otpornik za fino podešavanje koeficijenta prigušenja dok su ostali generatori spojeni na upravljački i ispravljački krug od kojih svaki regenerira električnu energiju i osigurava konstantan koeficijent prigušenja. Uređaj se sastoji od fiksnog prstena, generatora s prijenosnikom gibanja sa zupčanicima, kugličnih navojnih vretena, matica vretena, spojki, aksijalnih ležajeva, vodilica i pomičnog prstena. Matice su montirane na pomičnu ploču

koja je povezana s pomičnim prstenom putem štapova. Kuglična navojna vretena povezana su s generatorima, a svi generatori su pričvršćeni na fiksni prsten. U sklopu ovjesa, fiksni i pomični prsten uređaja za prikupljanje energije povezani su sa ovjesom tako da mehanizam kugličnog vretena može primati relativni pomak između klackalice i prigušivača. Kroz mehanizam kugličnog navojnog vretena, vertikalni pomak između fiksnog i pomičnog prstena pretvara se u rotaciju kugličnih vretena. Broj generatora ovisi o ukupnom zahtjevu za prigušenjem sustava ovjesa. Uređaj sadrži i električni sklop za kontrolu stanja (uključenja/isključenja) generatora te za regulaciju i pohranu električne energije iz generatora. Slika 3.18 prikazuje pojednostavljeni model uređaja, shemu strujnih krugova generatora električne energije i element (generator) s promjenjivim otporom za reguliranje koeficijenta prigušenja.



Slika 3.18 Model uređaja i shema strujnih krugova generatora [21]

Uređaj je eksperimentalno ispitan na ispitnom stolu (MTS) gdje je korištena sinusoidna pobuda. Unutarnji otpor svakog generatora je 25Ω , a podesivi otpornik ima interval otpora od 0Ω do 100Ω . Ispitivanjem je dobiveno da koeficijent prigušenja raste s povećanjem frekvencije pobude i povećanjem broja uključenih generatora za prikupljanje snage. Nadalje, koeficijent prigušenja opada s povećanjem vanjskog električnog otpora. Najveća izmjerena prikupljena snaga iznosi 32 W kada je svih 5 generatora uključeno pri amplitudi uzbude od 20 mm i frekvenciji od 3 Hz .

Singh i Satpute [22] su numerički i eksperimentalno ispitali regenerativni prigušivač udaraca na ovjesu osobnog vozila. Uređaj se sastoji od hidrauličkog dijela za prigušenje udaraca i generatora od permanentnih magneta u obliku diska, polarnih nastavaka i armaturnih zavojnica. U prototipu su korišteni visokoenergetski magneti (NdFeB, Razred-N35) koji su odabrani na temelju dostupnosti i prikladnosti za upotrebu u automobilskim ovjesima. Za unutarnje i vanjske polove korišten je visoko permeabilni čelik 1018. Armatura s četverofaznom bakrenom zavojnicom pomiče se u zračnom rasporu. Metodom konačnih elemenata je provedena analiza gustoće magnetskog polja u rasporu 2D osnosimetričnog modela za dobivanje vanjske i unutarnje debljine polova magneta za maksimalnu gustoću magnetskog polja. Pobuda korištena u eksperimentu je sinusoidnog oblika amplitude 22,6 mm u intervalu frekvencija od 1 Hz do 5,6 Hz uz brzinu kretanja armature od 0,14 m/s do 0,79 m/s što predstavlja očekivane brzine pri prelasku automobila preko uspornika gdje maksimalna prikupljena snaga iznosi 19,53 W. Numeričkim putem uspoređene su radne značajke uređaja pri harmoničnim i stohastičkim pobudama gdje se pokazalo da vršni napon ostvaren u armaturama je od 4 % do 8 % veći kod stohastičkih pobuda.

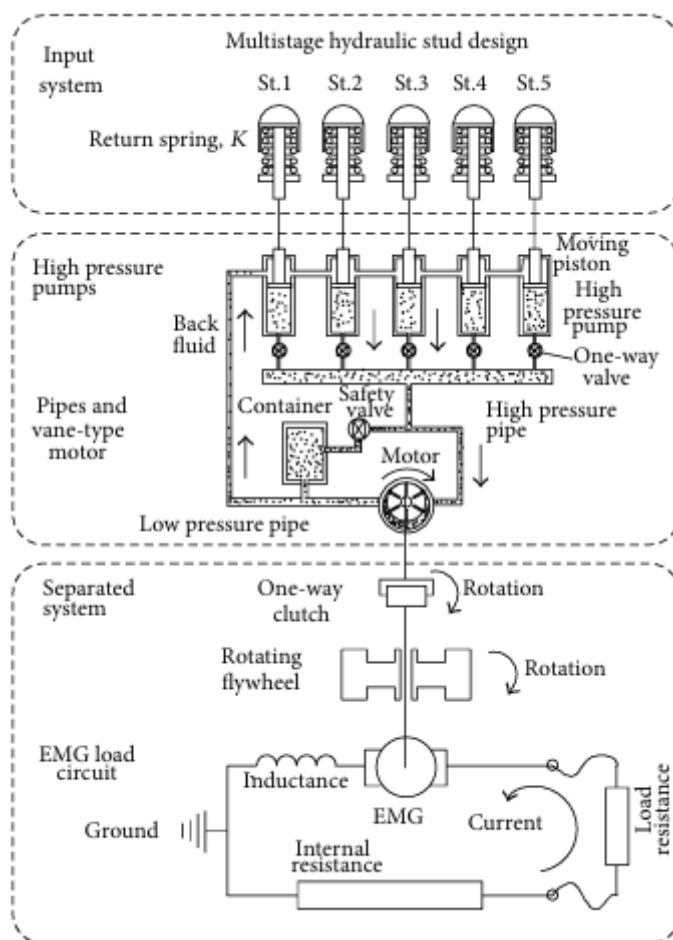
Zuo i dr. [23] predložili su regenerativni prigušivač s četverofaznim linearnim generatorom u svrhu povećanja učinkovitosti i smanjenja mase uređaja. Prigušivač se sastoji od magnetskog sklopa i sklopa zavojnice. Magnetski sklop izrađen je od prstenastih permanentnih magneta (FeNdB Razred-N52) i prstenastih visoko magnetski propusnih odstoynika složenih na šipku od materijala visokog otpora. Magneti su raspoređeni tako da su isti polovi susjednih magneta okrenuti jedan prema drugome kako bi se magnetski tok preusmjerio u radijalnom smjeru. Koncentrični vanjski cilindar izrađen je od visoko magnetski propusnog materijala zbog smanjenja otpora magnetskih petlji kako bi se dodatno povećala gustoća magnetskog toka u zavojnicama. Sklop zavojnice izrađen je od bakrenih zavojnica namotanih na plastičnu cijev. Zavojnice su spojene na ispravljački krug. Provedena je analiza metodom konačnih elemenata u svrhu dobivanja gustoće magnetskog toka u namotajima koristeći 2D osnosimetrični model. Autori su analizom uočili problem odabira čeličnog stupa po kojem se gibaju namotaji zbog zadržavanja magnetskog toka u stupu umjesto u namotajima. Za eksperiment su postavili stup izrađen od aluminija zbog njegove niže magnetske permeabilnosti što je povećalo gustoću magnetskog toka u namotajima za 18 %. Vodeći se istom logikom, koristili su čelični vanjski cilindar da zadrži veću količinu magnetskog toka u uređaju što je povećalo gustoću magnetskog toka u namotajima za 24 %. Prototip predloženog uređaja je izrađen u pola originalne veličine za provedbu eksperimentalnog ispitivanja i to za različite uvjete na cesti koji su simulirani

sinusoidnom pobudom. Eksperimentom su utvrđeni valni oblici regeneriranog napona gdje je utvrđeno da valni oblik regeneriranog napona neće imati istu frekvenciju kao i frekvencija pobude. Testiranjem uređaja pri frekvenciji od 10 Hz i relativnoj brzini od 0,25 m/s (vožnji brzinom 72 km/h po autocesti) dobivena je prikupljena snaga od 2,01 W. Skaliranjem na uređaj u punoj veličini, autori su procijenili da predloženi uređaj može prikupiti od 16 W do 64 W pri relativnoj brzini ovjesa od 0,25 m/s do 0,5 m/s.

Shi i dr. [24] testirali su model hidrauličkog regenerativnog sustava. Uređaj se sastoji od prigušivača i strujnog kruga temeljenog na pretvaraču istosmjerne struje. Prigušivač integrira cjevasti linearni motora s permanentnim magnetima u hidraulički prigušivač s radijalnim otvorima u klipnjači. I klipnjača i ventil imaju otvore u radijalnom smjeru. Postoje dva puta protoka ulja između dvije strane klipa. Ulje teče kroz otvore u klipu i kroz otvore klipnjače i ventila. Rotaciju ventila pokreće koračni motor putem dugog klipa unutar klipnjače. Stoga se područje prigušivanja otvora između klipnjače i ventila regulira podešavanjem kuta rotacije koračnog motora. Uređaj ostvaruje tri razine prigušenja (meko, srednje i kruto). Kada podesivi prigušivač radi u krutom stanju, ulje teče kroz otvore u klipu. Dok radi u mekom i srednjem stanju, ulje teče i kroz otvore klipnjače i ventila. Karakteristike prigušenja sustava opisane su pomoću modela vibracija vozila s dva stupnja slobode. Simulacija je provedena u programskom paketu MATLAB gdje je simulirana vožnja automobila pri brzini od 80 km/h po cesti razreda C u vremenu od 10 s. Utvrđeno je da predloženi uređaj smanjuje vertikalno ubrzanje ovjesa za 17,24 % što poboljšava ugodnost vožnje. S druge strane, opterećenje kotača je povećano za 3,41 % što smanjuje stabilnost vozila na cesti. Uređaj je ispitan i eksperimentalno gdje su potvrđeni rezultati dobiveni simulacijom gdje je vertikalno ubrzanje ovjesa smanjeno za 15,31 %, a opterećenje kotača uvećano za 2,47 %. Utvrđeno je da u optimalnim uvjetima rada uređaj može prikupiti snagu od 10,13 W.

Obeid i dr. [25] razvili su analitički model uspornika koji pomoću hidrauličkog sustava prikuplja energiju. Konstrukcija uređaja sastoji se od nekoliko uzastopnih hidrauličkih pumpi koje pumpaju tekućinu prema zajedničkom hidrauličkom motoru odvojenim ciklusima bez preklapanja. Pumpe imaju sličnu visinu hoda, ali imaju različit radni volumen koji se postupno povećava od prve do posljednje pumpe promjenom površine poprečnog presjeka klipa što znači da će se protok kroz motor postupno povećavati od najniže do najviše vrijednosti kod posljednje pumpe. Fluktuacija u protoku rezultira postupnim ubrzavanjem sustava zamašnjak-generator od mirovanja do maksimalne brzine. Prva pumpa ima najmanji omjer gibanja da bi mogla pokrenuti zamašnjak dok svaka iduća pumpa ima vrijednost omjera gibanja koja je veća od

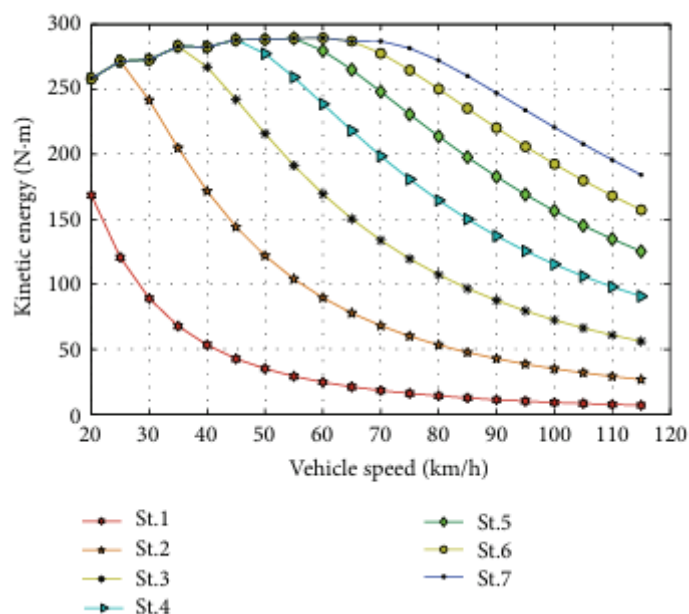
prethodne kako bi dodatno ubrzala zamašnjak. Tip motora fiksnog volumetrijskog tipa je korišten u svrhu postizanja da se izlazna brzina vratila mijenja samo promjenom brzine protoka fluida ovisno o ispusnom stupnju i lokaciji pumpe. Zamašnjak je izravno spojen s vratilom motora pomoću jednosmjerne spojke kako bi se mogao odvojiti od vratila motora kada se brzina motora smanji. Rotor generatora je izravno sastavljen sa zamašnjakom kako bi se smanjila inercija i gubici spojke. Shematski prikaz uređaja dan je na slici 3.19.



Slika 3.19 Shematski prikaz uređaja [25]

Provedbom simulacije uočeno je da je moment tromosti zamašnjaka jedan od ključnih parametara pri modeliranju uređaja zbog njegovog utjecaja na učinkovitost pretvorbe energije. Još jedan važan parametar je vremenski interval opterećenja gdje se s povećanjem vremena opterećenja povećava i količina prikupljene energije zbog čega uređaj sadrži više stupnjeva klipova koji preuzimaju energiju vozila. Slika 3.20 prikazuje količinu prikupljene energije ovisno o brzini vožnje vozila. Uočeno je da se za brzinu od 20 km/h do 30 km/h, maksimalna prikupljena energije ostvaruje u dva stupnja, dok je za brzinu vozila od 70 km/h potrebno sedam stupnjeva za regeneraciju maksimalne energije. Utvrđeno je da ova konstrukcija regenerativnog

uspornika po jednom prelasku automobila (prosječne mase od 1000 kg pri brzini vožnje između 30 i 50 km/h) može prikupiti 4000 W snage.



Slika 3.20 Količina prikupljene energije u ovisnosti o brzini kretanja vozila [25]

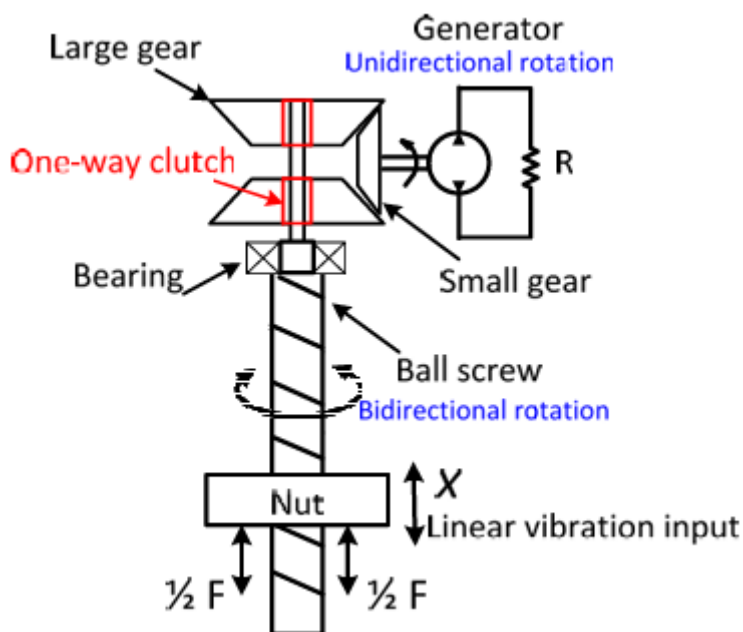
Tang i dr. [26] predstavili su model i optimizaciju tubularnih linearnih uređaja za prikupljanje energije. Uređaji se sastoje od sklopova magneta i zavojnica koji pretvaraju energiju vibracija u električnu energiju kada se relativno kreću jedan u odnosu na drugi. Parametri kao što su debljina magneta i debljina zavojnica u radijalnom smjeru, optimizirani su metodom konačnih elemenata kako bi se postigla visoka gustoća snage i prigušenja. Modelirane su četiri različite konfiguracije: jednoslojni aksijalni magneti i čelični odstoynici, dvoslojni aksijalni magneti i čelični odstoynici, jednoslojni aksijalni i radijalni magneti, dvoslojni aksijalni i radijalni magneti. Istraživanjem se pokazalo da je optimizacijom parametara moguće povećati gustoću snage do 3,8 puta u usporedbi s početnom konstrukcijom Zuoa i suradnika [23], a da dvoslojna konfiguracija s radijalnim i aksijalnim magnetima može poboljšati gustoću snage do 5,6 puta. Prototip koji koristi standardni aksijalni NdFeB magnet izrađen je te je eksperimentalno testiran sinusoidnom pobudom pri frekvenciji od 10 Hz i amplitudi od 2,54 mm uz jednak unutarnji i vanjski električni otpor (40Ω). Rezultati eksperimenta pokazali su da prototip vanjskog promjera 63,5 mm i komprimirane duljine 305 mm može prikupiti snagu od 2,8 W pri relativnoj brzini od 0,11 m/s i osigurati koeficijent prigušenja od 940 Ns/m.

Gao i dr. [27] predložili su uređaj za prikupljanje energije vibracija tračnica. Modelirano je pet konfiguracija od kojih su četiri rezonantne konfiguracije, a peta konfiguracija je

magnetsko-levitacijska. Svaki odjeljak rezonantnog uređaja uključuje jednu konfiguraciju koja zauzima jednu četvrtinu uređaja. Uređaj je montiran na tračnicu s tri pravokutna magneta. Rezonantni uređaj sastoji se od magneta, zavojnice, opruge, konektora, izolatora, ključa, nosača, čahure, opruge i pozicionera. Izolator je izrađen od aluminijske zbog vrlo niske propusnosti magnetskog toka i stoga služi kao zaštita između magneta i čeličnih tračnica. Obje strane opruga su učvršćene u stup i čahuru gdje je opruga posebno konstruirana da bude što mekša kako bi se postigla niskofrekventna rezonancija. Zavojnice (karakterizirane brojem zavoja, visinom i vanjskim/unutarnjim promjerima) fiksirane su prstenasto raspoređenim razmacima koji su podesivi za kompenzaciju tolerancije montaže. Magnetsko-levitacijski sakupljač sastoji se od statičkih magneta, plutajućih magneta, aluminijske čahure, višerednih višeslojnih zavojnica, stezaljke dna tračnice i vijaka. Ispitivanje je provedeno na ispitnom stolu s frekvencijom od 2 Hz do 7 Hz i amplitudi od 0,2 mm do 2 mm. Magnetsko-levitacijski uređaj može prikupljati širokopojasne niskofrekventne (3-7 Hz) interakcije kotača i tračnica s pomakom tračnice od 0,6 mm do 1,2 mm dok rezonantni uređaj prikuplja najviše energije pri svojoj rezonantnoj frekvenciji od 6 Hz. Za rezonantni uređaj, prikupljena snaga od 119 mW i izlazni vršni napon od 2,32 V postižu se s pomakom tračnice od 1,2 mm, visinom zavojnice od 48 mm, vanjskim otporom od 45 Ω , induktivitetom zavojnice od 105,572 mH i 3000 zavoja.

Liu i dr. [28] su numerički i eksperimentalno testirali uređaj za prikupljanje vibracija ovjesa automobila. Predloženi prigušivač sastoji se od tri dijela: kugličnog navojnog vretena, zatvorenog pretvarača mehaničkog gibanja (MMR-Mechanical Motion Rectifier) i generatora. Kuglično navojno vreteno i matica koriste se za prihvatanje vibracija ovjesa i pretvorbu dvosmjernog pravocrtnog gibanja matice u dvosmjernu rotaciju kugličnog navojnog vretena. Matica se pomiče duž vodilice u kućištu kugličnog navojnog vretena. U usporedbi s mehanizmom zupčanika sa zupčastom letvom kuglično navojno vreteno ima manji povratni udar prije MMR-a što rezultira većim stupnjem djelovanja prikupljanja energije. S druge strane, kontakt matice i kugličnog navojnog vretena uzrokuje dodatno trenje. Kako bi se smanjilo trenje, koristi se visoko podmazano vreteno s velikim korakom navoja. Zatvoreni mehanički ispravljač gibanja (MMR) sastoji se od vratila kugličnog navojnog vretena, dvije jednosmjerne kočione spojke, dva velika i jednog malog koničnog zupčanika s kosim zubima, ležajeva i brtvenih prstenova za podmazivanje. Dvije jednosmjerne spojke ugrađene su između vratila i velikih koničnih zupčanika. Ako se osovina vijka okreće suprotno od kazaljke na satu, donja spojka se uključuje i donji zupčanik postaje pogonski zupčanik koji pokreće generator da se okreće u smjeru kazaljke na satu. Tijekom tog vremena, gornja spojka je isključena i gornji

zupčanik ne prenosi moment. Time se postiže da se generator uvijek okreće u jednom smjeru bez obzira na to rasteže li se predloženi prigušivač ili sabija. Pošto je uređaj predviđen za uporabu kod teretnih vozila ili autobusa, odabran je vanjski električni otpor koji je devet puta veći od unutarnjeg zbog povećanja ekvivalentnog prigušenja tako da odgovara ciljanim tipovima vozila. Na slici 3.21 prikazan je model predloženog prigušivača.



Slika 3.21 Model predloženog prigušivača [28]

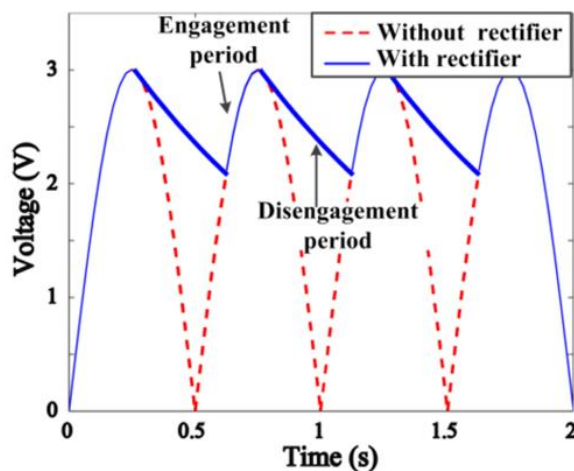
Prototip je izrađen i ispitan eksperimentalno pri sinusoidnoj pobudi u intervalu frekvencija od 1 Hz do 10 Hz i amplitudama od 0,5 mm do 5 mm. Autori su variranjem vanjskog električnog otpora uspjeli postići zadovoljavajući koeficijent prigušenja za teretna vozila. Otkriveno je da smanjivanjem vanjskog otpora, koeficijent prigušenja raste. Pri frekvenciji pobude od 4 Hz, amplitudi od 2 mm i ukupnom električnom otporu od 11.1Ω , uređaj je prikupio prosječnu snagu od 2,25 W. Ukupna učinkovitost uređaja na ispitnom stolu se kreće od 25,6 % do 42,4 % zavisno o frekvenciji, amplitudi i električnom otporu gdje učinkovitost raste s povećanjem amplitude i frekvencije i smanjenjem vanjskog električnog otpora. Najveća mehanička učinkovitost uređaja je postignuta pri vanjskom otporu od 3Ω , frekvenciji od 4 Hz i amplitudi od 2 mm i iznosi 70,1 %. Autori su usporedili učinkovitost uređaja s ekvivalentnim uređajem s mehanizmom zupčanika i zupčaste letve gdje je uočeno da pri nižim amplitudama vibracija mehanizam s kugličnim navojnim vretenom postiže veće učinkovitosti dok pri višim amplitudama veću učinkovitost ostvaruje mehanizam sa zupčanikom i zupčastom letvom. Nadalje, pri nižim vanjskim električnim otporima mehanizam s kugličnim navojnim vretenom ima veću učinkovitost gdje povećanjem otpora njegova učinkovitost znatno opada, dok kod mehanizma

sa zupčanicom i zupčastom letvom učinkovitost također opada, ali u puno manjoj mjeri gdje tada njihova učinkovitost postaje veća. Konačno, predloženi prototip uređaja montiran je na vozilo i ispitan. Brzina vožnje vozila je iznosila 65 km/h u vremenu od 8 sekundi i vanjski električni otpor je iznosio 10 Ω i 3 Ω . Pri otporu od 10 Ω prikupljeno je 13,3 W snage, dok pri otporu od 3 Ω prikupljeno je 24,7 W snage u 8 sekundi vožnje.

Yang i dr. [29] predložili su uređaj s istom konstrukcijom, ali različitim parametrima za prikupljanje vibracija šasije bicikla. Uređaj je montiran ispod sjedala i služi za napajanje LED svjetala bicikla. Dio za pretvorbu dvosmjernog rotacijskog gibanja u jednosmjerno je jednak kao u [28] s dodatkom spojke između izlaznog vratila zupčanika i vratila generatora gdje se ovisno o brzini vrtnje vratila spojka uključuje odnosno isključuje tako da se produlji vrijeme prikupljanja snage i samim time poveća ukupna količina prikupljene snage što je to prikazano na slici 3.22. Izvršene su simulacije gdje je ustanovljeno da se s povećanjem električnog otpora, koeficijent prigušenja smanjuje. Za izrađeni model, pri električnom otporu od 50 Ω koeficijent prigušenja je 1350 Ns/m, dok je za otpor od 200 Ω koeficijent prigušenja 500 Ns/m. Uređaj je i eksperimentalno testiran za sinusoidnu pobudu amplitude 10 mm i za frekvencije od 1 Hz do 2,5 Hz. Dobiveno je da je napon generiran eksperimentalnim putem 18 % niži od napona dobivenog simulacijom za otpor od 200 Ω zbog zanemarivanja trenja i udarne sile kod modeliranja. Najveća prikupljena snaga iznosi 0,491 W za frekvenciju od 2,5 Hz i otpor od 50 Ω . Učinkovitost uređaja ovisi o frekvenciji i električnom otporu gdje za frekvenciju od 1,5 Hz i rasponu otpora od 50 Ω do 200 Ω , uređaj postiže učinkovitost od 31,7 % do 52,8 %. Uređaj je montiran na bicikl s vozačem mase 60 kg pri brzini vožnje od 2 m/s. Test je napravljen tako da je vozač s biciklom prešao preko uspornika i mjeren je generirani napon. Pokazano je da se skokovi u generiranom naponu jasno vide pri kontaktu svakog kotača i uspornika te u trenutcima kada kotači gube kontakt s uspornikom. Izračunata je maksimalna prikupljena snaga i iznosi 0,313 W.

Demetgul i Guney [30] su modelirali i eksperimentalno testirali hibridni regenerativni uređaj koji koristi hidrauličke i elektromagnetske mehanizme prigušivanja. Uređaj se sastoji od dva dijela (konduktor i translator). Konduktor se sastoji od cilindra i namotaja dok se translator sastoji od klipa s magnetima i jezgrama. Veza između prigušivača i hidrauličkog kruga te ostalih hidrauličkih komponenti osigurana je pomoću samozatvarajućih spojnica. Dvosmjerno kretanje cilindra uređaja pretvoreno je u jednosmjernu rotaciju pomoću četiri nepovratna ventila gdje je postignut jednosmjerni protok. Uz generator je ugrađen i multiplikator za povećanje brzine vrtnje vratila generatora. Hidraulički krug sadrži akumulator koji stabilizira udare

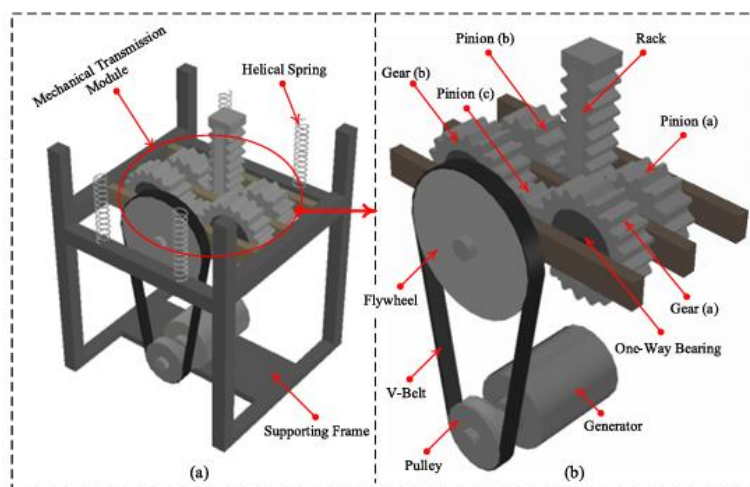
opterećenja. Kod elektromagnetskog dijela odabrana je konfiguracija s mirujućim namotajima i pokretnim magnetima. Za materijal magneta odabrani su sinterirani neodimijski magneti N35. Uređaj je eksperimentalno ispitan pri brzinama od 0,004 m/s, 0,0045 m/s i 0,005 m/s i amplitudom od 15 mm. Prikupljena snaga iznosi 0,25 W, 0,4 W odnosno 0,66 W pri vanjskom električnom otporu hidrauličkog dijela od 80 Ω i 2 Ω kod elektromagnetskog dijela.



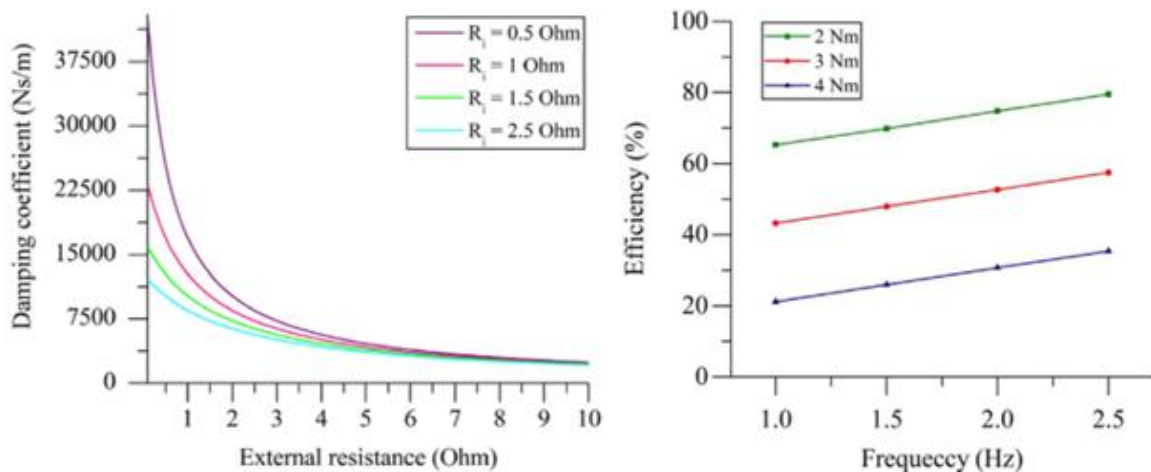
Slika 3.22 Usporedba generiranog napona ovisno o vremenu kod uređaja sa spojkom i bez nje [29]

Zhou i dr. [31] predložili su regenerativni ovjes za osobna vozila. Struktura uređaja sastoji se od prigušivača, opruge i sakupljača energije. Sakupljač energije ima dva dijela: pogonski i statorski dio. Pogonski dio se sastoji od tri zavojnice namotane oko okvira, a stator se sastoji od permanentnih magneta (FeNdB Razred-N40), željeznih prstenova, aluminijske cijevi i željeznog cilindra. Okvir sa zavojnicama ugrađen je između cilindra i magneta. Nadalje, svaka se zavojnica kreće u odgovarajućem području magnetskog polja kako bi se održalo isto radno okruženje. Željezni prstenovi umetnuti su između svakog magneta. Cilindar je postavljen izvan okvira koji se koristi za vođenje magnetskog toka. Opruga, koja se koristi za osiguravanje krutosti ovjesa, ugrađena je između gornjeg i donjeg poklopca. Izrađen je dinamički model (s dva stupnja slobode gibanja) četvrtine vozila s ugrađenim uređajem. Uređaj je numerički i eksperimentalno ispitan sa sinusoidnom pobudom amplitude od 1 mm do 3 mm, frekvencijama od 3 Hz do 10 Hz, vanjskim električnim otporom od 10 Ω do 60 Ω i unutarnjim električnim otporom od 20 Ω . Za amplitudu od 2 mm i frekvenciju od 10 Hz, uređaj može prikupiti snagu od 1,08 W, 0,92 W, 0,74 W i 0,64 W za vanjske električne otpore od 10 Ω , 20 Ω , 40 Ω i 60 Ω . Učinkovitost uređaja se kreće od 42 % do 67 % zavisno o frekvenciji. Pokazalo se da je maksimalna učinkovitost sustava pri frekvenciji od 6 Hz.

Azam i dr. [32] izradili su prototip regenerativnog ležećeg policajca koji se temelji na mehanizmu zupčanika i zupčaste letve. Uređaj se sastoji od četiri dijela: polukružnog elementa koji prima pobudu, dio za pretvorbu linearnog gibanja u jednosmjerno rotacijsko, generatora i jedinice za pohranu prikupljene energije. Kada automobil pređe preko ležećeg policajca, on se pomiče prema dolje zbog težine vozila i tada dvostrana zupčasta letva, pričvršćena za ležeći policajac, pokreće zupčanike te se gibanje dalje prenosi na element za pretvorbu gibanja. U međuvremenu su opruge koje su pričvršćene za ležeći policajac sabijene. Nakon prelaska automobila, opruge će se vratiti u početno stanje, vraćajući ležeći policajac i letvu u prvobitni položaj. Dvosmjerno rotacijsko gibanje pretvara se u jednosmjerno preko jednosmjernih ležajeva. Dio za pretvorbu gibanja sadržava dva jednosmjerna ležaja, tri vratila, dva manja gonjena zupčanika, dva veća pogonska zupčanika i jedan najmanji zupčanik koji je spojen sa zamašnjakom koji prenosi snagu na generator preko remena. Zamašnjak služi za smanjenje fluktuacija vibracija kod prijenosa momenta na generator. Za generator je odabran motor istosmjerne struje bez četkica zbog povećanja učinkovitosti prikupljanja energije i da se smanji gubitak materijala (bakra) u svrhu produljenja vijeka trajanja uređaja. Trodimenzionalni CAD model prikazan je na slici 3.23. Provedeno je numeričko ispitivanje uređaja gdje je ustanovljeno da pri amplitudi od 60 mm i frekvenciji od 2,5 Hz maksimalna prikupljena snaga iznosi 324 W, a prosječna snaga iznosi 13,51 W. Utvrđene su ovisnosti koeficijenta prigušenja pri različitim unutarnjim i vanjskim otporima kao i učinkovitost uređaja u ovisnosti o frekvenciji i otporu koji su prikazani na slici 3.24. Prototip je izrađen i eksperimentalno ispitan pri amplitudi od 60 mm i frekvenciji od 1 Hz. Prosječna prikupljena snaga dobivena eksperimentom iznosi 11,99 W, a učinkovitost uređaja je 66,6 % što pokazuje sličnosti u usporedbi s numeričkim rezultatima.



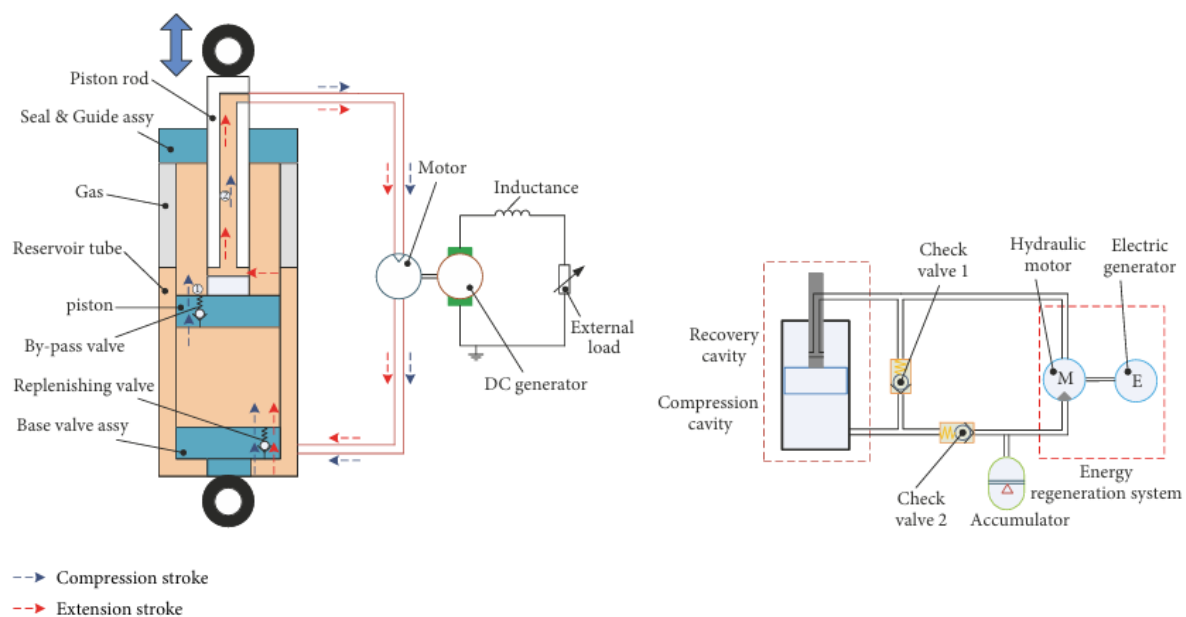
Slika 3.23 Izometrijski prikaz mehanizma za pretvorbu gibanja [32]



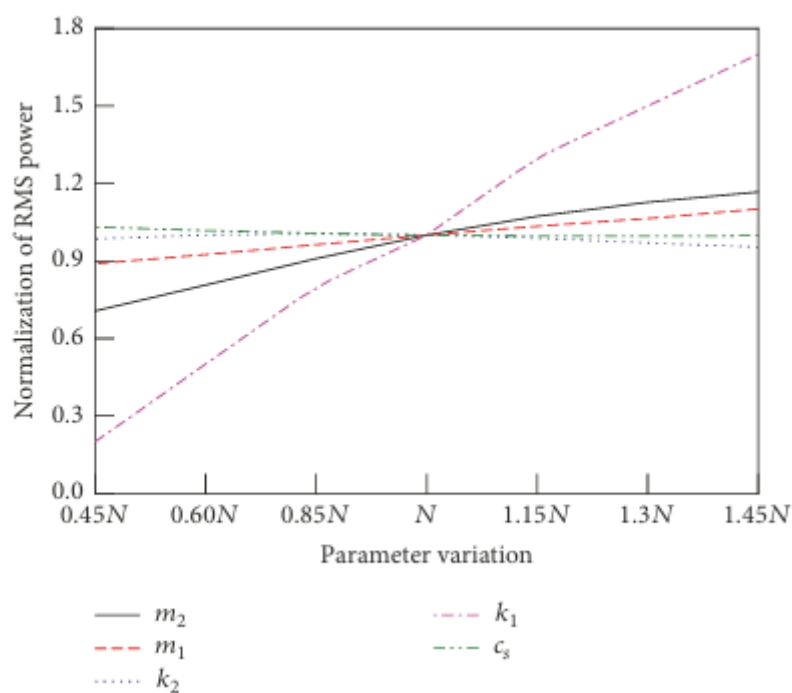
Slika 3.24 Prikaz ovisnosti koeficijenta prigušenja o otporima i učinkovitosti o frekvenciji i otporu [32]

Zou i dr. [33] razvili su hidraulički regenerativni prigušivač za osobna vozila. Uređaj se može podijeliti na tri cjeline: mehanički dio koji se sastoji od cilindra i dijela klipnjače, hidraulički ispravljač koji se sastoji od akumulatora, hidrauličkog motora, cjevovoda i konačno dio za regeneraciju energije koji se sastoji od generatora i ispravljačkog kruga. Klipnjača je šuplja tako da tekućina može teći do hidrauličkog motora. Uređaj sadrži tri cijevi koje uključuju cijev za povrat, kompresijsku cijev i cijev spremnika. Hidraulički motor je spojen s generatorom putem vratila. Tijekom takta ekspanzije, tekućina teče do šuplje klipnjače, zatim kroz šuplji kanal u klipnjači, duž cjevovoda do hidrauličke pumpe, kroz hidraulički motor do cijevi spremnika i prolazi kroz ventil za nadopunjavanje natrag u kompresijsku komoru. U ovom taktu, većina energije se može iskoristiti, a vanjsko opterećenje se može prilagoditi kako bi se postigao poluaktivni ovjes. Izrađen je model hidrauličkog sustava i model četvrtine ovjesa s dva stupnja slobode s ugrađenim uređajem. Numeričkom simulacijom ispitan je utjecaj parametara na količinu prikupljene energije (slika 3.25). Parametar m_1 predstavlja neovješenu masu, m_2 je ovješena masa, k_1 je konstanta opruge gume, k_2 je konstanta opruge ovjesa i c_s je koeficijent prigušenja. Zaključeno je da količina prikupljene snage najviše ovisi o konstanti opruge gume te zatim o ovješenoj i neovješenoj masi. Koeficijent prigušenja i konstanta opruge ovjesa imaju vrlo blag utjecaj na prikupljenu energiju. Provedena je i optimizacija parametara s funkcijom cilja da se prikupi najviše snage moguće bez ugrožavanja prigušenja sustava. Parametri koji su optimirani su vanjski električni otpor i pomak hidrauličkog motora. Pobuda je prikupljena mjerenjem vibracija ovjesa vožnjom po cesti u svrhu dobivanja što realističnijeg rezultata. Algoritam korišten za optimizaciju je više-otočni genetski algoritam (MIGA). Optimizacijom je pokazano da je poluaktivna kontrola ovjesa moguća s predloženim uređajem

i dobivene su optimalne vrijednosti otpora i pomaka hidrauličnog motora u svrhu dobivanja najveće moguće prikupljene energije.



