

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET**

**ANALIZA VARIJANTI MJENJAČKOG ZUPČANIČKOG
PLANETNOG PRETVARAČA**

Doktorska disertacija

Sanjin Troha

Rijeka, 2011.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET**

**ANALIZA VARIJANTI MJENJAČKOG ZUPČANIČKOG
PLANETNOG PRETVARAČA**

Doktorska disertacija

Sanjin Troha

Mentor: Red. prof. dr. sc. Neven Lovrin, dipl. ing.

Sumentori: Red. prof. dr. sc. Roberto Žigulić, dipl. ing.

Doc. dr. sc. Dimitar Karaivanov, dipl. ing.

Rijeka, 2011.

SAŽETAK

Istraživani su dvovodilni planetni pretvarači, izvedeni sa zupčanicima s ravnim zubima, koji imaju dva spojna i četiri vanjska vratila i koji omogućuju dvobrzinske pogone. Sustavno je istražen utjecaj raznih varijantnih pretvarača s pripadnim osnovnim parametrima na njihove osnovne karakteristike. Istražen je utjecaj idealnih momentnih omjera planetnih slogova na prijenosne omjere u obije brzine. Određene su kinematičke mjenjačke mogućnosti svake varijante ponaosob. Izvedeni su izrazi za određivanje idealnih momentnih omjera planetnih slogova na osnovu zahtijevanih prijenosnih omjera čime je stvorena osnova za sintezu dvobrzinskih planetnih pretvarača. Koncipirane su kinematičke sheme koje daju uvid u raspored zupčanika i vratila različitih varijanti pretvarača. Određene su ekstremne vrijednosti skokova prijenosa različitih varijanti pretvarača. Identificirane su varijante koje s aspekta ostvarivih prijenosnih omjera mogu imati široku primjenu u praksi. Izvedeni su izrazi za određivanje stupnja iskoristivosti planetnih pretvarača te provedene analize stupnja iskoristivosti kod karakterističnih varijanti. Provedeno je eksperimentalno određivanje stupnja iskoristivosti na eksperimentalnim pretvaračima s ciljem dokazivanja ispravnosti izvedenih matematičko-mehaničkih modela. Identificirane su varijante pretvarača kod kojih je moguća pojava neprihvatljivo velikih specifičnih relativnih brzina vrtnje satelita. Određeni su specifični momenti na sunčanim zupčanicima različitih varijanti pretvarača koji omogućuju dimenzioniranje zupčanika planetnih slogova. Razvijen je programski sustav koji omogućuje analizu, sintezu te ocjenu rješenja i optimalni izbor varijante pretvarača s pripadnim osnovnim parametrima.

SADRŽAJ

1. UVODNA IZLAGANJA	1
1.1 Planetni pretvarači i primjena.....	1
1.2 Ocjena dosadašnjih istraživanja.....	5
1.3 Svrha i ciljevi istraživanja	10
1.4 Metodologija istraživanja.....	12
2. JEDNOSTAVNI PLANETNI PRETVARAČ	15
2.1 Elementi planetnog sloga	15
2.2 Uvjeti sinteze planetnog sloga.....	16
2.3 Simbol planetnog sloga.....	17
2.4 Analiza sila i momenata na planetnom slogu.....	18
2.5 Geometrija planetnog sloga.....	21
2.6 Prijenosni omjeri.....	21
2.7 Relativne brzine vrtnje satelita	23
2.8 Relativni energetski tokovi.....	25
2.9 Stupanj iskoristivosti planetnog sloga	26
2.10 Radijalne dimenzije planetnog sloga	31
2.11 Masa zupčanika planetnog sloga	35
3. SLOŽENI PLANETNI PRETVARAČ.....	39
3.1 Dvovodilni planetni pretvarači	39
3.2 Oznčavanje planetnih pretvarača.....	44
3.3 Zajedničke karakteristike pojedinih varijanti pretvarača s dva spojna vratila	51
3.4 Metoda analize dvovodilnih planetnih pretvarača.....	51
4. KINEMATIČKE MOGUĆNOSTI DVOVODILNIH PLANETNIH PRETVARAČA.....	57
4.1 Dvobrzinski planetni pretvarači.....	57
4.2 Dvovodilni pretvarači s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima.....	58
4.2.1 Kinematičke karakteristike pretvarača s kočnicama na zasebnim vratilima	58
4.2.2 Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih planetnih pretvarača s kočnicama na zasebnim vratilima	62
4.2.3 Mjenjačke mogućnosti i skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima	65

4.2.3.1 Mjenjačke mogućnosti dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima	65
4.2.3.2 Skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima	67
4.3 Dvobrzinski planetni pretvarači s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima	70
4.3.1 Kinematičke karakteristike pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima	70
4.3.2 Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih planetnih pretvarača s kočnicama na spojnim vratilima	77
4.3.3 Mjenjačke mogućnosti i skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima	80
4.3.3.1 Mjenjačke mogućnosti dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima	80
4.3.3.2 Skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima	84
4.4 Dvobrzinski planetni pretvarači s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu	87
4.4.1 Kinematičke karakteristike pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu	87
4.4.2 Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih planetnih pretvarača s kočnicama raspoređenima na spojnom i zasebnom vratilu	101
4.4.3 Mjenjačke mogućnosti i skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu	108
4.4.3.1 Mjenjačke mogućnosti dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu	108
4.4.3.2 Skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu	114
4.5 Osvrt na kinematičke mogućnosti sve tri skupine varijanti pretvarača	118
5. ENERGETSKA UČINKOVITOST KOD DVOVODILNIH PLANETNIH PRETVARAČA	121
5.1 Stupanj iskoristivosti planetnih pretvarača	121
5.1.1 Određivanje funkcije stupanja iskoristivosti	122
5.1.2 Ekvivalentni stupanj iskoristivosti	123

5.2	Stupanj iskoristivosti pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima	124
5.3	Stupanj iskoristivosti pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima	124
5.4	Energetske karakteristike kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu	128
5.4.1	Određivanje računskog stupnja iskoristivosti	128
5.4.2	Energetski tokovi i jalova snaga	135
5.4.3	Stupnjevi iskoristivosti određenih pretvarača kod kojih se povećanjem prijenosnog omjera uz aktivnu kočnicu Br2 smanjuje stupanj iskoristivosti	140
5.4.4	Stupnjevi iskoristivosti određenih pretvarača kod kojih se povećanjem prijenosnog omjera uz aktivnu kočnicu Br2 povećava stupanj iskoristivosti	141
5.4.5	Stupanj iskoristivosti međusobno inverznih varijanti pretvarača	144
5.4.6	Ekvivalentne varijante pretvarača s aspekta brzine Br2	144
5.4.7	Rad s fiksnom kočnicom Br2- jednobrzinski pretvarači	146
5.5	Utjecaj relativnih stupnjeva iskoristivosti na ukupni stupanj iskoristivosti	147
5.6	Eksperimentalna provjera mehaničko-matematičkog modela stupnja iskoristivosti	150
5.6.1	Prikaz eksperimentalnog pretvarača i eksperimentalna oprema	150
5.6.2	Cilj eksperimenta	153
5.6.3	Teorijski temelji eksperimenta	154
5.6.4	Metodika eksperimenta	154
5.6.5	Rezultati eksperimenta	154
5.6.5.1	Određivanje stupnja iskoristivosti η_{Br_1}'	154
5.6.5.2	Određivanje stupnja iskoristivosti η_{Br_2}'	155
5.6.5.3	Određivanje relativnih stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova η_{0I}' i η_{0II}'	156
5.6.6	Usporedba rezultata	158
5.6.6.1	Stupanj iskoristivosti složenog pretvarača pri radu s uključenom kočnicom Br1	158
5.6.6.2	Stupanj iskoristivosti složenog pretvarača pri radu s uključenom kočnicom Br2	159

5.6.7	Zaključak eksperimenta	159
5.7	Eksperimentalno određivanje stupnja iskoristivosti.....	160
5.7.1	Cilj eksperimenta	160
5.7.2	Eksperimentalni pretvarač.....	160
5.7.3	Ispitni stol.....	162
5.7.4	Plan i metodika eksperimenta.....	164
5.7.5	Uspostava rezultata eksperimenta.....	165
5.7.6	Analiza dobivenih podataka i usporedba s računskim stupnjem iskoristivosti.....	166
5.7.7	Usporedba provedenog eksperimenta s drugim sličnim eksperimentom.....	169
6.	RELATIVNE BRZINE VRTNJE SATELITA.....	173
6.1	Općenito o relativnoj brzini vrtnje satelita	173
6.2	Specifične relativne brzine vrtnje satelita.....	173
7.	DIMENZIJE PLANETNOG PRETVARAČA	187
7.1	Dimenzioniranje planetnih sloganova	187
7.2	Momenti na sunčanim zupčanicima	187
7.3	Momenti na reakcijskim članovima (kočnicama)	200
8.	IZBOR OPTIMALNE VARIJANTE I PARAMETARA PRETVARAČA.....	203
8.1	Kriteriji pri optimalnom izboru.....	203
8.2	Metodika iznalaženja najprihvatljivijih idealnih momentnih omjera.....	204
8.3	Izbor najprikladnije varijante	208
8.4.	Programski sustav <i>DVOBRZ1</i>	209
8.4.1	Podsustav za analizu varijanti pretvarača	209
8.4.2	Podsustav za sintezu varijanti pretvarača.....	210
8.4.3	Podsustav za ocjenu rješenja	211
8.4.4	Ulagani podaci u programske sustav	211
8.5	Primjer izbora optimalne varijante pretvarača	218
8.5.1	Primjena programskog sustava za osnivanje dvobrzinskog pretvarača	218
8.5.2	Primjena programskog sustava za osnivanje jednobrzinskog pretvarača	220
9.	ZAKLJUČAK	227
	POPIS LITERATURE	235
	POPIS OZNAKA I INDEKSA	241
	POPIS SLIKA	247
	POPIS TABLICA	251

PRILOG 1	255
PRILOG 2	331
ŽIVOTOPIS	395

1. UVODNA IZLAGANJA

1.1 Planetni pretvarači i primjena

Kako bi radni stroj mogao vršiti svoju funkciju potrebna mu je pogonska energija koju proizvodi pogonski stroj. Pogonski stroj može biti elektromotor, motor s unutrašnjim izgaranjem, turbina i sl. Parametri mehaničke energije pogonskih strojeva u najvećem broju slučajeva ne odgovaraju potrebnim parametrima energije radnih strojeva koji ovise o uvjetima rada. Kako bi se pogonska energija mogla iskoristiti na radnom stroju treba njene energetske parametre prilagoditi traženim parametrima radnog stroja. Ovu prilagodbu provodi pretvarač parametara mehaničke energije. Mehanički pretvarač izведен sa zupčanicima naziva se mehanički zupčanički pretvarač.

Mehanički zupčanički pretvarači se primjenjuju u širokom rasponu brzina i opterećenja te pri tome ispunjavaju izuzetno stroge tehničke zahtjeve u pogledu kinematičke točnosti, stupnja iskoristivosti i pouzdanosti u različitim radnim uvjetima. Opća namjena ovih pretvarača je povezana s pretvorbom parametara mehaničke energije, a to je prilagodba torzijskog momenta zahtjevima pogonskog stroja i to najčešće njegovo povećavanje što se postiže smanjenjem brzine vrtnje suglasno zakonu o očuvanju mehaničke energije.

Zupčanički pretvarači se mogu s aspekta gibanja koja izvode njihovi vitalni elementi - zupčanici, podijeliti u dvije skupine. Prvu skupinu čine zupčanički pretvarači kod kojih su geometrijske osi svih zupčanika nepokretne. Takvi pretvarači se nazivaju standardni, obični ili klasični. U drugu skupinu spadaju planetni pretvarači. Kod planetnih pretvarača je os barem jednog zupčanika pomična. Zupčanici kojima je geometrijska os pomična izvode dva gibanja i to jedno gibanje oko svoje geometrijske osi, a drugo gibanje oko središnje osi pretvarača koja se naziva i osnovna os.

Prvi planetni pretvarač se pojavljuje 1781. godine u parnom stroju koji je patentirao James Watt. U drugoj polovini 19. stoljeća na razvoju planetnih pretvarača rade Eades, Reuleaux, Bock, Breuer i Daimler. 1912. godine Wolfrom opisuje planetni pretvarač s mogućnošću ostvarenja velikog prijenosnog omjera što zaokuplja pažnju znanstvenika i inženjera toga vremena. Tek od 1920. planetni pretvarači se počinju proizvoditi u većem broju i upotrebljavaju se prvenstveno kao diferencijali u vozilima, ali i kod ostalih industrijskih transportnih sredstava. Od tada pa sve danas primjena planetnih pretvarača se stalno povećava, a planetni pretvarači se neprestano razvijaju i usavršavaju.