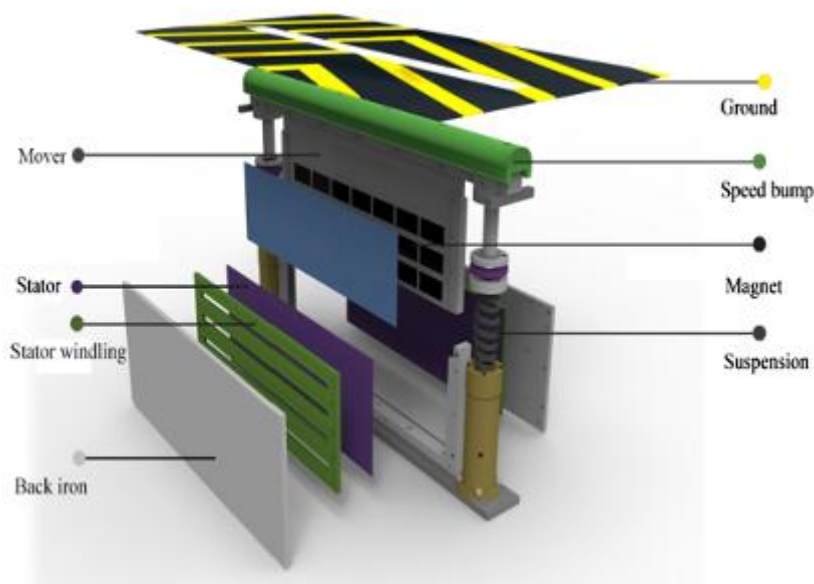
Slika 3.25 Smjer kretanja tekućine i shematski prikaz uređaja [33]



Slika 3.26 Utjecaj parametara na normaliziranu srednju prikupljenu snagu [33]

Zhang i dr. [34] predložili su regenerativni uspornik na ulazi i izlazu tunela za napajanje malih elektroničkih uređaja u tunelu. Uređaj sadrži četiri dijela: dio za prihvatanje pobude, dio za prijenos gibanja, dio za generiranje energije i dio za pohranu prikupljene energije. Kada vozila

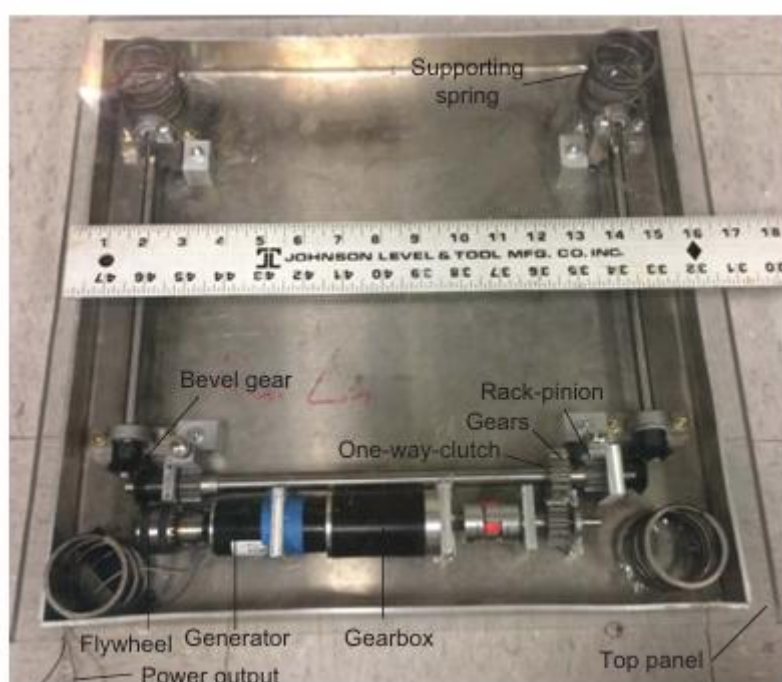
prelaze preko ležećih policajaca, unose mehaničku energiju koja pomiče uspornik prema dolje uslijed svoje težine. U međuvremenu, opruge, povezane s ležećim policajcem, sabijaju se do kraja hoda i akumuliraju energiju. Nakon prelaska kotača, ležeći policajac se vraća u svoj izvorni položaj uslijed djelovanja opruga. Linearni alternator generatora sastoji se od ploče, statora, statorskog namota, magneta (NdFeB Razred-N52) i potpornog željeza (slika 3.27). Magneti su ugrađeni u utore na ploči koja je spojena s ležećim policajcem. Namotaji statora su nekoliko slojeva bakrenih zavojnica koje su pričvršćene na statore. Dva potporna željeza nalaze se na dvije strane statora kako bi vodila magnetsko polje i spriječila njegov gubitak iz sustava. Kada se magnet pomiče, prema Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije, u namotajima statora se generira inducirana struja s promjenjivim magnetskim poljem, a struja je proporcionalna promjeni magnetskog toka. Kako bi se maksimizirale razlike u varijaciji toka i pojačao učinak elektromagnetske indukcije, u njih su postavljena tri niza permanentnih magneta s četiri kruga namota pričvršćenih na stator. Električna struja koju generira modul za generiranje dovodi se u modul za pohranu energije. Prototip je izrađen i ugrađen u tlo te ispitan prelaskom automobila preko uređaja. Automobil odabran za eksperiment je Volkswagen TUREG mase 2255 kg s brzinom vožnje od 20 km/h, 30 km/h i 40 km/h. Provedbom ispitivanja utvrđeno je da uređaj može generirati maksimalni napon od 194 V odnosno prosječni napon od 55,2 V pri brzini vožnje od 40 km/h.



Slika 3.27 Dijelovi predloženog uređaja [34]

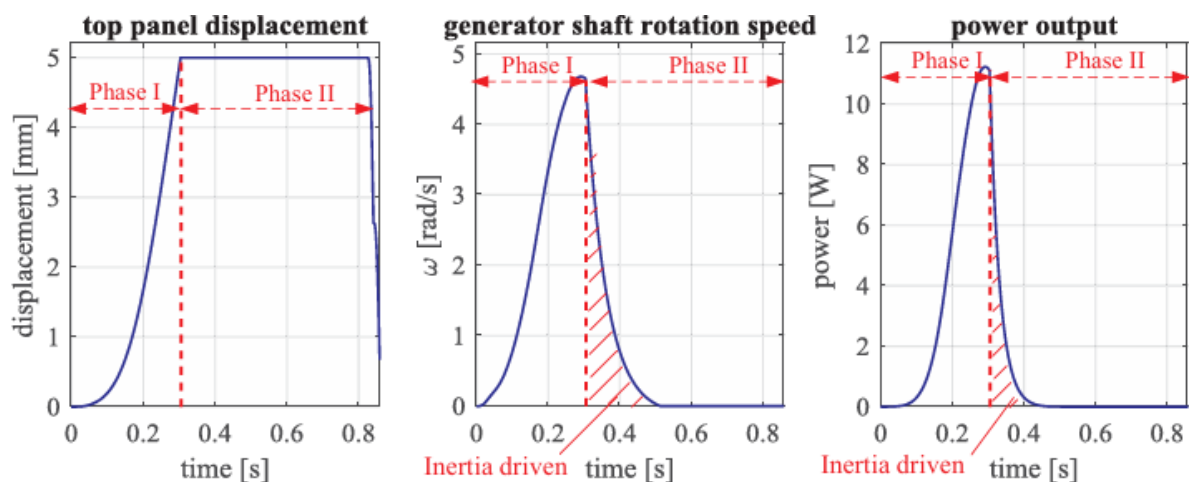
Liu i dr. [35] predstavili su regenerativni uređaj ugrađen u nogostup koji prikuplja energiju proizvedenu ljudskim hodom. Poklopac uređaja se pomiče put dolje kada ga ljudska noga

nagazi. Četiri zupčaste letve spojene su s poklopcem i prenose pravocrtno gibanje na cilindrične zupčanike koji pretvaraju pravocrtno gibanje u rotacijsko. Konični zupčanici montirani su s ciljem sinkronizacije vrtnje tri vratila. Kada gornja ploča dosegne svoju granicu pomaka od 6 mm (visina koja ne ometa ugodu šetnje) ili poklopac više ne proizvodi dovoljnu brzinu vrtnje vratila generatora, jednosmjerna spojka se isključuje. U tom trenutku generator se nastavlja rotirati zbog inercije i produljuje se vrijeme prikupljanja energije. Konstrukcija sadrži i zamašnjak koji je pričvršćen na vratilo generatora što produžuje trajanje rotacije. Zamašnjak također omogućuje generatoru da ima kontinuiranu izlaznu rotaciju. Slika 3.28 prikazuje izrađeni prototip predloženog uređaja.



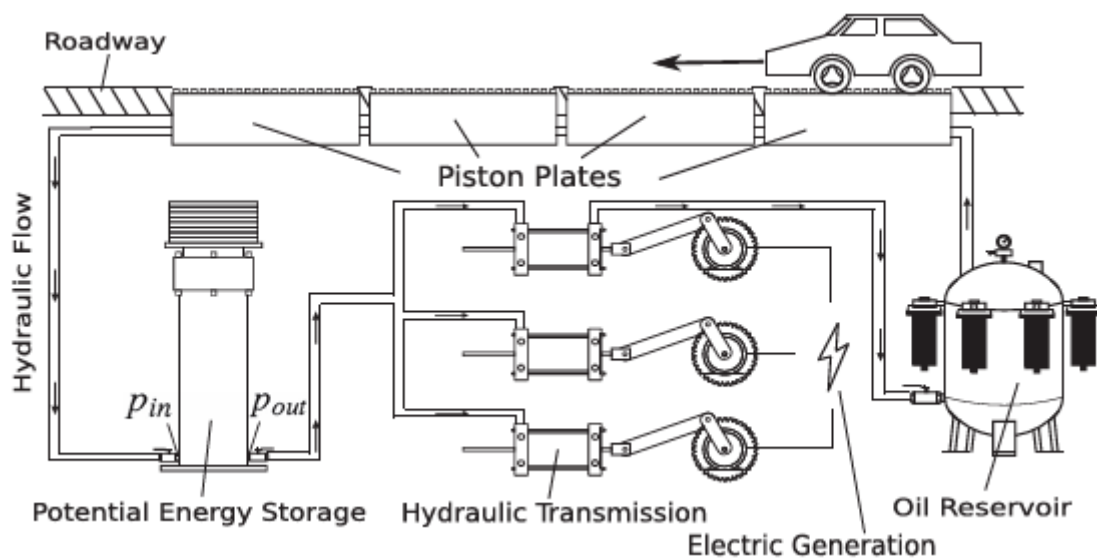
Slika 3.28 Prototip predloženog uređaja [35]

Provedene su simulacije modela uređaja gdje je prikazan utjecaj jednosmjerne spojke na prikupljenu energiju na (slika 3.29). Također, utvrđen je optimalni vanjski električni otpor od $7 \, \Omega$ za maksimalni potencijal prikupljene energije. Pokazano je da ugradnja zamašnjaka pozitivno utječe na prikupljenu energiju pri svim vanjskim električnim otporima. Prototip uređaja je izrađen i eksperimentalno ispitan prelaskom čovjeka (mase 80 kg) preko uređaja. Testiranjem uređaja prikupljena je prosječna snaga od 3,6 W i maksimalna snaga od 12 W u intervalu od 0,5 sekundi. Učinkovitost uređaja iznosi 50 %.



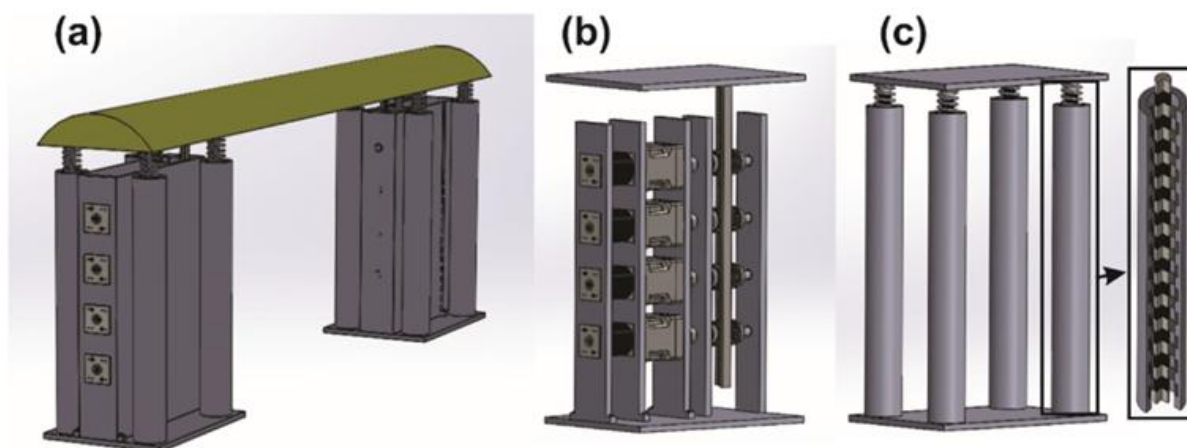
Slika 3.29 Utjecaj ugradnje jednosmjerne spojke na brzinu vrtnje vratila i prikupljenu snagu [35]

Ting i dr. [36] razvili su hidraulički uređaj za prikupljanje energije montiran na nizbrdicama u svrhu usporavanja prometa. Uređaj se sastoji od velikog broja klipova koji se prelaskom kotača pomiču put dolje čime tlače tekućinu i guraju je u akumulator. Uloga akumulatora je da ublaži skokove u opterećenju i dovodi konstantnu snagu u hidraulički motor koji pokreće generator. Nakon završenog procesa tekućina se kroz rezervoar vraća u sustav (slika 3.30). Uređaj je ispitan eksperimentalno na način da je izrađeni prototip testiran u realističnoj situaciji prelaska vozila preko uređaja. Ispitivanjem uređaja, dobiveno je da ukupna učinkovitost uređaja iznosi 41,03 %, a maksimalna prikupljena snaga je 920 W. Najveći gubici primijećeni su u cjevovodu gdje učinkovitost iznosi 57,52 %.

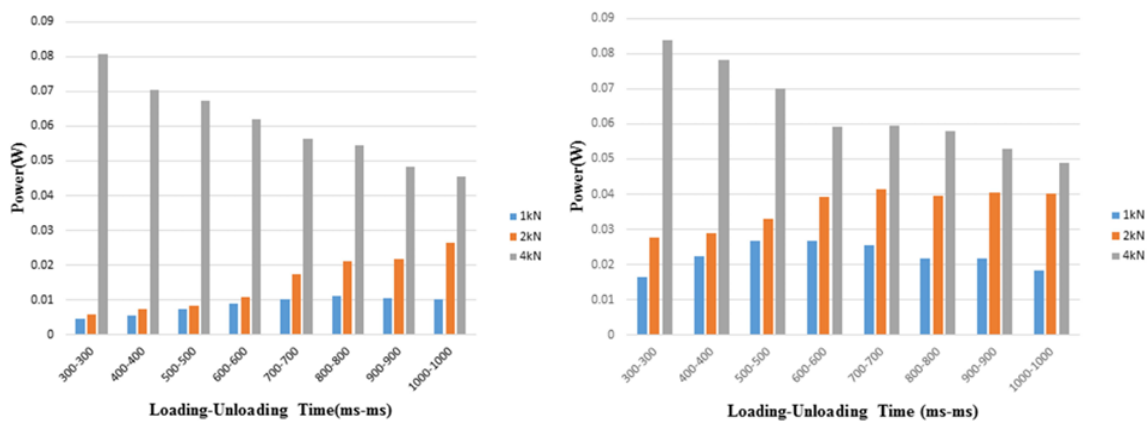


Slika 3.30 Shema uređaja za prikupljanje energije [36]

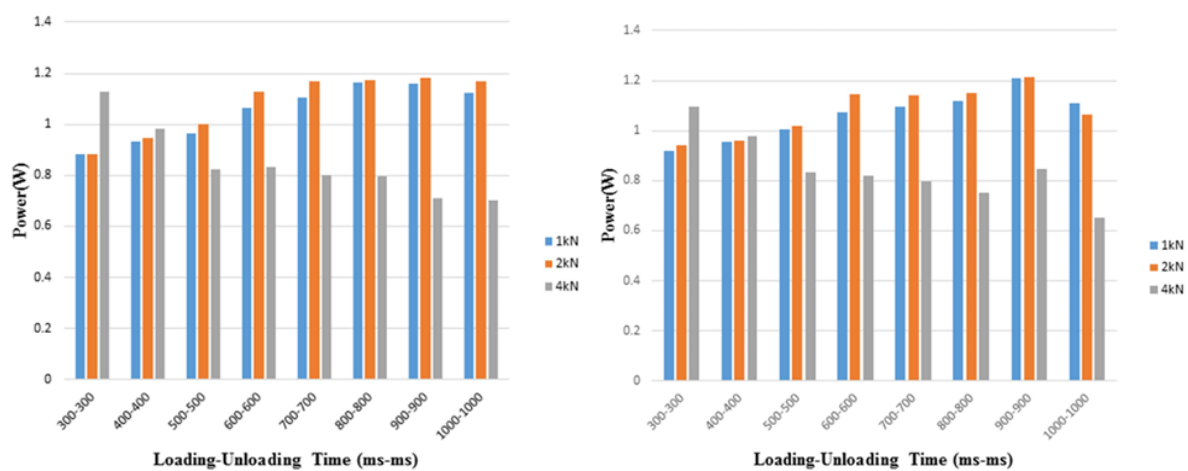
Gholikhani i dr. [37] su predstavili hibridni regenerativni ležeći policajac. Prototip se sastoji od dva mehanizma: linearnog generatora i mehanizma zupčanika i zupčaste letve. Uređaj sadrži osam setova ta dva mehanizma, dok izrađeni prototip uključuje samo jedan set svakog mehanizma što uzrokuje manju izmjerenu prikupljenu snagu. Oba mehanizma sadrže gornju ploču, nosače i tlačne opruge. Mehanizam zupčanika i zupčaste letve uključuje zupčaste letve, zupčanike, jednosmjerne spojke, vratila, planetarni prijenosnik i generator. Mehanizam linearnog generatora uključuje šipke, magnete i zavojnice. Kada kotač vozila dosegne uređaj, on gura gornju ploču prema dolje dok gornja ploča ne dosegne svoju donju granicu. Zatim, kada kotač izgubi kontakt s gornjom pločom, tlačne opruge vraćaju gornju ploču u početni položaj. U mehanizmu zupčanika, letve su izravno pričvršćene na gornju ploču kako bi se istovremeno pomicala. Letve su u zahvatu sa zupčanicima što pretvara pravocрно gibanje u rotacijsko gibanje vratila. Dvije jednosmjerne spojke ugrađene su unutar zupčanika. U mehanizmu linearnog generatora, šipke se izravno spajaju na gornju ploču i pomiču se istovremeno. Šipke podupiru skup permanentnih magneta. Električne zavojnice fiksirane su na maloj udaljenosti od magneta. Ovi relativni pokreti magneta i električne zavojnice uzrokuju električni naboj u žici zavojnice. Slika 3.31 prikazuje model cjelokupnog uređaja i pojedinih mehanizama. Uređaj je eksperimentalno ispitan za svaki mehanizam pojedinačno i za oba mehanizma kada su istovremeno uključeni. Uređaj je opterećen sa silama od 1 kN, 2 kN i 4 kN u vremenu od 300 ms, 400 ms, 500 ms, 600 ms, 700 ms, 800 ms, 900 ms i 1000 ms. Slika 3.32 prikazuje ovisnost prikupljene snage o vremenu opterećenja i intenzitetu opterećenja. Uočeno je da se količina prikupljene energije povećava s intenzitetom opterećenja kao i s povećanjem vremena opterećenja osim za najveće opterećenje gdje vrijednost prikupljene energije opada. Razlog tomu je što pri većim opterećenjima ploča vrlo brzo odradi svoj maksimalni hod i prisutan je dulji interval gdje ploča miruje i uređaj ne prikuplja snagu. Pokazano je i da prisutnost mehanizma zupčanika i letve ima slab utjecaj na količinu prikupljene energije mehanizma linearnog generatora. Slika 3.33 prikazuje količinu prikupljene energije mehanizma zupčanika i letve bez i sa linearnim generatorom. Uočeni trendovi su jednaki kao i kod linearnog generatora s tim da povećani interval mirovanja ploče više utječe na mehanizam zupčanika i letve toliko da prikupljena snaga iznosi manje nego kod manjih opterećenja. Također, ustanovljeno je da je mehanizam zupčanika i letve sposoban prikupiti više snage. Najviša srednja prikupljena snaga mehanizma zupčanika i letve iznosi 1,2 W, a linearnog generatora 0,08 W.



Slika 3.31 Model uređaja s pripadnim mehanizmima [37]

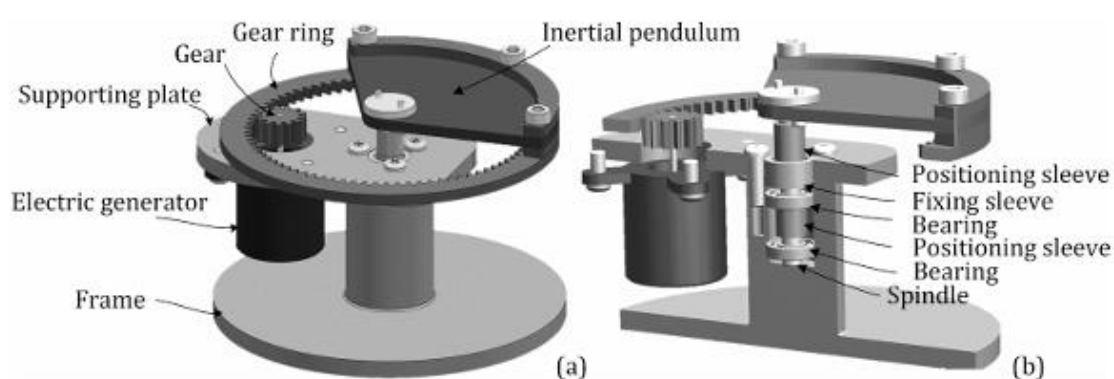


Slika 3.32 Količina prikupljene energije linearnog generatora bez i s mehanizmom zupčanika i letve [37]



Slika 3.33 Količina prikupljene energije mehanizma zupčanika i letve bez i sa mehanizmom linearnog generatora [37]

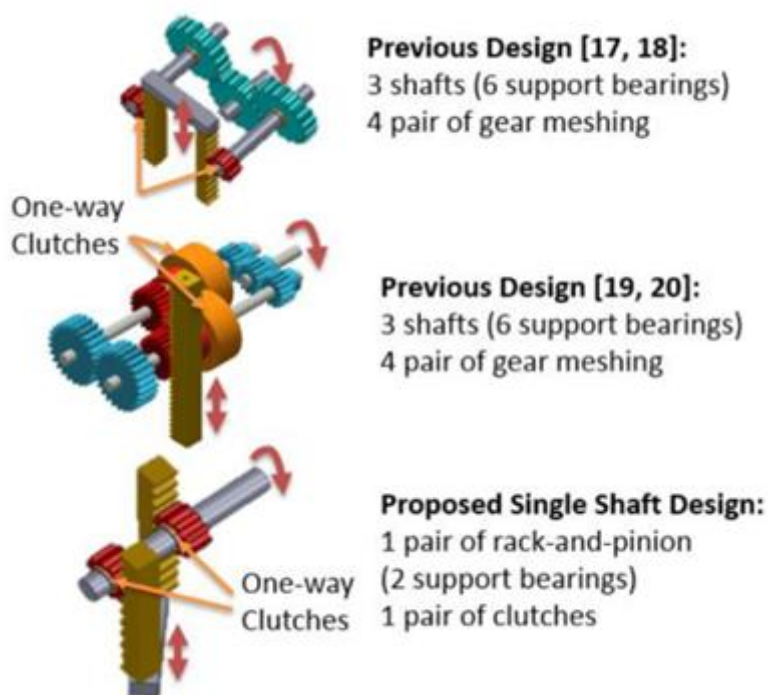
Gao i dr. [38] ispitivali su prototip uređaja za prikupljanje energije vibracija tračnica, a koji bi se mogao koristiti za napajanje senzora na vagonima teretnih vlakova. Uspostavili su kruto-fleksibilni spregnuti dinamički model (validiran terenskim ispitivanjima) teretnog željezničkog prometa s ciljem dobivanja vibracijskog odziva teretnih vagona i tračnica. Predloženi uređaj (slika 3.34) pokreće generator pomoću inercijskog njihala (klatno). Okvir uređaja se obično pričvršćuje na tijelo ili na postolje teretnog vagona. Generator je pričvršćen vijcima na potpornu ploču. Zupčanik je pričvršćen na vratilo pomoću steznog spoja. Okvir, inercijsko njihalo, zupčanik s unutarnjim zubima, dvije zakrivljene podloške, ležaj, rotirajuće vreteno i čahura imaju zajedničku os. Zupčanik s unutarnjim zubima je u zahvatu sa zupčanicom s vanjskim zubima. Ležaj je pričvršćen na vratilo pomoću steznog spoja. Pozicijska čahura je pričvršćena na vratilo pomoću zazora kako bi se definirao položaj ležaja, a njezina uloga je osiguranje da rotirajuća struktura ne padne s cilindričnog udubljenja okvira. Simulacijom razvijenog modela vibracija tračnica i vagona, dobiveno je da je najveći intenzitet vertikalnih vibracija tijela vagona u intervalu frekvencija od 1,3 Hz do 5,27 Hz, a horizontalnih vibracija u intervalu od 1,3 Hz do 2,8 Hz. Najveći intenzitet vertikalnih vibracija okvira vagona je u intervalu frekvencija od 2,16 Hz do 7,5 Hz, a najveći intenzitet horizontalnih vibracija je u intervalu frekvencija od 1,3 Hz do 2,59 Hz. Uređaj je eksperimentalno ispitan na ispitnom stolu i na tijelu vagona s vanjskim električnim otporom od $8\ \Omega$. Na ispitnom stolu pri sinusoidnim frekvencijama ulaza od 2,3 Hz, 2,8 Hz, 3,3 Hz i 3,8 Hz generiran je napon od 1,24 V, 1,84 V, 0,88 V odnosno 1,46 V. Pri ispitivanju na tijelu vagona vibracije su se pokazale intenzivnijima gdje je najveći generirani napon iznosio 4,92 V što odgovara prikupljenoj snazi od 263 mW.



Slika 3.34 Model predloženog uređaja [38]

Lin i dr. [39] poboljšali su konstrukciju za pretvorbu dvosmjernog pravocrtnog gibanja u jednosmjerno rotacijsko na temelju prijašnjih ideja. Predložili su uređaj za prikupljanje vibracija tračnica gdje se dio za pretvorbu gibanja sastoji od jednog vratila, dvije zupčaste letve

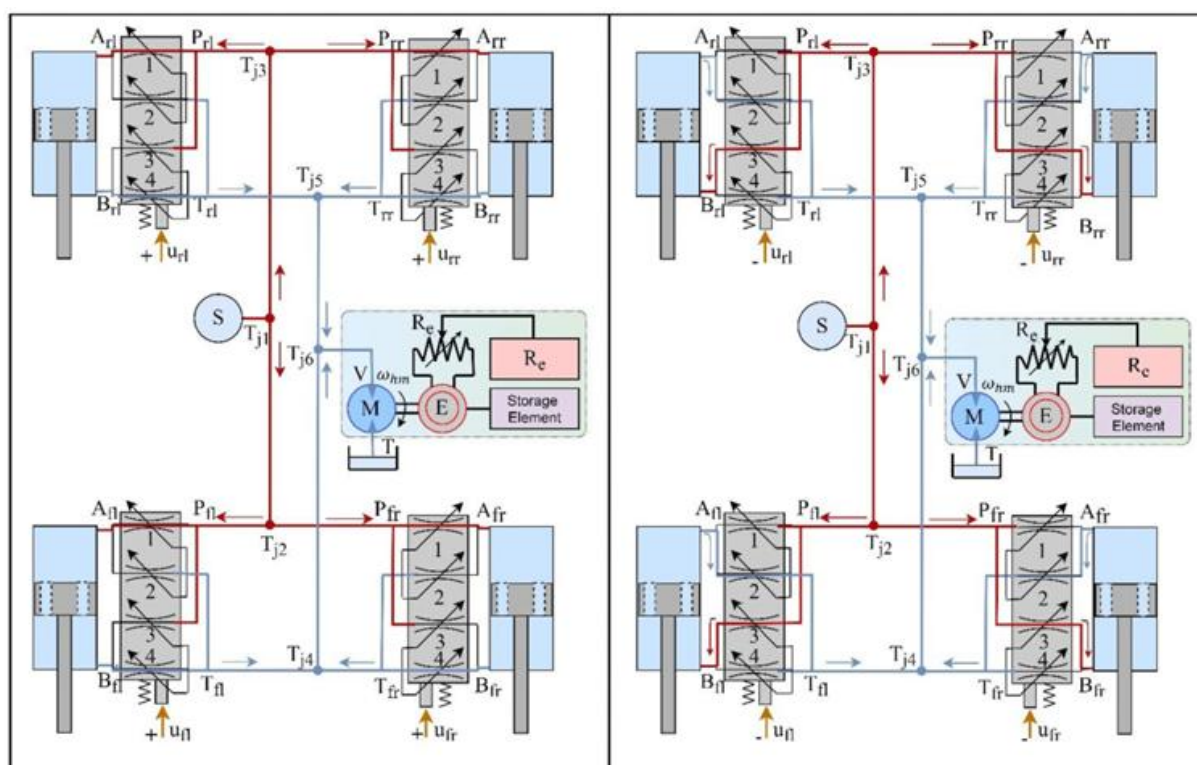
i dva zupčanika s jednosmjernim spojkama (slika 3.35). Kako bi se izbjegla neusklađenost, udarci i dodatno smanjio gubitak trenja, par linearnih vodilica ležajeva koristi se za ograničavanje zupčaste letve kako bi se održao spoj između zupčanika i letvi. Vratilo, generator i zamašnjak montirani su na osnovnu ploču neovisno s fleksibilnim spojnica između svakog dijela kako bi se osigurala odgovarajuća tolerancija i fleksibilnost. Za montažu uređaja, letve moraju biti fiksirane u temeljni sloj ispod tračnica dok je tijelo uređaja montirano preko para pragova. Uređaj je ispitan na ispitnom stolu sa sinusoidnim ulazom amplitude između 1 mm i 5 mm, intervala frekvencija od 1 Hz do 5 Hz i različitim vanjskim električnim otporima od 0,15 Ω do 2 Ω . Ispitivanjem na ispitnom stolu utvrđeno je da se učinkovitost uređaja kreće od 49 % do 74 % gdje se najveća učinkovitost postiže za frekvenciju od 2 Hz, amplitudu od 3 mm i vanjski otpor od 0,19 Ω . Najveća prikupljena snaga iznosi 47 W pri frekvenciji od 5 Hz, amplitudi od 3 mm i vanjskom otporu od 2 Ω .



Slika 3.35 Model predloženog uređaja [39]

Sathishkumar i dr. [40] osmislili su uređaj za prikupljanje energije putem regulacijskog ventila na hidrauličkom prigušivaču aktivnog ovjesa. Izrađen je dinamički model cijelog vozila s 14 stupnjeva slobode. Na slici 3.36 prikazani su smjerovi protoka ulja za dva različita pomaka klipa. Dio sustava za prikupljanje energije sastoji se od hidrauličkog motora i generatora uz hidraulički aktuator, regulacijski ventil i akumulator ulja. Prema izrađenom modelu zaključeno je da su vanjski električni otpor i zapremina hidrauličkog motora važni parametri i stoga su

testirane dvije verzije modela. Prva verzija sadrži konstantnu zapreminu motora i vanjski otpor, dok druga verzija sadrži konstantnu zapreminu motora, ali je vanjski otpor doveden u ovisnost o protoku na ulazu hidrauličkog motora gdje se traži maksimalni protok. Numerička analiza provedena je pri brzini vožnje vozila od 7 m/s, 14 m/s, 21 m/s i 28 m/s na cestama razreda B, C i D. Simulacijom je dobiveno da se količina prikupljene energije povećava s padom kvalitete ceste (razred D) što je i očekivano zbog neravnije površine, pa samim time i intenzivnih vibracija. Nadalje, zbog istih razloga kao i kod pada kvalitete ceste pokazalo se da se količina prikupljene energije povećava s brzinom vožnje. Također, prikupljena energija je veća u slučaju kada se vanjski električni otpor dovede u vezu s maksimalnim protokom na ulazu motora (s ciljem regulacije). Predloženi sustav je prikupio najviše snage od 1303,62 W za uvjete na cesti razreda D, pri brzine vožnje 28 m/s.

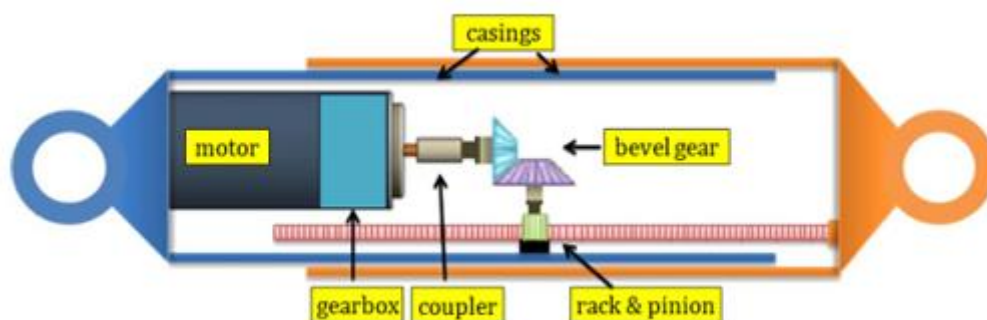


Slika 3.36 Smjer protoka ulja pri pozitivnog i negativnom pomaku klipa [40]

Li i dr. [41] predložili su regenerativni ovjes s mogućnosti kontrole prigušenja za prilagodbu uvjetima na cesti. Pretvorba gibanja iz pravocrtnog u rotacijsko se ostvaruje putem vijčanog mehanizma gdje su korišteni vreteno i matica. Uređaj koristi sinkroni motor s permanentnim magnetima za prikupljanje energije uz filter i ispravljač za pretvorbu izmjenične struje u istosmjernu. Novost ovog sustava je dodatni pretvarač istosmjerne struje koji omogućava pojačavanje ili smanjivanje izlaznog napona kontrolnom jedinicom i to omogućava

kontrolu opterećenja generatora što posljedično kontrolira i prigušenje. Pretvarač istosmjerne struje ima buck-boost topologiju (smanjenje-povećanje napona) s dva različita načina rada: isprekidani i kontinuirani način provođenja struje. Upravljačka jedinica je kontroler opremljen s ADC, QEP (kvadratni impulsni enkoder) i PWM (modulacija širine impulsa) modulom. ADC modul se koristi za dobivanje trofaznih struja, a QEP modul se koristi za dekodiranje signala impulsa za dobivanje brzine i položaja generatora struje. Greška očitavanja se šalje PI kontroleru za dobivanje radnog ciklusa PWM modula koji generira impuls u ispravljač za dobivanje željenog prigušenja. Uređaj je eksperimentalno ispitan sinusoidnom pobudom amplitude 8 mm i intervalom frekvencija od 1,5 Hz do 4 Hz. Najveća prikupljena snaga iznosi 3,36 W i dobivena je pri frekvenciji od 4 Hz. Učinkovitost uređaja se kreće od 65.09 % do 75.24 % gdje najveću učinkovitost sustav postiže također pri frekvenciji od 4 Hz.

Li i dr. [42] modelirali su regenerativni uređaj kojeg su i eksperimentalno ispitali. Uređaj pretvara dvosmjerno pravocrtno gibanje u rotacijsko preko zupčanika i zupčaste letve (slika 3.37). Zbog ograničenja konstrukcije uveden je i par koničnih zupčanika za promjenu smjera izlazne snage. Prije generatora ugrađen je planetarni prijenosnik za povećanje brzine vrtnje vratila generatora. Analizom je utvrđeno da je povećanjem prijenosnog omjera moguće ostvariti veći koeficijent prigušenja uređaja, ali učinkovitost sustava za prijenos gibanja opada. U ovom modelu odabran je prijenosni omjer od 1:50.



Slika 3.37 Model regenerativnog prigušivača [42]

Uređaj je prvo ispitan na ispitnom stolu gdje je najveća prikupljena snaga iznosila 22 W za frekvenciju pobude od 0,5 Hz i amplitude od 30 mm uz vanjski električni otpor od 42 Ω . Pokazano je da uređaj može imati različite koeficijenta prigušenja pri amortiziranju udarca i oporavku za povećanje ugođe vožnje i bolje držanje ceste. Također je utvrđeno da mehanička učinkovitost uređaja ovisi o vanjskom električnom otporu i frekvenciji ulaza. Tako se mehanička učinkovitost kreće od 33 % do 63 % za amplitudu od 10 mm i vanjski otpor od 94

Ω gdje se najveća mehanička učinkovitost postiže na frekvenciji od 1 Hz. Za frekvenciju od 0,5 Hz i vanjski otpor od 94 Ω , učinkovitost uređaja raste od 47 % do 60 % povećanjem amplitude ulaza od 10 mm do 30 mm. Uređaj je također ispitan na cesti gdje je ugrađen u SUV vozilo pri brzini vožnje od 48 km/h i 32 km/h i s vanjskim električnim otporom od 30 Ω (slika 3.38). Najveća prikupljena snaga je 67,5 W odnosno 58,2 W, a srednja prikupljena snaga je 4,8 W odnosno 3,3 W.