Planetni pretvarači u odnosu na klasične imaju više prednosti i s vremenom se njihov udio u zupčaničkim pretvaračima povećava na račun klasičnih. Suvremeni strojarski sustavi podrazumijevaju usavršen sustav transformacije energije, usavršen sustav sprezanja zubi,

dobre radne karakteristike, kompaktnost i racionalnost konstrukcije. Planetni pretvarači u ovom smislu predstavljaju bitno dostignuće te je njihova primjena vrlo bitna. Tome posebno doprinose karakteristike koje se sastoje u sljedećem:

- suosni (koaksijalni) raspored ulaznog i izlaznog vratila
- povoljan oblik kućišta (najčešće približan cilindričnom)
- raspodjela ukupnog energetskog toka na više zahvata zubi, tako da su mesta dodira zubi manje opterećena što daje manje dimenzije, masu i dinamičke sile na zupčanicima, čime se smanjuje i buka
- kompaktna konstrukcija posebno pogodna za povezivanje s elektromotorom ili turbinom
- jednostavno mehaničko ili hidrauličko uključivanje
- mogućnost kontinuirane promjene brzine vrtanje kod planetnih pretvarača koji umjesto zupčanika imaju tarenice
- mogućnost sumiranja i dijeljenja tokova energije s obzirom na veći broj ulaznih ili izlaznih vratila
- potpuno uravnoteženje statičkih sila unutar pretvarača
- relativno male zamašne mase
- mogućnost ostvarenja relativno velikog prijenosnog omjera, naročito kombinacijom dva ili više planetnih pretvarača
- relativno visok stupanj iskoristivosti s obzirom da se dio energije prenosi rotacijom zupčanika, a dio energije na sličan način kao pomoću spojke
- mogućnost prijenosa pri kojim izlazno vratilo rotira u suprotnom smjeru od ulaznog vratila (reversivna redukcija ili reversivna multiplikacija) i dr.

Manji promjeri zupčanika kod planetnog pretvarača uzrokuju kod istih brzina vrtanje manje brzine kotrljanja i klizanja na boku zuba u odnosu na iste kod usporednog (ekvivalentnog) standardnog pretvarača (30% do 40% manje u odnosu na usporedni standardni pretvarač) [1].

Rotirajuće mase planetnih pretvarača također mogu biti manje (i do 75%) u odnosu na standardne pretvarače istih karakteristika. Ovim se smanjuje moment ubrzanja, usporenja i udarni momenti kod pokretanja i zaustavljanja. Sve ovo rezultira boljim stupnjem iskoristivosti. Zbog toga se može odabrati pogonski stroj manje snage nego kod standardnih pretvarača.

Mogućnost popunjavanja prostora između središnjih zupčanika većim brojem satelita omogućuje da se opterećenje prenosi istovremeno većim brojem zubi, što dovodi do smanjenja opterećenja i izbora manjih modula. Tako se primjerice za isto opterećenje, modul zubi zupčanika planetnog pretvarača primijenjenog na gusjeničaru kreće od 3 mm do 5 mm, dok u slučaju pretvarača s nepokretnim osima iznosi od 7 mm do 10 mm [1].

Mnogi suvremeni uređaji zahtijevaju pretvarače s velikom redukcijom brzine vrtnje. Kako bi se ovakva pretvorba parametara mehaničke energije ostvarila klasičnim zupčaničkim pretvaračima razlika između brojeva zubi zupčanika u zahвату mora biti izuzetno velika što ima za posljedicu veliku i tešku konstrukciju. Planetni pretvarači zahvaljujući svojim pretvaračkim karakteristikama, kompaktnoj konstrukciji i relativno maloj masi mogu biti dobro rješenje kada se zahtijevaju veće redukcije brzine vrtnje.

Pomoću određenih kinematičkih konstrukcija planetnih pretvarača moguće je ostvariti vrlo velike prijenosne omjere (čak i do $i = 10000$), ali uz mali stupanj iskoristivosti jer je ostvarenje ekstremno velikih prijenosnih omjera praćeno smanjenjem stupnja iskoristivosti [2].

Konstrukcijska rješenja uležištenja pojedinih elemenata planetnih pretvarača izvedenih s zupčanicima s ravnim ozubljenjem mogu biti pojednostavljena jer ležajevi svih rotirajućih članova osim satelita nisu radijalno opterećeni [3].

Bez obzira na očigledne prednosti planetnih pretvarača, oni ne mogu svuda zamijeniti klasične. I u ovom slučaju u prvi plan se postavlja ekonomski faktor. Za ostvarivanje ovakvih konstrukcija potrebna je veća točnost izrade i montaže, primjena boljih materijala s boljim mehaničkim svojstvima, što dodatno poskupljuje izradu. Planetni pretvarači su konstrukcijski složeniji i teže se izrađuju u odnosu na klasične zupčaničke pretvarače. Osim toga montaža im je složena, a kontrola nepogodna. Iz tog razloga izbor planetnog pretvarača u slučajevima kad nema ograničenja u maksimalnim izmjerama i masi, može dovesti do neopravdanog povećanja cijene pretvarača i povećanja eksploatacijskih troškova. Određivanje racionalnih oblasti primjena određenih tipova zupčaničkih pretvarača predstavlja zadatak koji je vezan za ispunjenje optimalnih ekonomskih mjerila, minimizaciju mase i gabarita strojeva, uzimanjem u obzir režime rada, specifičnih uvjeta eksploatacije, mogućnosti proizvođača i mjera za otklanjanje buke i vibracija.

Za jedan konkretan strojarski sustav se opravdanost primjene određenog tipa pretvarača može utvrditi samo kao rezultat analize velikog broja varijanti [4].

Specifičnosti planetnih mehanizama, posebno njihove kinematičke i dinamičke karakteristike su dugo predmet teorijskih istraživanja. Mnogobrojni prijedlozi i rješenja

nastali kao rezultat ovih istraživanja nisu praktično realizirani, što govori o tome da teorijska rješenja i eksploatacijske karakteristike nisu usuglašene.

Planetni pretvarači pored brojnih prednosti imaju i određene nedostatke. To su ponajprije:

- pojava inercijskih sila koje opterećuju ležajeve satelita te uzrokuju vibracije i buku
- pojava dopunskih sila uslijed nedovoljne točnosti raspodjele opterećenja na satelite
- osjetljivost na promjenu razmaka osi i na druga odstupanja
- složenost kinematike i montaže
- veći stupanj složenosti konstrukcije u usporedbi s klasičnim pretvaračima
- veća cijena u usporedbi s klasičnim pretvaračima

Iako planetni pretvarači imaju navedeni niz nedostataka, ipak prednosti prevladavaju pa su planetni pretvarači našli vrlo veliku primjenu u svim granama tehnike posebno pri prijenosu velikih snaga uz mali smještajni prostor, kao kod helikoptera, ratnih brodova, zrakoplova, automobila, bagera i drugih transportnih sredstava.

Planetni pretvarači se još primjenjuju i kod [5]:

- građevinskih strojeva (miješalice za beton, strojevi za izgradnju cesta i putova)
- transporteru (transporteri s platformom, elevatori, trakasti transporteri, lančani transporteri, kružni transporteri, liftovi za robu)
- dizalica (pokretni mehanizam strijele, mehanizam za podizanje i spuštanje, obrtni mehanizmi, mosne dizalice)
- alatnih strojeva
- kompresora (klipni i turbokompresori)
- strojeva za kemijsku industriju (miješalice tekućeg i polutekućeg materijala, centrifuge, rashladni bubenjevi, bubenjevi za sušenje)
- strojeva za prehrambenu industriju (drobilice, noževi i mlinovi za šećernu trsku, strojevi za pakiranje)
- strojeva za rad s metalom (prese, škare, strojevi za ravnanje i ispravljanje limova)
- strojeva u naftnoj industriji (pumpe za cjevovode, oprema za bušenje)
- strojeva za industriju plastike (drobilice, ekstruder, mikseri)
- pumpi (centrifugalne, klipne pumpe za ulje pod tlakom)
- strojeva za industriju gume (ekstruder, mikseri, postrojenja za gnječenje, postrojenja za valjanje)

- tekstilnih strojeva (strojevi za tiskanje i bojanje, strojevi za čišćenje rasčupavanjem)
- strojeva za tretman voda (aeratori, zavojne pumpe)
- strojeva za obradu drva (strojevi za skidanje kore drva, blanje)
- strojeva za kamen i glinu (prese za cigle, rotacijske peći, razbijачi)
- strojeva za proizvodnju papira
- upravljačkih i regulacijskih uređaja itd.

1.2 Ocjena dosadašnjih istraživanja

Iz područja planetnih pretvarača (planetnih prijenosnika) je napisano mnogo znanstvenih radova koji su objavljeni u raznim časopisima i zbornicima. Napisano je mnogo knjiga i monografija, napravljen popriličan broj disertacija i magistarskih radova. U svim tim publikacijama sagledavani su razni problemi planetnih pretvarača s raznih aspekata. Usprkos brojnim istraživanjima koja se provode u području planetnih pretvarača, ima još puno praznina u znanju koje nalažu daljnja istraživanja. Neki dijelovi područja planetnih pretvarača su istraženi više, a neki manje ili čak uopće nisu istraživani. U ovom poglavlju se daje pregled istraživanja područja planetnih pretvarača koji je proizašao na osnovu analize dostupne literature. Daje se osvrt na stanje tehnike i identificiraju se određeni nedovoljno istraženi dijelovi područja planetnih pretvarača. Autor se pri izboru nedovoljno istraženog dijela područja planetnih pretvarača, koji je predmet istraživanja u ovom radu, prvenstveno rukovodio potrebama industrijske prakse za takvim istraživanjem.

Na osnovu analize literature posvećene planetnim pretvaračima može se zaključiti:

Planetni pretvarači neosporno imaju niz prednosti, koje uvjetuju njihovu široku primjenu, kako u proizvodnji reduktora tako i u mehanizmima različitih transportnih strojeva, brodogradnji, zrakoplovnoj industriji [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] itd.

Neprestani porast nazivnih snaga, povećavanje zahtjeva za smanjenjem utroška materijala, stupnjem tehnologičnosti, ekonomičnosti i pouzdanosti strojeva, navelo je znanstvenike da se usmjere prema podrobnjem istraživanju mogućnosti i problematike planetnih pretvarača.

Postoje rezultati detaljnih istraživanja problema statike jednostavnih planetnih pretvarača. Tu je osnovni problem raspodjela opterećenja između elemenata pretvarača i njen utjecaj na rad pretvarača [15, 16, 17, 18]. Detaljno su istraživani i dinamički procesi u planetnom pretvaraču, utjecajni faktori i njihov utjecaj na opterećenje elemenata i rad pretvarača [19, 20, 21, 22, 23, 24].

Jedna od prednosti planetnog pretvarača 1UV (1UV - jednostruko planetno kolo, jedan središnji zupčanik s unutrašnjijm ozubljenjem i jedan središnji zupčanik s vanjskim

ozubljenjem) je mogućnost dobivanja visokog stupnja iskoristivosti (u odnosu na pretvarače s nepokretnim osima) [25, 26, 27, 28]. Korištenje zupčaničkih pretvarača za sve veće snage, čak i kod visokog stupnja iskoristivosti, vodi do utroška značajne energije za hlađenje maziva i do povećanja rizika od havarije (uništavanja pretvarača) pri otkazivanju sistema za hlađenje. Odatle proizlazi naročit značaj točnog određivanja stupnja iskoristivosti još u ranoj fazi osnivanja pretvarača (izbora sheme i njenih osnovnih parametara) [27]. Vrijedni pažnje su i neki radovi vezani za gubitke u klasičnim zupčaničkim pretvaračima [29, 30] gdje se uzima u obzir uvjete rada i geometriju zahvata, kao i gubitke uslijed bućanja ulja [31]. Određivanju stupnja iskoristivosti u planetnim pretvaračima posvećena je pažnja u [26, 27, 32, 33]. U [26] su razmotrena pitanja vezana uz stupanj iskoristivosti i samokočnost kod različitih varijanti jednostavnih planetnih pretvarača. U [33] se određuju gubici u zahvatu planetnih pretvarača, tako što se koeficijent trenja u zahvatu određuje kao funkcija faze zahvata.

Pitanje određivanja stupnja iskoristivosti dvovodilnih planetnih pretvarača sastavljenih od jednostavnih planetnih slogova 1UV, je razmotreno u [27]. Dvostupanjski planetni pretvarač je promatran kao rezultat spajanja jednog ili dva vratila njegovih planetnih slogova. U prvom slučaju, ukupni stupanj iskoristivosti je jednak umnošku stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova. U drugom slučaju, stupanj iskoristivosti i torzijski momenti na vratilima jednog stupnja, ovise o stupnju iskoristivosti i torzijskim momentima na vratilima drugog stupnja i sustav se razmatra kao složeni pretvarački sustav. U ovom radu se navodi da je moguće na 36 načina spojiti vratila planetnih slogova, ali nisu analizirane njihove karakteristike. Nadalje, rad uopće ne spominje jalovu snagu i kod kojih shema se ona pojavljuje te se temeljem toga stvara pogrešna slika da postoji suštinska razlika između dvovodilnih pretvarača s jednim i dva spojna vratila. U stvari, prvi slučaj je varijanta drugog, pri čemu je jedno od spojnih vratila nepokretno. Proizvoljno odabrane slovne oznake torzijskih momenta i kutnih brzina, otežavaju razumijevanje i dopuštaju pojavu grešaka pri korištenju materijala. Isto se odnosi na strukturno prikazivanje pretvarača u kojem se vratila razlikuju samo po slovnim oznakama. Nisu izvedeni dovoljno jasni, laki za korištenje (inženjerski) izrazi za određivanje stupnja iskoristivosti pretvarača, a s lakoćom je prihvaćena teza da je određivanje veličine torzijskih momenata i stupnja iskoristivosti vrlo složeno.