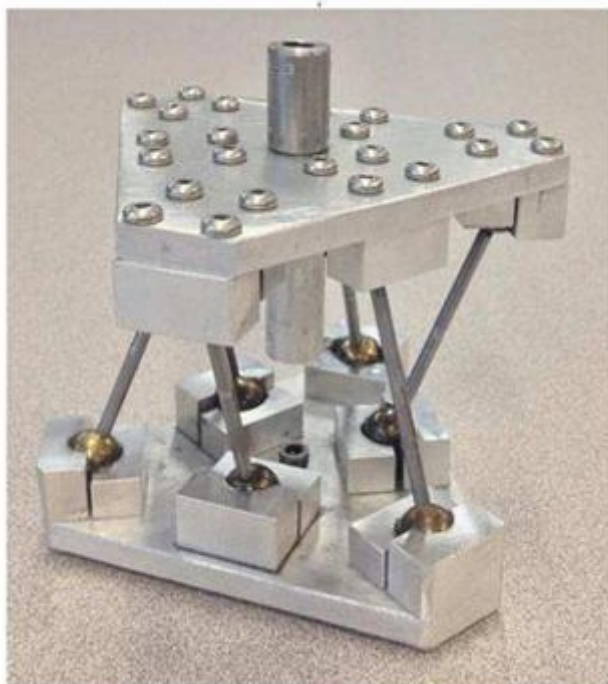
Slika 3.38 Postav testa uređaja na cesti [42]

Khalfan i Imrek [43] ispitali su hidraulički mehanizam pretvore energije primijenjen na ležeće policajce. Najvažnija komponenta sustava je hidraulički akumulator. On se sastoji od mjehura ispunjenog dušikom i prostora izvan mjehura za akumulaciju hidrauličkog ulja koje se zatim ispušta nakon što tlak u akumulatoru dosegne graničnu vrijednost. Osim što se koristi kao komponenta za primanje udara u hidrauličkim sustavima, akumulator također služi kao mehanizam za pohranu energije. Važnost akumulatora je u tome što se energija koju gibajuća vozila generiraju ne može odmah iskoristiti. Da bi akumulator pohranio energiju, fluid se mora pumpati u svoju komoru izvan mjehura i dopustiti da dostigne značajnu razinu tlaka fluida prije nego što se ispusti za bilo kakav koristan rad. Treba napomenuti da, osim potrebnog tlaka fluida, sustav treba dovoljnu količinu hidrauličkog ulja za pokretanje hidrauličkog motora neko vrijeme kako bi se mogla postići pretvorba hidrauličke u mehaničku energiju. Mehanizam

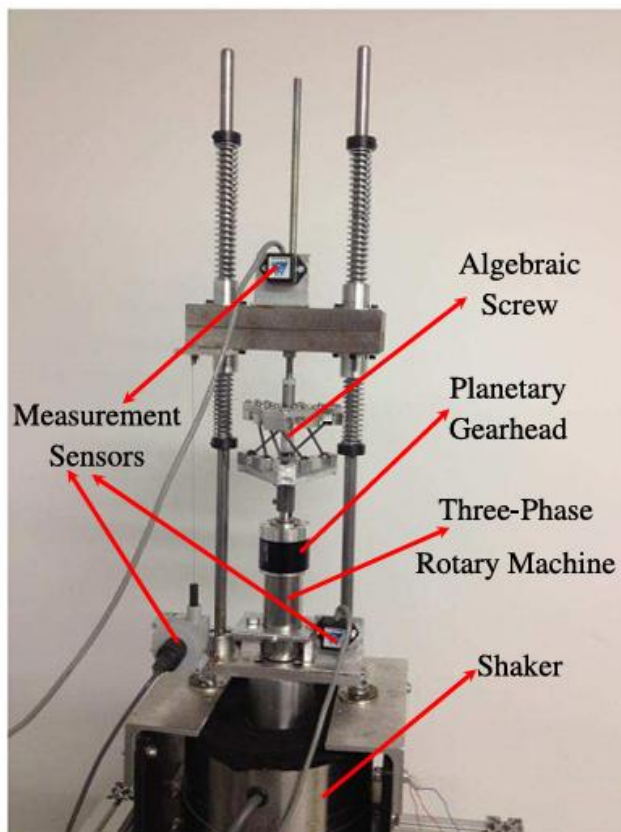
pumpanja je hidraulički cilindar ugrađen na kotač koji prelazi preko neravnine na cesti. Čim kotač napusti neravninu, tlačna opruga namotana na cilindar vraća cilindar za punjenje akumulatora natrag u prvobitni položaj. Cilindar za punjenje ima dva otvora za tekućinu; jedan za ulaz tekućine koji je spojen na hidraulički spremnik, a drugi za omogućavanje zatvorene tekućine da izađe iz akumulatora tijekom drugog silaznog hoda klipa. Kada se klip pomiče prema gore, na ulazu cilindra stvara se vakuum. Ovdje atmosferski tlak potiskuje ulje iz hidrauličkog spremnika u cilindar koji se puni. Kada drugi kotač pritisne klipnjaču, hidrauličko ulje zarobljeno tijekom prvog hoda pumpa se u izlazni otvor akumulatora. U ovaj cilindar ugrađena su dva nepovratna ventila. Prvi služi za sprječavanje povratka ulja (usisanog iz spremnika) tijekom silaznog hoda, dok drugi osigurava da ulje koje teče u akumulator ne curi dok se ne postigne granični tlak. Ispitivanje je razmotrilo pet različitih masa vozila koji prelaze preko uspornika (1000 kg, 2000 kg, 3500 kg, 5000 kg, 7000 kg) uz pet različitih brzina spuštanja klipa (0,05 m/s, 0,075 m/s, 1 m/s, 1,25 m/s, 1,5 m/s). Traženi parametri bili su brzina vrtnje hidrauličkog motora i vrijeme potrebno da tlak u akumulatoru s maksimalnog dođe na minimalni. Najveći broj okretaja hidrauličkog motora je dobiven za najveću masu i najveću brzinu spuštanja klipa (715 o/min), a najveći period opadanja tlaka u akumulatoru je zabilježen za najmanju masu i najmanju brzinu klipa (24 s). Autori su provjerili utjecaj temperature ulja na sustav i nisu zabilježili vidljiv utjecaj. Sustav je također izložen i dinamičkom opterećenju gdje je primijećeno da je opruga poslije 3,5 sati počela gubiti svoja svojstva i zabilježen je smanjeni protok ulja kroz sustav (96 % početnog protoka). Također, na temelju izmjenjenih tlakova izračunata je učinkovitost uređaja od 45 %. Konačno, ustanovljeno je da korišteni hidraulički motor može generirati snagu od 0,84 kW.

Sabzehgar i dr. [44] predstavili su regenerativni uređaj koji sadrži mehanizam vijčanog spoja koji se sastoji od dva seta serijski spojenih sfernih zglobova čija je prednost učinkovitost prijenosa gibanja i jednostavnost izrade. Predloženi mehanizam dan je na slici 3.39, a sastoji se od dvije trokutaste ploče spojene međusobno sa šest nogu koje na krajevima imaju oblik sfere. Ovaj prijenosnik gibanja je integriran s trofaznim pretvaračem (bez mosta s pojačalom) u svrhu postizanja mogućnosti kontrole koeficijenta prigušenja sustava. Uređaj je ispitan eksperimentalno na uređaju za izazivanje vibracija i mehatroničnom prigušivaču čiji je postav prikazan na slici 3.40. Amplituda pobude je 3,05 mm, a frekvencija 5,6 Hz i ona odgovara rezonantnoj frekvenciji uređaja. Ustanovljeno je da se s povećanjem otpora uređaja smanjuje koeficijent prigušenja. Stoga, pri električnom otporu od 100 Ω , koeficijent prigušenja iznosi 97 Ns/m, a pri otporu od 1 Ω , koeficijent prigušenja je 237 Ns/m. Izračunato je da je ukupna

učinkovitost uređaja 56 % s tim da je mehanička učinkovitost 59 %, a električna 95 %. Istraživanjem je otkriveno da prikupljena snaga ovog sustava iznosi 0,54 W.

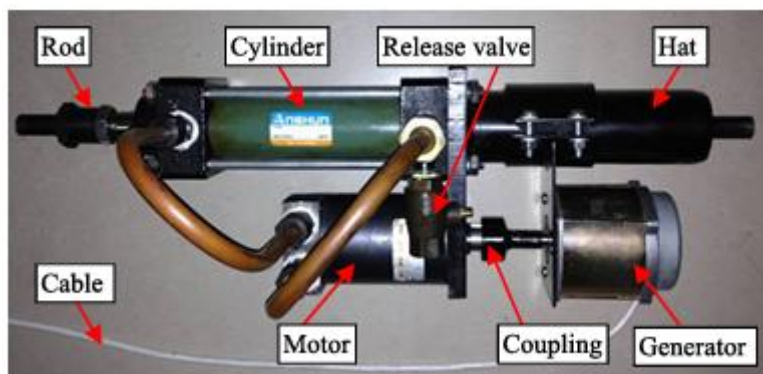


Slika 3.39 Predloženi mehanizam pretvorbe gibanja [44]



Slika 3.40 Eksperimentalni postav uređaja [44]

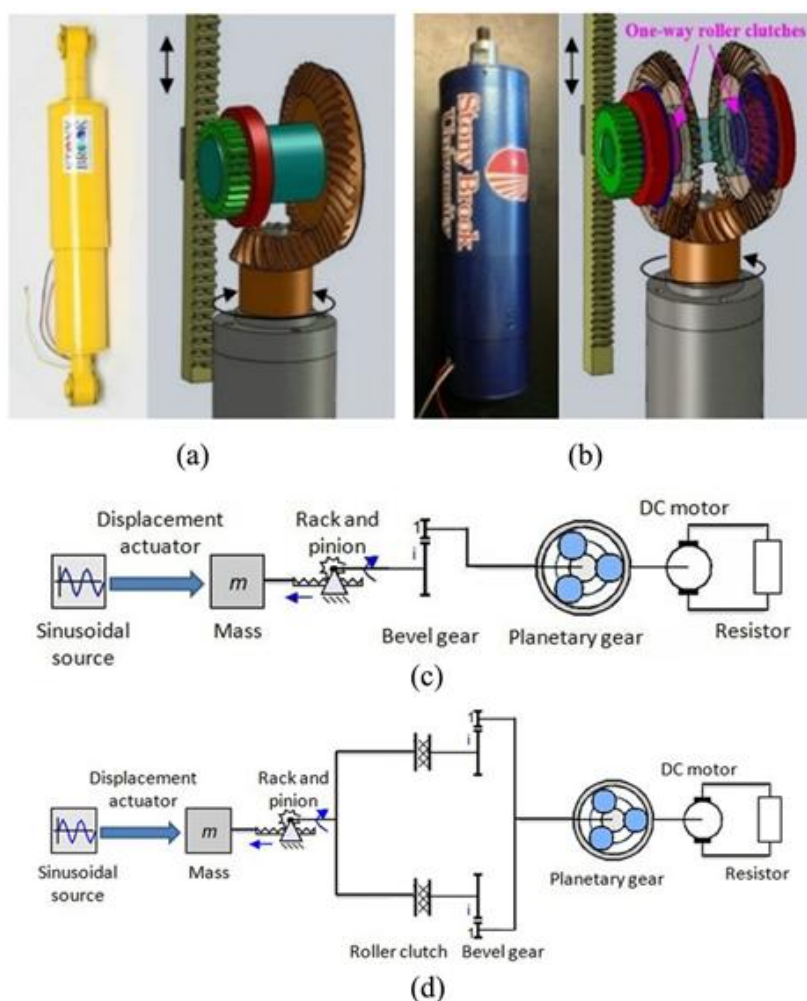
Li i Tse [45] izradili su hidraulički regenerativni uređaj koji prigušuje udarce s hidrauličkim uljem i radom električnog mehanizma. Sklop hidrauličkog sustava sastoji se od cilindra s dvije klipnjače, poklopca, hidrauličkog motora i otpusnog ventila. Klip dijeli cilindar u dvije komore, od kojih je svaka spojena na jedan od dva priključka hidrauličkog motora. Dvije klipnjače cilindra mogu se koristiti za osiguranje kontinuiranog protoka ulja između dvije komore. Pobudom vibracija između dva kraja, klip unutar cilindra gura hidrauličko ulje u jednoj komori kroz hidraulički motor u drugu komoru, čime pojačava rotaciju motora. Motor ima dvije funkcije: pretvoriti linearne vibracije u rotaciju generatora i pojačati rotaciju generatora odabirom manje zapremine motora. Zbog viskoznosti hidrauličkog ulja, protok ulja ima prigušujući učinak na vibracije između krajeva. Sklop sakupljača energije uključuje generator i opterećenje. Generator se sastoji od rotora sa zavojnicom i sinkronog statora s permanentnim magnetima. Zavojnica rotora je izravno spojena na izlazno vratilo hidrauličkog motora. Magnetsko polje statora s permanentnim magnetima se smanjuje rotacijom i time generira električnu energiju u sustavu. Osim što prikuplja energiju, generator djeluje kao dodatni prigušivač vibracija zbog pojačanja sile prigušenja inducirane električnom energijom. Izrađeni prototip uređaja dan je na slici 3.41. Uređaj je eksperimentalno ispitan na ispitnom stolu gdje je utvrđeno da je za dobivanje najveće moguće prikupljene snage potreban električni otpor od $2\ \Omega$ do $3\ \Omega$. Najveća prikupljena snaga iznosi 435,1 Ws/m pri amplitudi ulaza 0,02 m i frekvenciji od 0,8 Hz.



Slika 3.41 Izrađeni prototip uređaja [45]

Li i Zuo [46] ispitali su utjecaj regenerativnih uređaja na prigušenje ovjesa automobila. Za razliku od konvencionalnih hidrauličkih ovjesa, elektromagnetski regenerativni ovjesi imaju znatno veću inerciju koju unosi generator što ima važan utjecaj na dinamiku ovjesa. Koeficijent prigušenja elektromagnetskih prigušivača povezan je s električnim opterećenjem spojenim na izlaz generatora i može se kontrolirati. Autori su modelirali dvije vrste rotacijskih

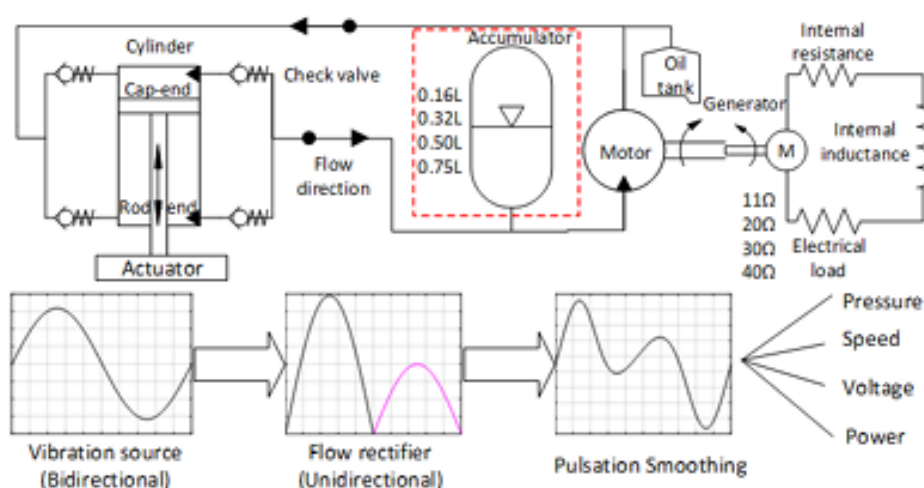
elektromagnetskih regenerativnih prigušivača, s mehaničkim ispravljačem gibanja (MMR) i bez njega (slika 3.42) te analizirali njihov utjecaj na radne značajke ovjesa vozila u usporedbi s utjecajima konvencionalnog prigušivača. Razmatran je i slučaj kada kotači izgube kontakt s tlom. Simulacije su provedene sa stepenastom pobudom profila ceste i pobudom profila ceste koja je definirana ISO standardom (razred C) kako bi se procijenili utjecaji ekvivalentne inercijske mase i ekvivalentnog koeficijenta prigušenja. Rezultati istraživanja su pokazali da optimizacijom ekvivalentne inercijske mase, obje vrste elektromagnetskih ovjesa mogu postići bolje značajke udobnosti vožnje nego konvencionalni hidraulički ovjes. Nadalje, mehanizam mehaničkog ispravljača gibanja (MMR) može značajno poboljšati udobnost vožnje i upravljanje cestom zbog smanjenog negativnog učinka povećane inercije koju proizvodi generator. Autori su istražili potencijal iskorištavanja energije predstavljenih uređaja za pobudu prema profilu ceste koji je definiran ISO standardom. Ispitivanjem su otkrili da je moguće prikupiti 65 W vožnjom na cesti C razreda pri brzini vožnje od 20 km/h.



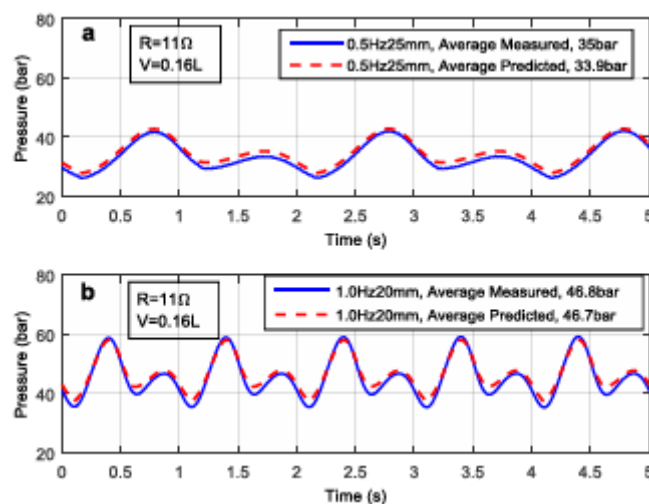
Slika 3.42 Modeli i shematski dijagrami predloženih uređaja bez i s mehaničkim ispravljačem gibanja [46]

60

Wang i dr. [48] predložili su regenerativni hidraulični ovjes za teretna vozila koji pretvara dvosmjerno pravocrtno gibanje klipa u jednosmjernu rotaciju hidrauličkog motora koji pokreće generator. Predstavljen je konceptualni model regenerativnog uređaja (slika 3.44) koji se sastoji od dvosmjernog hidrauličkog cilindra, hidrauličkog ispravljača s četiri nepovratna ventila, hidrauličkog akumulatora, hidrauličkog motora, generatora s permanentnim magnetima, cjevovoda i spremnika za ulje. Cilindar je konstruiran tako da ima četiri otvora koji su simetrično raspoređeni na obje strane tijela cilindra. Na otvore su spojena četiri nepovratna ventila koji djeluju kao hidraulički ispravljač. Na taj način, tekućina za bilo koje gibanje hidrauličnog klipa prolazi kroz hidraulički motor u jednom smjeru. Hidraulički motor je izravno spojen s generatorom preko vratila i pokreće ga protok pod tlakom. Uloga motora je da pretvara hidrauličku energiju u mehaničko rotacijsko gibanje protokom ulja s visokotlačne na niskotlačnu stranu. U nastavku rotacija vratila hidrauličkog motora pokreće generator. Razvijen je matematički model koji uzima u obzir stlačivost fluida, hidrauličke gubitke i nelinearnosti uzorkovane ventilima. Ulazna pobuda koja je korištena u simulacijama i eksperimentu je sinusoidnog oblika. Validacija modela izvršena je pri ulazima s frekvencijama od 0,5 Hz i 1 Hz, amplitudama s 25 mm i 20 mm, volumenu akumulatora od 0,16 L i električnom otporu od 11 Ω . Kao što je prikazano na slici 3.45, radne karakteristike hidrauličkog motora su dobro predviđene jer se potvrdila tvrdnja da intenzivnije vibracije uzrokuju veću rotacijsku brzinu motora. Ispitivanjem je dobiveno da uređaj postiže najveću učinkovitost (39,74 %) pri električnom otporu od 20 Ω , amplitudi od 25 mm, frekvenciji od 1 Hz i volumenu akumulatora od 0,16 L. Autori su izračunali da prosječna prikupljena snaga iznosi 258,1 W.

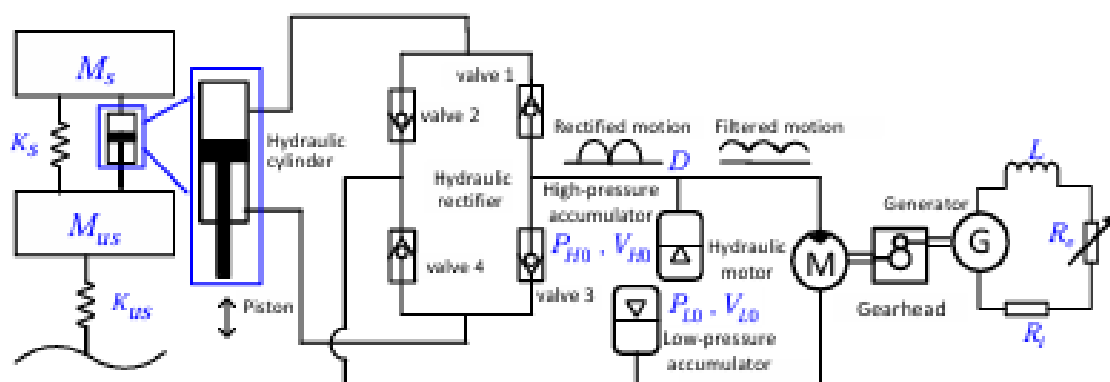


Slika 3.44 Shematski dijagram predloženog uređaja [48]



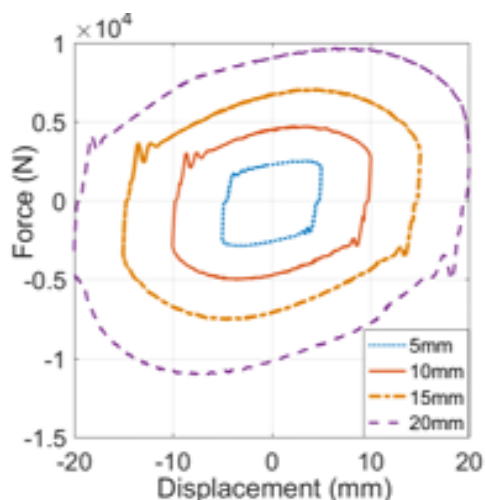
Slika 3.45 Pad tlaka u vremenu za dvije različite uzbude [48]

Guo i dr. [49] su izradili prototip hidrauličkog regenerativnog prigušivača za cestovna i željeznička teretna vozila. Shematski prikaz uređaja dan je na slici 3.46. Uređaj se sastoji od hidrauličkog cilindra, hidrauličkog ispravljača sastavljenog od četiri nepovratna ventila, dva akumulatora, hidrauličkog motora, generatora i hidrauličkih cijevi. Za ugradnju u ovjes, samo hidraulički cilindar treba biti montiran u ovjes, a ostale hidrauličke komponente mogu se integrirati u sklop koji se može postaviti na konstrukciju vozila. Kada se klip pomiče prema gore, on potiskuje tekućinu iz hidrauličkog cilindra do hidrauličkog motora kroz nepovratni ventil 1 i natrag do hidrauličkog cilindra kroz nepovratni ventil 4, a motor se okreće u smjeru kazaljke na satu. Kada se klip pomiče prema dolje, tekućina se potiskuje do motora kroz nepovratni ventil 3 i natrag do hidrauličkog cilindra kroz nepovratni ventil 2, a motor se također okreće u smjeru kazaljke na satu. Visokotlačni akumulator i niskotlačni akumulator su postavljeni na ulazu i izlazu hidrauličkog motora.



Slika 3.46 Shematski dijagram uređaja [49]

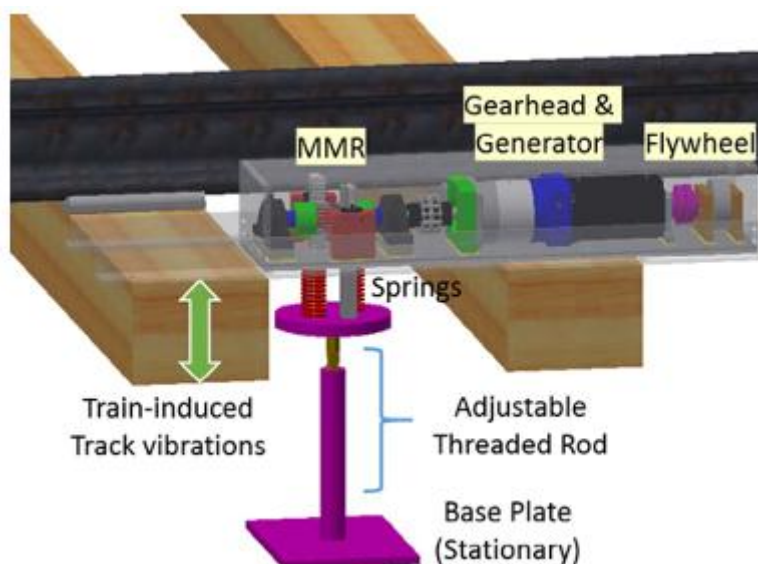
Tlak plina prednabijanja visokotlačnog akumulatora uvijek se odabire kao velika vrijednost što omogućava stabilizaciju visokog tlaka tekućine na ulazu hidrauličkog motora čime se stabilizira protok kroz hidraulički motor kako bi se ujednačila brzina rotacije hidrauličkog motora i generatora te poboljšala učinkovitost prikupljanja energije. Predtlak plina u niskotlačnom akumulatoru je uvijek odabran da bude manji od početnog tlaka okoline u hidrauličkom krugu što omogućava da je plin u niskotlačnom akumulatoru uvijek komprimiran. Akumulator s niskim tlakom kompenzira varijaciju volumena u hidrauličkom krugu uzrokovanu volumenom klipnjače i apsorpcijom tekućine visokotlačnog akumulatora. Akumulator niskog tlaka osigurava da volumen tekućine u sustavu uvijek ostane uravnotežen. Autori su postavili matematički model koji pokazuje da se izlazna sila uređaja može rastaviti na silu električnog prigušenja, silu prigušenja trenja, silu inercije i silu akumulatora. Prototip uređaja je izrađen i eksperimentalno ispitan pri ulazu frekvencija od 1 Hz do 5 Hz i amplitudi od 5 mm do 20 mm. Parametri su odabrani na način da obuhvate tipične frekvencije koje se javljaju kod razreda kvalitete cesta B i C po ISO standardu i kod željezničkih vozila. Također, variran je električni otpor uređaja koji se kreće od 4 Ω do 70 Ω . Parametri ostalih komponenti uređaja poput promjera crijeva, viskoznosti tekućine odabrani su u svrhu minimiziranja hidrauličke sile trenja. Utvrđeno je da je rezonantna frekvencija uređaja između 1 Hz i 2 Hz čija je petlja sila-pomak prikazana na slici 3.47. Autori su utvrdili da pravilnost linija na slici 3.47 uzrokuje prisutnost visokotlačnog i niskotlačnog akumulatora koji ujednačavaju tlak na ulazu i izlazu iz motora. Također su uočene očekivane oscilacije u petljama zbog promjene smjera gibanja klipa. Vrijednosti sila i električnog otpora dovedeni su u vezu gdje je utvrđeno da se s smanjenjem električnog otpora povećava izlazna sila uređaja, a samim time i prigušenje. Uređaj je prikupio prosječnu snagu od 220 W pri učinkovitosti od 30 % s ulazom amplitude od 7 mm, frekvencije od 3 Hz i vanjskog električnog otpora od 4 Ω . Autori su također istražili utjecaj hidrauličkih komponenti na učinkovitost uređaja gdje je zaključeno da bi tlak prednabijanja visokotlačnog akumulatora trebao biti jednak početnom tlaku sustava. Istraživanje je pokazalo da se učinkovitost može povećati odabirom motora s manjim početnim momentom i odabirom linijskih ventila.



Slika 3.47 Petlja sila-pomak za frekvenciju od 1 Hz [49]

Lin i dr. [50] predložili su uređaj za prikupljanje vibracija tračnica kojeg su laboratorijski i praktično ispitali. Glavna novost uređaja je u njegovoj ugradnji gdje za razliku od ostalih uređaja ovaj sustav nije usidren nego je poduprt oprugama. Uređaj sadrži mehanizam mehaničkog ispravljanja gibanja (MMR), planetarni prijenosnik za ubrzanje vrtnje vratila generatora, zamašnjak i generator. Tijelo uređaja je montirano na pragove tračnica, dok se temeljna ploča nalazi na tlu (slika 3.48). Opruge ostvaruju prednaprezanje između ploče i ostatka uređaja. Tijekom postavljanja, podesiva šipka je postavljena tako da komprimira opruge kako bi pričvrstila temeljnu ploču. Dok se uređaj pomiče s pragovima, osnovna ploča ostaje nepomična kako bi se maksimiziralo relativno gibanje preneseno na ulazni zupčanik mehanizma za ispravljanje mehaničkog gibanja. Mehanizam sadrži jedno vratilo s dva zupčanika i dvije jednosmjerne spojke koje prenose moment u samo jednom smjeru i omogućavaju isključenje mehanizma kod smanjenja brzine vrtnje u svrhu produljenja vremena prikupljanja energije. Radi sigurnosti, ukupna visina uređaja je ograničena kako bi se izbjeglo ometanje vlaka u pokretu i korišteni su pričvrtni elementi u slojevima za ugradnju uređaja na prag kako bi se izbjegla bilo kakva oštećenja. Izvršene su simulacije u svrhu odabira prikladnih opruga za prednaprezanje uređaja. Generator korišten u simulacijama i ispitivanjima ima unutarnji električni otpor od $0,73 \Omega$. Provedbom simulacija varirani su električni otpori i visina opruge pri amplitudi od 3 mm i frekvenciji od 2 Hz. Uočeno je da se minimalna krutost opruge znatno povećava kod manjih vanjskih električnih otpora, dok se s povećanjem visine opruge njezina krutost značajno smanjuje. Uređaj je eksperimentalno ispitan na ispitnom stolu čime se pokazalo da najveća i prosječna prikupljena snaga iznose 196,5 W odnosno 96,3 W pri sinusoidnoj pobudi amplitude 5 mm, frekvencije 4 Hz i vanjskog električnog otpora 8Ω . Uređaj je ugrađen na tračnice i praktično ispitan čime se otkrilo da najveća i prosječna prikupljena

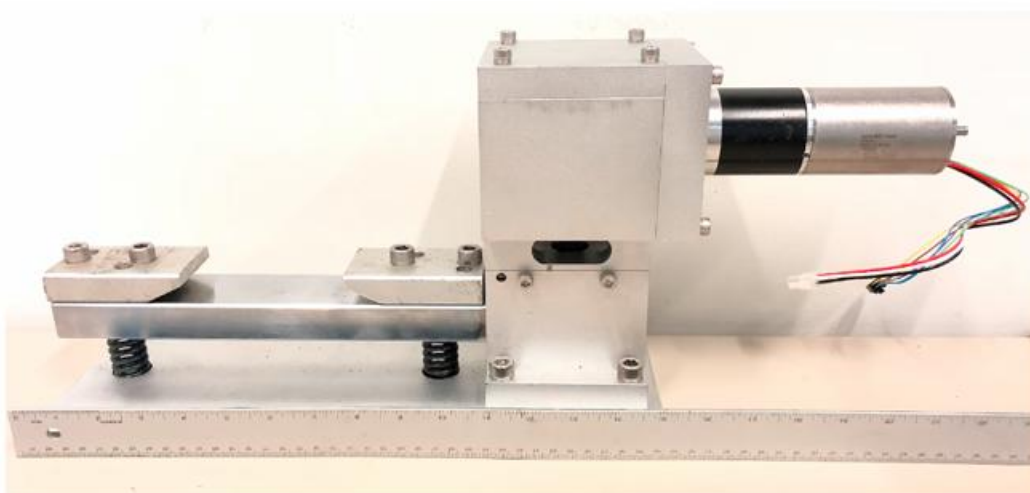
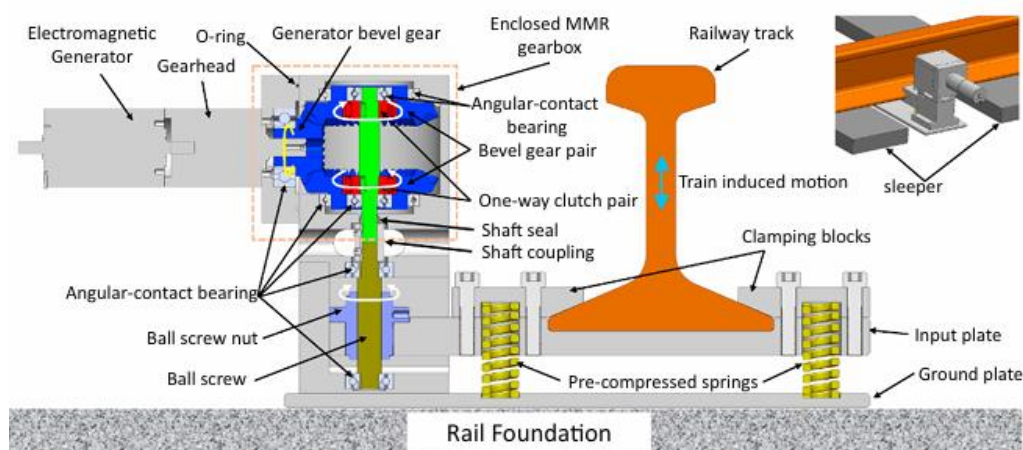
snaga iznose 56,2 W odnosno 6,9 W pri električnom otporu od 16,7 Ω . Uočen je trend rasta prikupljene snage s povećanjem električnog otpora do 16,7 Ω nakon čega slijedi pad. Autori su zaključili da do pada prikupljene snage dolazi zbog nemogućnosti opruga da zadrže uređaj mirnim. Ova pojava u praktičnom smislu znači da uređaj ne iskorištava puni ciklus opterećenja za prikupljanje snage.



Slika 3.48 3D model montiranog uređaja sa sastavnim dijelovima [50]

Pan i dr. [51] su modelirali i eksperimentalno ispitali dva modela uređaja za prikupljanje energije vibracija tračnica. Uređaji se sastoje od kugličnog navojnog vretena, zatvorenog ispravljača gibanja (MMR), generatora s planetarnim prijenosnikom i dijelova za ugradnju bez sidra, kao što je prikazano na slici 3.49. Mjesto ugradnje je predviđeno da bude ispod tračnica između dva susjedna praga, a ulazna ploča je čvrsto spojena sa željezničkom tračnicom pomoću dva stezna bloka s vijcima. Krutost čelične ulazne ploče je dovoljno velika da se deformacija ulazne ploče može zanemariti. U svrhu brze ugradnje uređaja na tračnice i sprječavanja promjene svojstava balasta i podloge, postavljene su dvije opruge između ulazne ploče i temeljne ploče, pružajući dovoljnu silu da temeljna ploča ostane nepomična. Matica je ugrađena blizu jednog kraja ulazne ploče, a kuglično navojno vreteno se koristi u načinu rada s povratnim pogonom što može pretvoriti recipročno linearno gibanje vibracija tračnica pri maloj brzini u dvosmjernu rotaciju vijka. Mehanička spojka se koristi za spajanje vretena i ulaznog vratila zatvorenog mehaničkog ispravljača gibanja tako da se ulazno vratilo također može okretati dvosmjerno. Zatvoreni MMR sustav sastoji se od para velikih koničnih zupčanika ugrađenih s jednosmjernim spojkama, malog koničnog zupčanika spojenog s vratilom planetarnog prijenosnika i pet kutnih kontaktnih ležajeva. Rotacijsko gibanje prenosi se s para velikih

koničnih zupčanika na mali konični zupčanik, te se posljedično okreću i planetarni prijenosnik i generator. Kutni kontakti ležajevi primjenjuju se za prenošenje radijalnih i aksijalnih sila na vratilo i zupčanike kako bi ukupni prijenos bio što stabilniji. Brtve i o-prstenovi dodaju se na ispravljač gibanja, pa se dodavanjem maziva unutar mehanizma poboljšava pouzdanost i učinkovitost prijenosa.



Slika 3.49 Model i izrađeni prototip predloženog uređaja [51]

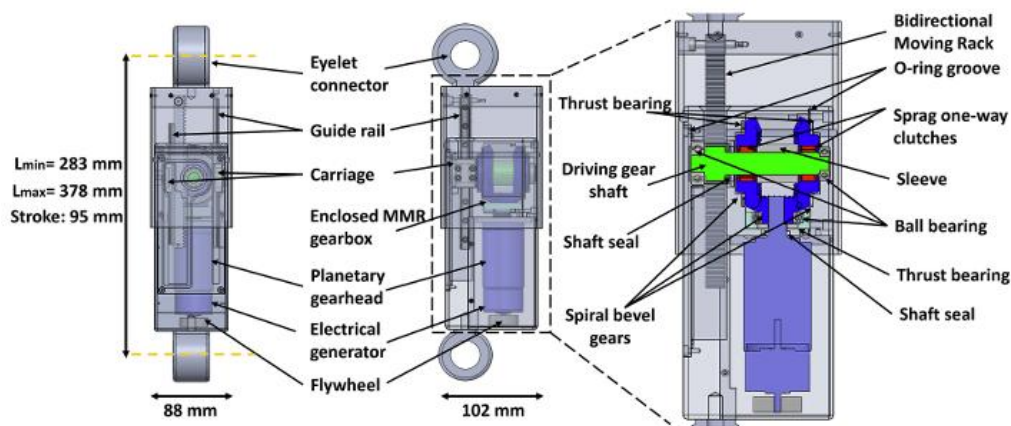
Izrađena su dva prototipa s istom konstrukcijom, ali različitim koracima kugličnog navojnog vretena (16 mm i 20 mm), povratnim oprugama čije krutosti iznose 26269 N/m i 95269 N/m, planetarnim prijenosnicima s prijenosnim omjerima 4,3 i 12 i generatorima. Generator prvog modela ima moment tromosti od 3,06 kg/cm², unutarnji električni otpor od 2,28 Ω , naponsku konstantu od 0,163 V/rad, induktivitet od 2,5 mH i konstantu momenta od 0,163 Nm/A. Generator drugog modela ima moment tromosti od 0,17 kg/cm², unutarnji električni otpor od 0,284 Ω , naponsku konstantu od 0,054 V/rad, induktivnost od 0,443 mH i konstantu momenta od 0,054 Nm/A. Uređaji su eksperimentalno ispitani u laboratoriju sa

sinusoidnom pobudom i izmjerenom pobudom pomaka tračnica. Pri sinusoidnom ulazu uočeno je da se prikupljena snaga povećava s povećanjem amplitude i frekvencije ulaza. Uočen je trend povećanja prikupljene snage s povećanjem prigušenja uređaja. Povećanje prigušenja se ostvaruje smanjivanjem vanjskog električnog otpora. Uspoređujući radne karakteristike dva izrađena prototipa, drugi prototip dao je bolje rezultate prvenstveno zbog većeg prijenosnog omjera planetarnog prijenosnika što je značajno povećalo brzinu vrtnje vratila generatora. Tako je prvi prototip za frekvenciju pobude od 1 Hz, amplitudu od 3 mm i vanjski električni otpor od $2\ \Omega$, prikupio snagu od 7,1 W, dok je drugi prototip pri istim ulaznim parametrima prikupio snagu od 17,7 W. Izmjerena pobuda vibracija tračnica je primijenjena na uređaje gdje je kod prvog prototipa izmjerena prosječna prikupljena snaga od 20,1 W, a kod drugog prototipa 23,54 W. Prototipi su također i terenski ispitani kako je prikazano na slici 3.50. Uređaj je ispitan pri brzini vožnje urbanog vlaka od 20 km/h i 30 km/h. Uočene su smanjene radne karakteristike uređaja kada se tračnica giba put gore zbog nedovoljne sile u oprugama i nestabilnosti balasta što je dodatno otežalo rad uređaja. Drugi prototip uspio je prikupiti najveću snagu od 2,24 W pri brzini vožnje od 30 km/h i vanjskom električnom otporu od $8\ \Omega$ iako je najveća snaga očekivana pri vanjskom električnom otporu od $2\ \Omega$. Autori su zaključili da je razlog tomu neprikladna sila u oprugama i proklizavanje spojki.



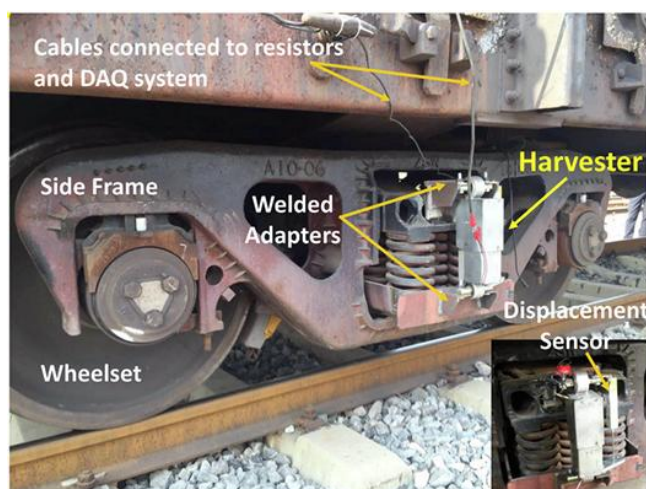
Slika 3.50 Postav terenskog ispitivanja uređaja [51]

Pan i dr. [52] modelirali su, izradili i eksperimentalno ispitali uređaj za prikupljanje vibracija vagona željezničkog vozila. Konstrukcija uređaja je jednaka kao u [51] s tim da se uređaj ugrađuje na vozilo i korišten je mehanizam zupčanika i zupčaste letve za pretvorbu pravocrtnog gibanja u rotacijsko (slika 3.51).