Opće prihvaćeno je mišljenje da se stupanj iskoristivosti može najtočnije utvrditi eksperimentalnim putem [28, 32, 34]. U vezi sa stupanjem iskoristivosti, može se primjetiti da se proizvođači suzdržavaju od iznošenja konkretnih podataka u svojim katalozima.

U posljednje vrijeme, posebna se pažnja posvećuje optimizaciji, kako samog zahvata tako i ukupne konstrukcije reduktora. Pri optimizaciji zahvata kao optimizacijski kriterij se najčešće koristi nosivost bokova i korijena zuba [35, 36, 37].

Pri optimizaciji reduktora najčešće susretani kriteriji su gabaritne izmjere i masa [4, 35, 38, 39, 40] te stupanj iskoristivosti [4]. U nekim radovima se kao kriterij koriste tehnološki i ekonomski pokazatelji [5, 41]. U [38] se naglašava da je dovoljno optimizirati radijalne gabarite zupčanika da bi se postigla minimalna masa reduktora.

Neki autori se bave problemima trajnosti i pouzdanosti planetnih pretvarača [42, 43].

Kod razmatranja dvovodilnih planetarnih pretvarača, autori se zadržavaju na najčešće susretanim strukturnim shemama s dokazanom kvalitetom [6, 11, 12, 20, 44, 45, 46], iako neki od njih naglašavaju neophodnost istraživanja svih mogućih strukturalnih shema [44].

Dobivene informacije od nekoliko različitih proizvođača planetnih reduktora iz EU ukazuju na činjenicu, da se najčešće upotrebljavani prijenosni omjeri u praksi kreću u intervalu od 18 do 90. Jednostavni planetni pretvarač 1UV osigurava obično prijenosne omjere od 3 do 8, a maksimalno 13. To nalaže primjenu dvostupanjskih (dvovodilnih) planetnih pretvarača, dobivenih spajanjem dva jednostavna planetna pretvarača. S takvim shemama je moguće postići dovoljno visok prijenosni omjer da bi se udovoljilo cilju. Posebno široku primjenu ovi pretvarači nalaze kod dizalica i općenito kod strojeva zastupljenih u transportnoj tehnici.

Rad [2] je posvećen sistematizaciji, razmatranju i analizi 21 sheme složenih jednobrzinskih dvovodilnih planetnih pretvarača (sastavljenih od dva planetna sloga). Dokazana je primjenjivost polužne analogije kod prijenosnih omjera, stupnja iskoristivosti, mrtvih hodova i krutosti vanjskih vratila kod složenih planetnih pretvarača koja daje mogućnost da se kod analize složenih pretvarača primjenjuju relativno jednostavne i konstruktoru dobro poznate formule za jednostavni planetni pretvarač. U ovom radu je primijenjena ova polužna analogija. Predložen je algoritam za određivanje strukturne sheme, koji omogućuje ostvarenje želenog prijenosnog omjera. Istraživani su energetski tokovi na razmatranim shemama jednobrzinskih dvovodilnih pretvarača. Definiran je reducirani unutrašnji stupanj iskoristivosti $\eta_{0\text{red}}$ dvovodilnih planetnih pretvarača, koji daje mogućnost analize složenog dvovodilnog planetnog pretvarača pomoću dobro poznatih izraza koji vrijede za jednostavni planetni pretvarač [47]. Istražen je utjecaj strukturne sheme i njenih parametara na gabaritne izmjere pretvarača. Napravljena je metodika za određivanje mrvog hoda vanjskih vratila dvovodilnih pretvarača i ustanovaljeno je da između njih postoji relacija, analogna relaciji jednostavnog planetnog pretvarača. Istraživan je utjecaj strukturne sheme i

njenih parametara na mrtvi hod vanjskih vratila. Na temelju izvedenih relacija je napravljen algoritam za izbor strukturne sheme i njenih parametara s aspekta minimalnog mrtvog hoda. Istraživan je utjecaj strukturne sheme i njenih parametara na reducirane krutosti vratila. Izvršen je niz mjerenja stupnja iskoristivosti na eksperimentalnom dvostupanjskom planetnom reduktoru. Dobiveni eksperimentalni rezultati su uspoređeni s teoretskim.

U [48, 49, 50] je dokazana opravdana primjena polužne analogije i za planetne pretvarače s tri i više vodila.

U [51] je predložena metodika za optimalni izbor strukturne sheme jednobrzinskog dvostupanjskog planetnog pretvarača prema više kriterija. Optimizacija je provođena po kriteriju maksimizacije stupnja iskoristivosti i minimizacije gabarita te krutosti. Gabariti su određeni uzimanjem u obzir kontaktne nosivosti vanjskog zahvata (sunčani zupčanik – sateliti). Pri određivanju stupnja iskoristivosti složenog pretvarača, relativni stupnjevi iskoristivosti planetnih slogova su prihvaćeni kao konstante. Nije uzet u obzir utjecaj broja zubi, obodne brzine zupčanika, i drugih utjecajnih faktora na gubitke u pretvaraču.

U [52, 53, 54, 55] se preporučuje višekriterijska optimizacija kod koje se dobiva nedominantno rješenje (Pareto optimalno rješenje). Pitanja optimizacije planetnih pretvarača su djelomično obuhvaćena i u [56].

Iako dvovodilni pretvarači pokrivaju raspon najčešće zastupljenih prijenosnih omjera u općem strojarstvu, trovodilni pretvarači također imaju svoje mjesto. U cilju smanjenja radikalnih gabarita primjerice kod malih dizalica s kukom, pribjegava se trovodilnim pretvaračima čak i pri manjim prijenosnim omjerima. Veliki broj mogućih načina povezivanja planetnih slogova kod trovodilnih pretvarača do danas nije omogućio njihovo sustavno istraživanje nego samo sporadična istraživanja ponekih shema. Trovodilnim pretvaračima je posvećen niz publikacija [49, 50, 57, 58].

U [57] predložena metoda za određivanje torzijskih momenata i energetskih tokova olakšava istraživanja viševodilnih planetnih pretvarača i omogućuje konstruktoru da se pravilno odredi još pri izboru strukturne sheme, ali u toj publikaciji je kao primjer razmatrano samo nekoliko shema.

U [49] je riješen konkretan problem izbora prikladnije od dvije prikazane strukturne sheme trovodilnog planetnog reduktora za male dizalice.

Planetni pretvarači uz adekvatnu konstrukciju mogu raditi i kao višebrzinski pretvarači (mjenjački pretvarači).

Dvovodilni planetni pretvarači s dva spojna i četiri vanjska vratila se mogu primijeniti kao dvobrzinski pretvarači [59]. Prikaz mogućih shema takvih pretvarača se može naći u [16,

48, 57, 59, 60, 61, 62] ali njihove pretvaračke karakteristike gotovo da nisu istraživane. U [57] se prikazuju moguće strukture pretvarača koje mogu uz odgovarajući raspored upravljačkih elemenata (kočnica) raditi kao dvobrzinski pretvarački sustavi. Sheme su predstavljene simbolički što olakšava uvid u povezanost elemenata. Ništa nije rečeno o njihovim pretvaračkim karakteristikama. Neke kinematičke sheme ovakvih pretvarača su predstavljene u [16] gdje su navedene i orijentacijske veličine prijenosnih omjera koje prikazane varijante mogu postići uz određene uvjete. Navedeni su i orijentacijski stupnjevi iskoristivosti.

U [59] se uvodi sustav označavanja ove vrste pretvarača koji omogućuje da se struktura pretvarača i raspored kočnica te aktivna brzina predstave alfanumeričkom oznakom što doprinosi mogućnosti njihove sistematizacije i sustavnog istraživanja. U [59] je primjenom metode torzijskih momenata izvršena analiza kinematičkih mogućnosti jedne varijante koja bi mogla imati praktičnu primjenu kod raznih industrijskih strojeva.

Zaključno se može reći da su rezultati istraživanja pretvarača s dva spojna i četiri vanjska vratila u dostupnoj literaturi vrlo oskudni te je potrebno njihovo daljnje sustavno istraživanje.

Kod nekih strukturalnih shema složenih planetnih pretvarača dolazi do pojave jalove snage (cirkulacije snage) [11, 63, 64]. Strukturne sheme pretvarača s imanentnom jalovom snagom se prihvataju s oprezom, ili izbjegavaju [1].

Kod dvovodilnih planetnih pretvarača, kako jednobrzinskih tako i dvobrzinskih, je poznat konstrukcijski kriterij po kojem se određuje da li je određenoj strukturno shemi imanentna jalova snaga ili nije [11]. U [57] je predložen vrlo jednostavan način za određivanje karakteristike energetskog toka unutar planetnog pretvarača (cirkulacija ili grananje) samo iz strukturne sheme. Svako ozbiljnije istraživanje koje se odnosi na jalovu snagu predstavljaljalo bi interes i bilo bi vrlo značajno za praksu. Iako se zna kojim shemama je jalova snaga imanentna, u literaturi nema nikakvih kvantitativnih podataka o njenom intenzitetu. Naime, u [1] se navodi da jalova snaga može imati za posljedicu smanjenje stupnja iskoristivosti i povećane gabarite te da sheme s jalovom snagom treba izbjegavati ili uzimati s oprezom. Nema podataka koliko je kod koje sheme izraženo djelovanje jalove snage na stupanj iskoristivosti i gabarite.

Stupanj iskoristivosti dvovodilnih planetnih pretvarača se razmatra i u [65]. U [65] su pokazane vrste gubitaka (odnosno izvori topline) u planetnom pretvaraču. Rezultati eksperimentalnih istraživanja dvostupanjskih planetnih pretvarača u [65] pokazuju da su gubici u ozubljenju od 62 % do 90 % od ukupnih gubitaka. Niže vrijednosti se odnose na

stupanj u kojem zupčanici imaju relativno veću brzinu rotacije. Rezultati provedenih eksperimenata, citirani i od drugih autora [32, 66] pokazuju slično.

Gubici u ležajevima kod planetnih pretvarača su obrađeni u [16].

Na temelju analize dostupne literature i dodatnih istraživanja mogu se iznijeti sljedeći zaključci o stanju tehnike u oblasti planetnih pretvarača:

- Sve je šira i učestalija primjena dvovodilnih planetnih pretvarača u suvremenom strojarstvu;
- Postoji široki spektar primjene planetnih pretvarača za velike i male snage te za velike i male prijenosne omjere;
- Relativno je mali broj kinematičkih shema koje su zastupljene u praksi;
- Postoje rezultati detaljnih istraživanja jednostavnih jednovodilnih planetnih pretvarača;
- Nedovoljno su provođena kompleksna, sustavna istraživanja strukture, kinematike, energetskih fenomena i dinamike složenih dvovodilnih planetnih pretvarača;
- Ne postoji kvalitetna metodika za izbor strukturne sheme i parametara dvovodilnih planetnih pretvarača;
- Nedovoljno su istraživane karakteristike dvovodilnih planetnih pretvarača koji omogućuju pogone s dvije brzine.

1.3 Svrha i ciljevi istraživanja

Zbog neospornih kvaliteta i velikih mogućnosti planetni pretvarači nalaze sve širu primjenu. Kompaktna konstrukcija uz pozitivni efekt podjele opterećenja na nekoliko satelita omogućuje prijenos relativno velikih snaga u širokom intervalu prijenosnih omjera. S druge strane velika raznolikost kinematičkih shema i neophodnost složenijih proračuna u usporedbi s uobičajenim pretvaračima s nepokretnim osima nalaže neophodnost sustavnog pristupa kod njihovog istraživanja, kako bi se potpunije mogle realizirati njihove mogućnosti.

Pažljivo razmatranje različitih kinematičkih shema pokazuje, da planetni pretvarač s dva središnja zupčanika (jedan s vanjskim i jedan s unutrašnjim ozubljenjem) i jednim redom satelita koji se nalaze na vodilu (1UV) najbolje ističe kvalitete planetnih pretvarača. Unutrašnji zahvat osigurava manja kontaktna naprezanja i manje gabarite (svi ostali zupčanici su smješteni unutar vjenca). Sama konstrukcija sa satelitima izvedenim s jednim vijencem zubi je kompaktnija, lakša za izradu i jeftinija. Navedene karakteristike su razlog da su u cijelokupnoj proizvodnji reduktora, reduktori planetne izvedbe u velikom porastu kao i da se isti sve češće primjenjuju kod raznovrsnih pogona u općem strojarstvu i transportu.