Slika 3.51 Model predloženog uređaja [52]

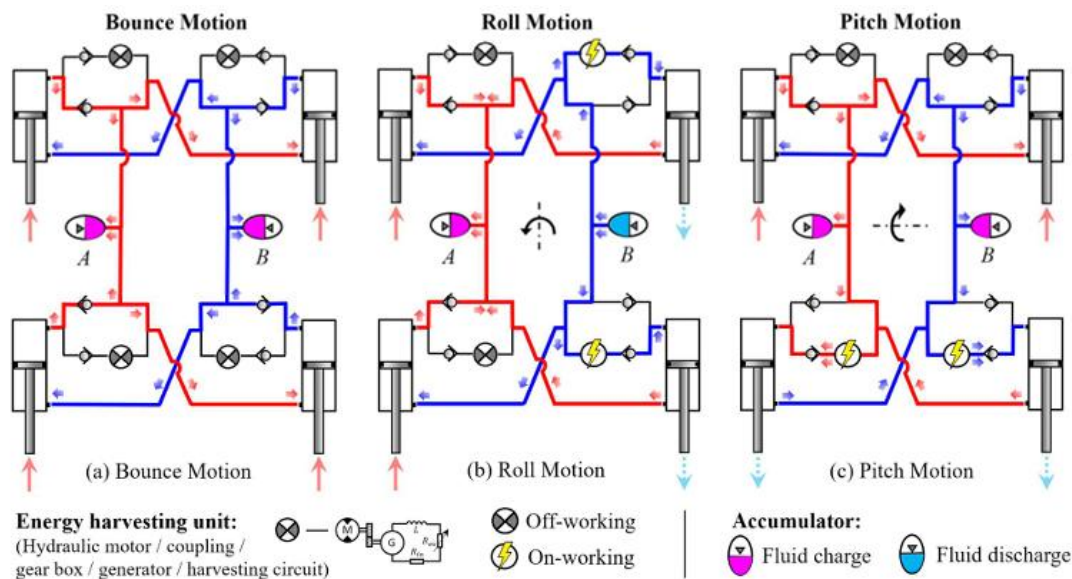
Radne karakteristike uređaja ispitane su na ispitnom stolu sa sinusoidnom pobudom s amplitudama od 2 mm do 4 mm, frekvencijama od 2 Hz do 4 Hz, prijenosnim omjerom od 1:43 i vanjskim električnim otporom od 10 Ω . Najveća prikupljena snaga je pri amplitudi od 4 mm i frekvenciji od 4 Hz i iznosi 62,62 W. Uređaj je također ispitan i s izmjerenim ulazom vibracija vagona u testnom centru i na tračnicama. Za ekvivalentnu brzinu vlaka od 30 km/h u testnom centru, električni otpor do 4 Ω i prijenosni omjer od 1:66, izmjerena je najveća prosječna prikupljena snaga koja iznosi 3,3 W. Za izmjereni ulaz vagona na tračnicama ispitani su prototipi s prijenosnim omjerom 1:43 i 1:66. Bolje radne karakteristike dao je uređaj s većim prijenosnim omjerom čija najveća prosječna izmjerena prikupljena snaga iznosi 14,5 W pri brzini od 90 km/h i vanjskom električnom otporu od 4 Ω . Naposljetku, uređaj s prijenosnim omjerom 1:43 montiran je na vagon i ispitan što je prikazano na slici 3.52. Vagon se kretao brzinom od 30 km/h što bi odgovaralo amplitudi manjoj od 2 mm i frekvenciji oko 0,5 Hz. Uređaj je prilikom ispitivanja prikupio prosječnu snagu od 1,96 W.



Slika 3.52 Postav terenskog ispitivanja uređaja [52]

Qin i dr. [53] razvili su regenerativni hidraulički sustav ovjesa. Sustav je montiran paralelno s oprugom u ovjesu vozila. Sastoji se od četiri prigušivača, osam nepovratnih ventila, dva akumulatora i četiri jedinice za prikupljanje energije. Kao izvor podesive sile prigušenja, jedinica za prikupljanje energije sastoji se od hidrauličkog motora, prijenosnika i generatora. Princip rada sustava pri odskoku prikazan je na slici 3.53 (a). Kada se klipovi pomiču prema gore (kompresija), ulje pod visokim tlakom u gornjoj komori svakog cilindra teče u donju komoru dijagonalnog cilindra bez prolaska kroz hidraulički motor. Kada se klipovi pomiču prema dolje ulje se pod visokim tlakom potiskuje u četiri hidraulička motora. U nastavku hidraulični motori pokreću sve generatore za prikupljanje energije. Zbog izvlačenja klipnjača, akumulatori kompenziraju potrebu za uljem cijelog sustava. Kada vozilo skreće desno, vanjski cilindri se komprimiraju, unutarnji cilindri se povlače, a karoserija se nagnje ulijevo, kao što je prikazano na slici 3.53 (b). Istisnuto ulje ulazi u akumulator A, što rezultira povišenim tlakom u komorama spojenim u crvenoj grani. Suprotno tome, ulje u akumulatoru B puni komore spojene na njega, što dovodi do smanjenog tlaka u plavoj grani. Kao rezultat toga, razlika tlaka između crvene i plave grane stvara značajan moment koji se suprotstavlja nagnjanju karoserije vozila. Pokazalo se da dvije desne jedinice za prikupljanje energije osiguravaju bolje radne karakteristike protiv nagnjanja. Akumulatori također smanjuju fluktuacije tlaka na ulazu hidrauličkog motora dok istovremeno sprječavaju pretjerano nagnjanje karoserije vozila. Sustav također može održavati povoljnu stabilnost vozila za uvjete kočenja prikazane na slici 3.53 (c). Ulje pod visokim tlakom iz gornjih komora dva prednja cilindra teče u donje komore umreženih cilindara bez prolaska kroz jedinice za prikupljanje energije. Za dva stražnja cilindra ulje pod visokim tlakom u donjim komorama teče kroz jedinice za prikupljanje energije i puni se u gornje komore umreženih cilindara. U ovome se slučaju sila prigušenja koju generiraju jedinice za prikupljanje energije suprotstavlja nagnjanju karoserije vozila. Razvijen je analitički model sustava sa sedam stupnjeva slobode s pretpostavkama da je fluid nestlačiv, da ima konstantna svojstva s promjenom temperature, da nema curenja i da je sila trenja u cilindrima zanemariva. Uređaj je ispitan na ispitnom stolu gdje je pokazano da se podesivi koeficijent prigušenja od 3608 Ns/m do 9913 Ns/m može postići variranjem vanjskog električnog otpora od 5 Ω do 30 Ω . Pri ulazu frekvencije od 2 Hz, amplitude od 20 mm, vanjskom otporu od 5 Ω , sustav je prikupio snagu od 82 W s učinkovitosti od 18 %. Uređaj je također ispitan s pobudom odgovarajućih razreda cesta prema ISO standardu gdje je utvrđeno da na cesti razreda D ovaj sustav ima bolju udobnost vožnje u usporedbi s konvencionalnim sustavima ovjesa. Dobiveno je da sustav može prikupiti snagu od 525 W vožnjom po cesti D

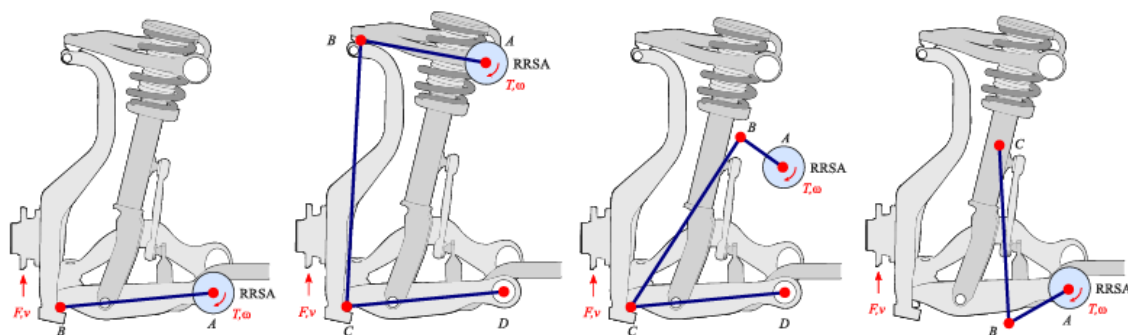
razreda pri brzini od 80 km/h. Također, utvrđeno je da se kut nagiba kod skretanja ovim ovjesom može smanjiti za 27 %, a kut nagiba kod kočenja za 11 %.



Slika 3.53 Smjerovi protoka ulja pri odskoku i nagnjanju po dužini i visini [53]

Guo i dr. [54] usporedili su radne karakteristike i osjetljivosti parametara regenerativnih ovjesa s i bez mehaničkog ispravljača gibanja (MMR) kod automobila, autobusa i kamiona. Modeli su numerički simulirani s ulazom kvalitete ceste razreda C po ISO standardu i brzinom vožnje od 27 m/s. Za oba regenerativna ovjesa postoji određeni raspon inercije u kojem je udobnost vožnje regenerativnog ovjesa bolja od odgovarajućeg tradicionalnog ovjesa. Za regenerativni ovjes bez MMR-a, ovaj raspon inercije za poboljšanje udobnosti vožnje povećava se od automobila do kamiona zbog povećanja mase vozila i smanjenja omjera krutosti guma i krutosti ovjesa. Regenerativni ovjes s MMR općenito ima mnogo veći raspon inercije za poboljšanje udobnosti vožnje od regenerativnog ovjesa bez MMR-a. Kada inercija u regenerativnom ovjesu nije mala vrijednost, obično u rasponu od 10 % do 40 % mase opruge, regenerativni ovjes s MMR-om može poboljšati udobnost vožnje u odnosu na tradicionalni ovjes, dok regenerativni ovjes bez MMR-a ne može. Ovjes s MMR-om pruža bolje upravljanje cestom od ovjesa bez MMR-a, ali oba regenerativna ovjesa pogoršavaju upravljivost na cesti u odnosu na tradicionalni ovjes. Jedini slučaj gdje regenerativni ovjes s MMR-om poboljšava upravljivost vozila je kod kamiona s nižim prigušenjem. Za ovjes bez MMR-a, prikupljena energija se ne mijenja puno kako se mijenja ekvivalentna inercija, dok za ovjes s MMR-om, prikupljena energija se smanjuje s povećanjem ekvivalentne inercije. Stoga, ovjes s MMR-om pruža bolje dinamičke radne karakteristike od ovjesa bez MMR-a što je glavni zadatak ovjesa, ali prikuplja manje energije od ovjesa bez MMR-a.

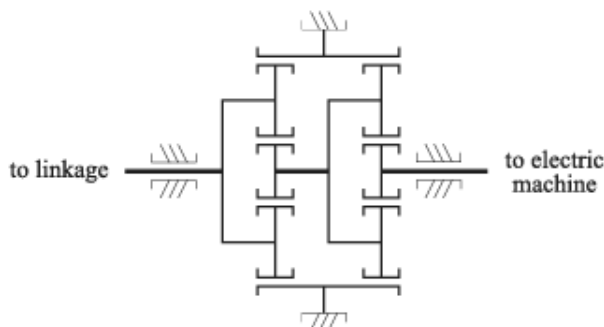
Galluzzi i dr. [55] predstavili su metodologiju pri modeliranju rotacijskih regenerativnih prigušivača gdje su izradili prototip i eksperimentalno ga ispitali. Predstavljeni model koristi generator koji ujedno radi kao i motor za kontrolu prigušenja udaraca. Uređaj pretvara linearno gibanje u rotacijsko preko zglobnog spoja s ovjesom automobila. Primjena metodologije odnosi se na automobil čiji je ovjes konstrukcijski razrađen kao sustav s dvostrukim viljuškastim ramenom gdje cijev tradicionalnog prigušivača nema glavnu strukturnu funkciju. Za procjenu vertikalne dinamike ovjesa i izračun sile prigušenja korišten je model četvrtine automobila gdje je u simulaciji korištena pobuda za neravnine ceste razreda B po ISO standardu. Budući da je kompaktnost uređaja vrlo važna u ovoj izvedbi, odabran je sinkroni generator s permanentnim magnetima jer nudi najveći omjer okretnog momenta i mase među elektromotorima. Kod modeliranja generatora autori su utvrdili da su najvažniji parametri poprečni presjek generatora, aktivna duljina generatora i ukupni prijenosni omjer. Konstrukcijsko rješenje poluga prilagođeno je rasporedu ovjesa kao što je prikazano na slici 3.54 gdje je izabran zadnji raspored zbog povoljnog prijenosnog omjera i zbog toga što ne zahtijeva značajne modifikacije ovjesa. Prijenosni omjer i kut prijenosa su parametri koje su autori razmatrali kod konstrukcije polužja. Poluga pretvara linearnu brzinu u uspravnom položaju u kutnu brzinu na ulaznom vratilu planetarnog prijenosnika. Prijenos mora biti minimiziran tako da se ukupni prijenosni omjer može postići s manjim doprinosom prijenosnika s polugama. Kut prijenosa je usvojen na način da se izbjegnu problemi sa automatskim blokiranjem poluge.



Slika 3.54 Predložena rješenja polužja za montažu uređaja na ovjes [55]

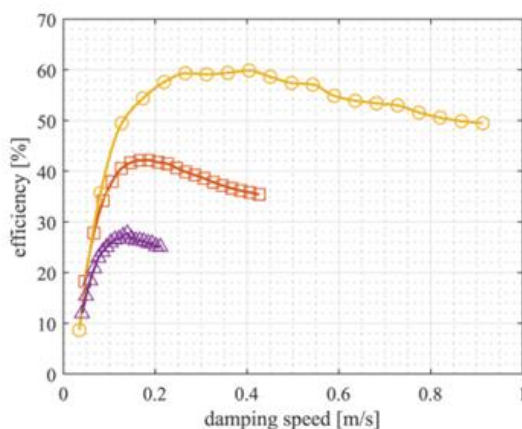
Kod konstrukcije prijenosnika uspoređene su konfiguracije s fiksnim vratilom i planetarna konfiguracija. Iako prva konfiguracija postiže nešto bolje radne karakteristike, planetarna konstrukcija ima puno veću kompaktnost i manju masu. Planetarni prijenosnik ima dva stupnja koja dijele isti fiksni zupčanik s unutarnjim zubima (slika 3.55). Svaki stupanj ima jedan nosač planeta, tri planetarna zupčanika i jedan sunčani zupčanik. Za svaki od oba stupnja, ulaz je na vodilu, dok sunčani zupčanik predstavlja izlaz. Izlaz drugog stupnja pokreće vratilo generatora.

Dimenzioniranje planetarnog prijenosnika s cilindričnim zupčanicima izvršeno je u skladu s ISO 6336 metodom B.



Slika 3.55 Konfiguracija planetnog prijenosnika [55]

Izrađen je prototip uređaja koji je eksperimentalno ispitan na ispitnom stolu gdje su analizirani prigušenje, učinkovitost pretvorbe energije i razina buke koju uređaj proizvodi. Prigušenja su dobivena za različite vanjske električne otpore (∞ , 465 m Ω , 135 m Ω , 55 m Ω i 0 Ω). Utvrđeno je da prigušenje opada s povećanjem otpora. Uočena su neslaganja izračunatih teorijskih prigušenja u odnosu na izmjerene što je objašnjeno s činjenicom da su kod mjerenih prigušenja prisutni gubici u prijenosniku, ležajima i remenom prijenosu koji je korišten za pokretanje uređaja. Sve ove stavke u stvarnosti povećavaju prigušenje. Ispitana je učinkovitost uređaja za ulazne otpore gdje je najveća učinkovitost postignuta za otpor od 465 m Ω i iznosi 59,86 %, dok za otpore od 135 m Ω i 55 m Ω najveća učinkovitost iznosi 42,16 % odnosno 27,69 % (slika 3.56). Pri najvećoj učinkovitosti, uređaj može prikupiti snagu od 146 W. Ispitana je i razina buke koju uređaj proizvodi gdje je utvrđeno da razina buke zadovoljava SAD-ov pravilnik o izloženosti buci u 24 satnom periodu.

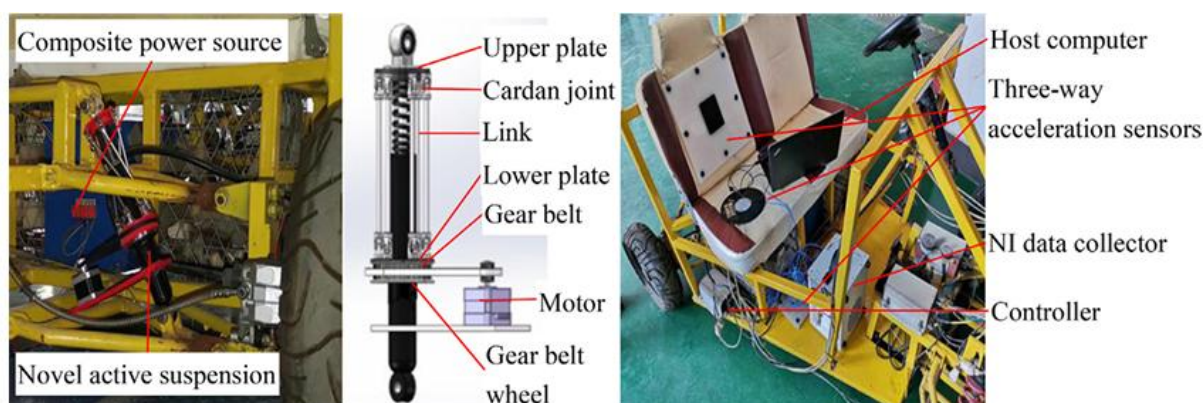


Slika 3.56 Učinkovitost u ovisnosti o prigušenju za vanjske otpore od 55 m Ω (trokuti), 135 m Ω (kvadrati) i 465 m Ω (krugovi) [55]

Bowen i dr. [57] istražili su utjecaj trenja gibajućih dijelova na radne karakteristike regenerativnih uređaja i predstavili su regenerativni ovjes na temelju kugličnog navojnog vretena zbog smanjenih gubitaka pri pretvorbi gibanja. Za identifikaciju parametara, uređaj je eksperimentalno ispitan pri sinusoidnom ulazu frekvencija od 0,5 Hz do 3,5 Hz, amplitudi od 15 mm i vanjskim električnim otporima od 15 Ω , 47 Ω i 109 Ω . Uz eksperiment, razvijen je i numerički model koji je korišten uz mjerenja kod identifikacije parametara trenja. Parametri trenja koji su razmatrani u ovoj studiji su Coulombova sila trenja pri translaciji, sila trenja pri

translaciji pri odvajanju, koeficijent viskoznog trenja pri translaciji, brzina trenja pri odvajanju, Coulombov rotacijski moment trenja, moment trenja pri odvajanju i brzina trenja pri odvajanju. Za dobivene parametre trenja, razmatrane su radne značajke uređaja u odnosu na ugodu vožnje, prijanjanja kotača na tlo, količine prikupljene energije i učinkovitosti. Uređaj je na temelju ovih zahtjeva optimiziran i uspoređene su radne značajke s trenjem i bez njega. Koristeći dobivene faktore trenja, ustanovljeno je da je ugodna vožnje manja za 15 % s trenjem, količina prikupljene energije opada za interval od 15 % do 37 % i iznosi oko 130 W, a učinkovitost se kreće od 50 % do 68 % za maksimalne odnosno minimalne parametre trenja. Ipak, parametri trenja poboljšavaju parametar prijanjanja kotača na tlo.

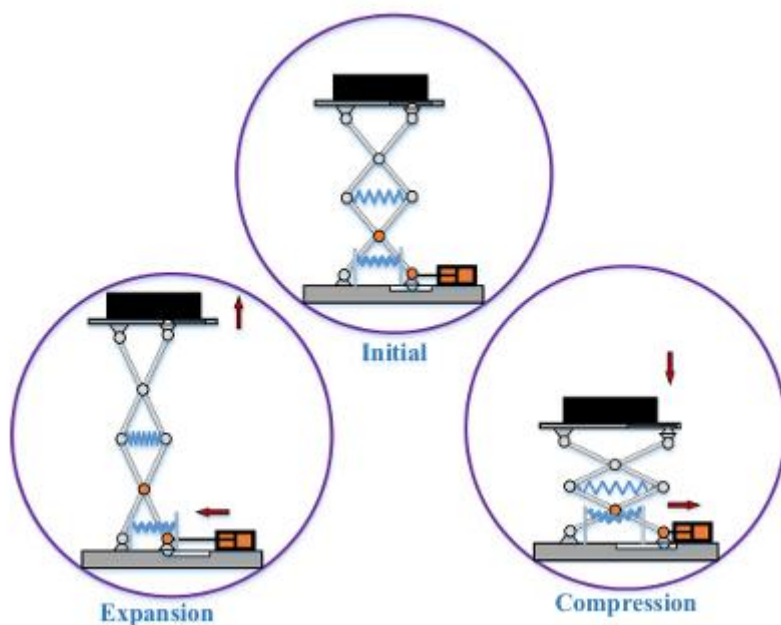
Liu i dr. [58] predložili su sustav regenerativnog ovjesa s mehanizmom poluga s mogućnosti regulacije sile prigušenja. Kod modeliranja uređaja, korišten je model četvrtine vozila s 2 stupnja slobode. Model ulaza je stohastična pobuda koja simulira neravnine ceste. Autori su pri modeliranju sustava poluga uveli novi parametar koji opisuje vanjsku ovojnici profila polužja, što pojednostavljuje proračun i daje dovoljno dobre rezultate. Model je simuliran s ulazom koji aproksimira neravnine ceste B razreda po ISO standardu u vremenu od 50 sekundi. Uočeno je smanjenje vertikalnog ubrzanja karoserije s implementacijom predloženog sustava za 20,56 % u usporedbi s tradicionalnim ovjesima. Izrađen je prototip uređaja koji je u nastavku istraživanja i eksperimentalno ispitan (postav prikazan na slici 3.58). Utvrđeno je da učinkovitost uređaja iznosi 14,28 % i da prikupljena snaga može osigurati 54,66 % energije (od ukupno potrebne) za kontrolu prigušenja. Predloženi sustav u usporedbi s tradicionalnim aktivnim ovjesima, troši 21,43 % manje energije za napajanje motora za kontrolu prigušenja.



Slika 3.58 Eksperimentalni postav predloženog uređaja [58]

Iako je najpopularnija primjena elektromagnetskih uređaja za prikupljanje energije u cestovnom prometu, razvojem tehnologije njihova primjena postaje popularna i kod

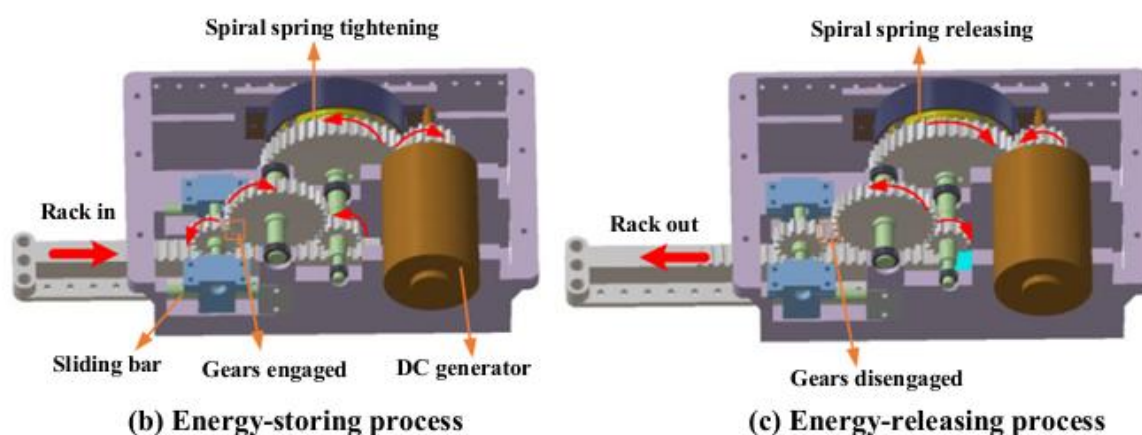
iskorištavanja mehaničke energije valova. Li i Jing [59] konstruirali su i ispitali bistabilni uređaj za prikupljanje energije valova s mehanizmom škara i mehaničkim ispravljačem gibanja. Uređaj je postavljen unutar plutače koja se sastoji od potpornog sustava opruga-masa s mehanizmom škara s dodatnom pomoćnom horizontalnom oprugom postavljenom ispod (slika 3.59). S ovim posebnim rasporedom opruga, negativna krutost strukture i pozitivna krutost dodatne horizontalne opruge se iskorištavaju za stvaranje velikog područja kvazi-nulte krutosti i bi-stabilne krutosti. Kod velike kompresije, spoj strukture dolazi u kontakt s donjom pomoćnom oprugom (narančasta točka na slici 3.59). Nakon kontakta, pozitivna krutost donje pomoćne opruge zajedno s negativnom krutošću strukture stvara bistabilnu krutost i kvazi-nultu krutost velikog raspona.



Slika 3.59 Shematski prikaz gibanja uređaja [59]

Relativno gibanje unutar strukture pokreće MMR sustav koji je prikazan na slici 3.60. Zupčasta letva spojena je s donjim šipkama strukture škara. Kada se letva pomakne put unutrašnjosti ispravljača, dva lijeva zupčanika će se spojiti međusobno, a spiralna opruga ugrađena na ispravljač će se zategnuti. Na taj način, kinetička energija iz gibanja letve može se pohraniti u spiralnu oprugu tijekom procesa pohrane energije. Istodobno, zupčanik generatora također se okreće u smjeru kazaljke na satu kako bi generirao energiju. Kada se letva izvuče iz MMR-a, dva lijeva zupčanika se isključuju. Nakon završetka procesa pohrane energije, elastična potencijalna energija pohranjena u spiralnoj opruzi se oslobađa. U procesu pohranjivanja energije trenutna izlazna snaga ovisi o brzini letve, dok u procesu oslobađanja

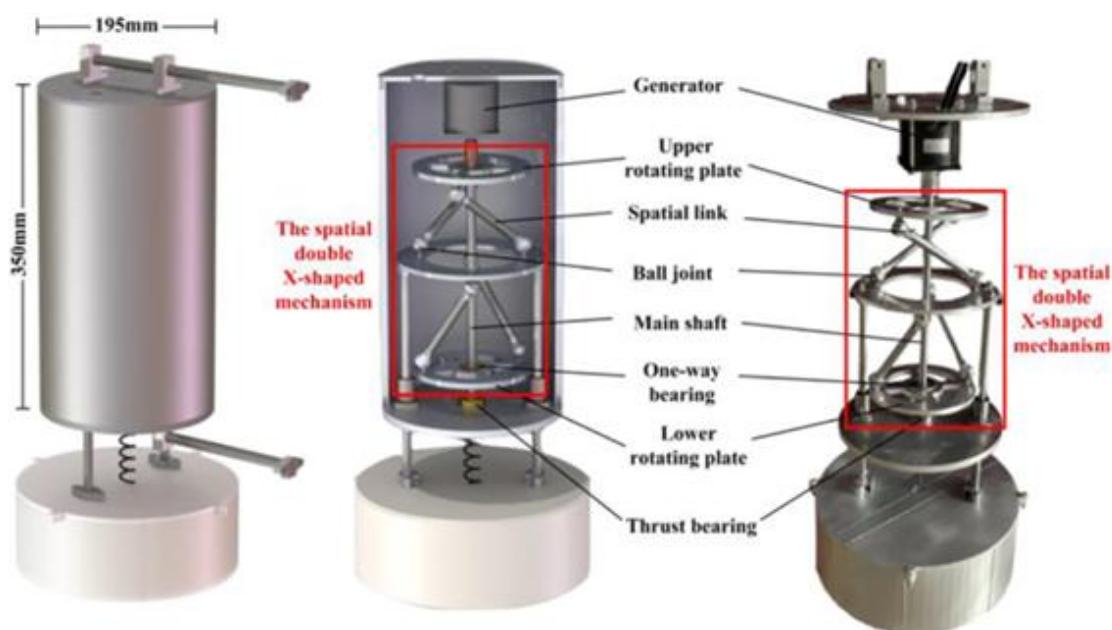
energije, trenutna izlazna snaga ovisi o pomaku gibanja letve. Model uređaja je simuliran s ulazom visine vala od 0,04 m i 0,14 m i frekvencije vala od 0,4 Hz do 0,8 Hz. Uočeno je da je odziv uređaja značajno povećan pri visini vala od 0,055 m zbog aktiviranja bi-stabilne karakteristike sustava. Autori su primijetili da se s povećanjem frekvencije vala, kritična visina vala za aktiviranje bi-stabilne karakteristike smanjuje od 0,073 m do 0,034 m. Općenito, količina prikupljene energije se povećava s povećanjem visine vala i njegove frekvencije. Prototip uređaja izrađen je i ispitan na ispitnom stolu s ulazom amplitude od 0,1 m i 0,15 m u vremenu od 2 sekunde i 0,15 m pri vremenu od 4 sekunde. Uređaj je prikupio maksimalnu snagu od 1 W i također je ispitan terenski na morskoj obali gdje je ostvarena snaga od 0,7 W.



Slika 3.60 Prikaz rada mehaničkog ispravljača gibanja [59]

Xie i dr. [60] predložili su oscilirajući uređaj za prikupljanje energije valova temeljen na prostornom mehanizmu dvostrukog X oblika za senzore s vlastitim napajanjem u mostovima. Uređaj je ugrađen na stup mosta i sastoji se od četiri dijela: dio za preuzimanje energije valova, dio za pretvorbu gibanja, generator i dio za pohranu energije. Dio za preuzimanje energije valova sastoji se od cilindrične šuplje plutače, dvije potisne šipke, dva vodootporna brtvena prstena i dvije tlačne opruge. Gornji kraj plutače učvršćen je s dvije potisne šipke, koje su usklađene s linearnim ležajevima unutar uređaja. Dva vodootporna brtvena prstena postavljena su na dnu cilindra, pričvršćena na potisne šipke. Tlačna opruga ugrađena je između dna plutače i cilindra. Dio za pretvorbu mehaničkog gibanja pretvara oscilatorno pravocrtno gibanje u jednosmjerno rotacijsko gibanje i sastoji se od prostornog dvostrukog mehanizma u obliku slova X, oscilirajuće ploče, gornje i donje rotirajuće ploče, aksijalnog ležaja, dva jednosmjerna ležaja i glavnog vratila (slika 3.61). Cijeli mehanizam smješten je u cilindru, gdje je oscilirajuća ploča spojena s vrhom potisnih šipki. Gornja rotirajuća ploča i donja rotirajuća ploča spojene su s obje strane oscilirajuće ploče putem dva seta prostornih dvostrukih veza (sfernih oslonaca)

čiji su smjerovi suprotni. Kuglice su postavljene na donju površinu gornje ploče, gornju površinu donje ploče i obje strane oscilirajuće ploče. Dva jednosmjerna ležaja ugrađena su unutar gornje i donje rotirajuće ploče putem steznog spoja. Model uređaja je razvijen i simuliran u programskom paketu MATLAB za utvrđivanje optimalnog vanjskog električnog otpora za dobivanje najveće moguće vrijednosti prikupljene energije. Autori su izradili prototip i eksperimentalno ga ispitali na ispitnom stolu i na terenu. Korišteni su ulazi s amplitudom od 2 mm, 4 mm i 6 mm i frekvencijama od 1 Hz, 1,5 Hz i 2 Hz. Najveća prikupljena snaga dobila se pri amplitudi od 6 mm i frekvenciji od 2 Hz i iznosi 2,359 W. Postavljeni su trendovi rasta učinkovitosti uređaja s povećanjem amplitude i frekvencije ulaza. Uređaj dostiže maksimalnu učinkovitost od 57,34 % pri najvećoj amplitudi i frekvenciji. Ulaz korišten za terensko ispitivanje ima amplitudu od 15 mm i frekvenciju od 1,2 Hz pri čemu je uređaj generirao napon od 3 V.

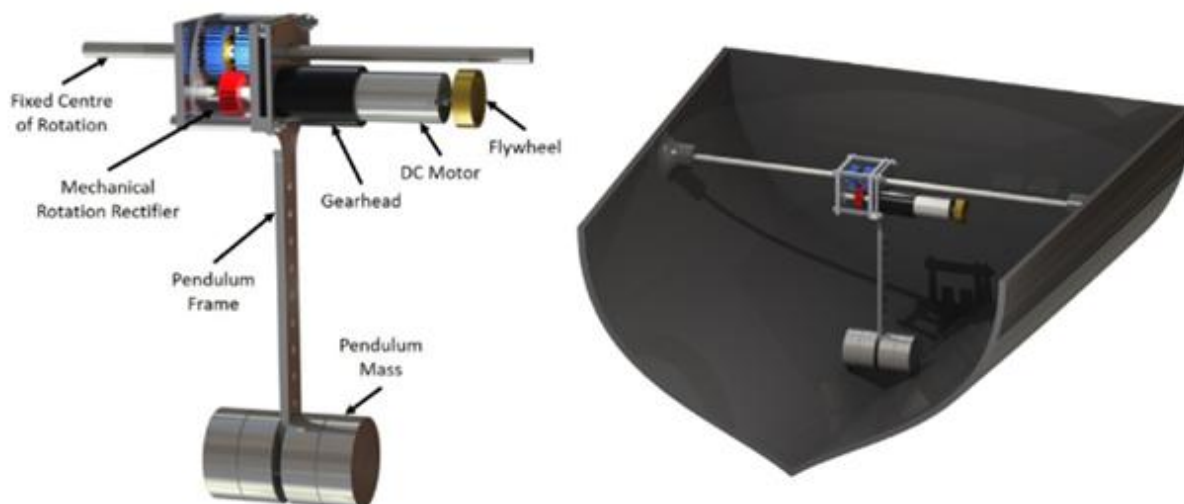


Slika 3.61 Dijelovi pretvarača gibanja [60]

Dang i dr. [61] eksperimentalno su istražili hidrodinamičke radne značajke i učinkovitost pretvorbe energije uređaja za prikupljanje energije valova. Uređaj se sastoji od sljedećih dijelova: polukuglaste plutače, mehanizma zupčanika s letvom, mehaničkog ispravljača gibanja spojenog sa zamašnjakom, magnetoreološke kočnice i linearnog aktuatora. Plutača i potisna osovina prisiljene su se kretati zajedno gore-dolje pod utjecajem vala. Zatim se translacijsko gibanje plutače pretvara u dvosmjerna rotacijska gibanja pomoću mehaničkog prijenosnika čija vratila predstavljaju ulazna vratila u ispravljač gibanja. Veliki zupčanici u ispravljaču su ugrađeni s jednosmjernim ležajevima koji omogućavaju pretvorbu gibanja iz dvosmjerne

rotacije u jednosmjernu. Zamašnjak je spojen s izlaznim vratilom radi pohrane i ujednačavanja rotacije. Snaga na ulaznom vratilu se prenosi na zamašnjak kada je rezultat umnoška njegove trenutne brzine i prijenosnog omjera isti ili veći od brzine zamašnjaka. U suprotnom, zamašnjak spojen kočnicom pokreće njegova pohranjena energija, pa se ulazno vratilo generatora rotira samo inercijom. Glavna svrha kočnice je stvaranje otpornog momenta. Kako bi se simuliralo opterećenje generatora, kočnica je zatim pričvršćena na izlazno vratilo ispravljača. Linearni aktuator koristi se za podešavanje kuta u odnosu na vertikalni smjer kako bi se istražilo prikupljanje snage u načinu rada s kombinacijom nagiba i udara. Kod eksperimenta, izvršeni su testovi gdje su se varirale amplitude i frekvencije generiranih sinusoidnih valova, otpori pomoću kočnice, mase plutača i kutovi nagiba plutača. Pri najpovoljnijim uvjetima rada, uređaj ostvaruje učinkovitost od 80,4 % za prikupljenu snagu od 25 W. Otkriveno je da masa ima veliki utjecaj na radne značajke uređaja zbog direktne veze s rezonantnom frekvencijom.

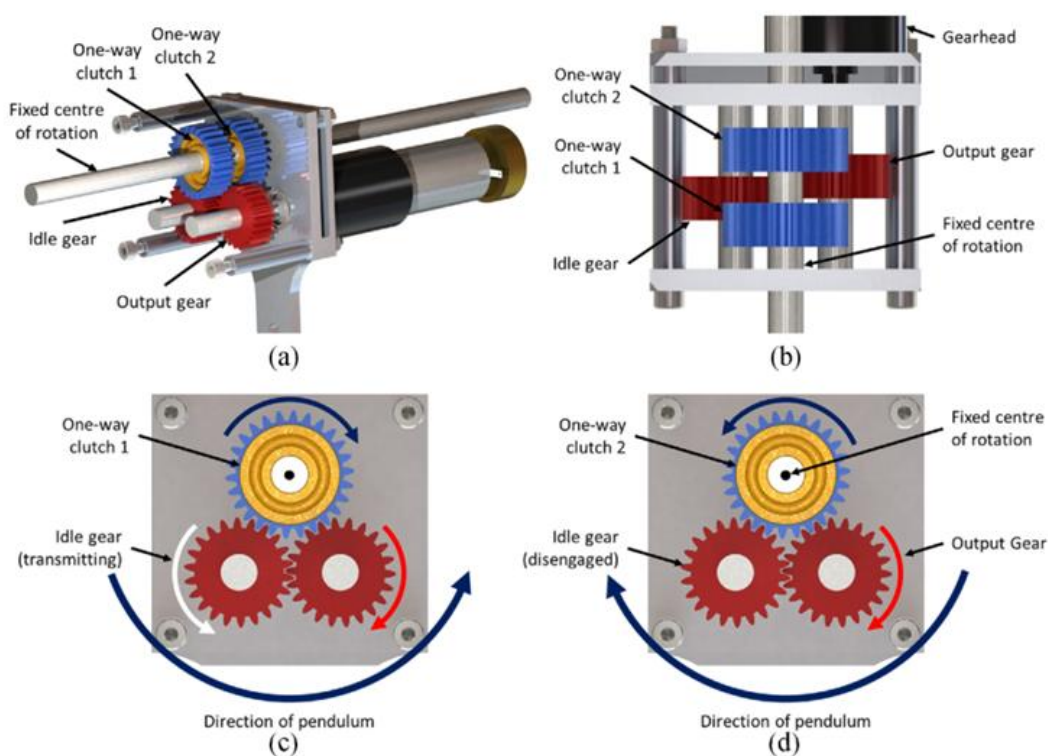
Graves i dr. [62] predstavili su uređaj za prikupljanje energije valova ugrađen na bespilotno plovilo. Uređaj je prikazan na slici 3.62 i sastoji se od okvira njihala, mase, mehaničkog ispravljača gibanja, zamašnjaka i generatora s prijenosnikom. Najdulje vratilo djeluje kao središte rotacije preko širine plovila i pričvršćeno je na trup na svojim krajevima tako da se cijeli okvir njihala okreće oko njega. Rotacija cijelog sklopa omogućuje jednostavnu montažu i omogućuje da masa motora i zupčanika doprinesu masi njihala.



Slika 3.62 Osnovni dijelovi predloženog uređaja [62]

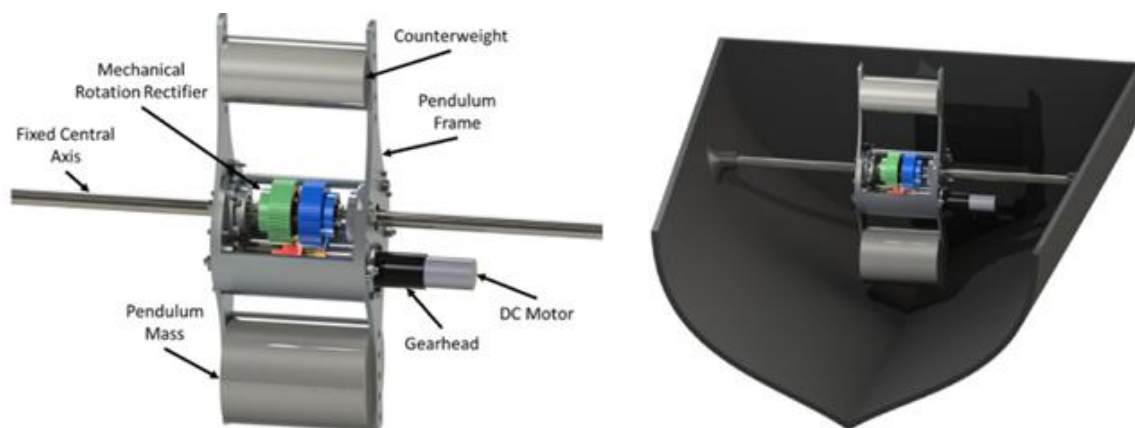
Mehanički ispravljač gibanja se sastoji od dvije jednosmjerne spojke i 4 cilindrična zupčanika (slika 3.63). Na središnjem vratilu nalaze se dvije jednosmjerne spojke koje su postavljene u suprotnim smjerovima sa zupčanicima ugrađenim na njihov vanjski prsten. Dva

manja vratila sadrže po jedan pričvršćen zupčanik koji su međusobno u zahvatu i raspoređeni su tako da je svaki od njih u kontaktu s jednom od jednosmjernih spojki. Na slici 3.63 može se vidjeti da kada se klatno vrti u smjeru suprotnom od kazaljke na satu uključuje se jednosmjerna spojka 1 koja pokreće zupčanik u mirovanju koji onda pokreće i izlazni zupčanik, a samim time i ulazno vratilo prijenosnika koje vodi do generatora. Kod okretanja klatna u smjeru kazaljke na satu, uključuje se jednosmjerna spojka 2 čiji zupčanik tada izravno pokreće zupčanik ulaznog vratila prijenosnika. Ovaj mehanizam je moguć zbog blagog pomicanja zupčanika iz njihovih ravnina. Jednosmjerne spojke također se mogu isključiti kada je ulazna brzina klatna manja od brzine vrtnje na vratilu elektromotora tako da ulaz ne utječe negativno na prikupljanje energije. Još jedna prednost ovakve konstrukcije je što se njezina veličina može varirati s povećanjem odnosno smanjenjem mase klatna i odabira prikladnih zupčanika koji će podnijeti opterećenja. Uređaj je ispitan eksperimentalno gdje je utvrđeno da je generirani napon veći pri rotaciji klatna u smjeru kazaljke na satu zbog manjeg broja dijelova koji prenose moment što smanjuje prigušenje, udare i time se ostvaruje veća učinkovitost pretvorbe energije. Pobuda na ispitnom stolu je sinusoidna s frekvencijama u intervalu od 0,5 Hz do 2 Hz i amplitudom od 150 mm. Korišten je vanjski električni otpor od 900 Ω pri kojem se pokazalo da uređaj prikuplja najviše energije. Pokazano je da je rezonantna frekvencija uređaja 1 Hz pri kojoj prikuplja najveću snagu koja iznosi 0,72 W. Za te uvjete rada uređaj ima učinkovitost od 43,5 %.



Slika 3.63 Način rada mehaničkog ispravljača gibanja [62]

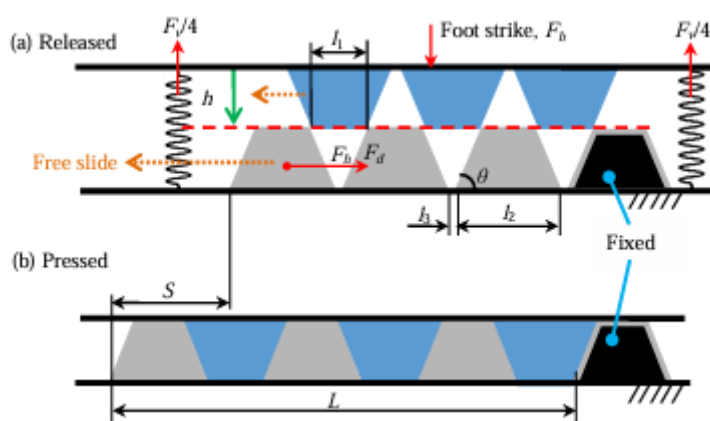
Autori su izveli konstrukciju i s protutegom [63] koji ima efekt smanjenja rezonantne frekvencije uređaja za koju će biti prikupljena maksimalna snaga. Također, dodatkom protutega dimenzije konstrukcije odnosno duljina kraka ne treba se povećavati za smanjenje rezonantne frekvencije. Mehanizam mehaničkog ispravljača gibanja je jednak onome iz [62] i cijela konstrukcija je prikazana na slici 3.64. Uređaj je izrađen i provedeno je eksperimentalno ispitivanje sa i bez protutega. Mase utega i protutega su 7,9 kg odnosno 4,4 kg. Bez protutega, uređaj je prikupio snagu od 4,58 W pri njegovoj rezonantnoj frekvenciji od 1,1 Hz i ubrzanju 0,2 g. S postavljenim protu utegom na kraku od 175 mm i pri ubrzanju od 0,13 g i frekvenciji od 1,1 Hz, prikupljeno je 0,54 W snage. Autori su doveli u vezu vanjski električni otpor s krakom protutega i prikupljenom snagom. Utvrđeno je da se s povećanjem otpora povećava prikupljena snaga do kritične vrijednosti nakon čega opada. Nadalje, smanjenjem kraka protutega povećava se maksimalna prikupljena snaga pri optimalnom otporu i rezonantnoj frekvenciji. Također, povećanjem kraka protu utega, povećava se i optimalni otpor pri kojem će uređaj prikupiti najviše snage. Postavljena je i ovisnost rezonantne frekvencije, omjera krakova utega i protutega čime se pokazalo da će snaga prikupljena pri smanjenoj rezonantnoj frekvenciji uvijek biti manja kod uređaja s protutegom nego kod uređaja bez protutega. Razlog tomu je što momenti utega i protutega uvijek djeluju u suprotnom smjeru.



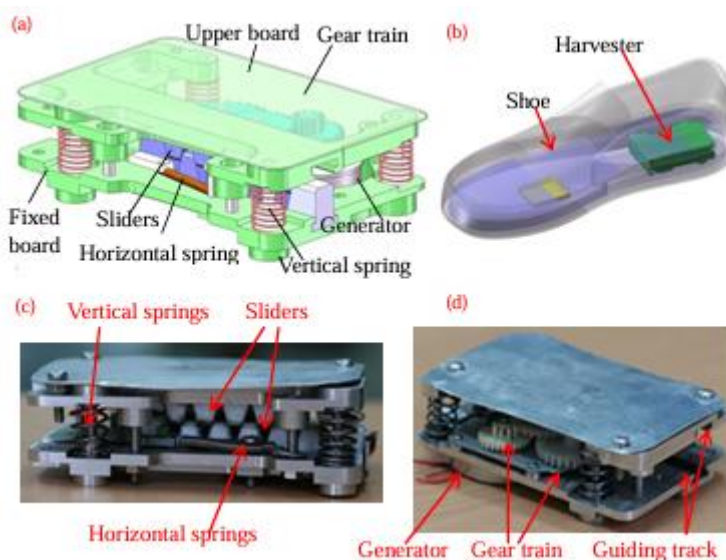
Slika 3.64 Osnovni dijelovi uređaja i prikaz njegove montaže u bespilotno plovilo [63]

Boljim razumijevanjem dinamike ljudskih pokreta poput hodanja, trčanja i pokreta ljudskih ruku, otvorio se prostor razvitku regenerativnih uređaja koji mogu prikupiti energiju različitih ljudskih radnji. Glavna svrha ovih uređaja bila bi napajanje osobne elektronike. Tako su Xie i Cai [64] razvili uređaj ugrađen u potplat cipele koji prikuplja energiju udara noge od površinu prilikom hoda. Zbog zahtjeva da se ne oteža hod prisutnošću ovog uređaja, razvijen je mehanizam trapezoidnog klizača koji pojačava zadani niski pomak (slika 3.65). Uređaj se sastoji od donje fiksne ploče, gornje pokretne ploče, horizontalnih i vertikalnih opruga, dva seta

trapezoidnih klizača, zupčanog prijenosnika za pretvorbu linearnog gibanja u rotacijsko i mikrogeneratora. Udarcom pete od gornju ploču, ona se pomiče put dolje gdje se linearno gibanje pojačava trapezoidnim klizačem na čijem je kraju zupčasta letva koja je u zahvatu s zupčanicima i na njihovom se izlazu nalazi generator. Autori su izradili prototip i ugradili ga u cipelu za eksperimentalno ispitivanje na traci za trčanje. Ispitivanje je teklo na način da je pet studenata hodalo na traci deset minuta pri brzini od 3 km/h i 5 km/h koje predstavljaju lagan i ubrzan hod. Utvrđeno je da je više snage prikupljeno pri većoj brzini hoda. Prikupljena snaga je varirala od 0,81 W za nižu brzinu do 1,39 W za višu brzinu hoda. Za ove uvjete pokazano je da je prosječna učinkovitost uređaja 57 %.



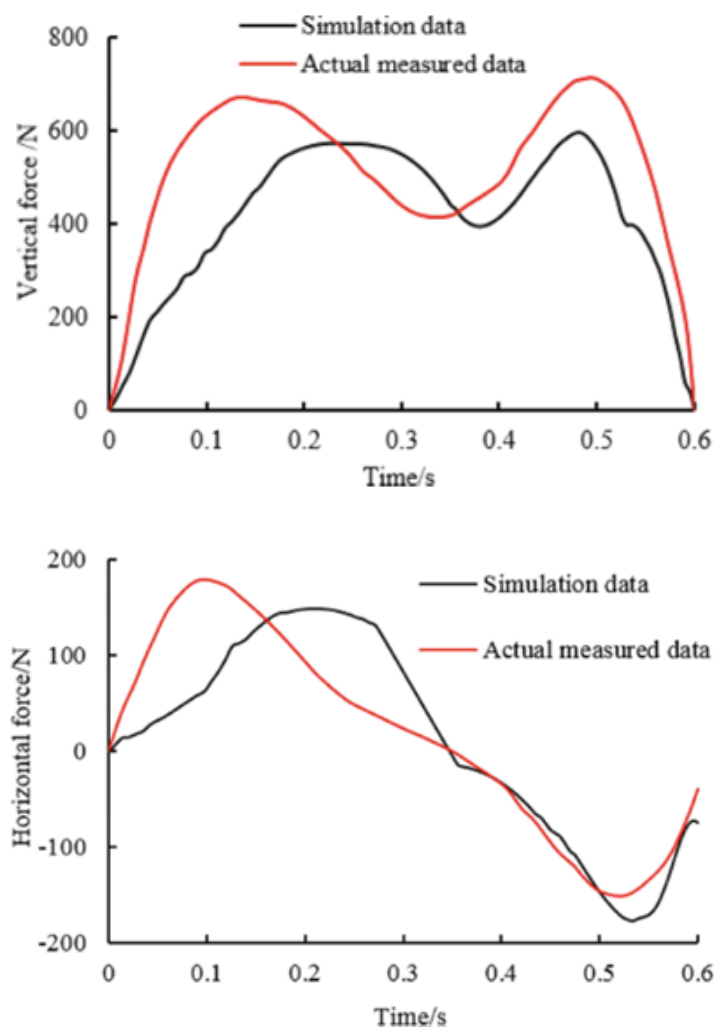
Slika 3.65 Trapezoidni klizač za amplifikaciju pomaka [64]



Slika 3.66 Glavni dijelovi uređaja [64]

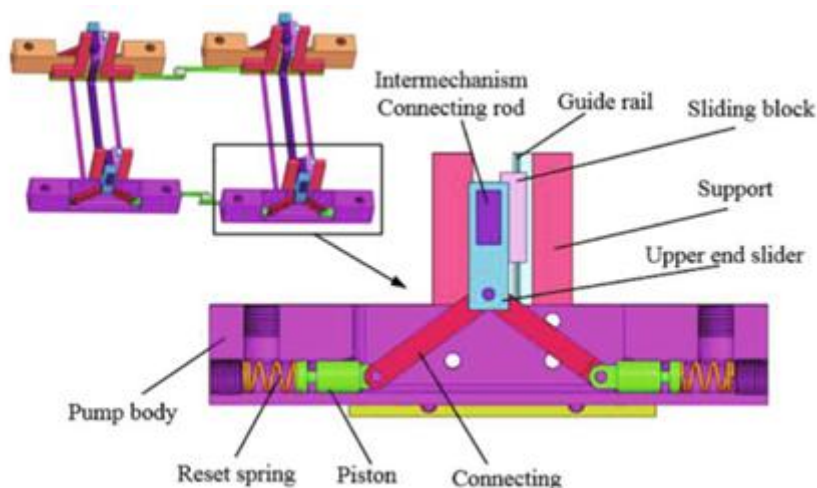
Shi i dr. [65] su istražili dinamiku ljudskog hoda i na temelju dobivenih izraza razvili hidraulički uređaj za prikupljanje energije hoda. Uspostavljen je model s više krutih tijela koji

predstavljaju bedro, potkoljenicu i stopalo i njihova međusobna interakcija je analizirana. Autori su proces hoda podijelili u dvije faze. Prva faza se odnosi na vremenski period između dodira pete s tlom i odvajanja pete od tla i iznosi 0,35 sekundi. Druga faza traje 0,25 sekundi i predstavlja period od odvajanja pete od tla do odvajanja prstiju od tla. Utvrđeno je da je pomak težišta ljudskog tijela u vertikalnom smjeru 3 cm prilikom hoda. Vertikalna komponenta sile doseže svoju najveću vrijednost kada se peta odvoji od tla, a vrhovi prstiju dodirnu tlo. Prva najveća vrijednost je 590 N, dok je druga najveća vrijednost 610 N. Horizontalna sila ima oblik sličan sinusoidi. Maksimalna vrijednost je 150 N kada se peta odvoji od tla, a 180 N kada se vrhovi prstiju odvoje od tla. Ljudski hod je ispitan i eksperimentalno i uspoređen s modelom gdje su rezultati dani na slici 3.67 za vertikalnu i horizontalnu silu. Uočena su odstupanja u numeričkim i eksperimentalnim podacima zbog nesavršenosti mjerne opreme i jedinstvenosti hoda svakog pojedinca.



Slika 3.67 Ovisnost vertikalne i horizontalne sile u vremenu u ljudskom hodu [65]

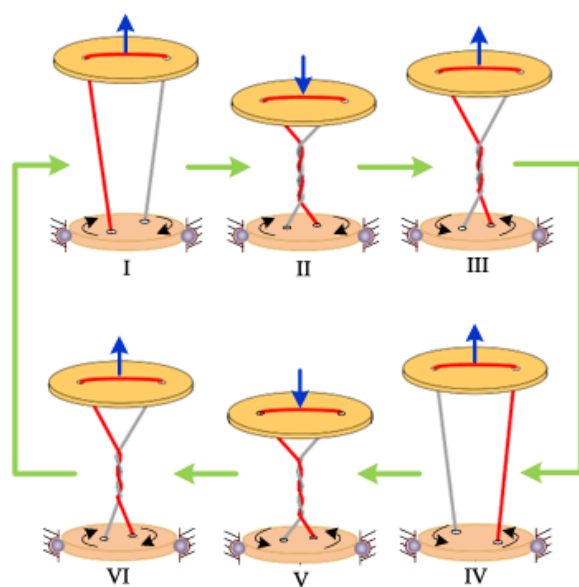
Na temelju dobivenih podataka, autori su predložili hidraulički mehanizam za prikupljanje energije sa simetrično raspoređenim klipovima. Uređaj se sastoji od jednosmjernog ventila, opruge, klipa, klipnjače i gornjeg klizača. Kada stopalo stane na gornji klizač, dvije klipnjače i klip formiraju mehanizam klizača za pokretanje. Kada se opruga komprimira, ulje pod tlakom istječe kroz jednosmjerni ventil na izlazu za ulje. Nakon što ljudsko stopalo napusti gornji klizač, klip se vraća u početni položaj pod djelovanjem sile koju vrši opruga. Kako se volumen komore klipa povećava, ulje se usisava i puni u komoru klipa kroz jednosmjerni ventil. Trodimenzionalni model klizača dan je na slici 3.68. Hidraulički krug uključuje akumulator za pohranu, ventile za kontrolu smjera protoka i druge pomoćne komponente. Izrađen je prototip uređaja koji je eksperimentalno ispitan za različite brzine hoda. Uočeno je da količina prikupljene energije značajno ovisi o predtlaku i krutosti opruga koje se nalaze u akumulatoru gdje se s većim predtlakom može prikupiti više energije, ali ima jako prigušenje pri pokretu stopala prema dolje. Dobiveno je da je prosječna snaga koju prikuplja uređaj za jedno stopalo 3,2 W.



Slika 3.68 Model mehanizma klizača za jedno stopalo [65]

Fan i dr. [66] predložili su mehanizam pretvorbe linearnog gibanja u rotacijsko pomoću užeta za prikupljanje energije ljudskih pokreta. Rotor s užetom sastoji se od rotora diska s dva provrta, komada užeta, poklopca u obliku ploče s dva provrta i opruge. Rotor je obješen o poklopac pomoću užeta koje prolazi kroz ta četiri otvora. Poklopac je pričvršćen na gornji kraj opruge čiji donji kraj je fiksiran. Kako bi se poboljšala stacionarnost rotacije, rotor je montiran na vanjski prsten ležaja kako bi se osiguralo da se rotor okreće samo oko svoje aksijalne osi. Da bi se rotor vrtio pod vibracijama niskih frekvencija ili linearnim gibanjima duž aksijalnog smjera, potreban je početni moment što se omogućava malim zakretom rotora u odnosu na

poklopac. Početni kut uvijanja smanjuje razmak između poklopca i rotora, što uzrokuje sabijanje opruge kroz zategnuto uže. Vlačna sila u užetu tako uzrokuje početni moment za rotor zbog nastojanja da se smanji početni kut uvijanja. Radni proces rotora prikazan je na slici 3.69 na kojoj plave strelice predstavljaju smjer primijenjene sile. Pod pretpostavkom da rotor u početku ima mali kut uvijanja suprotno od kazaljke na satu, tada se stvara moment u smjeru kazaljke na satu s kojim uže djeluje na rotor, što pokreće rotor da se okreće u smjeru kazaljke na satu. Zbog prisutnosti rotacijskog momenta inercije, vrtnja rotora u smjeru kazaljke na satu se nastavlja čak i kada kutni pomak suprotno od kazaljke na satu i moment u smjeru kazaljke na satu nestanu što rezultira kutnim pomakom u smjeru kazaljke na satu i momentom suprotno od kazaljke na satu uz kontinuiranu vrtnju rotora u smjeru kazaljke na satu. Okretanje rotora u smjeru kazaljke na satu bit će olakšano ako se na poklopac sada primijeni sila prema dolje kako bi se suprotstavila povratnoj sili opruge budući da se moment koji ometa rotaciju rotora u smjeru kazaljke na satu smanjuje.

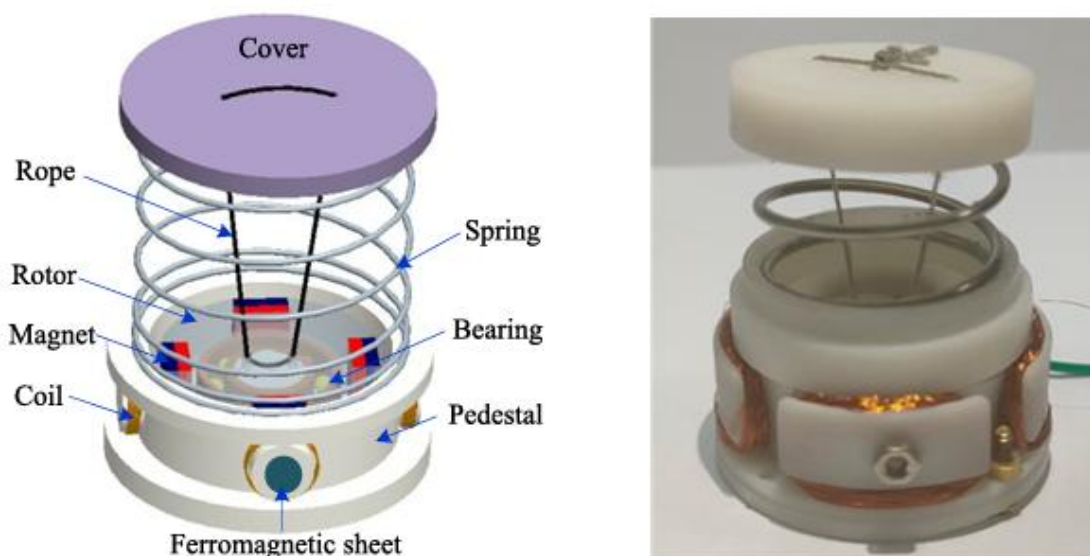


Slika 3.69 Radni proces rotora [66]

Ako se sila prema dolje sada ukloni ili preokrene, moment suprotno od kazaljke na satu uzrokovan vlačnom silom u užetu će pogoniti rotor da se okreće u obrnutom smjeru. Stoga, dvosmjerno okretanje rotora uzrokovano je izmjenom između kinetičke energije rotora i potencijalne energije pohranjene u sabijenoj opruzi i uvijenom užetu.

Prototip predloženog mehanizma je izrađen što je prikazano na slici 3.70 i eksperimentalno testiran. Uređaj je sposoban prikupiti najveću snagu od 9,7 mW pri amplitudi ulaza od 10,5 mm

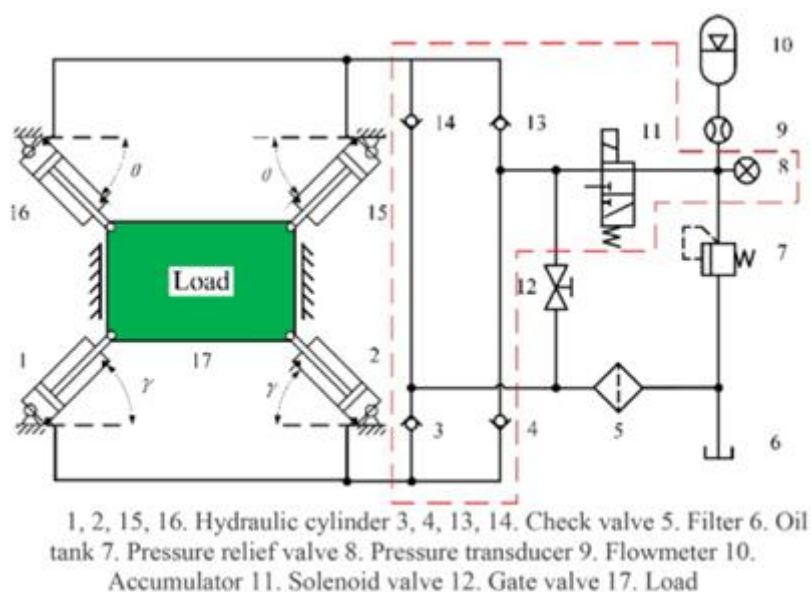
i frekvenciji od 1,5 Hz. Autori su uređaj ugradili u potplat cipele i izmjerili da se hodom od 8 minuta može napajati senzor za mjerenje temperature i vlažnosti zraka u trajanju od 65 minuta.



Slika 3.70 Model i prototip predloženog uređaja [66]

Shi i dr. [67] iskoristili su model ljudskog hoda iz [65] i proširili istraživanje na gibanje trupa prilikom hoda za modeliranje uređaja koji prikuplja energiju hoda i ugrađen je u ruksak. Kako bi se učinkovito iskoristila energija koju stvara opterećenje ruksaka tijekom hodanja, autori su predložili shemu uređaja temeljenu na principu volumetrijske hidraulične pumpe. Za postizanje visoke gustoće snage, četiri simetrično raspoređena hidraulička cilindra učvršćena su sa šipkom koja spaja ploču opterećenja ruksaka. Hidraulički cilindri imaju kut nagiba u odnosu na vertikalni smjer kako bi se povećala sila koju opterećenje generira u vertikalnom smjeru. Na taj način tlak ulja u hidrauličkom cilindru može doseći viši radni tlak kada je izložen kompresiji. Opruga je konstruirana za podešavanje dinamičkih karakteristika sustava. Kada se teret pomiče prema dolje, volumen komore donjih hidrauličnih cilindara se smanjuje. Tada se nepovratni ventil 3 zatvara, a nepovratni ventil 4 otvara (slika 3.71). Komprimirano ulje pod visokim tlakom prolazi kroz nepovratni ventil i solenoidni razvodni ventil i mjerač protoka, a zatim ulazi u akumulator za skladištenje ulja pod visokim tlakom. U međuvremenu, volumen komore gornjih hidrauličnih cilindara se povećava kako bi se izvršilo usisavanje ulja. U tom trenutku, nepovratni ventil 13 se zatvara, a nepovratni ventil 14 se otvara, ulje teče kroz filter i nepovratni ventil 14, ispunjavajući komoru gornjih cilindara. Shematski dijagram uređaja i hidrauličkog kruga dan je na slici 3.71. Izvršeno je numeričko ispitivanje gdje je dokazano da se količina prikupljene snage povećava s povećanjem brzine hoda tako da bi za brzine hoda od 1,03 m/s, 1,3 m/s i 1,53 m/s uz masu ruksaka od 5 kg, uređaj prikupio snagu od 3 W, 3,75 W

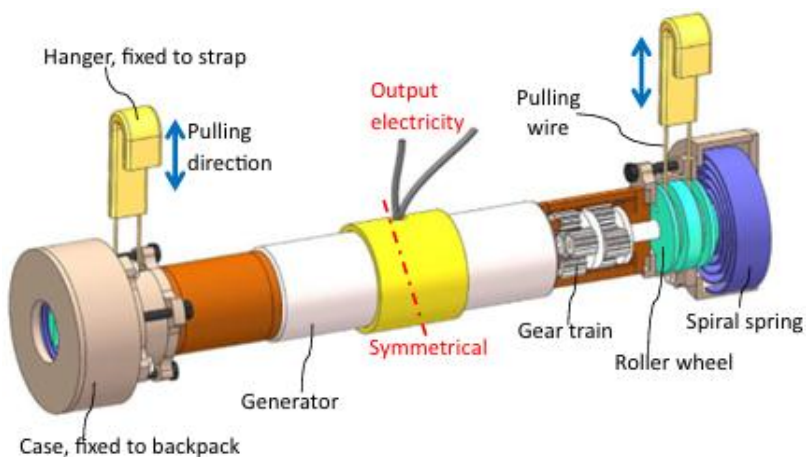
odnosno 4,75 W. Isto tako, jednaku ovisnost ima i masa ruksaka s količinom prikupljene energije. Tako bi za brzinu hoda od 1,53 m/s i masama ruksaka od 5 kg, 10 kg i 15 kg, prikupljena snaga iznosila 4,75 W, 5,6 W odnosno 6,6 W. Uspoređujući ova dva parametra, veći utjecaj ima masa ruksaka od brzine hoda čovjeka. Uređaj je također eksperimentalno testiran s jednakim ulazom. Kod eksperimenta, za zadane brzine hoda, prikupljena snaga iznosi 3,5 W, 4,5 W odnosno 6,2 W. Za različite mase ruksaka, prikupljena snaga iznosi 2 W, 4,2 W i 6 W. Autori su postigli masu uređaja od 2 kg s čeličnim dijelovima koji ima potencijal zamjene s aluminijskim što bi dodatno olakšalo konstrukciju. Uspoređujući numeričke i eksperimentalne rezultate uočena su veća odstupanja pri manjim brzinama hoda i opterećenjima. Općenito odstupanja se događaju zbog nemogućnosti održavanja konstantne brzine hoda u praksi i nemogućnosti reguliranja curenja ulja u eksperimentalnom sustavu. Trenje također uzrokuje odstupanja zbog nemogućnosti njegovog preciznog reguliranja u eksperimentalnom dijelu istraživanja.



Slika 3.71 Shematski dijagram uređaja [67]

Xie i dr. [68] proveli su ispitivanje radnih značajki uređaja za prikupljanje energije ljudskog hoda. Predloženi uređaj ugrađen je u ruksak i radi zajedno s masom u ruksaku kako bi formirao oscilirajući sustav. Ruksak ima dva remena za ramena, pa uređaj ima dva seta mehanizama za sakupljanje energije koji su simetrično sastavljeni (slika 3.72). Mehanizam se sastoji od žice s vješalicom, koloture s ugrađenom spiralnom oprugom, zupčanika i mikrogeneratora. Vješalica je pričvršćena na remen ruksaka, a kada ruksak oscilira tijekom ljudskog hoda, vješalica pokreće vučnu žicu i okreće koloturu. Mehanizam zupčanika se koristi

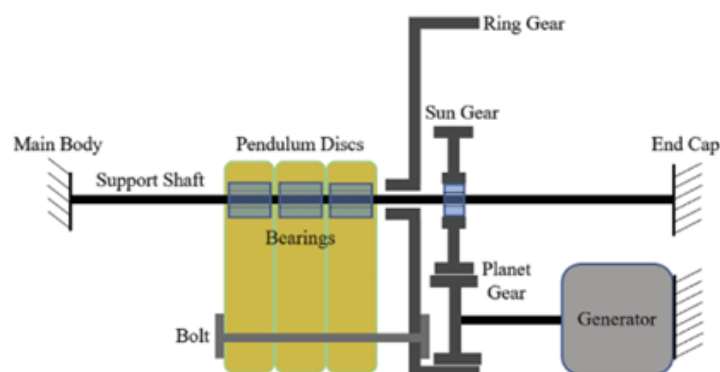
za ubrzavanje rotacije koloture. Spiralna opruga osigurava povratnu silu za povlačenje žice. Sve gore navedene komponente, žice i njezine vješalice, sastavljene su u kućištu, a to kućište je pričvršćeno na ruksak tako da i težina samog sakupljača i masa sadržana u ruksaku služe kao masa oscilacijskog sustava. Električni izlazi iz dva generatora su nepravilni, pa se za ispravljanje električne energije koristi punovalni mostni ispravljački krug kako bi se proizvela istosmjerna struja. Provedeno je eksperimentalno ispitivanje uređaja čija ukupna masa iznosi 380 grama. Uređaj je montiran u ruksak i ispitan je pri masama ruksaka od 2 kg, 3,5 kg i 5 kg i s brzinama hoda od 3,6 km/h do 6 km/h. Utvrđeno je da porast ovih ulaznih parametara povećava i količinu prikupljene snage, s tim da je kod povećanja brzine hoda trend rasta sve manji. Štoviše, nakon određene kritične brzine, ona više nema značajan utjecaj. Također, pokazano je da se s povećanjem mase ruksaka vrijednost kritične brzine snižava. Obzirom na povoljnosti uvjeta rada, uređaj dostiže učinkovitosti od 10 % do 37 %. Maksimalna prikupljena energije uređaja iznosi 7 W pri brzini hoda od 5,5 km/h i masi ruksaka od 5 kg.



Slika 3.72 3D model predloženog uređaja [68]

George i dr. [69] razvili su uređaj za prikupljanje energije pokreta ljudske ruke. Uređaj se sastoji od klatna koje je postavljeno na planetarni prijenosnik na koji dolazi generator i ispravljač. Princip inercijskog prikupljanja energije uređaja oslanja se na korištenje momenta tromosti ekscentrične mase kao izvora pobude. Klatno je polukružnog oblika i najveće mase unutar dopuštenih granica kako bi se dobio najveći ulazni moment. Klatno se sastoji od tri identična polukružna diska. Efektivna inercija sustava rotacije uključuje klatno, planetni zupčanik i spojeni generator istosmjerne struje. Planetarni prijenosnik odabran je kako bi se osigurao prijenosni omjer uz kompaktnu konstrukciju. Aluminijski zupčanik s unutarnjim zubima ima 120 zubi, planetni zupčanik 24 zuba, a sunčani zupčanik 72. Ulazni zupčanik je zupčanik s unutarnjim zubima, a izlaz je na planetnom zupčaniku. Uz stabilnu ugradnju

planetnog zupčanika na vratilo generatora, sunčani zupčanik uklonjen je iz sklopa kako bi se smanjila težina i smanjili gubici trenja zupčanika. Model uređaja dan je na slici 3.73. Prototip uređaja je izrađen i testiran na traci za trčanje s frekvencijom pokreta ruke oko 2 Hz kroz 5 sekundi. Uređaj je prikupio 1,39 mJ što je 81 % od predviđene prikupljene energije. Autori su utvrdili da je razlog tomu varijacija u pokretima ljudske ruke i gubici u generatoru i ispravljačkom krugu.

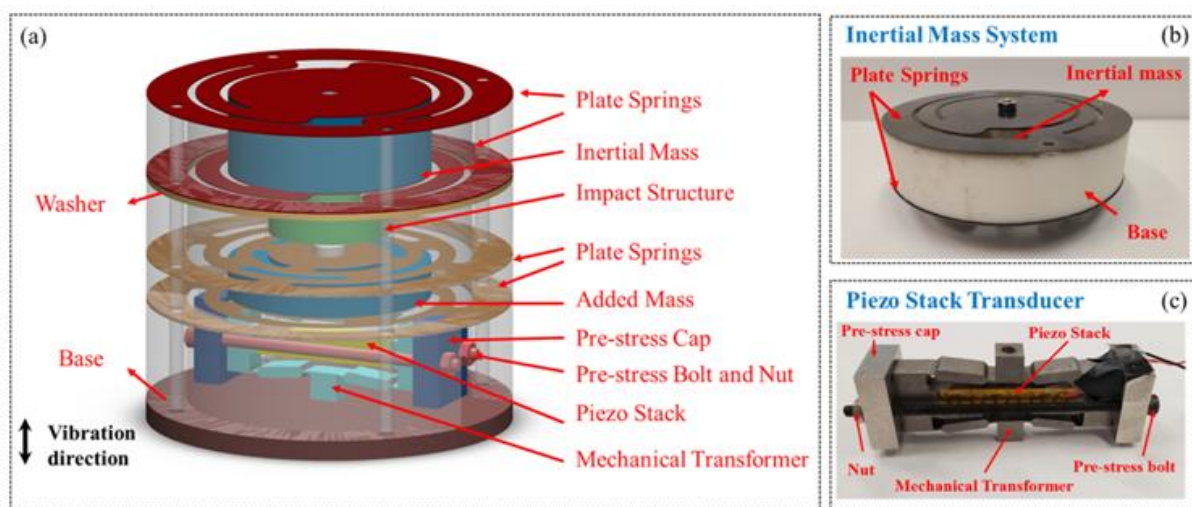


Slika 3.73 Model uređaja za prikupljanje energije pokreta ljudske ruke [69]

3.2. Piezoelektrični uređaji za prikupljanje energije

Iako piezoelektrični uređaji najčešće prikupljaju manje vrijednosti energije, njihova velika prednost je u njihovoj veličini i jednostavnosti izrade i ugradnje što dovodi do manje cijene uređaja. Shan i dr. [70] predstavili su uređaj za prikupljanje vibracija tračnica kojeg su optimizirali i potom izradili i eksperimentalno testirali. Uređaj sadrži dva različita sustava spojena pomoću četiri vijka: sustav mase i sustav piezo pretvornika sa slogom. Sustav mase sastoji se od udarne strukture, dvije pločaste opruge i inercijske mase. Rezonantna frekvencija sustava je dizajnirana tako da se uskladi s dominantnim frekvencijskim rasponom vibracija tračnica. Udarne strukture uspostavlja kontakt sa sustavom pretvornika i time omogućava pretvorbu frekvencije. Sustav piezo pretvornika sa slogom sastoji se od dodane mase, dvije pločaste opruge, piezo sloga, mehaničkog transformatora te prednapregnutih poklopaca i vijaka. Piezo slog se nalazi unutar mehaničkog transformatora. Mehanički transformator pojačava silu i prenosi je na piezo element (33 način rada) koji generira energiju. Dva prednapregnuta poklopca postavljaju se s obje strane mehaničkog transformatora, koji se zatim pričvršćuje i zateže s dva vijka. Na taj način, statičko tlačno naprezanje se primjenjuje na piezo element. Ova tehnika predtlaka koristi visoku tlačnu čvrstoću piezoelektrične keramike i izbjegava stvaranje vlačnog naprezanja što je bitno za osiguravanje trajnosti piezo elementa. Dodatna masa je ugrađena kako bi se snizila rezonantna frekvencija sustava pretvarača.

Pločaste opruge u dva sustava razlikuju se po obliku i funkciji. Pločaste opruge korištene u sustavu mase konstruirane su na način da imaju vrlo nisku krutost što pomaže u održavanju niske rezonantne frekvencije. U sustavu pretvarača, pločaste opruge su namijenjene održavanju vertikalne oscilacije mehaničkog transformatora i istovremeno sprječavaju neželjene vibracije. Kada dođe do vibracija tračnica, sustav mase rezonira s niskofrekventnim vibracijama i udara u sustav pretvarača. Ova interakcija dovodi do stvaranja udarne sile koju zatim pojačava mehanički transformator i potom je prenosi na piezo element. Kao rezultat ove udarne sile, sustav pretvarača slobodno vibrira na vlastitoj visokoj rezonantnoj frekvenciji, čime se generira električna energija. Model uređaja i izrađeni prototip oba sustava prikazani su na slici 3.74.

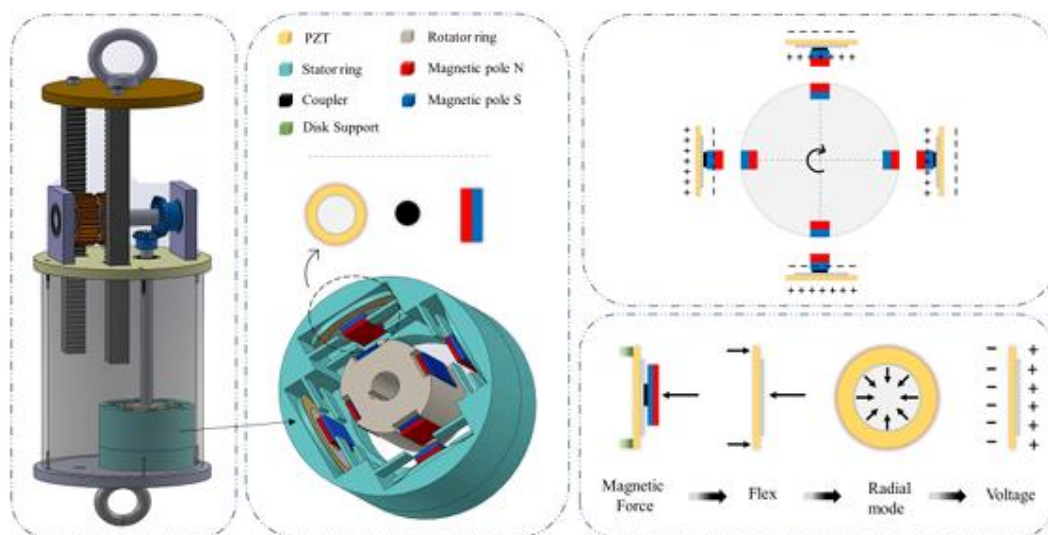


Slika 3.74 Model i prototip uređaja [70]

Ispitivanje je provedeno na ispitnom stolu gdje je utvrđena ovisnost prikupljene snage o električnom otporu gdje je ustanovljeno da je za frekvenciju pobude od 21 Hz, ubrzanju od 0,7 g i podlošci debljine 1,6 mm, najveća prikupljena snaga pri otporu od 150 Ω . Isto tako ispitan je utjecaj debljine podloške na radne značajke uređaja gdje su ispitivanja provedena za debljine podloški od 1,5 mm, 1,6 mm i 1,7 mm. Sve tri debljine podloške proizvode željeni efekt, a to je da se stvore dvije bliske rezonantne frekvencije uređaja. Pokazano je da podloška debljine 1,6 mm daje najveću maksimalnu snagu od 24,5 mW. Testiran je utjecaj inercijske mase na rezonantne frekvencije i radne karakteristike uređaja, pa je tako uređaj testiran s inercijskim masama od 50 g, 150 g i 250 g. Uočeno je da rezonantna frekvencija pretvornika s povećanjem mase opada s 185 Hz na 147 Hz. Također uočeno je povećano naprezanje u mehaničkom transformatoru gdje za mase od 150 g i 250 g naprezanje iznosi 688 MPa odnosno 782 MPa. Prikupljena snaga iznosi 24,5 mW za masu od 150 g, odnosno 22,6 mW za masu od 250 g.

Uređaj je također testiran s pobudom stvarnih vibracija tračnica pri čemu je sustav prikupio snagu od 7,3 mW.

Alhumaid i dr. [71] ispitali su uređaj za prikupljanje energije vibracija ovjesa. Uređaj ima jednaku konstrukciju za prihvat vibracija i mehanički ispravljač gibanja kao i [7] s tim da izlazno vratilo ne okreće rotor generatora nego se električna struja generira odbijanjem odnosno privlačenjem magneta koji onda deformiraju piezoelektrične pločice (slika 3.75).