Istraživanja pokazuju, da je najčešće zastupljen interval prijenosnih omjera od 18 do 90. Jednostavni (jednovodilni) planetni pretvarač (1UV) omogućuje obično prijenosne omjere od 3 do 8, maksimalno 13, što nalaže široku primjenu dvovodilnih (dvostupanjskih) planetnih pretvarača, dobivenih povezivanjem dva jednostavna. Ove sheme mogu realizirati dovoljno visoke prijenosne omjere, da bi udovoljile potrebama prakse. Posebno široku primjenu ovakvi pretvarači nalaze u transportnoj tehnici (vitla, viljuškari, motor-bubnjevi, dizalice, tenkovi, razni gusjeničari i dr.), kod alatnih strojeva, strojeva u tekstilnoj industriji i dr.

Iz prethodnog se može zaključiti da su za praksu najzanimljiviji dvovodilni planetni pretvarači, sastavljeni od dva planetna sloga (reda).

Ovakvi pretvarači mogu raditi kako s jednim tako i s dva, a neki od njih čak i s 3 stupnja slobode.

Posebni interes nekih domaćih i stranih proizvođača predstavljaju pretvarači koji bi omogućavali dvobrzinski pogon tj. dva stupnja prijenosa s različitim prijenosnim omjerima. Takav mjenjački pretvarač bi se uspješno mogao primjenjivati u transportnoj tehnici kao i kod pogona raznih strojeva u industriji.

Ovakve mjenjačke karakteristike bi mogao osigurati dvovodilni planetni pretvarač s dva spojna i četiri vanjska vratila s tim da bi se na dva od vanjskih vratila nalazile kočnice koje bi izmjeničnim uključivanjem mijenjale energetske tokove u pretvaraču, a time i stupanj prijenosa (brzinu). Ovaj rad svojim najvećim dijelom obuhvaća istraživanje ovakvih mjenjačkih pretvarača.

Glavni cilj rada je spoznavanje znanstvenih činjenica koje doprinose razvoju dvobrzinskih pretvarača i njihovoj primjeni u praksi. Cilj rada je ostvaren između ostalog kroz sljedeće važne zadatke:

- sistematizirane su varijante pretvarača na osnovu izvornog sustava oznaka i to prema strukturi, razmještaju pogonskog i radnog stroja te razmještaju upravljačkih članova (kočnica).
- provedena je kinematička analiza svih varijanti pretvarača te su određene mjenjačke mogućnosti svake varijante ponaosob
- napravljene su kinematičke (konceptijske) sheme svih varijanti
- istraženi su relativni energetski tokovi u planetnim sloganima kod svih varijanti planetnih pretvarača čime je stvorena osnova za definiranje funkcija stupnjeva iskoristivosti za obje brzine mjenjačkog pretvarača

- istraženi su rasponi specifičnih relativnih brzina vrtnje satelita na planetnim sloganima mjenjačkih pretvarača
- izvedene su funkcije momenata torzije na sunčanim zupčanicima planetnih sloganova mjenjačkih planetnih pretvarača koje imaju primjenu kod dimenzioniranja zupčanika planetnih sloganova
- razvijen je računalni programski sustav koji omogućuje analizu, sintezu i optimalni izbor mjenjačkog planetnog pretvarača
- eksperimentalno je potvrđeno da se stupanj iskoristivosti ispitivanog pretvarača može točno izračunati preko izведенog matematičko-mehaničkog modela, ako su poznati relativni stupnjevi iskoristivosti planetnih sloganova.

1.4 Metodologija istraživanja

U istraživanju planetnih pretvarača u ovom radu pošlo se od struktura koje su predstavljene simbolima iz kojih se jasno vidi vrsta pojedinog vratila, povezanost vratila između planetnih sloganova, raspored kočnica na vratilima te smještaj pogonskog i radnog stroja. Ovakav pregledni pristup strukture je omogućio postavljanje mehaničkih jednadžbi između elemenata strukture koje omogućuju izvođenje originalnih matematičko-mehaničkih modela za opisivanje kinematičkih i dinamičkih karakteristika sustava (metoda torzijskih momenata).

Pored analitičkog pristupa svakoj različitoj strukturi i formiranja navedenih modela sastavljen je i programski algoritam koji je omogućio sintezu varijanti te naknadnu analizu njihovih karakterističnih parametara kao i usporednu analizu varijanti prema relevantnim kriterijima.

Pomoću računalnog programskog sustava su generirani veliki skupovi podataka istraživanih karakteristika za svaku varijantu ponaosob koji su u cilju analize, primjenom programskog sustava „Origin 7.5“, prikazani u tabličnom obliku i po potrebi vizualizirani. Prikladnom sustavnom vizualizacijom tj. pretvaranjem podataka u slikovni oblik omogućena je njihova analiza, istraživani su odnosi između skupova podataka, identificirane su zajedničke karakteristike zasebnih skupova i na taj način se došlo do novih znanstvenih činjenica.

Primjenom razvijenog programskog sustava omogućena je usporedba varijanti prema nekoliko kriterija od kojih su najvažniji dimenzije (masa) i stupanj iskoristivosti pretvarača. Ovo su dva suprotstavljeni kriterija koja su sadržana u višekriterijskoj optimizaciji. Višekriterijska optimizacija koju programski sustav može izvršiti se provodi metodom težinskih koeficijenata pomoću kojih se određuje važnost pojedinog kriterija.

Proračun naprezanja u zubima se temelji na kontaktnoj nosivosti boka zuba i nosivosti korijena. Relativni stupanj iskoristivosti se određuje na osnovu brojeva zubi zupčanika i eksperimentalno dobivenih koeficijenata.

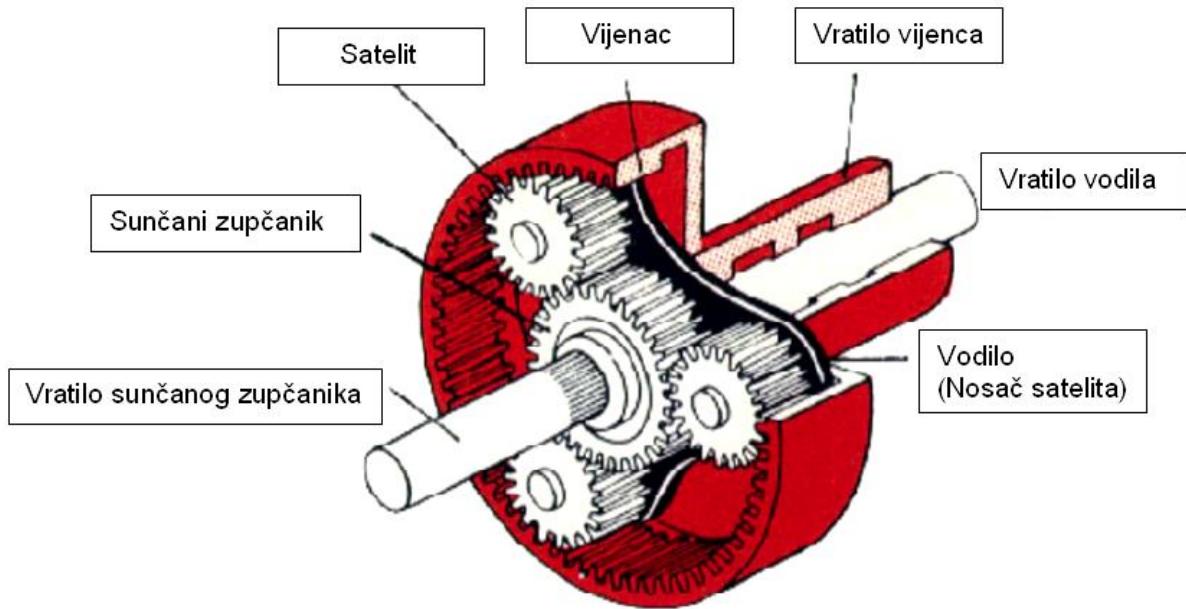
Budući da se u ovom radu obrađuje veliki broj varijanti pretvarača s različitim parametrima, verifikacija rezultata eksperimentalnim putem je ograničena na verifikaciju modela stupnja iskoristivosti kod jednog dvobrzinskog pretvarača eksperimentalnim putem i to određivanjem stupnja iskoristivosti statičkom metodom. Pored toga je provedeno određivanje stupnja iskoristivosti na drugom dvovodilnom pretvaraču tenziometrijskom metodom u otvorenom kolu snage te izvršena usporedba dobivenih rezultata s rezultatima sličnog eksperimenta od drugog autora.

2. JEDNOSTAVNI PLANETNI PRETVARAČ

U ovom poglavlju se razmatraju pojmovi vezani za jednostavni planetni pretvarač odnosno planetni slog (1UV). Navedeni podaci, definicije i izvedeni izrazi su osnova za razumijevanje te analizu i sintezu složenih planetnih pretvarača i imaju za cilj omogućiti lakše praćenje ostalih poglavlja.

2.1 Elementi jednostavnog planetnog pretvarača

U ovom radu se istražuju složeni dvostupanjski planetni pretvarači. Ovi su pretvarači sastavljeni od dva jednostavna planetna pretvarača tipa 1UV. Pretvarač 1UV je osnovni gradbeni dio složenog planetnog pretvarača i kao takav se često naziva planetni slog ili planetni red. Prije nego što se pristupi kinematičkoj i dinamičkoj analizi planetnog pretvarača, potrebno je definirati njegove osnovne rotirajuće elemente. Zato je na sl. 2.1.1 prikazan osnovni planetni pretvarač sa sljedećim osnovnim elementima i to: satelitima, nosačem satelita (vodilom) i središnjim zupčanicima (sunčani zupčanik i vijenac). Sateliti su zupčanici koji istovremeno rotiraju oko svoje vlastite osi i osi središnjih zupčanika. Pretvarač na sl. 2.1.1 ima tri satelita što je i najčešći slučaj. Element na kojem se nalaze sateliti se naziva nosač satelita ili vodilo. Vodilo osigurava odgovarajući razmak osi. Nepokretna os, oko koje se može okretati ili se okreće nosač satelita se naziva *osnovna os* ili *središnja os* planetnog pretvarača. Zupčanici koji su istovremeno u zahvatu sa satelitima i čije se geometrijske osi poklapaju s osnovnom osi prijenosnika su *središnji zupčanici*. Središnji zupčanik koji se nalazi unutar putanje koju opisuje satelit naziva se sunčani zupčanik ili sunce. Središnji zupčanik koji se nalazi izvan putanje satelita naziva se ozubljeni vijenac ili vijenac. Sunčani zupčanik, vijenac i vodilo (nosač satelita) imaju svoja vratila koja su opterećena momentom torzije. Sunčani zupčanik, vijenac i vodilo se nazivaju *središnji članovi* planetnog sloga.



Sl. 2.1.1 Jednostavni planetni pretvarač 1UV s osnovnim elementima [80]

2.2 Uvjeti sinteze planetnog sloga

Konstruktivno izvođenje planetnog sloga s više satelita zahtijeva osiguranje određenih geometrijskih uvjeta kako bi se mogao osigurati ispravan zahvat i sastavljanje zupčanika u planetni slog.

Ovi uvjeti se nazivaju *uvjeti sinteze planetnog sloga*. Uvjeti sinteze planetnog sloga su:

1. Uvjet koaksijalnosti (suosnosti)
2. Uvjet susjedstva
3. Uvjet montaže

Ovi uvjeti su detaljno objašnjeni u [3, 11, 54, 69, 70]. Uvjeti koji slijede odnose se na planetni slog 1UV kakav je prikazan na sl. 2.1.1.

Ad.1. Uvjet koaksijalnosti

Ovaj uvjet proizlazi iz zahtjeva da razmak osi sunca i satelita bude jednak razmaku osi sunca i vijenca. Uvjet koaksijalnosti se može preko brojeva zubi izraziti na slijedeći način:

$$z_2 = \frac{|z_3| - z_1}{2} \quad (2.2.1)$$

Ovdje su:

z_1 - broj zubi sunčanog zupčanika

z_2 - broj zubi satelita

z_3 - broj zubi vijenca

Ako se uz poznate brojeve zubi sunca z_1 i vijenca z_3 za broj zubi satelita z_2 ne dobije cijeli broj, opravdano je prihvatići cijeli dio tog broja i zahvat izvesti s pomakom profila.

Ad.2 Uvjet susjedstva

Ovim se uvjetom osigurava zazor između tjemenih kružnica susjednih satelita. Kako bi se osigurao ovaj uvjet kod jednostavnih planetnih pretvarača s tri satelita (najčešći slučaj) omjer broja zubi vijenca i broja zubi sunčanog zupčanika mora biti manji ili jednak 12 tj. vrijedi (2.2.2) [2]

$$\frac{|z_3|}{z_1} \leq 12 \quad (2.2.2)$$

Prema [2] minimalna vrijednost izraza (2.2.2) nije manja od 2.

Ad.3 Uvjet montaže

Kod planetnih slogova je pravilo da središnji kutovi između satelita budu jednaki i da iznose $2\pi/k$ radijana. Ovdje je s k označen broj satelita. Sateliti će biti ravnomjerno raspoređeni po kružnici njihovih središta jedino ako je zadovoljen sljedeći analitički izraz

$$\frac{z_1 + |z_3|}{k} = \text{cijeli broj} \quad (2.2.3)$$

U posebnim slučajevima pri izboru zubi zupčanika može se odstupiti od ovog pravila [67].

2.3 Simbol planetnog sloga

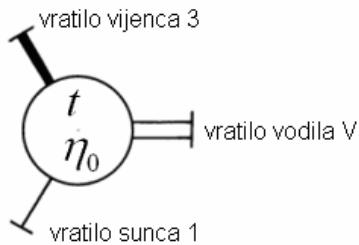
U ovom radu se razmatraju različite strukture planetnih pretvarača sastavljenih od dva planetna sloga. Kako bi se povećala preglednost i time olakšala analiza struktura planetni slogovi se prikazuju simbolima. U ovom radu je upotrijebljen poznati Wolf-ov simbol koji je malo modificiran odnosno nadopunjjen [44, 48, 57, 68] (sl. 2.3.1). Kod nadopunjjenog modificiranog simbola vratila se označavaju debljinom i brojem crta za razliku od uobičajenog označavanja s alfanumeričkim oznakama.

Planetni slog se označava s kružnicom s tri izdanka koji predstavljaju vratila.

Unutar kružnice se može upisati vrijednost idealnog momentnog omjera t (koja je brojčano jednaka apsolutnoj vrijednosti omjera broja zubi vijenca i sunčanog zupčanika) i vrijednost relativnog stupnja iskoristivosti η_0 . Vratila se označavaju kako slijedi:

- vratilo sunčanog zupčanika (sunca) 1 – s jednom uskom crtom;
- vratilo vijenca 3 – s jednom širokom crtom;
- vratilo vodila V – s dvije uske paralelne crte.

(Vodilo je kod planetnog sloga 1UV uvijek sumarni član.)



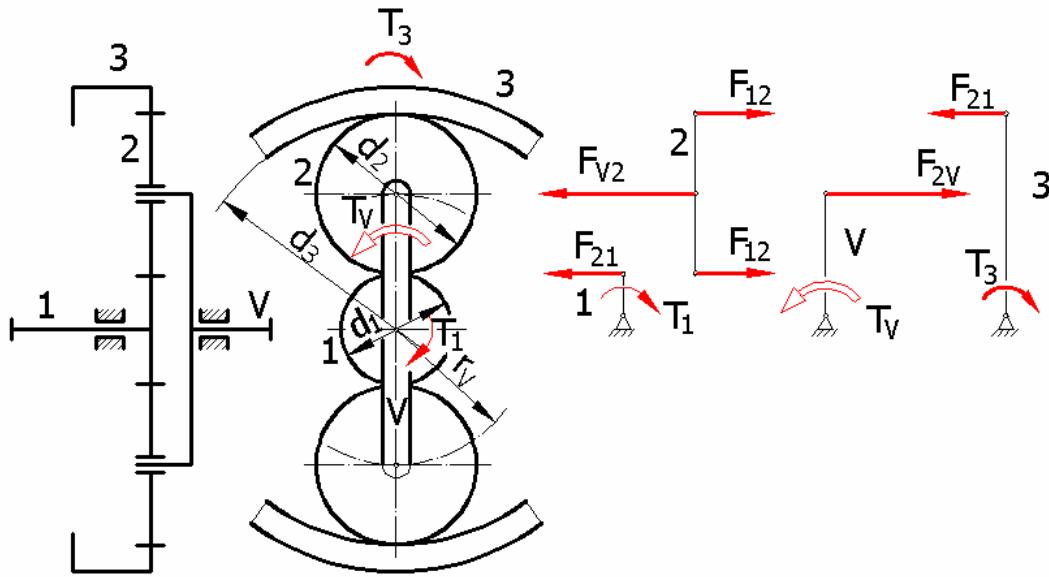
Sl. 2.3.1 Simbolički prikaz planetnog sloga

2.4 Analiza sila i momenata na planetnom slogu

Kod jednostavnih planetnih pretvarača postoje tri različita mjesta prijenosa tangencijalnog opterećenja. To su dva mjesta zahvata središnjih zupčanika (sunčanog zupčanika i vijenca) sa satelitom te spoj vratila vodila i satelita.

Na tim se mjestima obodne sile/momenati mogu prikazati po veličini i smjeru planom sila/momenata. Na sl. 2.4.1 je prikazan raspored sila/momenata na planetnom slogu 1UV. Na planetnom slogu vrijede pravila:

- sile/momenati su u međusobnoj ravnoteži,
- sile koje djeluju na bokove zubi zupčanika imaju tangencijalne i radijalne komponente pri čemu samo tangencijalne utječu na veličine torzijskih momenata.



Sl. 2.4.1 Prikaz sila i momenata na planetnom slogu 1UV

Moment na vratilu sunčanog zupčanika 1 je:

$$T_1 = F_{21} \cdot \frac{d_1}{2} \quad (2.4.1)$$

Moment na vratilu ozubljenog vijenca je:

$$T_3 = F_{21} \cdot \frac{d_3}{2} \quad (2.4.2)$$

Iz statičkih uvjeta ravnoteže proizlaze jednakosti (2.4.3) i (2.4.4)

$$F_{12} = F_{32} \quad (2.4.3)$$

$$F_{V2} = 2 \cdot F_{12} = -2 \cdot F_{21} \quad (2.4.4)$$

Moment na vratilu vodila je:

$$T_V = -F_{V2} \cdot r_V \quad (2.4.5)$$

Razmak središnje osi i osi satelita je:

$$r_V = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{d_1 + d_3}{4} \quad (2.4.6)$$

Uvrštavanjem (2.4.6) u (2.4.5) dobiva se:

$$T_V = -F_{21} \cdot \frac{d_1 + d_3}{2} \quad (2.4.7)$$

Odnosi momenata na sunčanom zupčaniku, vijencu i vodilu su:

$$T_1 : T_3 : T_V = \left(F_{21} \cdot \frac{d_1}{2} \right) : \left(F_{21} \cdot \frac{d_3}{2} \right) : \left(-F_{21} \cdot \frac{d_1 + d_3}{2} \right) \quad (2.4.8)$$

Skraćivanjem se dobije:

$$T_1 : T_3 : T_V = d_1 : d_3 : [-(d_1 + d_3)] \quad (2.4.9)$$

Provede li se supsticija:

$$t = \frac{d_3}{d_1}, \quad (2.4.10)$$

dobije se izraz koji prikazuje omjere momenata u funkciji parametra t :

$$T_1 : T_3 : T_V = +1 : +t : -(1+t) \quad (2.4.11)$$

Vrijednosti s desne strane izraza (2.4.11) predstavljaju idealne relativne momente na vratilima planetnog sloga.

Iz uvjeta ravnoteže momenata slijedi da je intenzitet momenta na vratilu vodila jednak zbroju intenziteta momenata na vratilu sunčanog zupčanika i vratilu vijenca dok je smjer momenta na vratilu vodila suprotan smjeru momenta na vratilu sunčanog zupčanika i vratilu vijenca:

$$T_V = -(T_1 + T_3) \quad (2.4.12)$$

Iz tog razloga se moment na vratilu vodila naziva sumarni moment, a vodilo sumarni član. Sumarni moment se označava s T_Σ . Momenti na vratilu sunčanog zupčanika i vratilu vijenca su diferencijalni momenti i označavaju se s $T_{D\min}$ i $T_{D\max}$.

Iz (2.4.11) se vidi da je uvijek zadovoljeno:

$$T_1 \equiv T_{D\min} < T_3 \equiv T_{D\max} < |T_V| \equiv |T_\Sigma| \quad (2.4.13)$$

Ako se zanemare gubici (relativni stupanj iskoristivosti, $\eta_0 = \eta_{13(V)} = \eta_{31(V)} = 1$), momenti istog smjera T_3 i T_1 imaju stalan (konstantan) omjer t [57],

$$t = \frac{T_3}{T_1} = \left| \frac{z_3}{z_1} \right| > +1 \quad (2.4.14)$$

Ovaj omjer se naziva *idealni momentni omjer* i brojčano je jednak apsolutnoj vrijednosti omjera brojeva zubi na vijencu i sunčanom zupčaniku kao i apsolutnoj vrijednosti unutrašnjeg prijenosnog omjera. Ovaj parametar je vrlo bitan jer se preko njega u ovom radu izražavaju najvažnije karakteristike složenih pretvarača.

Ako se pretpostavi da u pretvaraču nema gubitaka (osnovni stupanj iskoristivosti $\eta_0 = 1$), idealni momentni omjer t i proizvoljni omjeri momenta T_1 , T_3 i T_v su konstantni bez obzira na:

- broj stupnjeva slobode gibanja S_G kod rada pretvarača, ($S_G = 1$ ili $S_G = 2$);
- izbor reaktivnog vratila (zakočenog vratila) ($S_G = 1$);
- smjer energetskog toka (reduktorski ili multiplikatorski rad uz $S_G = 1$);
- sumarni odnosno razlikovni rad ($S_G = 2$);
- samostalan rad pretvarača ili rad u sklopu viševodilnog pretvarača.

2.5 Geometrija planetnog sloga

Budući da idealni momentni omjer planetnog sloga ovisi samo o geometriji tog planetnog sloga, moguće je važne geometrijske parametre planetnog sloga povezati jednadžbom u kojoj je uključen idealni momentni omjer t .

Tako se diobeni promjer vijenca d_3 , diobeni promjer satelita d_2 i razmak središnje osi i osi satelita r_v mogu izraziti kao funkcija diobenog promjera sunčanog zupčanika d_1 i omjera momenata t .

$$d_3 = t \cdot d_1 \quad (2.5.1)$$

$$d_2 = \frac{t-1}{2} \cdot d_1 \quad (2.5.2)$$

$$r_v = \frac{t+1}{4} \cdot d_1 \quad (2.5.3)$$

2.6 Prijenosni omjeri

Kako bi se došlo do jednadžbe koja povezuje brzine vrtnje središnjih članova planetnih slogova pretvarača polazi se od zakona o očuvanju energije (2.6.1) odnosno (2.6.2). Ako se zanemare gubici u pretvaraču algebarski zbroj energetskih tokova na vanjskim vratilima pretvarača mora biti jednak nuli.

$$P_1 + P_3 + P_v = 0, \quad (2.6.1)$$

odnosno

$$T_1 \cdot \omega_1 + T_3 \cdot \omega_3 + T_v \cdot \omega_v = 0 \quad (2.6.2)$$

Ako se izraz (2.6.2) podijeli s T_1 i ako se uzme u obzir (2.4.14) dobiva se osnovna jednadžba gibanja središnjih članova planetnog sloga:

$$\omega_l + t \cdot \omega_3 - (t+1) \cdot \omega_V = 0 \quad (2.6.3)$$

Umjesto kutnih brzina se mogu pisati brzine vrtnje članova planetnih slogova pa (2.6.3) dobiva oblik:

$$n_l + t \cdot n_3 - (t+1) \cdot n_V = 0 \quad (2.6.4)$$

Ovo je oblik osnovne jednadžbe kinematike koja se često viđa u literaturi samo što je ovdje kao parametar, umjesto unutrašnjeg prijenosnog omjera u ($u = z_3 / z_1$), uzet idealni momentni omjer t .

Kinematički prijenosni omjer i je omjer kutnih brzina ulaznog i izlaznog vratila. Na osnovu (2.6.3) su izvedeni izrazi za kinematičke prijenosne omjere kod *dvovratilnog režima rada* planetnog sloga koji su sistematizirani u Tab. 2.6.1. Dvovratilni režim rada je režim kod koga je jedno vratilo planetnog sloga zakočeno, a ostala dva rotiraju. Kod dvovratilnog režima rada planetni slog radi s jednim stupnjem slobode gibanja $S_G = 1$. Stupanj slobode gibanja S_G predstavlja broj kinematičkih podataka s kojim je gibanje članova planetnog pretvarača potpuno određeno.

Moguće je šest različitih slučajeva rada pretvarača u dvovratilnom režimu. U Tab. 2.6.1 su u prvom stupcu navedene oznake režima rada planetnog sloga. S oznakom 1 je označen prijenos sa sunčanog zupčanika 1 na vodilo V uz zakočeni vijenac 3. Prijenosni omjer ovog slučaja je označen s $i_{1V(3)}$. Prva oznaka u indeksu označava pogonski član, druga gonjeni član, a oznaka u zagradi označava zakočeni član. Isto vrijedi za cijelu tablicu.