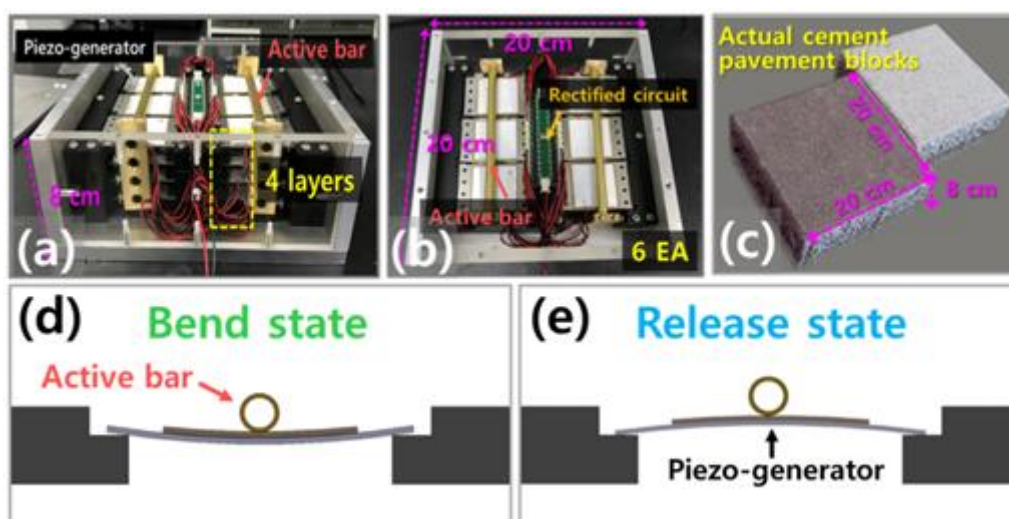
Slika 3.75 Model uređaja i dijela za pretvorbu energije [71]

Dio za pretvorbu energije je konstruiran s dva beskontaktna prstena kako bi se osiguralo da nema gubitka snage zbog trenja. Četiri pravokutna permanentna magneta simetrično su pričvršćeni na unutarnju površinu statorskog prstena koji je pričvršćen na donji poklopac cilindra. Između vanjskog prstena i magneta nalaze se piezoelektrične pločice koje su ugrađene između statorskog prstena i magneta. Magneti su simetrično pričvršćeni na vanjsku površinu rotacijskog prstena koji je spojen na vratilo kako bi se stvorila periodična kompresija zbog odbijajuće/privlačne magnetske sile koja djeluje na piezoelektrične elemente. Budući da su piezoelektrični dijelovi pričvršćeni preko krajeva svojih diskova na nosače diska i zbog prisutnosti spojnog elementa između magneta i piezoelektrika, deformacije uzrokovane magnetskim silama pozicionirane su u sredini što omogućuje savijanje piezoelektričnog diska. Uređaj je eksperimentalno ispitan čime su autori pokazali da se s povećanjem električnog otpora s $4,7 \text{ k}\Omega$ na $11,2 \text{ M}\Omega$ generirani napon povećava s $62,2 \text{ V}$ na 172 V , dok jačina struje opada. Pri sinusoidnom ulazu amplitude 9 mm i frekvencije od $2,5 \text{ Hz}$ maksimalna prosječna prikupljena snaga iznosi $0,948 \text{ mW}$ pri električnom otporu od $1,6 \text{ M}\Omega$ i razmaku magneta od 3

mm. Pokazano je i da sa smanjenjem razmaka magneta izrazito raste i generirani napon s time da se životni vijek piezoelektričnih elemenata skraćuje zbog povećanog naprezanja.

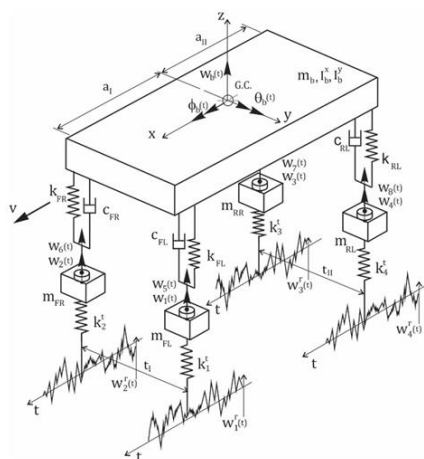
Wang i dr. [72] istražili su upotrebljivost piezoelektričnih uređaja za prikupljanje energije ugrađenih u asfalt. Ukupna debljina uređaja se sastoji od debljine izolacijskog zaštitnog sloja i piezoelektrične keramičke ploče čime se teži što manjoj debljini. Piezoelektrična keramika od olovnog cirkonata titanata se koristi zbog visoke tlačne čvrstoće, visokog piezoelektričnog koeficijenta, visoke dielektrične konstante i jednostavne obrade. Uspoređene su radne značajke uređaja u asfaltnom i cementnom kolniku gdje je bolje radne značajke pokazao uređaj u asfaltnom kolniku s dubinom ukopa od 2 cm do 5 cm. Područje rasporeda uređaja odabran je na temelju uobičajene širine presjeka gume vozila. U ispitivanju su korištene dvije varijante asfalta: 2+3 što označava sloj asfaltne strukture AC-16 od 2 cm i sloj asfaltne strukture AC-13 od 3 cm i 4+6 koji koristi iste asfaltne strukture od 4 cm odnosno 6 cm što predstavlja tipičnu novu asfaltiranu cestu. Piezoelektrični uređaji su izrađeni, ugrađeni u asfaltne strukture i ispitani s opterećenjem od 0,7 MPa. Uređaji ukopani u 2+3 varijantu kolnika dali su 3 puta više snage od uređaja u 4+6 kolniku. Dodavanjem gume u asfalt se pokazalo negativnim za radne karakteristike uređaja zbog apsorpcije opterećenja od strane gume. Općenito, utvrđeno je da je za maksimizaciju prikupljene snage poželjno da donji sloj asfalta bude što tvrdi. Također, radne karakteristike uređaja ovise i o temperaturi asfalta gdje je za temperaturu od 70 stupnjeva celzijusa uočen pad učinkovitosti.

Song i dr. [73] razvili su uređaj za prikupljanje energije ugrađen u nogostup koji je eksperimentalno testiran. Sustav se sastoji od ukupno 24 piezoelektrična uređaja koji su postavljeni po 6 uređaja u svakome sloju. Osam aktivnih šipki služi za primjenu pritiska na piezoelektrične ploče instalirane na svakom katu unutar modula. Slika 3.76 prikazuje izrađeni prototip uređaja i princip rada. Uređaj je ispitan na ispitnom stolu s masama od 40 kg, 60 kg i 80 kg gdje su generirani maksimalni naponi od 66,7 V, 72,3 V odnosno 78,93 V. Autori su testiranjem uređaja pri masi od 80 kg dobili konstantne izlazne veličine kroz 105000 ciklusa što zadovoljava zahtjeve trajnosti. Uređaj je ispitan i pri frekvencijama od 2 Hz do 15 Hz gdje je ustanovljen rast generiranog napona s povećanjem frekvencije do 10 Hz nakon čega slijedi pad. Najveća prikupljena snaga iznosi 129,06 mW pri frekvenciji od 15 Hz i otporu od 2,2 k Ω s učinkovitosti od 26,3 %. Uređaj je konačno ispitan prelaskom autora preko uređaja s masama od 60 kg, 80 kg i 100 kg. Najveća izmjerena prikupljena snaga iznosi 148,38 mW pri masi od 100 kg i otporu od 15 k Ω .



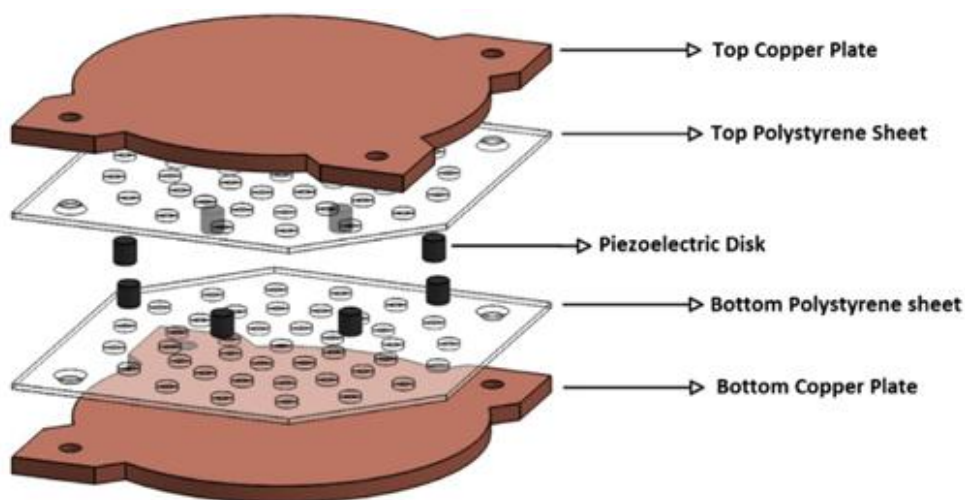
Slika 3.76 Prototip uređaja i princip rada [73]

Morangueira i Pereira [74] istražili su primjenu piezoelektričnih materijala na sustave vozila u svrhu prikupljanja energije vibracija ovjesa. Razvijen je vertikalni model ovjesa automobila s 19 stupnjeva slobode za predviđanje potencijala prikupljanja energije i korišten je za prikaz udobnosti vožnje, sigurnosti na cesti i upravljivosti. Slika 3.77 prikazuje shematski prikaz modela s krutim tijelom u sustavu ovjesa na četiri kotača u kojem je dodan piezoelektrični kristal. Piezoelektrični kristal je modeliran kao disk sa svojim promjerom i debljinom. Ulaz korišten u simulacijama je opisan modelima za neravnine cesta s načinom rada odskoka, odskoka s nagibom i odskoka s okretnim nagibom. Simulacija je provedena pri brzini vožnje od 20 m/s u trajanju od 30 s. Uspoređene su radne značajke različitih piezoelektričnih kristala spojenih na ovjes (BaZrO_3 , PbTiO_3 , $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$, PZT-5A i PZT-5H). Najbolje radne značajke pokazali su PZT-5A i PZT-5H čija prosječna prikupljena snaga iznosi 9,8 mW odnosno 11,3 mW, dok maksimalna prikupljena snaga iznosi 44,72 mW odnosno 32,99 mW.

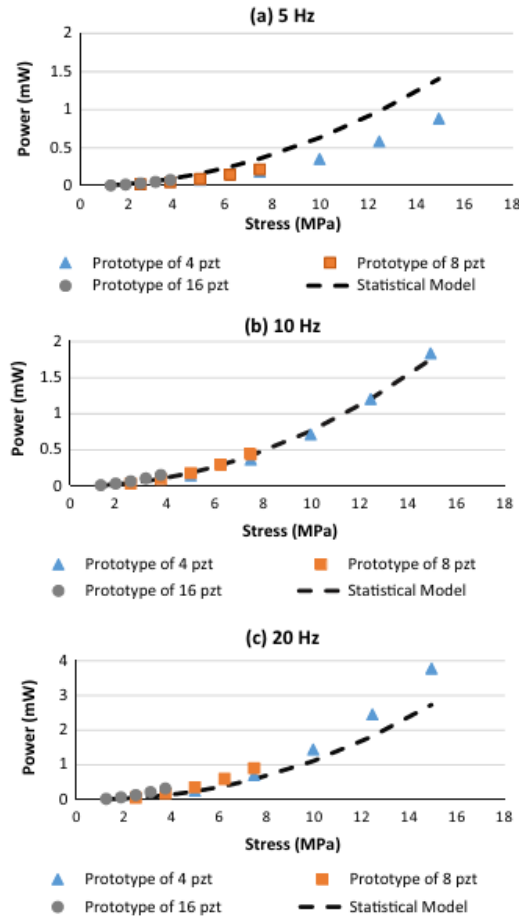


Slika 3.77 Model automobila s 19 stupnjeva slobode [74]

Roshani i dr. [75] ispitivali su radne značajke piezoelektričnog uređaja ugrađenog u kolnik. Komponente uređaja uključuju dvije bakrene ploče s električnim žicama, dva polistirenska lista i piezoelektrične diskove (PZT). Bakrene ploče djeluju kao elektrode za prikupljanje generiranog napona kompresijom piezoelektričnih diskova. Polistirenski listovi korišteni su za sprječavanje klizanja i bočnih pomaka piezoelektričnih diskova te su spojeni na ploču pomoću vijčane veze. Polistirenski materijali su lagani, neprovodljivi i dovoljno čvrsti kako bi se oduprli horizontalnim naprezanjima i bočnim pomacima. Odabrana su tri kružna uzorka rupa za držanje piezoelektričnih diskova. Kako bi se prevladala nepravilnost, svaki disk je zalijepljen na površinskim krajevima električno vodljivim epoksidnim ljepilom koje sadrži srebro kako bi se osigurao potpuni kontakt s bakrenom pločom. Ljepilo također djeluje kao materijal za punjenje kako bi se izbjegla neravnomjerna raspodjela naprezanja koja dovodi do loma diskova. Dvije bakrene ploče su smještene između dvije asfaltne jezgre. Model uređaja sa svojim dijelovima dan je na slici 3.78. Uređaj je izrađen i eksperimentalno ispitan gdje je ugrađen u asfalt na dubini od 38 mm i ispitan s frekvencijama ulaza od 5 Hz, 10 Hz i 20 Hz i silama od 1 kN, 1,5 kN, 2 kN i 2,5 kN. Testiranja su također provedena pri temperaturi od 4, 22 i 40 stupnjeva celzijusa i broju piezoelektričnih diskova 4, 8 i 16. Ispitivanjem pri različitim temperaturama, autori su utvrdili da temperatura nema značajan utjecaj na radne značajke uređaja. Također, povećanjem sile i frekvencije, povećava se količina prikupljene snage. Variranjem broja piezoelektričnih diskova, primijećeno je da se s povećanjem broja diskova prikupljena snaga smanjuje. Slika 3.79 prikazuje ovisnost broja diskova i frekvencije o prikupljenoj snazi. Izračunato je da uređaj s 4 diska može regenerirati 10780 Wh kroz 10 godina životnog vijeka uređaja.



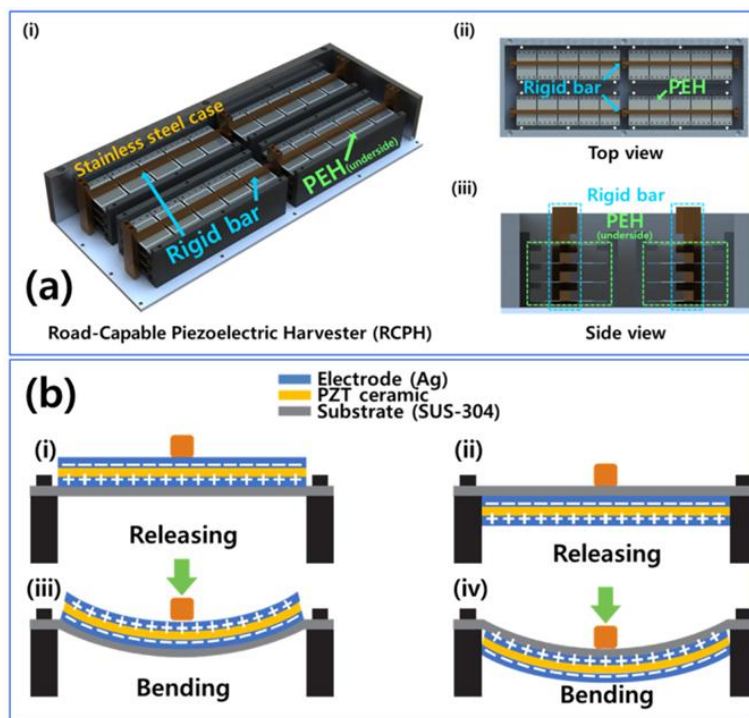
Slika 3.78 Model predloženog uređaja [75]



Slika 3.79 Ovisnost prikupljene snage o frekvenciji ulaza i broju piezoelektričnih elemenata [75]

Hong i dr. [76] proveli su eksperimentalno ispitivanje uređaja za prikupljanje energije ugrađenog u cestu. Sustav uključuje 80 paralelno spojenih piezoelektričnih uređaja. Jedan uređaj se sastoji od piezoelektričnih dijelova pričvršćenih na središte dijela od nehrđajućeg čelika. Slika 3.80 prikazuje unutarnji izgled sustava. Kruta šipka pomiče se vertikalno i potom tlači piezoelektrične uređaje. Provedeno je istraživanje metodom konačnih elemenata kako bi se istražio utjecaj smjera pričvršćivanja uređaja na izlazni napon (slika 3.80 (b)). U prvom tipu, piezoelektrična keramika je pričvršćena ispod podloge, dok je u drugom tipu piezoelektrična keramika pričvršćena iznad podloge. Dobiveno je da smjer pričvršćivanja piezoelektrične keramike nema značajan utjecaj na izlazni napon. Ipak, prvi tip daje nešto bolje rezultate uz to što drugi tip ima izravan kontakt šipke i piezoelektričnih elemenata što može smanjiti trajnost uređaja. Uređaj je ispitan eksperimentalno na ispitnom stolu s amplitudom od 2 mm. Pri frekvenciji od 10 Hz i električnom otporu od 2 k Ω , uređaj je prikupio maksimalnu snagu od 415 mW. Učinkovitost pretvorbe energije iznosi samo 2,2 % zbog korištenja gume za osiguranje brtvljenja uređaja, a pokazalo se da brtva apsorbira veliki dio energije koju sustav

regenerira. Uređaj je također ugrađen u kolnik pri dubinama od 1 cm, 3 cm i 5 cm gdje je uočen trend opadanja generiranog napona s povećanjem dubine. Uređaj je najveću snagu prikupio pri dubini od 1 cm s prelaskom manjeg kombija preko uređaja brzinom od 90 km/h (1150 mW).



Slika 3.80 Izrađeni prototip sustava (a) i dva predložena tipa piezoelektričnog uređaja (b)
[76]

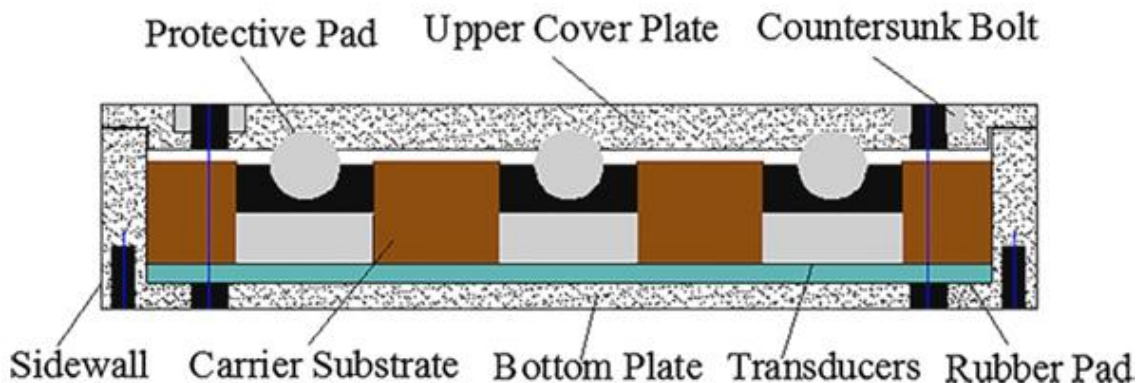
Guo i Lu [77] predložili su uređaj za prikupljanje energije ugrađen u kolnik. Predloženi sustav se sastoji od dva vodljiva asfaltna sloja i jednog sloja piezoelektričnog materijala. Asfalt je izrađen s vodljivim dodacima kao što su čelična vuna, grafit i crni ugljen. Prednosti korištenja vodljivog asfalta su povećana utjecajna površina uređaja za prikupljanje energije, manje narušavanje karakteristika kolnika i veća sloboda kod odabira dimenzija piezoelektričnog i asfaltnog sloja. Negativna strana ovog dizajna je što se dva vodljiva asfaltna sloja ne smiju dodirivati jer će se prikupljena energija tada potrošiti u kratkom spoju između asfaltnih slojeva. Još jedan problem ovog dizajna je utjecaj kiše na sustav zbog vodljivosti vode što može biti štetno ako voda uđe u piezoelektrični sloj. Autori su ovaj problem riješili korištenjem gustih asfaltnih smjesa i uvođenjem vodootpornog sloja za zaštitu piezoelektričnog elementa. Izrađeni prototip je testiran na ispitnom stolu (slika 3.81), a piezoelektrični materijal koji je korišten u eksperimentu je PZT keramika. Sustav je ispitan pri frekvenciji od 1 Hz i silama od 88 N i 133 N gdje je generiran napon 4,5 V odnosno 7,6 V. Uočeno je da s povećanjem krutosti asfalta generirani napon opada. Također, povećanjem broja piezoelektričnih elemenata smanjuje se

rezonantna frekvencija što bolje odgovara prirodi opterećenja, a time se poboljšavaju radne značajke sustava. Predloženi sustav je prikupio maksimalnu snagu od 1,2 mW.



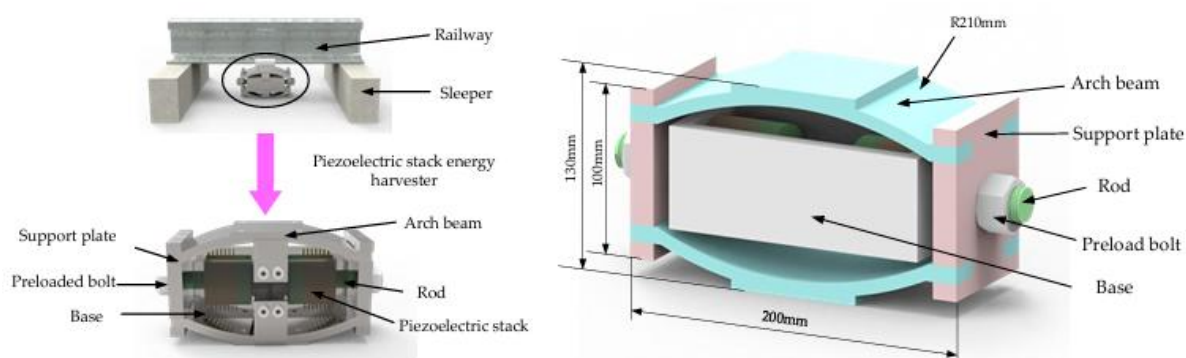
Slika 3.81 Eksperimentalni postav predloženog sustava [77]

Wang i dr. [78] izvršili su optimizaciju i eksperimentalno ispitivanje uređaja za prikupljanje energije ugrađenog u asfalt. Uređaj se sastoji od kućišta, zaštitne pločice i pretvornika s nosivom podlogom (slika 3.82). Aluminijsko kućište služi za zaštitu od oštećenja uzrokovanih opterećenjem i vodom. Pokazalo se da aluminijsko kućište može povećati prikupljenu energiju jer bolje prenosi opterećenje na pretvornike. Polipropilenska zaštitna podloga služi za ravnomjernu raspodjelu opterećenja. Nosiva podloga pretvornika sadrži utor za montažu strujnog kruga i štiti piezoelektrične elemente od trošenja i oštećenja. Uređaj je optimiziran na temelju puta kotača automobila i gume kotača gdje su dobivene optimalne duljine uređaja i razmaci između njih kao i broj. Provedeno je ispitivanje na ispitnom stolu s opterećenjima od 0,2 MPa do 0,7 MPa, pri frekvencijama od 5 Hz, 10 Hz i 15 Hz. Ispitivanjem je dobiveno da su veću učinkovitost i stabilniju izlaznu struju ostvarili paralelno spojeni uređaji. Utvrđeno je da se s povećanjem gustoće prometa, frekvencije i broja pretvornika, povećava i prikupljena snaga. Maksimalna prikupljena snaga iznosi 50,41 mW s devet paralelno spojenih pretvornika s dimenzijama sustava 150 mm × 150 mm i otporom od 4 kΩ.



Slika 3.82 Model predloženog uređaja [78]

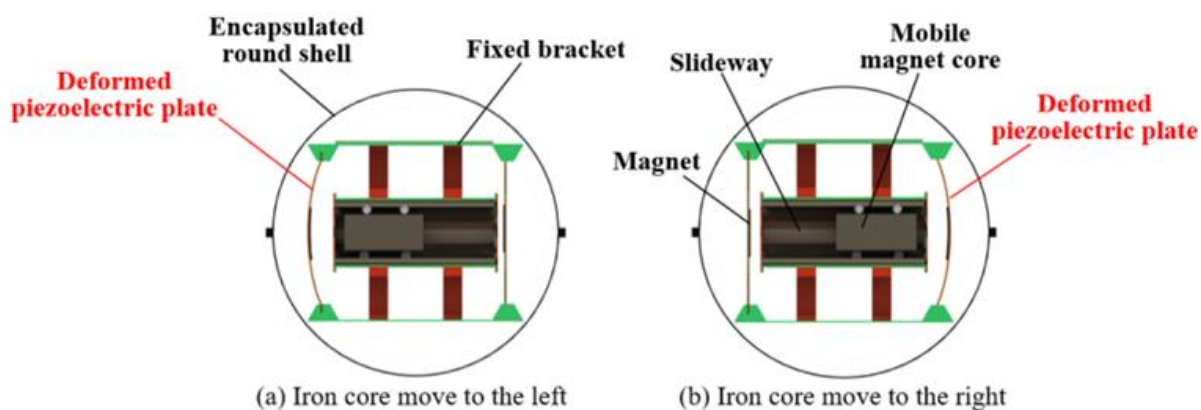
Min i dr. [79] proveli su numeričko i eksperimentalno ispitivanje piezoelektričnog sloga ugrađenog na tračnice. Sustav za prikupljanje energije sastoji se od luka, potporne ploče, vijka za prednaprezanje, šipke, baze, tlačnog diska i piezoelektričnog sloga. Kada luk primi vertikalne vibracije i udar od tračnice, deformira se i generira bočni pritisak prema van na kliznu potpornu ploču. Potporna ploča, vijak za prednaprezanje, spona i tlačni disk osiguravaju da je piezoelektrični slog tlačno opterećen. Piezoelektrični sloj u uređaju raspoređen je u dvije grupe, što uravnotežuje naprezanje i deformaciju luka. Svaka grupa piezoelektričnog sloja sastoji se od 12 prstenastih piezoelektričnih ploča spojenih paralelno. Svaki piezoelektrični sloj sastoji se od dvije piezoelektrične ploče spojene serijski kao jedinica, a zatim je tih šest jedinica spojeno paralelno. Model uređaja dan je na slici 3.83.



Slika 3.83 Model predloženog uređaja [79]

Uređaj je ispitan eksperimentalno gdje je za silu od 3,01 kN uočena deformacija uređaja od 0,76 mm, a za minimalnu silu od 0,99 kN, deformacija od 0,54 mm. U nastavku je izračunata i krutost uređaja. Uočeno je da se s povećanjem frekvencije ulaza do 12 Hz značajno povećava izlazni napon nakon čega povećanje frekvencije gubi utjecaj. Maksimalna prikupljena snaga uređaja iznosi 193 mW.

Qi i dr. [80] razvili su hibridni uređaj za prikupljanje energije valova koji koristi piezoelektricitet i elektromagnetizam za pretvorbu energije. Predloženi sustav sastoji se od tri glavne komponente: piezoelektričnog dijela, elektromagnetskog dijela i dijela za pohranu energije. Piezoelektrični dio sastoji se od dva piezoelektrična lima koji se deformiraju kontinuiranim gibanjem valova. Elektromagnetski dio uključuje fiksnu zavojnicu i jezgru koja se pomiče naprijed-natrag. Električna energija koju prikupljaju piezoelektrični i elektromagnetski dio pohranjuje se u dijelu za pohranu energije nakon ispravljanja i stabilizacije. Način rada uređaja prikazan je na slici 3.84.

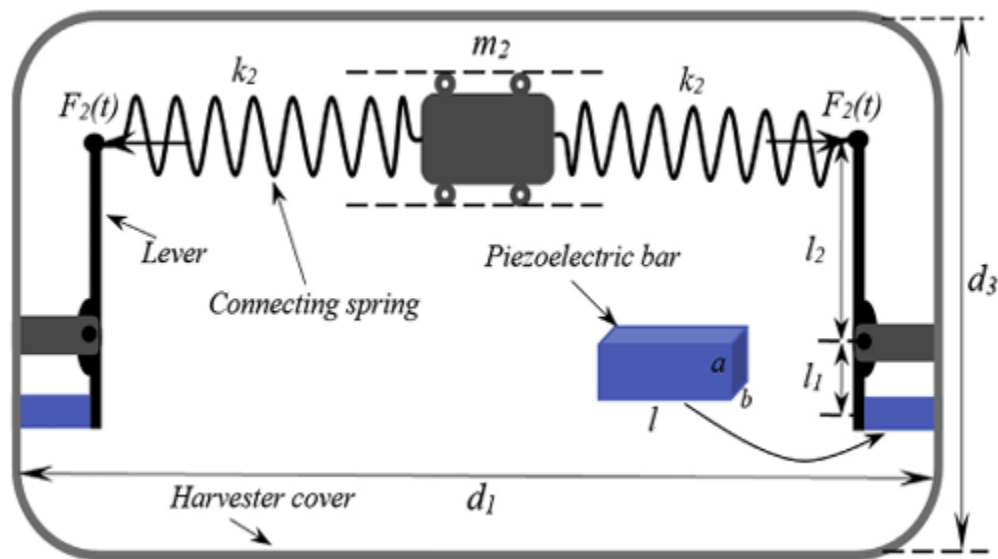


Slika 3.84 Princip rada hibridnog uređaja za prikupljanje energije valova [80]

Prototip je izrađen i provedeno je eksperimentalno ispitivanje s vremenskim intervalima od 0,6, 0,8 i 1 sekunde. Uočeno je da variranje vremenskog intervala ispitivanja nema neki značajni utjecaj na generirani napon. Nadalje, utvrđeno je da se s povećanjem mase magneta, povećava generirani napon. Također, povećanjem razmaka između elektromagnetskog dijela i piezoelektričnog dijela, generirani napon se smanjuje. Maksimalna izmjerena prikupljena snaga uređaja je 162 mW.

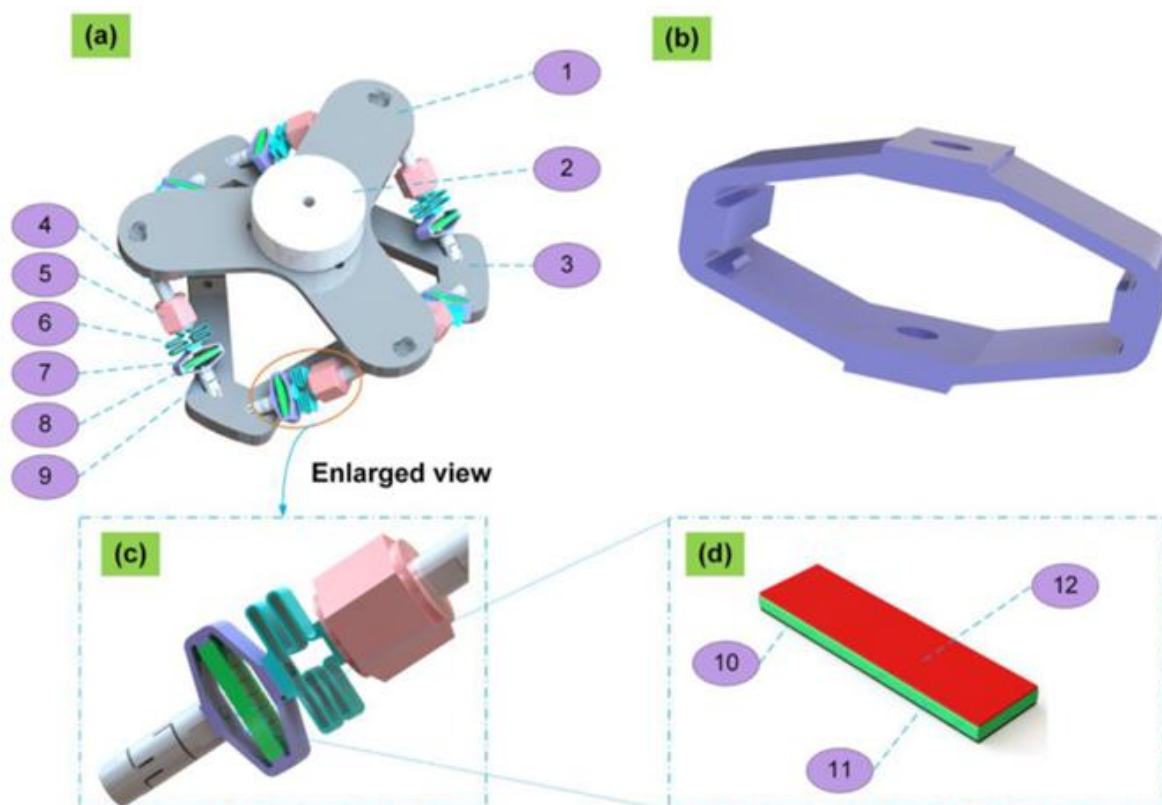
Viet i dr. [81] predložili su uređaj za prikupljanje energije valova u dubokim vodama. Uređaj se sastoji od sustava masa-opruga koji služi za pretvorbu valnih gibanja u mehaničke vibracije i dva piezoelektrična poluzna dijela koji se koriste za pojačavanje i prijenos prikupljenih mehaničkih vibracija (slika 3.85). Matematički model je razvijen na temelju Lagrange-Eulrove metode i riješen je iterativnom metodom za izračun srednje vrijednosti kvadrata generirane električne energije. Utvrđeno je da prikupljena snaga raste s povećanjem amplitude/frekvencije oceanskog vala, mase sustava, duljine i Youngovog modula elastičnosti poluge, te smanjenjem perioda oceanskog vala. Tako za masu od 100 kg, povećanjem amplitude vala od 1 m do 2 m, prikupljena snaga raste s 20 W na 103 W. Pokazano je da bi uređaj prikupio

snagu od 103 W za masu od 100 kg, amplitude vala od 2 m, periodom od 6 sekundi te širine i visine mase od 1 m.



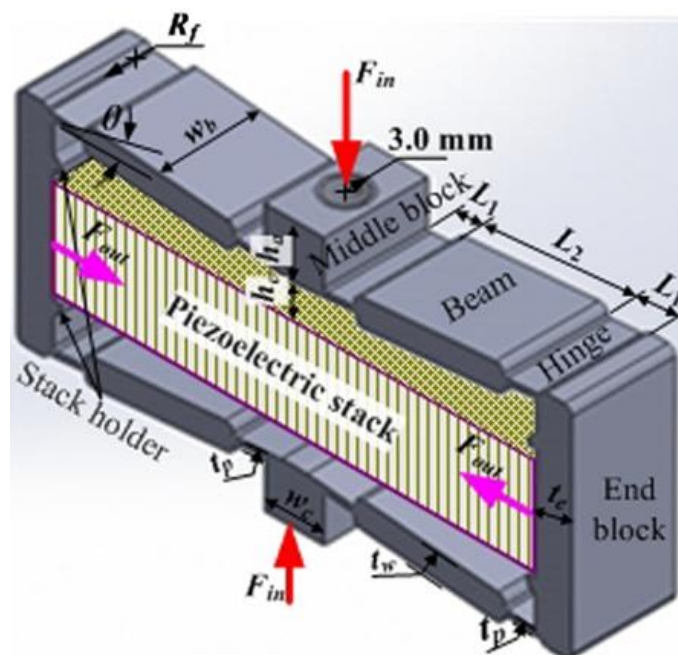
Slika 3.85 Model predloženog uređaja [81]

Li i dr. [82] razvili su uređaj za prikupljanje energije valova. Struktura uređaja sastoji se od tri dijela: osnovne platforme, platforme za opterećenje i šest pojedinačnih jedinica za prigušenje vibracija. Svaka pojedinačna jedinica za prigušenje vibracija uključuje senzor sile, savijenu lisnatu oprugu i dva fleksibilna zgloba spojena na platforme za opterećenje i osnovnu platformu. Sila koja djeluje na piezoelektrični slog je povećana s pojačalom sile, a piezoelektrični slog se može prethodno zategnuti. Savijena lisnata opruga je postavljena na pojačalo sile. Piezoelektrični slog je fiksiran s pojačalom sile u horizontalnom smjeru. Kada se pojačalo sile pritisne u vertikalnom smjeru, sila koja djeluje na piezoelektrični slog se pretvara u povećanu vlačnu silu u horizontalnom smjeru. Kada je uređaj izložen pobudi, vibracije mase predaju vertikalnu silu na platformu za opterećenje. Sila se prenosi duž mehanizma i prolazi kroz fleksibilni zglob i savitljivu lisnatu oprugu, a zatim djeluje na pojačalo sile. Nakon pojačanja, sila djeluje na piezoelektrične slogove. Model uređaja prikazan je na slici 3.86 sa svojim dijelovima (1-platforma za opterećenje, 2-masa, 3-osnovna platforma, 4-fleksibilni zglob, 5-senzor sile, 6-opruga, 7-pojačalo sile, 8-piezoelektrični snop, 9-fleksibilni zglob, 10-piezoelektrična pločica, 11-pozitivna elektroda, 12-negativna elektroda). Uređaj je izrađen i ugrađen na plovilo s brzinama od 5 do 35 nautičkih milja s masama od 0,5 kg, 1 kg i 1,5 kg. Uređaj je pokazao najbolje radne značajke s masom od 0,5 kg i brzinom od 15 nautičkih milja i s masom od 1,5 kg i brzinom od 20 nautičkih milja. Optimiziranjem vanjskog električnog otpora, uređaj je pri masi od 0,5 kg i brzini od 15 nautičkih milja prikupio snagu od 574 mW.



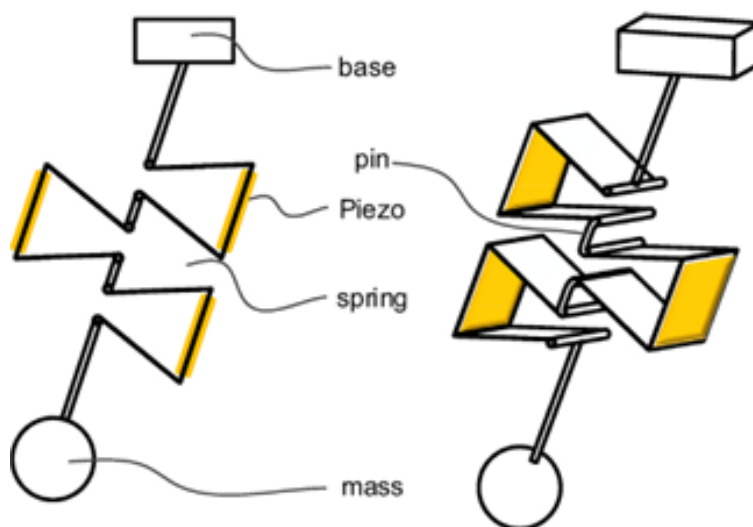
Slika 3.86 Model predloženog uređaja [82]

Qian i dr. [83] optimizirali su i testirali uređaj za prikupljanje energije ugrađen u potplat cipele. Predloženi uređaj sastoji se od više piezoelektričnih slojeva u okvirima za pojačanje sile i dvije aluminijske ploče u obliku pete. Okviri služe za prijenos mehaničkog gibanja i sile u vertikalnom smjeru na piezoelektrične slojeve raspoređene u horizontalnom smjeru. Druga funkcija okvira je povećati vertikalnu silu prenesenu s aluminijskih ploča tako da sila primijenjena na piezoelektrične slojeve može biti što veća unutar dopuštenog naprezanja materijala kako bi se generirala veća snaga. Okvir (slika 3.87) se sastoji od četiri identične debele grede koje su zgloбно povezane s dva krajnja bloka i dva srednja bloka kroz osam identičnih tankih greda. Dva prototipa uređaja koji uključuju osam odnosno šest piezoelektričnih slojeva, proizvedena su, sastavljena i integrirana u petu čizme za testove na traci za trčanje. Maksimalna prosječna prikupljena snaga (s optimiziranim električnim otporom) s osam slojeva je 6 mW, 7 mW i 9 mW pri brzinama hodanja od 4,0 km/h, 4,8 km/h i 5,6 km/h. Uređaj sa šest slojeva je prikupio 8 mW, 9 mW i 14 mW snage pri tri brzine hoda. Rezultati su pokazali da se s smanjenjem piezoelektričnih slojeva može prikupiti više energije zbog velike ulazne sile u svaki sloj.