Tab. 2.6.1 Oznake stupnjeva prijenosa u različitim režimima rada planetnog pretvarača, analitički izrazi i vrijednosti za prijenosne omjere i pri $t \in (2, 12)$

oznaka	opis	i	$i \in$
1	najveća moguća redukcija	$i_{IV(3)} = t + 1$	(3, 13)
1M	najveća moguća multiplikacija	$i_{V1(3)} = \frac{1}{t+1}$	(1/3, 1/13)
2	redukcija (reversivna)	$i_{13(V)} = -t$	(-12, -2)
2M	multiplikacija (reversivna)	$i_{31(V)} = -\frac{1}{t}$	(-1/12, -1/2)
3	najmanja moguća redukcija	$i_{3V(1)} = \frac{t+1}{t}$	(13/12, 3/2)
3M	najmanja moguća multiplikacija	$i_{V3(1)} = \frac{t}{t+1}$	(12/13, 2/3)

Napomena: prvi indeks označava ulazno vratilo, drugi indeks označava izlazno vratilo, a indeks u zagradi označava reaktivno vratilo

2.7 Relativne brzine vrtnje satelita

Ovisno o ustrojstvu planetnog pretvarača, moguća je pojava znatno većih ili manjih brzina vrtnje satelita od brzine vrtnje na ulazu ili izlazu iz pretvarača. Njihovo bi nepoznavanje moglo rezultirati nekvalitetnom konstrukcijom.

Posebnu pažnju treba posvetiti relativnim brzinama vrtnje satelita zbog:

- habanja, koje nastaje kao posljedica klizanja bokova zuba u zahvatu, a ovisno je o intenzitetu relativnih brzina vrtnje satelita.
- dimenzioniranja ležajeva satelita
- utjecaja na ukupnu iskoristivost planetnog pretvarača (procjena gubitaka) [69].
- emisije buke
- centrifugalnih sila (nemaju uvijek zanemariv utjecaj)

Dobro se držati preporuke da relativna brzina satelita ne premaši brzinu vrtnje sunčanog zupčanika [54].

Određivanje relativne brzine vrtnje satelita na planetnom slogu

Za zupčanički par vijenac-satelit vrijedi kinematička jednadžba:

$$\frac{n_2 - n_V}{n_3 - n_V} = \frac{z_3}{z_2} \quad (2.7.1)$$

Za zupčanički par sunčani zupčanik-satelit vrijedi kinematička jednadžba:

$$\frac{n_2 - n_V}{n_l - n_V} = -\frac{z_1}{z_2} \quad (2.7.2)$$

Brojnik lijeve strane izraza (2.7.1) i (2.7.2) predstavlja brzinu vrtnje satelita prema vodilu ili relativnu brzinu vrtnje satelita n_{2r} .

Iz (2.7.1) slijedi:

$$n_{2r} = \frac{z_3}{z_2} (n_3 - n_V) \quad (2.7.3)$$

Iz (2.7.2) slijedi:

$$n_{2r} = -\frac{z_1}{z_2} (n_l - n_V) \quad (2.7.4)$$

Budući da je:

$$z_2 = \frac{z_3 - z_1}{2} \quad (2.7.5)$$

može se pisati:

$$\frac{z_3}{z_2} = \frac{2z_3}{z_3 - z_1} = \frac{2t}{t-1} \quad (2.7.6)$$

i

$$-\frac{z_1}{z_2} = -\frac{2z_1}{z_3 - z_1} = -\frac{2}{t-1} \quad (2.7.7)$$

Iz čega slijedi da je:

$$n_{2r} = \frac{2t}{t-1} (n_3 - n_V) \quad (2.7.8)$$

i

$$n_{2r} = -\frac{2}{t-1} (n_l - n_V) \quad (2.7.9)$$

Iz osnovne jednadžbe kinematike planetnog pretvarača (2.6.4) slijedi:

$$n_{2r} = \frac{2t}{t^2 - 1} (n_3 - n_l) \quad (2.7.10)$$

Budući da je važan samo intenzitet relativnih brzina vrtnje satelita izrazi

(2.7.8), (2.7.9) i (2.7.10) se mogu pisati:

$$n_{2r} = \frac{2}{t-1} |n_l - n_V| < n_{2rdop} \quad (2.7.11)$$

$$n_{2r} = \frac{2t}{t-1} |n_3 - n_V| < n_{2rdop} \quad (2.7.12)$$

$$n_{2r} = \frac{2t}{t^2 - 1} |n_3 - n_1| < n_{2rdop} \quad (2.7.13)$$

O relativnim brzinama vrtnje satelita biti će još riječi kod razmatranja složenih pretvarača.

2.8 Relativni energetski tokovi

Unutar planetnog pretvarača postoje dva mehanizma prijenosa energije i to: mehanizam prijenosa energije relativnim gibanjem (odvaljivanjem zupčanika) i mehanizam prijenosa energije prijenosnim gibanjem (efektom spojke). Energija koja se prenosi relativnim gibanjem se naziva relativna energija, a njen energetski tok relativni energetski tok (relativna snaga ili snaga odvaljivanja). Relativna energija se prenosi od sunčanog zupčanika preko satelita prema vijencu ili u obrnutom smjeru.

U cilju određivanja gubitaka u planetnom pretvaraču (planetnom slogu) neophodno je poznavati smjer prijenosa relativne energije [57].

Ukoliko se uzmu u obzir gubici koji nastaju u pretvaraču onda je odnos realnih momenata na središnjim članovima planetnog pretvarača $T'_1 : T'_3 : T'_V$ ovisan o smjeru relativnog energetskog toka.

Kod prijenosa relativne energije od sunčanog zupčanika prema vijencu vrijedi:

$$T'_1 : T'_3 : T'_V = +1 : +\eta_0 t : -(1 + \eta_0 t), \quad (2.8.1)$$

a kod prijenosa relativne energije od vijenca prema sunčanom zupčaniku vrijedi:

$$T'_1 : T'_3 : T'_V = +1 : +\frac{t}{\eta_0} : -\left(1 + \frac{t}{\eta_0}\right) \quad (2.8.2)$$

Relativna snaga (idealni slučaj) se može odrediti prema izrazu:

$$P_W = T_1(\omega_1 - \omega_V) \quad (2.8.3)$$

ili prema izrazu:

$$P_W = T_3(\omega_3 - \omega_V) \quad (2.8.4)$$

Kod upotrebe izraza (2.8.3) dobivena pozitivna vrijednost P_W znači da se relativna energija prenosi od sunčanog zupčanika prema vijencu, a dobivena negativna vrijednost P_W znači da se relativna energija prenosi od vijenca prema sunčanom zupčaniku. Kod upotrebe izraza (2.8.4) dobivena pozitivna vrijednost P_W znači da se relativna energija prenosi od vijenca prema sunčanom zupčaniku, a dobivena negativna vrijednost P_W znači da se relativna energija prenosi od sunčanog zupčanika prema vijencu.

Tok relativne energije od sunčanog zupčanika prema vijencu će se simbolički označavati s "e", a tok relativne energije od vijenca prema sunčanom zupčaniku će se simbolički označavati s "E".

2.9 Stupanj iskoristivosti planetnog sloga

Ne postoji pretvarač koji pretvara parametre mehaničke energije bez gubitaka. Ti gubici ovise o izvedbi pretvarača i uvjetima rada. Na gotovom pretvaraču oni se mogu posredno izmjeriti pri različitim uvjetima rada i na osnovu njih odrediti pripadne stupnjeve iskoristivosti.

Pri osnivanju budućeg pretvarača (usvajanju optimalne sheme i njenih parametara) jedan od bitnih kvalitativno-kvantitativnih kriterija usavršenosti konstrukcije pretvarača je računski stupanj iskoristivosti.

Taj se stupanj iskoristivosti razlikuje od realnog, no u ranoj fazi konstruiranja moguće se je osloniti samo na njega. Funkcija računskog stupnja iskoristivosti obuhvaća nekoliko najvažnijih faktora koji utječu na efikasnost pretvorbe energije u pretvaraču.

Matematičko-mehanički model za opisivanje stupnja iskoristivosti u ovom radu će obuhvatiti gubitke u ozubljenju, mazivu, ležajevima i brtvama.

Kod određivanja računskog stupnja iskoristivosti planetnog pretvarača poći će se od relativnog (osnovnog, unutrašnjeg) stupnja iskoristivosti η_0 . To je stupanj iskoristivosti planetnog pretvarača koji radi s nepokretnim vodilom. Do njega se dolazi preko stupnja (koeficijenta) gubitaka ψ_0 .

Veza između relativnog stupnja iskoristivosti i stupnja gubitaka je prikazana s (2.9.1).

$$\eta_0 = 1 - \psi_0 \quad (2.9.1)$$

Relativni računski stupanj iskoristivosti η_0 je vrlo važan jer se preko njega mogu izraziti računski stupnjevi iskoristivosti planetnog pretvarača u proizvoljnem režimu rada. U Tab. 2.9.1 su navedeni izrazi za računski stupanj iskoristivosti kod šest slučajeva rada planetnog sloga koji radi s jednim stupnjem slobode gibanja. U slučaju rada s dva stupnja slobode gibanja tj. kod trovratilnog režima rada stupanj iskoristivosti se mijenja u vrlo širokom intervalu što ovisi o odnosima brzina vrtnje pojedinih članova.

Tab. 2.9.1 Izrazi za određivanje stupnjeva iskoristivosti kod dvovratilnog režima rada planetnog sloga

oznaka	opis	η
1	najveća moguća redukcija	$\eta_{1V(3)} = \frac{1 + \eta_0 t}{1 + t}$
1M	najveća moguća multiplikacija	$\eta_{V1(3)} = \frac{1 + t}{1 + \frac{t}{\eta_0}}$
2	redukcija (reversivna)	$\eta_{13(V)} = \eta_0$
2M	multiplikacija (reversivna)	$\eta_{31(V)} = \eta_0$
3	najmanja moguća redukcija	$\eta_{3V(1)} = \frac{1 + \frac{\eta_0}{t}}{1 + \frac{1}{t}}$
3M	najmanja moguća multiplikacija	$\eta_{V3(1)} = \frac{1 + \frac{1}{t}}{1 + \frac{1}{\eta_0 t}}$

Napomena: prvi indeks označava ulazno vratilo, drugi indeks označava izlazno vratilo, a indeks u zagradi označava reaktivno vratilo

Gornji izrazi su izvedeni uz pretpostavku, da osnovni stupanj iskoristivosti planetnog sloga η_0 nije ovisan o smjeru relativnog energetskog toka ($\eta_{13(V)} = \eta_{31(V)} = \eta_0$), što je uvijek tako [69, 70].

U najvećem dijelu se, energetski gubici u planetnim pretvaračima, sastoje od gubitaka u ozubljenju, gubitaka u ležajevima i gubitaka u uljnoj kupki (zbog bućanja ulja) [65, 71]. Pored njih su prisutni gubici u brtvama, ventilacijski gubici i dr.

Gubici zbog trenja u ozubljenju i ležajevima ovise neposredno o opterećenju pretvarača, dok gubici u uljnoj kupki, brtvama i ventilacijski gubici nisu ovisni o opterećenju i nazivaju se "gubici praznog hoda" [72]. Gubici praznog hoda se određuju eksperimentalno za svaki konkretni pretvarač [31].

Za razliku od drugih pretvarača, kod planetnih pretvarača, gubici u uljnoj kupki su značajno veći. Zbog toga se kod visokobrzinskih pretvarača zupčanici ne potapaju u ulju, a podmazivanje se provodi rasprskavanjem ulja pod tlakom.

U velikom broju slučajeva, što se u potpunosti odnosi i na planetne pretvarače, može se prihvati (eksperimentalno je dokazano), da su gubici u ozubljenju osnovni (najveći) dio gubitaka [11, 28, 33]. Kod planetnih pretvarača s nekoliko (najčešće tri) ravnomjerno

raspoređenih satelita na vodilu, gubici u uležištenju središnjih članova se mogu izbjegći (tzv. plivajući članovi) [16, 26, 28].

Na sl. 2.9.1 su prikazani razlozi energetskih gubitaka (izvori topline) u planetnom pretvaraču. Provedena eksperimentalna istraživanja na skupu dvostupanjskih planetnih pretvarača pokazuju, da je udio energetskih gubitaka u ozubljenju 62-90% od ukupnih energetskih gubitaka [65]. Niže vrijednosti odnose se na stupnjeve čiji zupčanici brzo rotiraju (brzohodni stupnjevi). Eksperimenti i od drugih autora [32, 66] pokazuju slične rezultate.

<i>Energetski gubici</i>	<i>BILANCA ENERGIJE</i>	<i>Toplinski tok</i>
-zbog trenja u ozubljenju →		→ -konvekcija
-u ležajevima →		→ -zračenje
-u brtvama →		→ -kondukcija (odvođenje) preko vratila i kućišta
-zbog bučkanja → ulja (miješanje, rasprskavanje, istiskivanje iz uzubina)		→ -hlađenje kod prijenosnika s cirkulacijskim sustavom hlađenja
- ventilacijski →	→ Radna temperatura ulja ←	
- zbog trošenja →		

Sl. 2.9.1 Vrste energetskih gubitaka u planetnom pretvaraču i načini odvodenja topline

Za određivanje stupnja (koeficijenta) gubitaka zbog trenja u ozubljenju (zahvatu) ψ_z , u svrhu usporedne analize varijanti, prikladno je primijeniti izraz (2.9.2) [73] i njegove oblike (2.9.3) i (2.9.4). U (2.9.2) je stupanj (koeficijent) gubitaka izražen kao funkcija brojeva zubi sunčanog zupčanika z_1 , satelita z_2 i vjenca z_3 . U (2.9.3) je stupanj (koeficijent) gubitaka izražen kao funkcija broja zubi sunčanog zupčanika z_1 i idealnog momentnog omjera t . U (2.9.4) je stupanj (koeficijent) gubitaka izražen kao funkcija brojeva zubi sunčanog zupčanika z_1 i vjenca z_3 .

$$\psi_z = 0,15 \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right) + 0,2 \left(\frac{1}{z_2} - \frac{1}{z_3} \right) \quad (2.9.2)$$

$$\psi_z = \frac{t+1}{z_1 t (t-1)} (0,15t + 0,2), \quad (2.9.3)$$

$$\psi_z = \frac{z_3 + z_1}{z_3 - z_1} \left(\frac{0,15}{z_1} + \frac{0,2}{z_3} \right) \quad (2.9.4)$$

U nekim izvorima se za izračun ukupnog stupnja iskoristivosti pretvarača preporučuje usvajanje vrijednosti relativnih stupnjeva iskoristivosti koje su približne stvarnim (npr. 0,97 ili 0,98) [2, 69, 70].

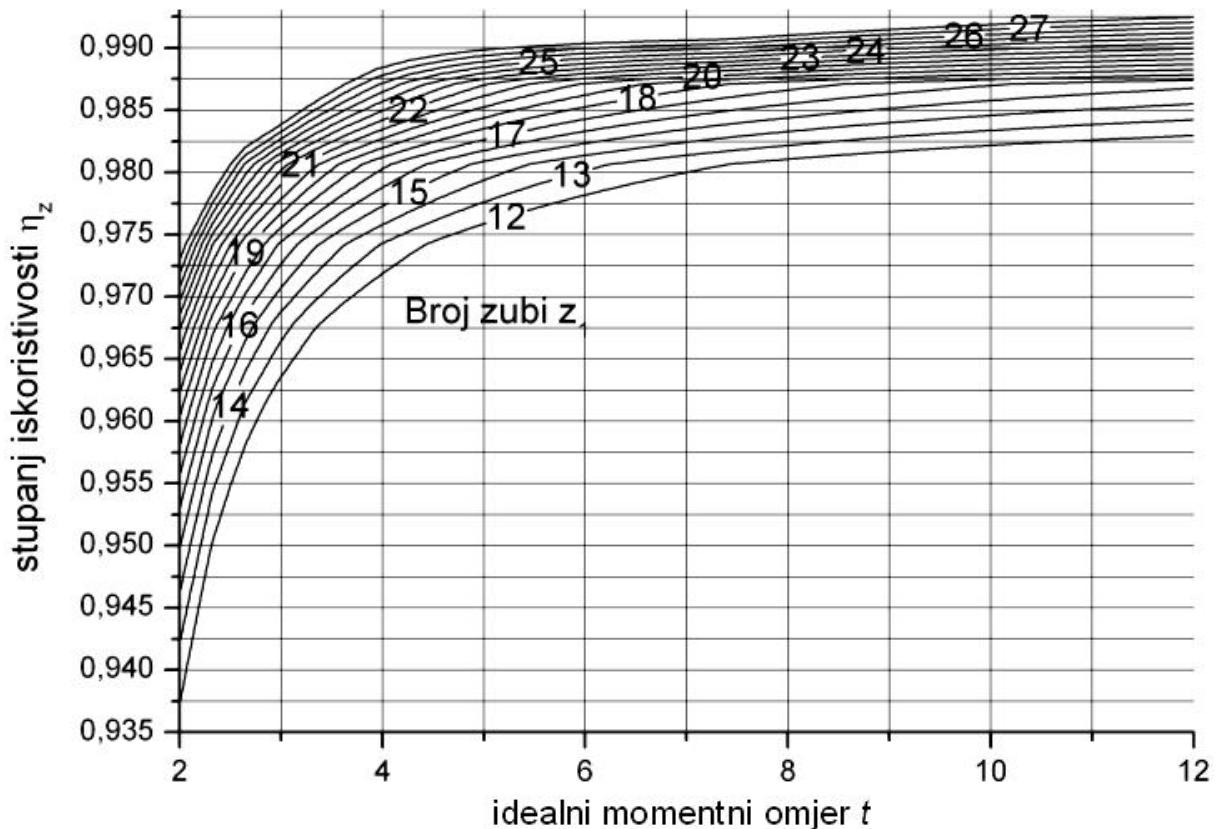
U cilju dobivanja preciznije određenih ukupnih stupnjeva iskoristivosti u ovom radu, relativni stupnjevi iskoristivosti će se odrediti uzimajući u obzir najutjecajniji faktor, a to je broj zubi zupčanika.

U (2.9.3) je broj zubi sunčanog zupčanika z_1 cjelobrojna (diskretna) varijabla. Varijabla t je također diskretna varijabla jer predstavlja omjer broja zubi vijenca i broja zubi sunčanog zupčanika. Želi li se grafički prikazati ovisnost relativnog stupnja iskoristivosti η_z o z_1 i t treba odrediti granice područja u kojem se izmjenjuju z_1 i t . Prihvate li se za minimalnu i maksimalnu vrijednost od z_1 vrijednosti 12 i 28, a za minimalnu i maksimalnu vrijednost od t vrijednosti 2 i 12 tada se izračunavanjem prema (2.9.5)

$$\eta_z(z_1, t) = 1 - \psi_z(z_1, t) \quad (2.9.5)$$

dobiva diskretan skup vrijednosti računskih relativnih stupnjeva iskoristivosti. Trenutna vrijednost t se kreće od 2 do 12 s korakom od jednog zuba vijenca.

Grafički prikaz ovisnosti relativnog računskog stupnja iskoristivosti u ozubljenju o broju zubi sunčanog zupčanika z_1 i idealnom momentnom omjeru t u izabranoj domeni dobiven na osnovu izraza (2.9.3) i (2.9.5) dat je na sl. 2.9.2.



Sl. 2.9.2 Ovisnost računskog relativnog stupnja iskoristivosti u ozubljenju planetnog sloga o broju zubi sunčanog zupčanika i idealnom momentnom omjeru

Iz grafa se jasno vidi u kojoj mjeri se gubici povećavaju smanjenjem broja zubi i u kojoj mjeri utječe promjena idealnog momentnog omjera.

Iz grafa se vidi da bi usvajanje osnovnog stupnja iskoristivosti prema preporukama iz [2, 69, 70] ne vodeći računa o broju zubi moglo dovesti do većih nepreciznosti. Kao primjer može poslužiti pretvarač kojem je idealni momentni omjer $t=2$ i broj zubi sunčanog zupčanika $z_1=12$. Usvoji li se kod tog pretvarača relativni stupanj iskoristivosti $\eta_0=0,97$ ili $\eta_0=0,98$ napraviti će se znatna greška što potvrđuje očitanje iz grafa na sl. 2.9.2 iz kojega za navedene podatke slijedi da je $\eta_z=0,9375$.

U cilju stvaranja matematičko-mehaničkog modela koji će točnije opisivati energetske gubitke unutar planetnog sloga, model će se proširiti koeficijentima koji uzimaju u obzir gubitke u ležajevima, gubitke u mazivu i gubitke u brtvama.

Za točnije određivanje ovih gubitaka mogu poslužiti rezultati provedenih eksperimenata na planetnim pretvaračima [65], koji omogućuju postavljanje proširenog modela.

Na osnovu rezultata eksperimenata iz [65] dobiveni su koeficijenti k_B , k_S i k_C koji dovode u vezu računski relativni stupanj gubitaka u ozubljenju ψ_z i računski relativni stupanj gubitaka u planetnom slogu ψ_0 .

U skladu s gore navedenim relativni stupanj gubitaka u planetnom slogu ψ_0 se može izraziti s (2.9.6):

$$\psi_0 = (1 + k_B + k_S + k_C) \cdot \psi_z \quad (2.9.6)$$

Vrijednosti koeficijenata su:

$k_B = 0,06 \div 0,07$ - koeficijent koji uzima u obzir gubitke u ležajevima satelita;

$k_S = 0,09 \div 0,01$ - koeficijent koji uzima u obzir gubitke u brtvama;

$k_C = 0,25 \div 0,02$ - koeficijent koji uzima u obzir gubitke zbog bućanja ulja.

Ovdje je važno napomenuti da se vrijednosti na lijevoj strani odnose na planetne pretvarače kod kojih su prisutne relativno veće brzine vrtnje zupčanika, a vrijednosti na desnoj strani na planetne pretvarače kod kojih su prisutne relativno niže brzine vrtnje zupčanika te da najširi interval ima koeficijent k_C (koeficijent koji uzima u obzir hidrauličke gubitke).

2.10 Radijalne dimenzije planetnog sloga

Planetni pretvarači se odlikuju velikim stupnjem kompaktnosti. Svi zupčanici planetnog sloga su smješteni unutar vijenca. Stoga je diobeni promjer vijenca pokazatelj veličine planetnog sloga i može se prihvati kao kriterij za gabarit kod usporedne analize radijalnih dimenzija planetnih slogova.

Diobeni promjer vijenca d_3 se može izraziti preko diobenog promjera sunčanog zupčanika d_1 i idealnog momentnog omjera t pri čemu je:

$$d_3 = t \cdot d_1 \quad (2.10.1)$$

Poznavajući broj zubi sunčanog zupčanika planetnog sloga i modula zupčanika planetnog sloga diobeni promjer se može odrediti:

$$d_1 = m_n \cdot z_1 \quad (2.10.2)$$

Sa stanovišta trajne dinamičke čvrstoće najosjetljivije mjesto planetnog sloga je zahvat zubi sunčanog zupčanika i satelita [2]. Kod tog se vanjskog zahvata pojavljuju velika naprezanja na boku zubi sunčanog zupčanika i satelita te u njihovim korijenima. Ovdje se prepostavlja da su svi zupčanici izrađeni od istog materijala.

Dosadašnja istraživanja pokazuju da je najčešće bok zubi sunčanog zupčanika najosjetljivije mjesto [2].

Na osnovu uvjeta nosivosti boka sunčanog zupčanika može se odrediti normalni modul zupčanika planetnog sloga m_n [2]:

$$m_n = \sqrt[3]{Z_H^2 \cdot Z_E^2 \cdot Z_\varepsilon^2 \cdot Z_\beta^2 \frac{2000 \cdot T_1}{z_1^3 \cdot k \cdot \left(\frac{b_w}{d_1}\right) \sigma_{HP}^2} \frac{|u_{12}| + 1}{|u_{12}|} K_A \cdot K_v \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot K_\gamma} \quad (2.10.3)$$

gdje su:

m_n - normalni modul zupčanika planetnog sloga, mm;

T_1 - nazivni torzijski moment na vratilu sunčanog zupčanika, Nm;

b_w - aktivna širina zupčanika, mm;

k - broj satelita u planetnom slogu (najčešće $k=3$);

$|u_{12}| = \frac{z_2}{z_1} = \frac{t-1}{2}$ - omjer brojeva zubi vanjskog zahvata (satelit/sunčani zupčanik);

$Z_H, Z_E, Z_\varepsilon, Z_\beta$ - faktor zone, faktor elastičnosti materijala zupčanika u zahvatu, faktor stupnja prekrivanja profila, faktor utjecaja kuta nagiba [81, 82];

$K_A, K_v, K_{H\alpha}, K_{H\beta}, K_\gamma$ - faktor primjene, faktor dodatnih dinamičkih opterećenja, faktor raspodjele opterećenja na par zubi u zahvatu, faktor raspodjele opterećenja uzduž boka zuba, faktor neravnomernog opterećenja satelita ($K_\gamma > 1$) [81, 82];

σ_{HP} - maksimalno dozvoljeno kontaktno naprezanje, MPa;

Maksimalno dozvoljeno kontaktno naprezanje se određuje prema izrazu (2.10.4) [81, 82]:

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlimb} \cdot Z_N}{S_{Hmin}} Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X \quad (2.10.4)$$

gdje su:

σ_{Hlimb} - trajna dinamička čvrstoća boka zuba za odabrani čelik, MPa;

S_{Hmin} - faktor sigurnosti boka zuba (sigurnost na pitting);

$Z_N, Z_L, Z_R, Z_V, Z_W, Z_X$ su faktori: trajnosti, utjecaja maziva na nosivost boka zuba, utjecaja hrapavosti boka zuba na nosivost, utjecaja obodne brzine za područje trajne dinamičke čvrstoće, sparivanja materijala, utjecaja veličine zuba na nosivost boka zuba [81, 82];

$\left(\frac{b_w}{d_1}\right)$ - relativna radna širina zubi u zahvatu;

k - broj satelita u planetnom slogu.