Slika 3.87 Prikaz okvira uređaj [83]

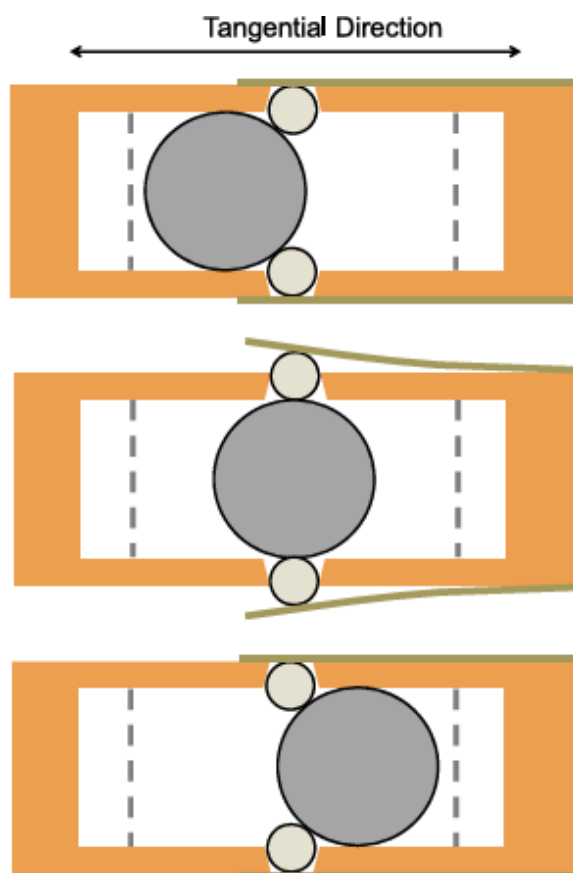
Wu i dr. [84] predstavili su piezoelektričnu oprugu u obliku kopči. Struktura uređaja sastoji se od mase i opruge klatna s vezanim piezoelektričnim elementima. Sustav opruge njihala temelji se na više metalnih veznih kopči i sastavljen je serijski (slika 3.88). Krutost opruge određena je s brojem kopči. Jedna vezna kopča ima 6 strana za praktičnu integraciju sa 6 piezoelektričnih keramika. Iako integracija s više piezoelektričnih keramika može postići veći koeficijent elektromehaničkog spajanja, odabrana je shema integracije dva komada piezoelektrične keramike zbog maksimalne učinkovitosti pretvorbe zbog ujednačene i velike raspodjele naprezanja na donjim stranama.



Slika 3.88 Struktura predloženog uređaja [84]

Simulacija je provedena s duljinom kraka od 100 mm gdje je postignuta rezonantna frekvencija od 1,5 Hz za određivanje radnih karakteristika uređaja. Na temelju rezultata dobivenih simulacijama, proveden je eksperiment s fokusom na horizontalna ubrzanja gdje je odabran vanjski električni otpor od 54,16 k Ω . Pobuda korištena u eksperimentu je temeljena na pokretima ljudske ruke gdje maksimalna prikupljena snaga iznosi 13,29 mW pri frekvenciji od 2,03 Hz i ubrzanju od 0,26 g.

Roundy i Tola [85] razvili su sustav pomaknutog njihala koji je montiran na kotač. Za implementaciju dinamike pomaknutog njihala, sustav sadrži zakrivljenu stazu s radijusom manjim od naplatka kotača i sadrži kuglicu kugličnog ležaja (masa) koja se kotrlja naprijed-nazad duž staze. Opružni graničnici se koriste u stazi za poboljšanje radnih karakteristika uređaja pri nižim frekvencijama rotacije. Pretvarači su dvije piezoelektrične pločice koje se protežu duž staze, po jedna sa svake strane. Greda i ispitna masa dodiruju se kroz manju kuglicu koja se nalazi u konusnom otvoru duž stranice staze. Kako se ispitna masa kotrlja pored manje kuglice, manja kuglica se istiskuje i savija piezoelektričnu pločicu. Princip rada uređaja prikazan je na slici 3.89 gdje isprekidane linije predstavljaju opružne graničnike, narančaste linije označavaju kućište odnosno stazu, a zelene linije predstavljaju piezoelektrične pločice.

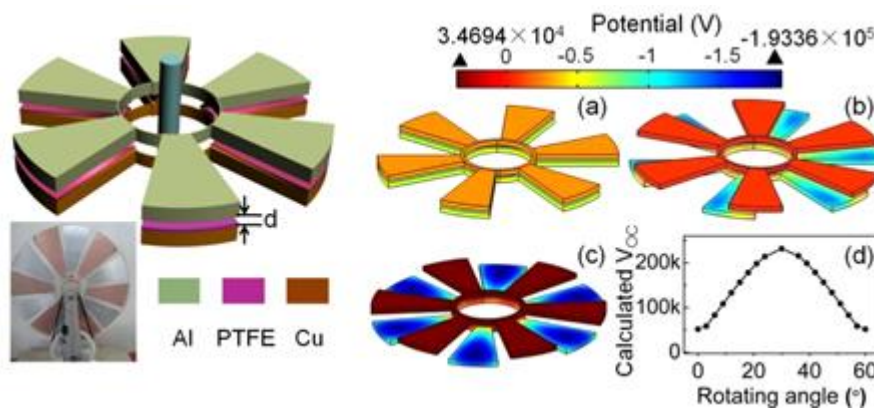


Slika 3.89 Princip rada predloženog uređaja [85]

Simulacijama je utvrđeno da s porastom brzine vožnje raste i generirani napon do brzine od 160 km/h nakon čega radne karakteristike uređaja drastično opadaju zbog povećanja normalne sile što uzrokuje povećano trenje kotrljanja. Analizom rezultata dobivenih simulacijom, uočena je velika osjetljivost konstrukcije na preciznost ugradnje. Uređaj je također ispitan na ispitnom stolu i na kotaču. Predloženi sustav uspio je prikupiti snagu od 10 μW pri brzini od 10 km/h. Radne karakteristike uređaja su konstantne pri brzinama od 10 km/h do 155 km/h gdje se eksperimentom pokazalo da pri brzinama iznad 155 km/h radne karakteristike uređaja opadaju, ali manje nego kod simulacijskog istraživanja.

3.3. Triboelektrični uređaji za prikupljanje energije

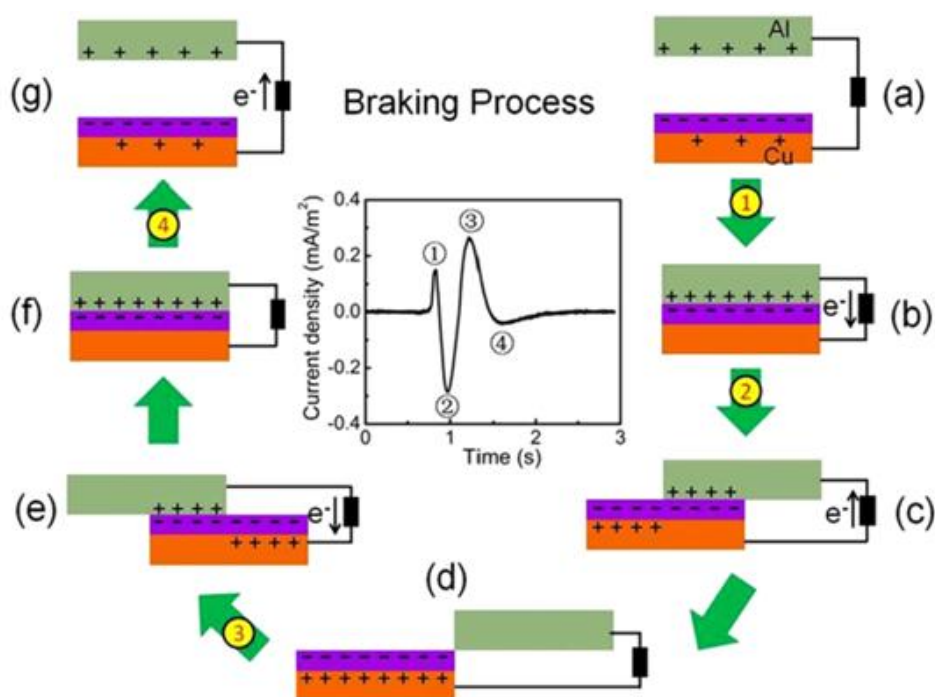
Triboelektrični uređaji za prikupljanje energije odnosno triboelektrični nanogeneratori (TENG) su se počeli intenzivnije istraživati u prošlom desetljeću, stoga ovaj način pretvorbe energije nije još u potpunosti opisan. Ono što je velika prednost ovih uređaja je njihova veličina i cijena izrade kao i široka primjenjivost. Han i dr. [86] izradili su uređaj za prikupljanje energije uslijed kočenja. TENG je izrađen na slijedeći način. Šest lepezastih aluminijskih folija spojeno je prstenastom elektrodom. Politetrafluoroetilen (PTFE) izrađen je istog oblika kao i aluminijski sloj. Na stražnjoj strani PTFE sloja nanesen je bakreni sloj koji služi kao druga elektroda. Aluminijski sloj pričvršćen je na polimetil metakrilatnu (PMMA) podlogu diska s jedne strane, a PTFE-Cu slojevi pričvršćeni su na drugu PMMA podlogu diska. Uređaj ima dva načina rada: kontaktni način rada kada vozilo koči i beskontaktni način rada kada vozilo ne koči. U kontaktnom načinu rada, dolazi do lateralnog klizanja jednog diska u odnosu na drugi u kojem dominiraju paralelni procesi triboelektrifikacije i elektrostatske indukcije. U beskontaktnom načinu rada, TENG se oslanja na elektrostatsku indukciju za prikupljanje energije. Model uređaja prikazan je na slici 3.90.



Slika 3.90 Model uređaja i naponski potencijal u odnosu na kut rotacije [86]

Provedbom eksperimenta pri brzini vrtnje od 900 o/min i razmaku između diskova od 4 mm, u načinu rada s dvije elektrode generiran je napon od 60 V s gustoćom struje od 0,86 mA/m², dok u načinu rada s jednom elektrodom gdje je bakreni sloj uzemljen, napon i gustoća struje imaju dvostruko nižu vrijednost. Najveća gustoća prikupljene snage iznosi 5,7 mW/m² pri otporu od 20 MΩ. Povećanjem razmaka između diskova u beskontaktnom načinu rada od 1 mm do 5 mm, uočen je blagi pad gustoće prikupljene snage. Naposljetku, simuliran je cjelokupni proces kočenja (slika 3.91) gdje je uređaj ostvario gustoću prikupljene snage od 221 mW/m² pri otporu od 20 MΩ.

Kang i dr. [87] testirali su uređaj za prikupljanje vibracija ovjesa. Uređaj se sastoji od unutarnjeg cilindra i vanjskog cilindra izrađenog od aluminija s prigušivačem. Unutarnji cilindar je okružen bakrenim elektrodama nanesenim na fleksibilnu tiskanu ploču (PCB). Polietilenska (PE) pjenasta traka umetnuta je između unutarnjeg cilindra i okolne PCB ploče nanasene bakrenim elektrodama kako bi se povećao vanjski promjer unutarnjeg cilindra i kontrolirala sila trenja između unutarnjeg cilindra i vanjskog cilindra. Na kraju, PFA film, koji predstavlja sloj trenja, pričvršćen je na bakrenu elektrodu. Unutarnja površina vanjskog cilindra ima rešetkastu strukturu iste širine kao i bakrena elektroda.

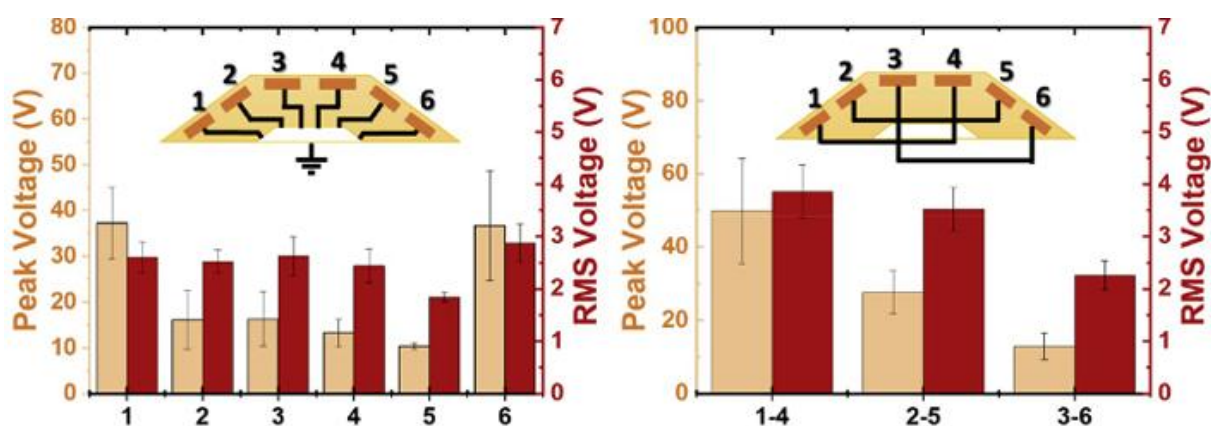


Slika 3.91 Proces generiranja napona kod kočenja [86]

Radne značajke uređaja mjerene su dok je unutarnja površina vanjskog cilindra klizila po površini PFA filma primjenom cikličke vertikalne sile. Unutarnji cilindar je fiksiran na statički

dio, a vanjski cilindar je pričvršćen na pokretni dio koji se periodično kreće konstantnom brzinom od 62,5 mm/s, 140 mm/s i 200 mm/s. Dobiveno je da se s povećanjem debljine elektrode od 1 mm do 3 mm, povećava generirani napon do 131,9 V nakon čega dodatnim povećanjem debljine elektrode generirani napon opada. Također, dovedeni su u vezu debljina elektrode i optimalni vanjski električni otpor gdje se s povećanjem debljine elektrode povećava otpor, pa je uređaj uspio prikupiti gustoću snage od $4,9 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pri debljini elektrode od 3 mm i otporu od $66 \text{ M}\Omega$.

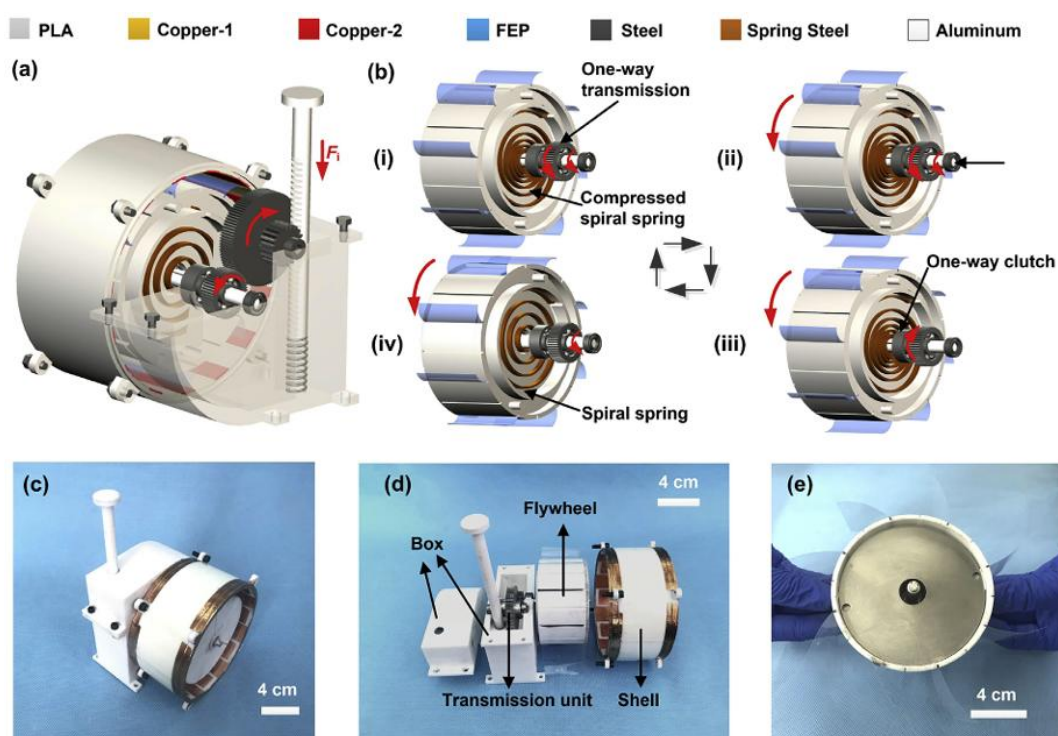
Heo i dr. [88] predstavili su trapezoidni regenerativni ležeći policajac izrađen od PVC-a i 6 bakrenih elektroda umetnutih blizu površine uređaja. Svaka elektroda može raditi kao jednoelektrodni TENG ili može biti spojena na svaku elektrodu kako bi radila kao samostojeći TENG. Model uređaja s bakrenim elektrodama u navedena dva načina rada i njihov generirani napon dobiven simulacijom prikazan je na slici 3.92. U jednoelektrodnom načinu rada na prvoj i šestoj elektrodi dobiveno je da je maksimalni generirani napon veći od prosječnog zbog udara gume kotača u prvu elektrodu i odvajanja kotača od ležećeg policajca. Ovo odvajanje događa se na šestoj elektrodi što uzrokuje visoke impulse u generiranom naponu. Nadalje, svakom idućom elektrodom generirani napon opada zbog postupnog usporavanja vozila prilikom prelaženja preko uređaja. Samostojeći način rada je prikladan kada se želi postići laka prenosivost uređaja zbog izostanka uzemljenja. Ovim načinom rada moguće je ostvariti razne konfiguracije gdje je najpovoljnija dana na slici 3.92. Razlog opadanja generiranog napona je isti kao i kod jednoelektrodnog načina rada gdje se postupnim usporavanjem vozila smanjuje sila na uređaj pa tako i generirani napon.



Slika 3.92 Generirani napon u jednoelektrodnom i samostojećem načinu rada [88]

Yang i dr. [89] izradili su uređaj za prikupljanje vibracija temeljen na zamašnjaku i spiralnoj opruzi. Uređaj se sastoji od kućišta, zamašnjaka, spiralne opruge i jedinice za prijenos

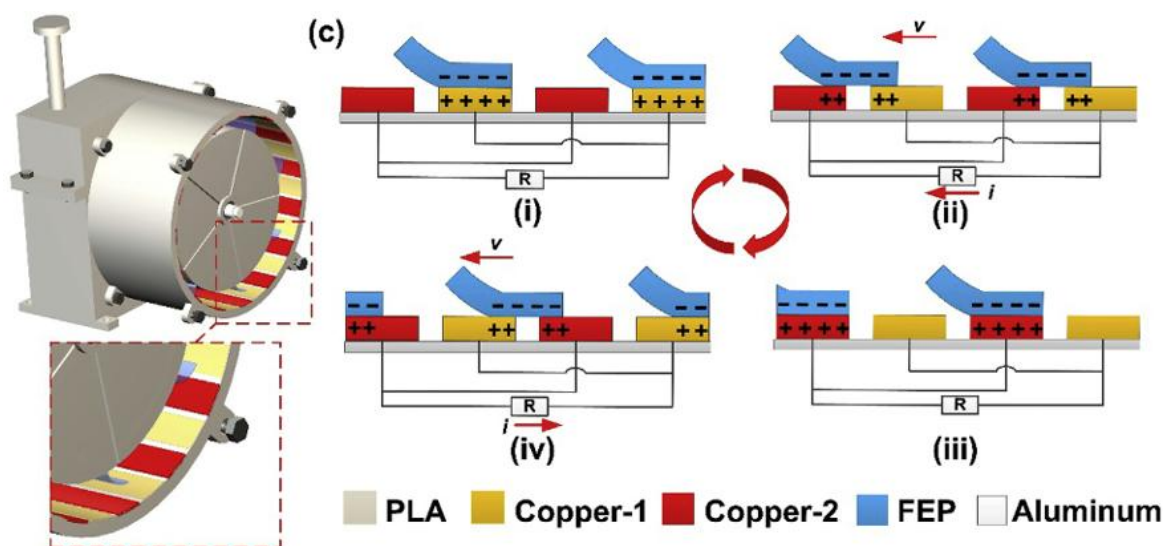
gibanja. Kućište se koristi kao nosač za montažu jedinice za prijenos gibanja. U jedinici za prijenos gibanja, letva prima pobudu te u nastavku preko zupčanika pretvara pravocrtno gibanje u rotacijsko. Vratilo rotora pokreću zupčanici čija se brzina istovremeno udvostručuje pomoću prijenosnih omjera zupčanika. Unutarnji kraj spiralne opruge spojen je na vratilo, a vanjski kraj na zamašnjak. Dvosmjerno rotacijsko gibanje pretvara se u jednosmjerno pomoću jednosmjerne spojke. Okretanjem vrtila, spiralna opruga se komprimira i pokreće zamašnjak. Prestankom djelovanja pobude, letva se vraća u svoj prvobitni položaj zbog povratne sile od opruge na dnu letve i tada jedinica za prijenos gibanja ne prenosi moment. Komprimirana spiralna opruga pokreće zamašnjak suprotno od kazaljke na satu, a vratilo se okreće u smjeru kazaljke na satu. Zbog jednosmjerne spojke rotacija vrtila je spriječena u tom smjeru pa spiralna opruga predaje cijelu akumuliranu energiju na zamašnjak. Tada, zbog inercije zamašnjaka, zamašnjak pokreće vratilo suprotno od kazaljke na satu. Fleksibilne lopatice su izrađene od triboelektričnog materijala (fluorirani etilen propilen (FEP)) i pričvršćene su na zamašnjak. Ukupno osam lopatica raspoređeno je na vanjskoj strani zamašnjaka. Šesnaest bakrenih elektroda postavljeno je na unutarnjoj stijenci ljuske. Model i prototip uređaja kao i način njegovog rada prikazani su na slici 3.93.



Slika 3.93 Prikaz uređaja i način rada prijenosa mehaničkog gibanja [89]

Okretanjem zamašnjaka, lopatice od FEP-a kližu po bakrenim elektrodama. Princip rada kod pretvorbe energije kreće s FEP filmom koji je inicijalno u stanju kontakta s elektrodom

(bakar-1). Prema triboelektričnom slijedu, elektronegativnost FEP-a je veća od elektronegativnosti bakra. Elektroni se tada prenose s bakra-1 na FEP. Površina FEP filma sada ima istu količinu suprotnog naboja u odnosu na površinu bakra. Kako se lopatica okreće, FEP film dolazi u kontakt s bakrom-2 i površina kontakta s bakrom-1 se smanjuje. Zbog elektrostatske indukcije, pozitivni naboj bakra-2 postupno se akumulira, a struja u bakru-1 teče prema bakru-2 kroz vanjski krug. Pozitivni naboj se potpuno prenosi na bakar-2 kada FEP film dosegne položaj koji se potpuno preklapa s bakrom-2. Zatim se lopatica nastavlja okretati i ponovno dolazi u kontakt s bakrom-1 što rezultira pozitivnim nabojem u bakru-2 koji teče prema bakru-1 kroz vanjski strujni krug. Izmjenična struja se generira između bakra-1 i bakra-2 dok se FEP film pričvršćen na zamašnjak kreće oko elektroda. Cijeli proces prikazan je na slici 3.94.

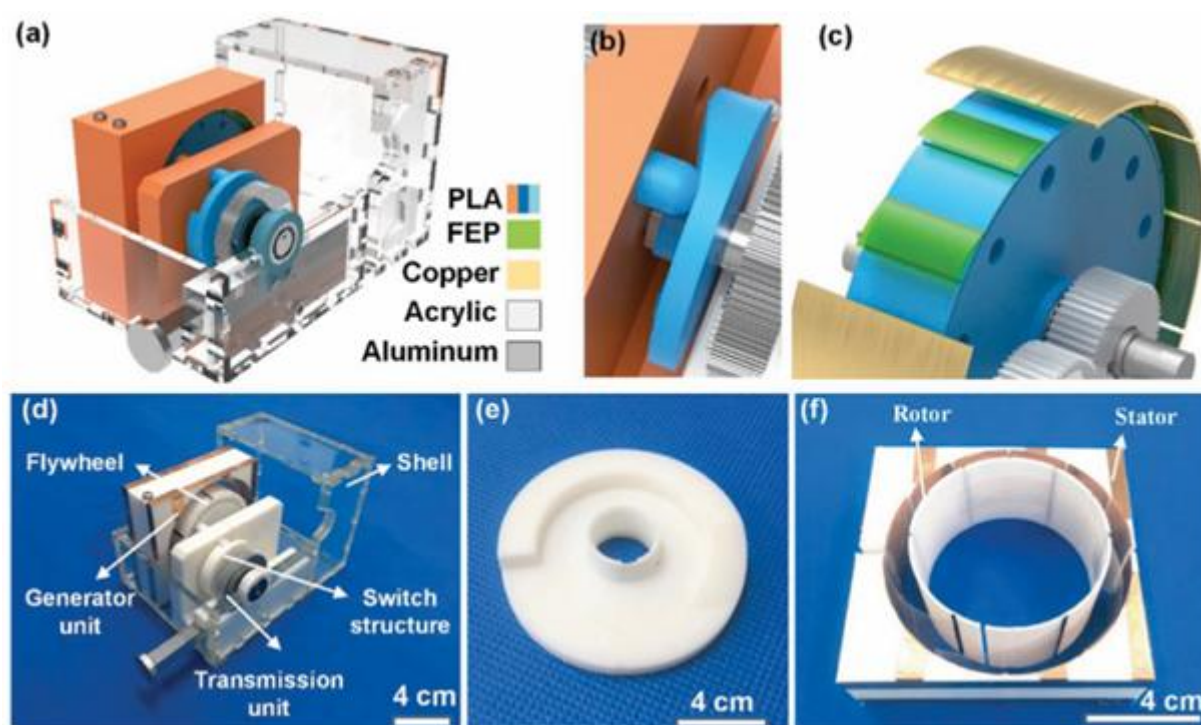


Slika 3.94 Način rada dijela za pretvorbu energije [89]

Izrađen je prototip uređaja koji je eksperimentalno ispitan gdje su se autori varirali krutost spiralne opruge, masu zamašnjaka, kut i duljinu lopatice. Uređaj je pokazao najbolje karakteristike pri krutosti spiralne opruge od 29 Nmm/rad i masi zamašnjaka od 1,458 kg. Za kutove montaže lopatice od 30, 60 i 90 stupnjeva, dobivene su optimalne duljine lopatica od 50 mm, 40 mm i 40 mm. Zbog težnje da se smanji trenje između lopatice i elektrode, pokazano je da je najpovoljniji kut lopatice od 30 stupnjeva. Pri tim uvjetima je postignuta maksimalna prikupljena snaga od 16,03 mW, dok je uređaj postigao najduži vrtnju zamašnjaka pri jednoj pobudi za duljinu lopatice od 30 mm.

Yin i dr. [90] predstavili su uređaj za prikupljanje mehaničke energije. Uređaj se sastoji od jedinice za prijenos gibanja, mehaničke sklopke, generatorske jedinice, zamašnjaka i kućišta.

Jedinica za prijenos mehaničkog gibanja koristi se za pretvaranje pravocrtnog gibanja u rotacijsko. Mehanička sklopka kombinira se sa zamašnjakom za kontrolu pohrane energije i oslobađanja energije pri pretvaranju vanjskog nepravilnog linearnog gibanja u pravilno rotacijsko gibanje. Generatorska jedinica sastoji se od rotora i statora. U početnom stanju gdje nema pobude, sklopka je isključena i spiralna opruga nije komprimirana. Kada pobuda počne djelovati, letva se pomiče i opruga se komprimira. Tada, jednosmjerna spojka dopušta okretanje diska mehaničke sklopke suprotno od kazaljke na satu pomoću vratila. U tom trenutku, disk sklopke gura graničnik kako bi blokirao zamašnjak. Prestankom djelovanja pobude, letva se pomiče u suprotnom smjeru dok se opruga vraća u početni položaj. Jednosmjerna spojka se okreće u smjeru kazaljke na satu, ali vratilo ne prenosi okretni moment i mehanička sklopka je i dalje isključena. Nakon nekoliko ciklusa pobude, graničnik se vraća u početni položaj pomoću povratne opruge. Kinetička energija zamašnjaka transformira se iz elastične potencijalne energije pohranjene u spiralnoj opruzi u električnu energiju preko generatorske jedinice. Princip rada generatorske jedinice jednak je kao i u [89]. Model uređaja kao i njegov prototip prikazani su na slici 3.95.

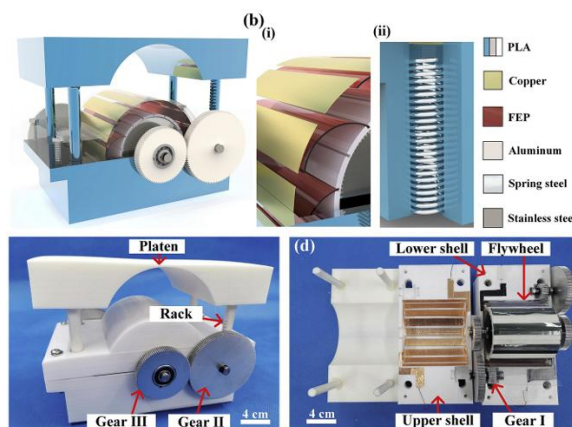


Slika 3.95 Model uređaja (a) s uvećanom mehaničkom sklopkom (b) i generatorskom jedinicom (c) i izrađeni prototip (d) s diskom sklopke (e) i rotorom i statorom (f) [90]

U eksperimentalnom ispitivanju varirani su duljina lopatice, masa zamašnjaka, kutovi akumulacije energije diska i krutost spiralne opruge pri amplitudi podražaja od 4 mm i

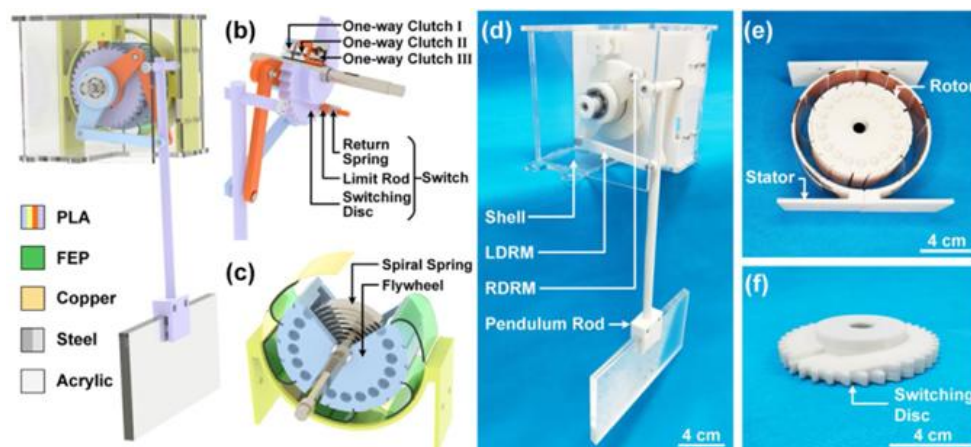
frekvenciji od 2 Hz. Pokazano je da se s povećanjem duljine lopatice skraćuje vrijeme okretanja rotora zbog većeg trenja gdje je najbolji rezultat pokazala duljina lopatice od 55 mm. Obzirom da se radi o sustavu s navijanjem, povećanjem krutosti spiralne opruge se povećava i prikupljena energija gdje je opruga krutosti 5,32 Nmm/rad dala najbolji rezultat. Prema krutosti opruge, odabrana je i masa zamašnjaka od 0,252 kg. Isto tako, povećanjem kuta diska sklopke povećava se vrijeme akumulacije energije, ali isto tako i ukupna prikupljena energija gdje je usvojen kut diska od 270 stupnjeva. Uređaj je pri navedenim parametrima prikupio snagu od 2,52 mW.

Lu i dr. [91] testirali su triboelektrični uređaj za prikupljanje vibracija. Struktura uređaja uključuje komponentu za regeneriranje energije, nosač opruge i ploču, oprugu, zupčanike montirane s jednosmjernim spojkaama te gornje i donje kućište. Ploča je spojena s donjim kućištem kroz provrte smještene u gornjem kućištu i ona preuzima vanjsku pobudu. Kada nema vanjske pobude, ploča je u svom početnom podignutom položaju. Kada se ploča giba prema dolje zbog djelovanja vanjske pobude, letva pokreće zupčanike I. Budući da su montirani na isto vratilo kao i zupčanici I, zupčanici II se također okreću, pokrećući zupčanike III. Tijekom ove faze, samo zupčanic III, smješten na stražnjoj strani, može prenijeti moment na vratilo zbog jednosmjerne spojke. Zamašnjak se tada okreće sa zupčanicom III. Nakon što se vanjska pobuda ukloni, ploča započinje svoj uzlazni hod pod akumuliranom silom pritisnute povratne opruge. Tijekom uzlaznog hoda, stražnja jednosmjerna spojka ne prenosi moment, dok prednja jednosmjerna spojka prenosi moment na zamašnjak i posljedično okreće zupčanic III, koji je ugrađen u prednji zupčanic. Način rada komponente za regeneraciju energije jednak je onome u [89]. Model i prototip uređaja dan je na slici 3.96. Provedeno je eksperimentalno ispitivanje gdje je uređaj prikupio snagu od 4 mW pri masi zamašnjaka od 1243 g i frekvenciji pobude od 3,5 Hz.



Slika 3.96 Model i prototip uređaja s navedenim osnovnim dijelovima [91]

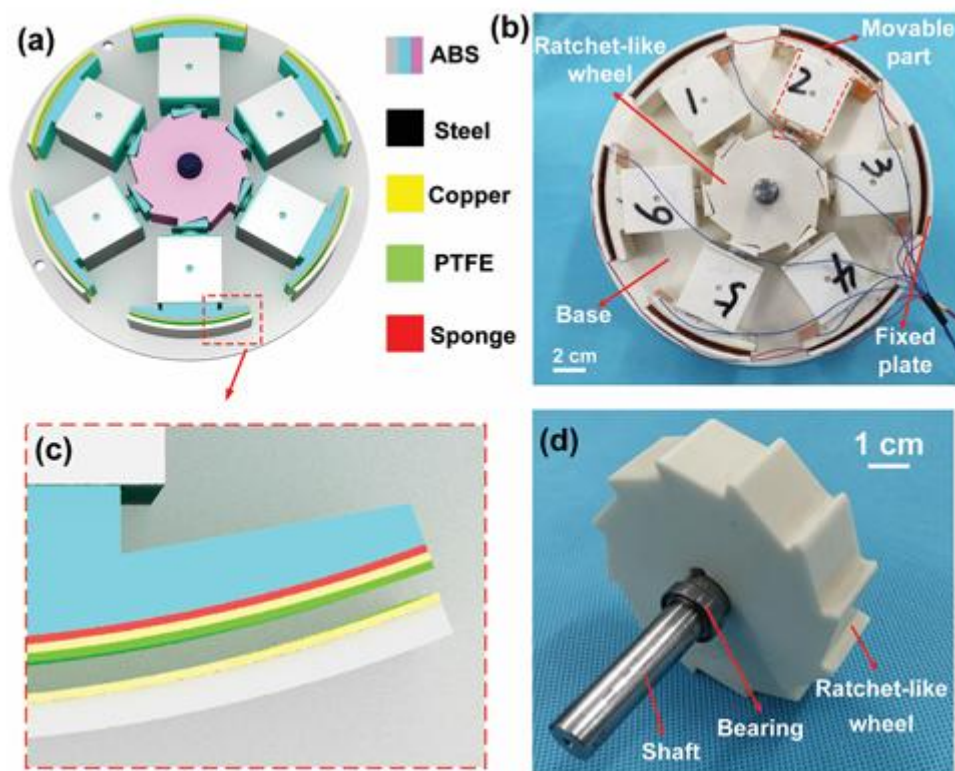
Yang i dr. [92] predstavili su uređaj za prikupljanje energije niskofrekventnih valova. Tri glavna dijela uređaja su generatorska jedinica, kućište i jedinica za prijenos mehaničkog gibanja. Jedinicu za prijenos mehaničkog gibanja sačinjavaju lijevi i desni dvostruki mehanizam klackalice, tri jednosmjerne spojke, mehanička sklopka i vratilo. Graničnik u mehaničkoj sklopki (koja ima i disk s istom funkcijom kao i u [90]) služi za upravljanje kretanjem zamašnjaka. Slika 3.97 prikazuje model i izrađeni prototip s navedenim dijelovima. U početnom stanju, šipka njihala nije pogonjena vanjskom silom, sklopka je otvorena, a spiralna opruga nije komprimirana. Kada se klatno kreće udesno, desni dvostruki mehanizam klackalice se okreće suprotno od kazaljke na satu čime prisili vratilo i disk da se rotiraju suprotno od kazaljke na satu putem jednosmjernih spojki II i III. Istovremeno, graničnik se pomiče pomoću diska kako bi se blokirao zamašnjak radi pohrane energije. Iako se lijevi dvostruki mehanizam klackalice i jednosmjerna spojka I okreću u smjeru kazaljke na satu, na vratilo se ne prenosi moment. Stoga se zamašnjak ne okreće i generatorska jedinica ne regenerira električnu energiju. Kada se njihalo zanjiše ulijevo, lijevi dvostruki mehanizam klackalice se okreće suprotno od kazaljke na satu i pokreće vratilo da se okreće suprotno od kazaljke na satu putem jednosmjerne spojke I. Disk se tada ne okreće dok se spiralna opruga kontinuirano komprimira radi pohrane energije, a zamašnjak ostaje zaključan. Nakon nekoliko ciklusa pobude, disk se okrene za 360 stupnjeva, graničnik se pomiče lijevo u utor diska uz pomoć opruge, zamašnjak se otključava i energija pohranjena u spiralnoj opruzi se oslobađa. Pohranjena energija pokreće zamašnjak, a zatim generatorska jedinica koja funkcionira na isti način kao i u [89] daje električni signal. Ispitane su radne značajke uređaja za različite mase zamašnjaka i krutosti spiralnih opruga gdje su najbolje rezultate dali zamašnjak mase 602 g i krutost opruge od 5,32 Nmm/rad. Uređaj je uspio prikupiti snagu od 11 mW i pokazao je veliku trajnost od preko 100000 ciklusa bez narušavanja radnih značajki.



Slika 3.97 Model i prototip uređaja [92]

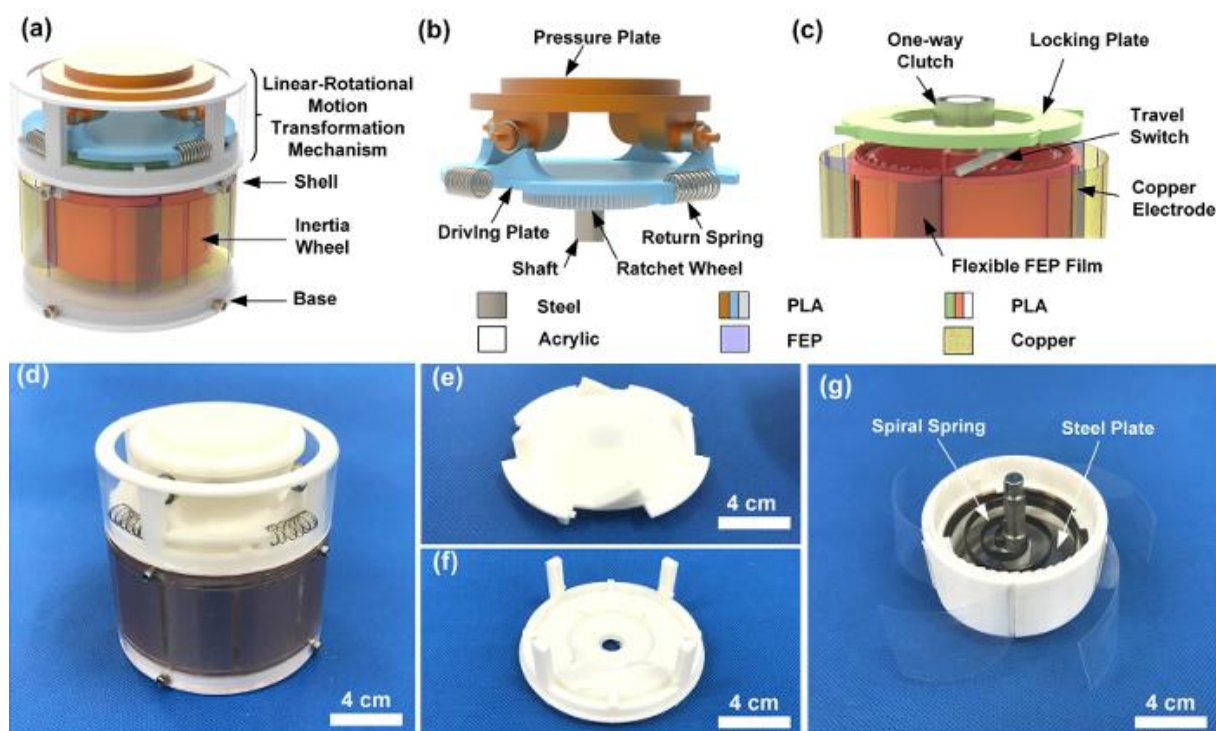
Chen i dr. [93] prikazali su potencijal primjene TENG-a kod prikupljanja energije morskih valova kroz mrežu jednostavnih TENG uređaja. Osnovna jedinica TENG-a ima gornju i donju ploču u obliku luka s višeslojnom jezgrom. Koristeći sendvič strukturu, i gornji i donji sloj funkcionalne jezgre je politetrafluoroetilenski (PTFE) film s nanesenim bakrom kao stražnjim elektrodama. Tanki aluminijski film s nanoporoznom površinom nalazi se između gornjeg i donjeg sloja funkcionalne jezgre, igrajući dvostruku ulogu kao elektroda i kontaktna površina. Temeljni princip rada TENG-a temelji se na sprezi između kontaktne elektrifikacije i elektrostatske indukcije. Kada se vanjska sila primijeni na gornju ploču, dva sloja PTFE-a dolaze u kontakt sa srednjim aluminijem, a istovremeno se i naboj prenosi na kontaktnim površinama. Prema triboelektričnom nizu, elektroni se ubrizgavaju iz aluminija u PTFE budući da je PTFE mnogo triboelektrično negativniji od aluminija, generirajući pozitivne triboelektrične naboje na aluminiju i negativne na PTFE-u. Nakon toga, ako sudar nestane, elastičnost ploča u obliku luka dovest će do odvajanja između PTFE-a i aluminija. Kao rezultat toga, pozitivni i negativni triboelektrični naboji više se ne podudaraju u istoj ravnini i generiraju unutarnji dipolni moment između dva seta kontaktnih površina. Takav dipolni moment pomiče slobodne elektrone s bakrene elektrode na aluminijsku elektrodu kako bi uravnotežio električno polje, stvarajući pozitivno inducirane naboje na bakrenoj elektrodi. Eksperimentalnim ispitivanjem jednog TENG-a dobivena je gustoća snage od $0,26 \text{ mW/cm}^2$. Stoga, procijenjeno je da na površini mora od 1 km^2 , mreža ovako jednostavnih uređaja ima potencijal za prikupiti $1,15 \text{ MW}$ snage.

Gao i dr. [94] izradili su uređaj za prikupljanje energije rotacijskog gibanja. Uređaj se sastoji od zupčastog kotača, šest fiksnih ploča i šest pomičnih dijelova s jedinicama za triboelektrifikaciju. Pomični dio se sastoji od ploče, klizača, opruge, pregradne ploče i klinastog podnožja. Na svakoj jedinici, postavljen je sloj bakra na fiksnu ploču koji djeluje i kao elektroda i kao jedan od dva triboelektrična sloja. Drugi triboelektrični sloj (politetrafluoretilen, PTFE) je pričvršćen na vrh drugog sloja elektrode (bakar) koji je postavljen na vrh ploče pomičnog dijela. Kombinacija zupčastog kotača i pokretnih dijelova transformira rotacijsko gibanje u pravocrtno gibanje uz pomoć opruge i dovodi do periodičnog dodirivanja i razdvajanja bakrenog sloja na fiksnoj ploči i PTFE sloja na ploči pokretnog dijela u svakoj jedinici. Slika 3.98 prikazuje model i izrađeni prototip uređaja. Izrađeni su zupčasti kotači s 6, 9 i 12 zubi i ispitane su njihove radne značajke. Pokazano je da zupčasti kotač s 12 zubi pokazuje najbolje radne značajke i pri nižim i višim brzinama vrtnje. Uređaj je ugrađen u malu vjetroturbinu i pri brzini strujanja zraka od $15,5 \text{ m/s}$, prikupljena je snaga od $6,05 \text{ mW}$.



Slika 3.98 Model i prototip predloženog uređaja [94]

Yang i dr. [95] predložili su uređaj za prikupljanje energije koji sadrži kućište, mehanizam za pretvorbu gibanja, zamašnjak i mehaničku sklopku. Kućište je prozirna akrilna cijev koja se koristi za zaštitu uređaja i ugradnju bakrenih elektroda. Mehanizam za pretvorbu gibanja sastoji se od tlačne ploče, pogonske ploče, zupčastog kotača, vratila i povratne opruge. Bakrene elektrode su ugrađene na unutarnju stijenku kućišta, a film fleksibilnog fluoriranog etilen propilena (FEP) postavljen je na zamašnjak u koji su ugrađeni spiralna opruga i čelična ploča. Spiralna opruga služi za akumulaciju energije, a čelična ploča služi za promjenu mase zamašnjaka. Kada je uređaj pobuđen vibracijama, tlačna ploča se kreće prema dolje što uzrokuje rotaciju pogonske ploče i djeluje silom na klinasti blok pogonske ploče. Zupčasti kotač tada postupno okreće ploču za blokiranje. Ploča za blokiranje pritišće graničnik, uzrokujući da se ona okrene u smjeru kazaljke na satu kako bi se pokrenuo zamašnjak. Nakon rotacije, povratna opruga vraća pogonsku ploču u njezin prvobitni položaj. Pogonska ploča tada uzrokuje rotaciju vratila putem jednosmjerne spojke. Budući da graničnik blokira zamašnjak, sva energija rotacije pohranjuje se u spiralnu oprugu. Okretanjem zamašnjaka, FEP folije klizu po bakrenim elektrodama. Uređaj je prikazan na slici 3.99.



Slika 3.99 Model i prototip predloženog uređaja [95]

FEP folije su ugrađene pod kutom od 60 stupnjeva s duljinama od 40 mm, 50 mm, 60 mm i 70 mm. Do 60 mm uređaj je pokazao bolje radne značajke gdje folija s duljinom od 70 mm dodiruje istovremeno dvije bakrene elektrode što uzrokuje pad generiranog napona. Također, ispitani su zamašnjaci s masama od 295 g, 430 g, 565 g, 700 g i 835 g. Variranjem masa, razlike u generiranom naponu nisu bile velike, ali s povećanjem mase, povećano je i trenje u mehaničkom sustavu, pa se vrijeme okretanja zamašnjaka skratilo. Stoga, usvojena je masa zamašnjaka od 295 g. Uređaj je testiran sinusoidnom pobudom amplitude 10 mm i frekvencija od 1 Hz, 2 Hz i 3 Hz. Uređaj je pri frekvenciji od 3 Hz prikupio snagu od 5 mW.

4. ZAKLJUČAK

Regenerativni uređaji za prikupljanje kinetičke energije, poznati i kao "energy harvesteri", predstavljaju tehnološko rješenje za iskorištavanje energije iz okolišnih izvora. Trenutno se sve veći naglasak stavlja na održive izvore energije i ovi uređaji se predlažu kao potencijalno rješenje za napajanje niskonaponskih sustava, senzora i uređaja na vozilima. Ovakvi sustavi mogu se koristiti i u udaljenim, teško dostupnim područjima uklanjajući potrebu za klasičnim izvorima električne energije. Primjene ovih uređaja su sve šire i obuhvaćaju različita okruženja: od sustava za prikupljanje vibracija na cestama, nogostupima, željezničkim prugama i vozilima, do sustava za iskorištavanje kinetičke energije morskih valova i ljudskih pokreta.

U radu su obrađene tri osnovne vrste uređaja: elektromagnetski, piezoelektrični i triboelektrični (TENG) uređaji. Analizom znanstveno-istraživačkih radova uočeno je da elektromagnetski uređaji, zbog robusnije konstrukcije i većih dimenzija imaju sposobnost prikupljanja veće količine energije u usporedbi s piezoelektričnim i TENG uređajima. Ipak, njihova veličina i masa često ograničavaju područja primjene, pogotovo kada je riječ o prijenosnim i nosivim uređajima. S druge strane, piezoelektrični i TENG uređaji mogu prikupiti manju količinu energije, ali imaju brojne prednosti u pogledu veličine, fleksibilnosti i mogućnosti integracije u tekstil, obuće i razne mobilne komponente. Ta karakteristika ih čini izuzetno pogodnima za primjene povezane s ljudskim kretanjem, poput ugradnje u potplate obuće, prijenosne uređaje ili pametnu odjeću, gdje kontinuirano prikupljanje male količine energije može napajati senzore ili prijenosne uređaje.

U svim analiziranim sustavima, ključni parametri koji utječu na učinkovitost i količinu prikupljene energije uključuju amplitudu i frekvenciju vibracija te vanjski električni otpor. Optimalno projektiranje uređaja zahtijeva preciznu prilagodbu ovim parametrima kako bi se postigla maksimalna iskoristivost u zadanim uvjetima rada. Generalno, kod elektromagnetskih uređaja većih dimenzija, rast amplitude i frekvencije pozitivno utječe na radne značajke uređaja. S druge strane, kod manjih uređaja s jednostavnim mehanizmima za prijenos mehaničke energije, najbolje radne značajke se postižu kada frekvencija pobude odgovara rezonantnoj frekvenciji uređaja. Nadalje, vodeći se samo amplitudom bez adekvatnog dimenzioniranja dijelova uređaja može doći do oštećenja. Stoga, važno je istaknuti da nije uvijek cilj prikupiti najveću moguću količinu energije, već osigurati dovoljnu količinu energije za određenu primjenu, pri čemu dimenzije, financijski trošak i životni vijek uređaja imaju ključnu ulogu. Kod električnih otpora, svi uređaji sadrže unutarnji električni otpor u njihovim dijelovima za pretvorbu energije poput elektromotora/generatora odnosno piezoelektričnih i triboelektričnih

strujnih krugova. Isto tako, uređaji koji se napajaju regeneriranom električnom energijom predstavljaju vanjski električni otpor i pokazano je da se najveća količina energije regenerira kada su vanjski i unutarnji električni otpori jednaki. Pošto se vanjskim električnim otporom može manipulirati, iznimno je važno ga optimizirati da se postignu najbolje radne značajke uređaja. Nadalje, u kontekstu primjene ovih uređaja u ovjesu automobila koji ujedno rade kao i prigušivači udaraca, električni otpori su usko povezani s koeficijentom prigušenja što daje još jednu dimenziju kod projektiranja ovakvih sustava. Tada, uz maksimiziranje prikupljene energije, potrebno je i osigurati adekvatno prigušenje za zadovoljavajuću ugodu vožnje kao i upravljivost vozila.

Kod elektromagnetskih uređaja posebnu pažnju treba dati mehaničkim prijenosnim sustavima koji osiguravaju transformaciju niskofrekventnog oscilatornog gibanja u rotacijsko gibanje pogodnije za regeneriranje električne energije. U tom kontekstu kao osobito korisnima istaknuli su se mehanizmi zupčanika i hidraulički sustavi, kao i noviji koncepti poput mehaničkih ispravljača gibanja koji dvosmjernu rotaciju pretvaraju u jednosmjernu pomoću jednosmjernih spojki i kod hidrauličkih sustava, hidrauličke mreže s jednosmjernim ventilima koji okreću hidraulički motor u jednom smjeru. Nadalje, upotreba klatna kao ulaznog mehanizma pokazala se inovativnim rješenjem koje omogućuje učinkovitu pretvorbu oscilatornog gibanja u rotaciju vratila generatora, uz istovremeno povećanje brzine vrtnje putem prijenosnih omjera zupčanika.

Analizom relevantnih znanstveno-istraživačkih radova iz područja regenerativnih uređaja uočen je potencijalni prostor za moguću integraciju dva, pa možda čak i sva tri načina pretvorbe energije u jedan sustav (hibridni uređaj za prikupljanje kinetičke energije). Nadalje, obim istraživanja će se proširiti s detaljnijom analizom i modeliranjem mehaničkih prijenosnih sustava gdje se optimizacijom zupčanika (i njihovih prijenosnih omjera) odnosno hidrauličkih sustava kao i ostalih strojnih elemenata može povećati učinkovitost mehaničkih prijenosnika gibanja, a samim time i učinkovitost cjelokupnog uređaja. Također, uz mehanizme zupčanika i hidrauličkih sustava postoje dodatne mehaničke veze za pretvorbu pravocrtnog gibanja u rotacijsko, a koje se mogu numerički modelirati i istražiti čime bi se otkrile njihove radne značajke i mogućnost praktične primjene. Planirana je izrada proračuna opterećenja i gibanja cijelog sustava kao i dimenzioniranje svih dijelova, izrada numeričkog modela uz potencijalno eksperimentalni dio istraživanja gdje bi se predloženi uređaj konstruirao, izradio i ispitao uz usporedbu s relevantnim rezultatima iz ovog istraživačkog područja.

LITERATURA

- [1] Griffiths, D. J.: "Introduction to Electrodynamics", Prentice Hall, New Jersey, Sjedinjene Američke Države, 1999.
- [2] Yang, J.: "An Introduction to the Theory of Piezoelectricity", Advances in Mechanics and Mathematics, Lincoln, Nebraska, Sjedinjene Američke Države, 2018.
- [3] Shao, J. J.; Willatzen, M.; Wang, Z. L.: "Theoretical modeling of triboelectric nanogenerators", Journal of Applied Physics, Vol. 128, No. 11, 2020.
- [4] Wang, Z. L.: "On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations", Nano Energy, Vol. 68, 2020.
- [5] Li, H.; Zheng, P.; Zhang, T. S.; Zou, Y. Q.; Pan, Y. J.; Zhang, Z. T.; Azam, A.: "A high-efficiency energy regenerative shock absorber for powering auxiliary devices of new energy driverless buses", Applied Energy, Vol. 295, 2021.
- [6] Salman, W.; Qi, L. F.; Zhu, X.; Pan, H. Y.; Zhang, X. T.; Bano, S.; Zhang, Z. T.; Yuan, Y. P.: "A high-efficiency energy regenerative shock absorber using helical gears for powering low-wattage electrical device of electric vehicles", Energy, Vol. 159, pp. 361-372, 2018.
- [7] Zhang, Z. T.; Zhang, X. T.; Chen, W. W.; Rasim, Y.; Salman, W.; Pan, H. Y.; Yuan, Y. P.; Wang, C. B.: "A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle", Applied Energy, Vol. 178, pp. 177-188, 2016.
- [8] Wang, Z.; Zhang, T.; Zhang, Z. T.; Yuan, Y. P.; Liu, Y.: "A high-efficiency regenerative shock absorber considering twin ball screws transmissions for application in range-extended electric vehicles", Energy and Built Environment, Vol. 1, No. 1, pp. 36-49, 2020.
- [9] Qi, L. F.; Pan, H. Y.; Bano, S.; Zhu, M. K.; Liu, J. Z.; Zhang, Z. T.; Liu, Y. J.; Yuan, Y. P.: "A high-efficiency road energy harvester based on a chessboard sliding plate using semi-metal friction materials for self-powered applications in road traffic", Energy Conversion and Management, Vol. 165, pp. 748-760, 2018.
- [10] Zhang, R.; Wang, X.; Al Shami, E.; John, S.; Zuo, L.; Wang, C. H.: "A novel indirect-drive regenerative shock absorber for energy harvesting and comparison with a conventional direct-drive regenerative shock absorber", Applied Energy, Vol. 229, pp. 111-127, 2018.

- [11] Wu, X. P.; Qi, L. F.; Zhang, T. S.; Zhang, Z. T.; Yuan, Y. P.; Liu, Y. J.: “A novel kinetic energy harvester using vibration rectification mechanism for self-powered applications in railway”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 228, 2021.
- [12] Zhang, R.; Wang, X.; Liu, Z. W.: “A novel regenerative shock absorber with a speed doubling mechanism and its Monte Carlo simulation”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 417, pp. 260-276, 2018.
- [13] Sun, M. D.; Wang, W.; Zheng, P.; Luo, D. B.; Zhang, Z. T.: “A novel road energy harvesting system based on a spatial double V-shaped mechanism for near-zero-energy toll stations on expressways”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 323, 2021.
- [14] Zhang, X. T.; Zhang, Z. T.; Pan, H. Y.; Salman, W.; Yuan, Y. P.; Liu, Y. J.: “A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 118, pp. 287-294, 2016.
- [15] Liu, G. S.; Fang, Z.; Zhang, Z. T.; Tan, X.; Dai, C. T.; Wu, X. P.; Jin, Z.; Li, D. Y.: “A vibration energy harvester for freight train track self-powered application”, *IScience*, Vol. 25, No. 10, 2022.
- [16] Bowen, L.; Vinolas, J.; Olazagoitia, J. L.; Otero, J. E.: “An Innovative Energy Harvesting Shock Absorber System Using Cable Transmission”, *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 24, No. 2, pp. 689-699, 2019.
- [17] Wang, L. R.; Todaria, P.; Pandey, A.; O'Connor, J.; Chernow, B.; Zuo, L.: “An Electromagnetic Speed Bump Energy Harvester and Its Interactions With Vehicles”, *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 21, No. 4, pp. 1985-1994, 2016.
- [18] Zhang, X. T.; Pan, H. Y.; Qi, L. F.; Zhang, Z. T.; Yuan, Y. P.; Liu, Y. J.: “A renewable energy harvesting system using a mechanical vibration rectifier (MVR) for railroads”, *Applied Energy*, Vol. 204, pp. 1535-1543, 2017.
- [19] Fang, Z. G.; Guo, X. X.; Xu, L.; Zhang, H.: “An Optimal Algorithm for Energy Recovery of Hydraulic Electromagnetic Energy-Regenerative Shock Absorber”, *Applied Mathematics and Information Sciences*, Vol. 7, No. 6, pp. 2207-2214, 2013.
- [20] Abdelkareem, M. A. A.; Zhang, R.; Jing, X. J.; Wang, X.; Ali, M. K. A.: “Characterization and implementation of a double-sided arm-toothed indirect-drive rotary

- electromagnetic energy-harvesting shock absorber in a full semi-trailer truck suspension platform”, *Energy*, Vol. 239, 2022.
- [21] Xie, L. H.; Li, J. H.; Li, X. D.; Huang, L. D.; Cai, S. Q.: “Damping-tunable energy-harvesting vehicle damper with multiple controlled generators: Design, modeling and experiments”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 99, pp. 859-872, 2018.
- [22] Singh, S.; Satpute, N. V.: “Design and analysis of energy-harvesting shock absorber with electromagnetic and fluid damping”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 4, pp. 1591-1605, 2015.
- [23] Zuo, L.; Scully, B.; Shestani, J.; Zhou, Y.: “Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 4, 2010.
- [24] Shi, D. H.; Chen, L.; Wang, R. C.; Jiang, H. B.; Shen, Y. J.: “Design and experiment study of a semi-active energy-regenerative suspension system”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 1, 2015.
- [25] Obeid, H. H.; Jaleel, A. K.; Hassan, N. A.: “Design and Motion Modeling of an Electromagnetic Hydraulic Power Hump Harvester”, *Advances in Mechanical Engineering*, 2014.
- [26] Tang, X. D.; Lin, T.; Zuo, L.: “Design and Optimization of a Tubular Linear Electromagnetic Vibration Energy Harvester”, *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 2, pp. 615-622, 2014.
- [27] Gao, M. Y.; Wang, P.; Cao, Y.; Chen, R.; Cai, D. J.: “Design and Verification of a Rail-Borne Energy Harvester for Powering Wireless Sensor Networks in the Railway Industry”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 18, No. 6, pp. 1596-1609, 2017.
- [28] Liu, Y. L.; Xu, L.; Zuo, L.: “Design, Modeling, Lab, and Field Tests of a Mechanical-Motion-Rectifier-Based Energy Harvester Using a Ball-Screw Mechanism”, *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 22, No. 5, pp. 1933-1943, 2017.
- [29] Yang, Y. Q.; Pian, Y. W.; Liu, Q.: “Design of energy harvester using rotating motion rectifier and its application on bicycle”, *Energy*, Vol. 179, pp. 222-231, 2019.
- [30] Demetgul, M.; Guney, I.: “Design of the Hybrid Regenerative Shock Absorber and Energy Harvesting from Linear Movement”, *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 5, No. 1, pp. 81-84, 2017.

- [31] Zhou, R.; Sun, F.; Yan, M. Y.; Jin, J. J.; Li, Q.; Xu, F. C.; Zhang, X. Y.; Nakano, K.: “Design, analysis and prototyping of a magnetic energy-harvesting suspension for vehicles”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 29, No. 10, 2020.
- [32] Azam, A.; Ahmed, A.; Hayat, N.; Ali, S.; Khan, A. S.; Murtaza, G.; Aslam, T.: “Design, fabrication, modelling and analyses of a movable speed bump-based mechanical energy harvester (MEH) for application on road”, *Energy*, Vol. 214, 2021.
- [33] Zou, J. Y.; Guo, X. X.; Xu, L.; Tan, G. F.; Zhang, C. C.; Zhang, J.: “Design, Modeling, and Analysis of a Novel Hydraulic Energy-Regenerative Shock Absorber for Vehicle Suspension”, *Shock and Vibration*, Vol. 2017, 2017.
- [34] Zhang, Z. T.; Zhang, X. T.; Rasim, Y. B.; Wang, C. B.; Du, B.; Yuan, Y. P.: “Design, modelling and practical tests on a high-voltage kinetic energy harvesting (EH) system for a renewable road tunnel based on linear alternators”, *Applied Energy*, Vol. 164, pp. 152-161, 2016.
- [35] Liu, M. Y.; Lin, R.; Zhou, S. X.; Yu, Y. L.; Ishida, A.; McGrath, M.; Kennedy, B.; Hajj, M.; Zuo, L.: “Design, simulation and experiment of a novel high efficiency energy harvesting paver”, *Applied Energy*, Vol. 212, pp. 966-975, 2018.
- [36] Ting, C. C.; Tsai, D. Y.; Hsiao, C. C.: “Developing a mechanical roadway system for waste energy capture of vehicles and electric generation”, *Applied Energy*, Vol. 92, pp. 1-8, 2012.
- [37] Gholikhani, M.; Shirazi, S. Y. B.; Mabrouk, G. M.; Dessouky, S.: “Dual electromagnetic energy harvesting technology for sustainable transportation systems”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 230, 2021.
- [38] Gao, M. Y.; Cong, J. L.; Xiao, J. L.; He, Q.; Li, S. T.; Wang, Y.; Yao, Y.; Chen, R.; Wang, P.: “Dynamic modeling and experimental investigation of self-powered sensor nodes for freight rail transport”, *Applied Energy*, Vol. 257, 2020.
- [39] Lin, T.; Wang, J. J.; Zuo, L.: “Efficient electromagnetic energy harvester for railroad transportation”, *Mechatronics*, Vol. 53, pp. 277-286, 2018.
- [40] Sathiskumar, P.; Wang, R. C.; Yang, L.; Thiyagarajan, J.: “Energy harvesting approach to utilize the dissipated energy during hydraulic active suspension operation with comfort oriented control scheme”, *Energy*, Vol. 224, 2021.
- [41] Li, S. Y.; Xu, J.; Pu, X. H.; Tao, T.; Gao, H. N.; Mei, X. S.: “Energy-harvesting variable/constant damping suspension system with motor based electromagnetic damper”, *Energy*, Vol. 189, 2019.

- [42] Li, Z. J.; Zuo, L.; Luhrs, G.; Lin, L. J.; Qin, Y. X.: “Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, No. 3, pp. 1065-1074, 2013.
- [43] Khalfan, O. M.; Imrek, H.: “Energy generation from weights of moving vehicles: A case study at Alaeddin Keykubad Campus-Konya/Turkey”, *Energy*, Vol. 87, pp. 212-222, 2015.
- [44] Sabzehgar, R.; Maravandi, A.; Moallem, M.: “Energy Regenerative Suspension Using an Algebraic Screw Linkage Mechanism”, *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, No. 4, pp. 1251-1259, 2014.
- [45] Li, C.; Tse, P. W.: “Fabrication and testing of an energy-harvesting hydraulic damper”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 6, 2013.
- [46] Li, P.; Zuo, L.: “Influences of the electromagnetic regenerative dampers on the vehicle suspension performance ”, *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 231, No. 3, pp. 383-394, 2017.
- [47] Li, C.; Zhu, R. R.; Liang, M.; Yang, S.: “Integration of shock absorption and energy harvesting using a hydraulic rectifier ”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333, No. 17, pp. 3904-3916, 2014.
- [48] Wang, R. C.; Gu, F. S.; Cattley, R.; Ball, A. D.: “Modelling, Testing and Analysis of a Regenerative Hydraulic Shock Absorber System”, *Energies*, Vol. 9, No. 5, 2016.
- [49] Guo, S. J.; Xu, L.; Liu, Y. L.; Guo, X. X.; Zuo, L.: “Modeling and Experiments of a Hydraulic Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorber”, *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 22, No. 6, pp. 2684-2694, 2017.
- [50] Lin, T.; Pan, Y.; Chen, S. K.; Zuo, L.: “Modeling and field testing of an electromagnetic energy harvester for rail tracks with anchorless mounting”, *Applied Energy*, Vol. 213, pp. 219-226, 2018.
- [51] Pan, Y.; Lin, T.; Qian, F.; Liu, C.; Yu, J.; Zuo, J. Y.; Zuo, L.: “Modeling and field-test of a compact electromagnetic energy harvester for railroad transportation”, *Applied Energy*, Vol. 247, pp. 309-321, 2019.
- [52] Pan, Y.; Liu, F. W.; Jiang, R. J.; Tu, Z. W.; Zuo, L.: “Modeling and onboard test of an electromagnetic energy harvester for railway cars”, *Applied Energy*, Vol. 250, pp. 568-581, 2019.
- [53] Qin, B. N.; Chen, Y. Z.; Chen, Z. H.; Zuo, L.: “Modeling, bench test and ride analysis of a novel energy-harvesting hydraulically interconnected suspension system”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 166, 2022.

- [54] Guo, S. J.; Liu, Y. L.; Xu, L.; Guo, X. X.; Zuo, L.: “Performance evaluation and parameter sensitivity of energy-harvesting shock absorbers on different vehicles”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 54, No. 7, pp. 918-942, 2016.
- [55] Galluzzi, R.; Circosta, S.; Amati, N.; Tonoli, A.: “Rotary regenerative shock absorbers for automotive suspensions”, *Mechatronics*, Vol. 77, 2021.
- [56] Hajidavalloo, M. R.; Cosner, J.; Li, Z. J.; Tai, W. C.; Song, Z. Y.: “Simultaneous Suspension Control and Energy Harvesting Through Novel Design and Control of a New Nonlinear Energy Harvesting Shock Absorber”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 71, No. 6, pp. 6073-6087, 2022.
- [57] Bowen, L.; Vinolas, J.; Olazagoitia, J. L.: “The influence of friction parameters in a ball-screw energy-harvesting shock absorber”, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 96, No. 4, pp. 2241-2256, 2019.
- [58] Liu, J. Z.; Liu, J.; Zhang, X. L.; Liu, B. L.: “Transmission and energy-harvesting study for a novel active suspension with simplified 2-DOF multi-link mechanism”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 160, 2021.
- [59] Li, M.; Jing, X. J.: “A bistable X-structured electromagnetic wave energy converter with a novel mechanical-motion-rectifier: Design, analysis, and experimental tests”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 244, 2021.
- [60] Xie, Q.; Zhang, T. M.; Pan, Y. J.; Zhang, Z. T.; Yuan, Y. P.; Liu, Y. J.: “A novel oscillating buoy wave energy harvester based on a spatial double X-shaped mechanism for self-powered sensors in sea-crossing bridges”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 204, 2020.
- [61] Dang, T. D.; Phan, C. B.; Ahn, K. K.: “Modeling and Experimental Investigation on Performance of a Wave Energy Converter with Mechanical Power Take-Off”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 751-768, 2019.
- [62] Graves, J.; Kuang, Y.; Zhu, M. L.: “Scalable pendulum energy harvester for unmanned surface vehicles”, *Sensors and Actuators A-Physical*, Vol. 315, 2020.
- [63] Graves, J.; Kuang, Y.; Zhu, M. L.: “Counterweight-pendulum energy harvester with reduced resonance frequency for unmanned surface vehicles”, *Sensors and Actuators A-Physical*, Vol. 321, 2021.
- [64] Xie, L. H.; Cai, M. J.: “An In-Shoe Harvester With Motion Magnification for Scavenging Energy From Human Foot Strike”, *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 20, No. 6, pp. 3264-3268, 2015.

- [65] Shi, H.; Yue, Y. Y.; Wang, H. T.; Xu, J.; Mei, X. S.: “Design and performance analysis of human walking induced energy recovery system by means of hydraulic energy conversion and storage”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 217, 2020.
- [66] Fan, K. Q.; Liu, J.; Cai, M. L.; Zhang, M. M.; Qiu, T.; Tang, L. H.: “Exploiting ultralow-frequency energy via vibration-to-rotation conversion of a rope-spun rotor”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 225, 2020.
- [67] Shi, H.; Luo, S.; Xu, J.; Mei, X. S.: “Hydraulic system based energy harvesting method from human walking induced backpack load motion”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 229, 2021.
- [68] Xie, L. H.; Li, X. D.; Cai, S. Q.; Huang, L. D.; Li, J. H.: “Increased energy harvesting from backpack to serve as self-sustainable power source via a tube-like harvester”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 96, pp. 215-225 2017.
- [69] George, A.; Moline, D.; Wagner, J.: “A mobile energy harvesting autowinder - Build and test”, *Renewable Energy*, Vol. 146, pp. 2659-2667, 2020.
- [70] Shan, G. S.; Wang, D.; Chew, Z. J.; Zhu, M. L.: “A high-power, robust piezoelectric energy harvester for wireless sensor networks in railway applications”, *Sensors and Actuators A-Physical*, Vol. 360, 2023.
- [71] Alhumaid, S.; Hess, D.; Guldiken, R.: “A Noncontact Magneto-Piezo Harvester-Based Vehicle Regenerative Suspension System: An Experimental Study”, *Energies*, Vol. 15, No. 12, 2022.
- [72] Wang, C. H.; Wang, S.; Gao, Z. W.; Wang, X. J.: “Applicability evaluation of embedded piezoelectric energy harvester applied in pavement structures”, *Applied Energy*, Vol. 251, 2019.
- [73] Song, G. J.; Cho, J. Y.; Kim, K. B.; Ahn, J. H.; Song, Y.; Hwang, W.; Hong, S. D.; Sung, T. H.: “Development of a pavement block piezoelectric energy harvester for self-powered walkway applications”, *Applied Energy*, Vol. 256, 2019.
- [74] Morangueira, Y. L. A.; Pereira, J. C. D.: “Energy harvesting assessment with a coupled full car and piezoelectric model ”, *Energy*, Vol. 210, 2020.
- [75] Roshani, H.; Dessouky, S.; Montoya, A.; Papagiannakis, A. T.: “Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: A feasibility study”, *Applied Energy*, Vol. 182, pp. 210-218, 2016.
- [76] Hong, S. D.; Kim, K. B.; Hwang, W.; Song, Y. S.; Cho, J. Y.; Jeong, S. Y.; Ahn, J. H.; Kim, G. H.; Cheong, H.; Sung, T. H.: “Enhanced energy-generation performance of a

- landfilled road-capable piezoelectric harvester to scavenge energy from passing vehicles”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 215, 2020.
- [77] Guo, L. K.; Lu, Q.: “Modeling a new energy harvesting pavement system with experimental verification”, *Applied Energy*, Vol. 208, pp. 1071-1082, 2017.
- [78] Wang, C. H.; Zhao, J. X.; Li, Q.; Li, Y. W.: “Optimization design and experimental investigation of piezoelectric energy harvesting devices for pavement”, *Applied Energy*, Vol. 229, pp. 18-30, 2018.
- [79] Min, Z. W.; Hou, C. W.; Sui, G. D.; Shan, X. B.; Xie, T.: “Simulation and Experimental Study of a Piezoelectric Stack Energy Harvester for Railway Track Vibrations”, *Micromachines*, Vol. 14, No. 4, 2023.
- [80] Qi, L. F.; Li, H.; Wu, X. P.; Zhang, Z. T.; Duan, W. J.; Yi, M. Y.: “A hybrid piezoelectric-electromagnetic wave energy harvester based on capsule structure for self-powered applications in sea-crossing bridges”, *Renewable Energy*, Vol. 178, pp. 1223-1235, 2021.
- [81] Viet, N. V.; Xie, X. D.; Liew, K. M.; Banthia, N.; Wang, Q.: “Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester”, *Energy*, Vol. 112, pp. 1219-1226, 2016.
- [82] Li, Z. J.; Peng, Y.; Xu, Z. B.; Peng, J. L.; Xin, L. M.; Wang, M.; Luo, J.; Xie, S. R.; Pu, H. Y.: “Harnessing energy from suspension systems of oceanic vehicles with high-performance piezoelectric generators”, *Energy*, Vol. 228, 2021.
- [83] Qian, F.; Xu, T. B.; Zuo, L.: “Design, optimization, modeling and testing of a piezoelectric footwear energy harvester”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 171, pp. 1352-1364, 2018.
- [84] Wu, Y. P.; Qiu, J. H.; Zhou, S. P.; Ji, H. L.; Chen, Y.; Li, S.: “A piezoelectric spring pendulum oscillator used for multi-directional and ultra-low frequency vibration energy harvesting”, *Applied Energy*, Vol. 231, pp. 600-614, 2018.
- [85] Roundy, S.; Tola, J.: “Energy harvester for rotating environments using offset pendulum and nonlinear dynamics”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 10, 2014.
- [86] Han, C. B.; Du, W. M.; Zhang, C.; Tang, W.; Zhang, L. M.; Wang, Z. L.: “Harvesting energy from automobile brake in contact and non-contact mode by conjunction of triboelectrification and electrostatic-induction processes”, *Nano Energy*, Vol. 6, pp. 59-65, 2014.
- [87] Kang, M.; Kim, T. Y.; Seung, W.; Han, J. H.; Kim, S. W.: “Cylindrical Free-Standing Mode Triboelectric Generator for Suspension System in Vehicle”, *Micromachines*, Vol. 10, No. 1, 2019.

- [88] Heo, D.; Chung, J.; Kim, B.; Yong, H.; Shin, G.; Cho, J. W.; Kim, D.; Lee, S.: “Triboelectric speed bump as a self-powered automobile warning and velocity sensor”, *Nano Energy*, Vol. 72, 2020.
- [89] Yang, W. X.; Wang, Y. Q.; Li, Y. K.; Wang, J. L.; Cheng, T. H.; Wang, Z. L.: “Integrated flywheel and spiral spring triboelectric nanogenerator for improving energy harvesting of intermittent excitations/triggering”, *Nano Energy*, Vol. 66, 2019.
- [90] Yin, M. F.; Lu, X. H.; Qiao, G. D.; Xu, Y. H.; Wang, Y. Q.; Cheng, T. H.; Wang, Z. L.: “Mechanical Regulation Triboelectric Nanogenerator with Controllable Output Performance for Random Energy Harvesting”, *Advanced Energy Materials*, Vol. 10, No. 22, 2020.
- [91] Lu, X. H.; Xu, Y. H.; Qiao, G. D.; Gao, Q.; Zhang, X. S.; Cheng, T. H.; Wang, Z. L.: “Triboelectric nanogenerator for entire stroke energy harvesting with bidirectional gear transmission”, *Nano Energy*, Vol. 72, 2020.
- [92] Yang, Y. F.; Yu, X.; Meng, L. X.; Li, X.; Xu, Y. H.; Cheng, T. H.; Liu, S. M.; Wang, Z. L.: “Triboelectric nanogenerator with double rocker structure design for ultra-low-frequency wave full-stroke energy harvesting”, *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 46, 2021.
- [93] Chen, J.; Yang, J.; Li, Z. L.; Fan, X.; Zi, Y. L.; Jing, Q. S.; Guo, H.Y.; Wen, Z.; Pradel, K. C.; Niu, S. M.; Wang, Z. L.: “Networks of Triboelectric Nanogenerators for Harvesting Water Wave Energy: A Potential Approach toward Blue Energy”, *ACS Nano*, Vol. 9, No. 3, pp. 3324-3331, 2021.
- [94] Gao, Q.; Li, Y. K.; Xie, Z. J.; Yang, W. X.; Wang, Z.; Yin, M. F.; Lu, X. H.; Cheng, T. H.; Wang, Z. L.: “Robust Triboelectric Nanogenerator with Ratchet-like Wheel-Based Design for Harvesting of Environmental Energy”, *Advanced Materials Technologies*, Vol. 5, No. 1, 2020.
- [95] Yang, W. X.; Gao, Q.; Xia, X.; Zhang, X. S.; Lu, X. H.; Yang, S. T.; Cheng, T. H.; Wang, Z. L.: “Travel switch integrated mechanical regulation triboelectric nanogenerator with linear-rotational motion transformation mechanism”, *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 37, 2020.

POPIS OZNAKA I KRATICA

a	površina pomaka žice
B	jačina magnetskog polja
C	kapacitet kondenzatora
CAD	računalom podržano dizajniranje
D	gustoća električnog toka
d	piezoelektrična nabojna konstanta
E	elektrostatska sila
E	jakost električnog polja
F	sila na piezoelektrični kristal
f_s	sila izvora električne energije
FEM	metoda konačnih elemenata
FEP	fluorirani etilen propilen
g	električno polje piezoelektrični materijala
I	jakost električne struje
IoT	internet stvari
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju
J_D	gustoća električne struje
L	induktivnost
l	udaljenost između kontaktnih površina kondenzatora
LED	svjetleća dioda
MEMS	mikro elektromehanički sustav
MIGA	više-otočni genetski algoritam
MMR	mehanički ispravljač gibanja
P	polarizacija materijala
P_S	Wangov član

PCB	tiskana elektronička ploča
PE	polietilen
PFA	perfluoroalkoksi alkani
PLA	polilaktid
PMMA	polimetil metakrilat
PTFE	politetrafluoretilen
PVC	polivinil-klorid
PZT	olovo cirkonat titanat
Q	inducirani naboj
R	otpor
S	kontaktna površina kondenzatora
SMFM	polumetalni tarni materijali
TENG	triboelektrični nanogenerator
t	vrijeme
U	napon
v	brzina
W	rad
ε	elektromotorna sila
ε_0	permitivnost u vakuumu
ε_d	dielektrička konstanta
ε_m	permitivnost materijala
Φ	magnetski tok
ϕ_{AB}	pad potencijala između elektroda
σ	naprezanje piezoelektričnog kristala
ρ'	gustoća naboja

SAŽETAK

U ovom kvalifikacijskom radu razrađena je problematika i potencijal regenerativnih sustava za prikupljanje kinetičke energije. Predstavljena su tri načina pretvorbe energije (elektromagnetska indukcija, piezoelektricitet i triboelektricitet). Analizom i usporedbom ovih prirodnih fenomena, utvrđene su njihove prednosti, ograničenja i uvjeti za implementaciju u regenerativne uređaje. Elektromagnetska indukcija pokazala se posebno učinkovitom pri niskofrekventnim vibracijama i većim amplitudama dok su piezoelektrični i triboelektrični sustavi prikladniji za manje dimenzije uređaja i više frekvencije. Nadalje, provedeno je istraživanje regenerativnih sustava koji implementiraju elektromagnetsku indukciju (65 znanstvenih radova), piezoelektricitet (16 znanstvenih radova) i triboelektricitet (10 znanstvenih radova). Istraženi su različiti konteksti primjene, uključujući regeneraciju energije vozila u pokretu, ljudskih gibanja i gibanja morskih valova. Ono što je zajedničko svim regenerativnim sustavima je ovisnost njihovih radnih značajki o uvjetima rada (amplituda i frekvencija vibracija). Također, za maksimalnu regeneraciju energije važno je uskladiti unutarnji i vanjski električni otpor. Posebna pažnja posvećena je mehaničkim prijenosnim sustavima koji pretvaraju oscilatorno gibanje u rotaciju pri čemu su se osobito korisnima pokazali zupčanici, hidraulički sustavi i mehanički ispravljači gibanja. Uočena je mogućnost razvoja hibridnog sustava koji integrira više načina pretvorbe energije, a daljnje istraživanje uključuje optimizaciju mehaničkih elemenata, numeričko modeliranje i potencijalnu eksperimentalnu validaciju novog uređaja.