Provede li se u izrazu (2.10.3) slijedeća supstitucija:

$$K_{0H} = \sqrt[3]{Z_H^2 \cdot Z_E^2 \cdot Z_\epsilon^2 \cdot Z_\beta^2 \frac{2000}{k \cdot \left(\frac{b_w}{d_1}\right) \cdot \sigma_{HP}^2} K_A \cdot K_v \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \cdot K_\gamma} \quad (2.10.5)$$

modul se može kraće izraziti preko (2.10.6) ako je poznat moment na vratilu sunčanog zupčanika T_1 :

$$m_n = K_{0H} \cdot \sqrt[3]{\frac{T_1}{z_1^3} \cdot \frac{t+1}{t-1}}, \quad (2.10.6)$$

diobeni promjer sunčanog zupčanika se može izraziti kao:

$$d_1 = K_{0H} \cdot \sqrt[3]{T_1 \cdot \frac{t+1}{t-1}}, \quad (2.10.7)$$

a diobeni promjer vijenca se može izraziti kao:

$$d_3 = K_{0H} \cdot t \cdot \sqrt[3]{T_1 \cdot \frac{t+1}{t-1}} \quad (2.10.8)$$

U slučaju da su zupčanici izvedeni s otvrdnutim bokovima zubi, najslabije mjesto zahvata može biti korijen zuba. Minimalni potreban modul zupčanika iz uvjeta nosivosti korijena se tada može odrediti prema (2.10.9) [2]:

$$m_n \geq \sqrt[3]{Y_{FS} \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta \cdot Y_B \frac{2000 \cdot T_1}{k \cdot \left(\frac{b_F}{d}\right) \cdot z_1^2 \cdot \sigma_{FP}} \cdot K_A \cdot K_v \cdot K_{F\beta} \cdot K_{Fa} \cdot K_\gamma} \quad (2.10.9)$$

gdje su:

Y_{FS} - faktor koji uzima u obzir oblik zuba i koncentraciju naprezanja [81, 82];

Y_ε - faktor koji uzima u obzir prekrivanje zubi [81, 82] ;

Y_β - faktor koji uzima u obzir nagib zubi. Za ravne zube $Y_\beta = 1$ [81, 82];

Y_B - faktor koji uzima u obzir utjecaj debljine vijenca zupčanika s_R (debljine materijala pod zubom) [81, 82];

z_1 - broj zubi sunčanog zupčanika;

$\left(\frac{b_F}{d}\right)$ - relativna radna širina zupčanika kod proračuna zubi na savijanje;

σ_{FP} - dopušteno naprezanje na savijanje koje se određuje prema (2.10.10) [81, 82], MPa;

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{FE} \cdot Y_{NT}}{S_{Fmin}} \cdot Y_{\delta relT} \cdot Y_{RrelT} \cdot Y_x \quad (2.10.10)$$

gdje su:

σ_{FE} - osnovna čvrstoća zubi na savijanje, MPa;

S_{Fmin} - koeficijent sigurnosti na lom zubi;

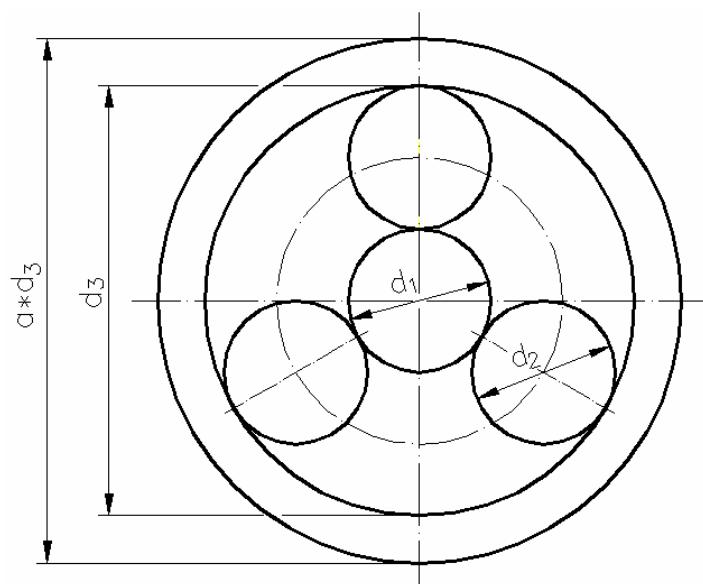
Y_{NT} , $Y_{\delta relT}$, Y_{RrelT} , Y_x - faktori koji uzimaju u obzir utjecaj: povećanja trajnosti korijena zuba, osjetljivosti materijala na koncentraciju naprezanja, hrapavosti prijelaznog dijela korijena zuba, izmjera zupčanika [81, 82].

Budući da se bez izračuna modula ne zna da li je u pogledu nosivosti kritičan bok zuba ili korijen zuba potrebno je izračunati minimalne potrebne module prema oba kriterija. Veću dobivenu vrijednost treba zaokružiti na prvu veću normiranu vrijednost modula i nju prihvati kao mjerodavnu.

2.11 Masa zupčanika planetnog sloga

Vrlo važan kriterij optimizacije zupčaničkih pretvarača je masa svih zupčanika. Minimizacijom volumena svih zupčanika planetnih slogova se dobiva s velikom vjerojatnošću minimalna masa pretvarača što rezultira minimalnim utroškom materijala, olakšanim transportom, olakšanom montažom, manjim inercijskim silama i momentima tj. manjim opterećenjima ostalih dijelova prijenosnika kao što su vratila, ležajevi i kućište. Pored navedenog s velikom vjerojatnosti se može očekivati da će u tom slučaju i troškovi izrade biti smanjeni. Iz tog razloga jedan od kriterija optimizacije može biti funkcija koja opisuje ukupnu orijentacijsku masu planetnih slogova.

Za potrebe usporedne analize sunčani zupčanik i sateliti u planetnom slogu se mogu aproksimirati valjcima promjera jednakog diobenim promjerima odgovarajućih zupčanika i visine b . Vjenac se može aproksimirati šupljim valjkom kome je unutrašnji promjer jednak diobenom promjeru vjenca, a vanjski promjer je jednak umnošku unutrašnjeg promjera i koeficijenta debljine vjenca a . Nacrt (čelna površina) aproksimacijskog geometrijskog modela planetnog sloga je prikazan na sl. 2.11.1.



Sl. 2.11.1 Nacrt aproksimacijskog geometrijskog modela planetnog sloga

Približna, aproksimacijska (orijentacijska) masa zupčanika planetnog sloga je jednaka zbroju masa svih valjaka. Da bi se dobila ukupna masa svih valjaka treba odrediti njihov volumen. Volumen je jednak umnošku površina osnovica svih valjaka i visine b .

Ukupna čelna površina svih zupčanika (zbroj površina osnovica valjaka) je:

$$A = A_3 + A_1 + 3A_2 \quad (2.11.1)$$

Izraze li se površine u funkciji diobenih promjera, a diobeni promjeri u funkciji modula, broja zubi i idealnog momentnog omjera prema (2.11.2), (2.11.3) i (2.11.4)

$$d_1 = m_n \cdot z_1, \quad (2.11.2)$$

$$d_2 = m_n \cdot z_1 \frac{t-1}{2}, \quad (2.11.3)$$

$$d_3 = m_n \cdot z_1 \cdot t, \quad (2.11.4)$$

dobiva se ukupna površina osnovica svih valjaka

$$A = \frac{(a \cdot m_n \cdot z_1 \cdot t)^2 \pi}{4} - \frac{(m_n \cdot z_1 \cdot t)^2 \pi}{4} + \frac{(m_n \cdot z_1)^2 \pi}{4} + k \frac{\left(m_n \cdot z_1 \frac{t-1}{2}\right)^2 \pi}{4}, \quad (2.11.5)$$

gdje k predstavlja broj satelita u planetnom slogu. Nakon sređivanja se dobiva:

$$A = \frac{\pi}{4} (m_n \cdot z_1)^2 \left[(a \cdot t)^2 - t^2 + 1 + k \frac{(t-1)^2}{2} \right] \quad (2.11.6)$$

Množenjem površine A s visinom valjaka, izraženom kao umnožak faktora širine ψ i diobenog promjera sunca d_1 , i gustoćom materijala ρ dobiva se izraz za masu svih zupčanika u planetnom slogu.

$$m = \frac{\pi}{4} \psi \cdot \rho \cdot (m_n \cdot z_1)^3 \left[(a \cdot t)^2 - t^2 + 1 + k \frac{(t-1)^2}{2} \right] \quad (2.11.7)$$

Uz pretpostavku da su zupčanici od čelika $\rho = 7,85 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{mm^3}$, dobiva se konačni izraz za masu svih zupčanika planetnog sloga koji se može upotrijebiti kao kriterijska funkcija kod optimalnog izbora varijante i parametara pretvarača:

$$m = 6,1654 \cdot 10^{-6} \cdot \psi \cdot (m_n \cdot z_1)^3 \left[t^2 (a^2 - 1) + 1 + k \frac{(t-1)^2}{2} \right] \quad (2.11.8)$$

Izraz (2.11.8) će biti integriran u logiku programskog sustava za analizu, sintezu i izbor optimalne varijante planetnog pretvarača koji je opisan u poglavlju 8.4.

3. SLOŽENI PLANETNI PRETVARAČ

3.1 Dvovodilni planetni pretvarači

U praksi se često zahtijeva mogućnost ostvarenja kinematičkih prijenosnih omjera koje jednostavni planetni pretvarač ne može ostvariti pa se u cilju proširivanja mogućnosti pretvorbe povezuje više planetnih slogova. Tako nastaje složeni planetni pretvarač. Najčešće se povezuju dva planetna sloga čime nastaje složeni planetni pretvarač koji u svom sastavu ima dva vodila pa se iz tog razloga naziva dvovodilni planetni pretvarač.

Planetni slogovi se mogu spojiti na dva načina i to:

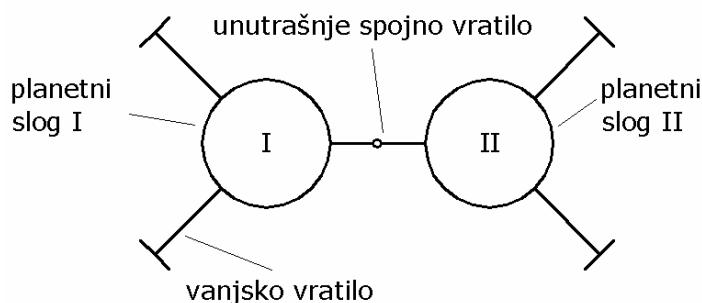
- da se spoji međusobno po jedno vratilo od svakog planetnog sloga
- da se spoje međusobno po dva vratila od svakog planetnog sloga

Povezivanjem proizvoljnog vratila jednog planetnog sloga s proizvoljnim vratilom drugog planetnog sloga dobiva se vratilo sastavljeno od dvaju vratila susjednih planetnih slogova. Budući da to vratilo povezuje dva planetna sloga isto će se u ovom radu nazivati *spojno vratilo*. Ako to spojno vratilo ima vanjski priključak na koji se može spojiti pogonski ili radni stroj ili se vratilo može preko vanjskog priključka zakočiti onda se to vratilo naziva *vanjsko spojno vratilo*. Ako spojno vratilo nema vanjski priključak onda se ono naziva *unutrašnje spojno vratilo*.

Ukoliko planetni slogovi dvovodilnog planetnog pretvarača imaju jedno rotirajuće vratilo koje ih povezuje tada se takvi pretvarači nazivaju dvovodilni pretvarači s jednim spojnim vratilom.

Dvovodilni pretvarači s jednim spojnim vratilom imaju četiri *vanjska vratila* preko kojih se energija može dovoditi, odvoditi ili se vratilo može zakočiti.

Simbolički prikaz dvovodilnog planetnog pretvarača s jednim spojnim vratilom dat je na sl. 3.1.1.

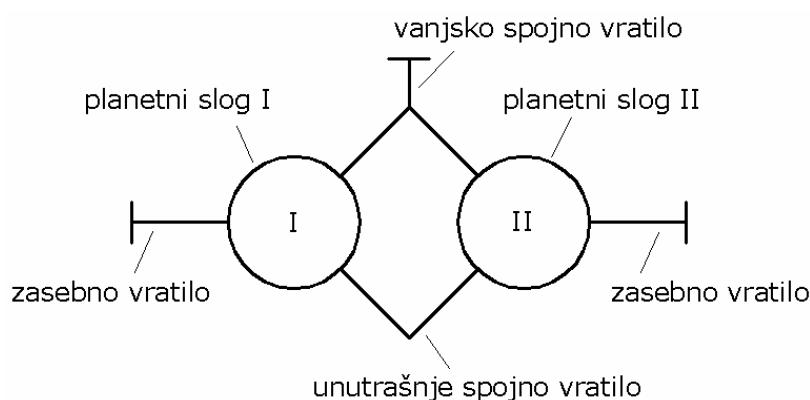


Sl. 3.1.1 Simbolički prikaz dvovodilnog planetnog pretvarača s jednim spojnim i četiri vanjska vratila

Ukoliko planetni slogovi dvovodilnog planetnog pretvarača imaju dva rotirajuća vratila koja ih povezuju tada se takvi pretvarači nazivaju *dvovodilni pretvarači s dva spojna vratila*.

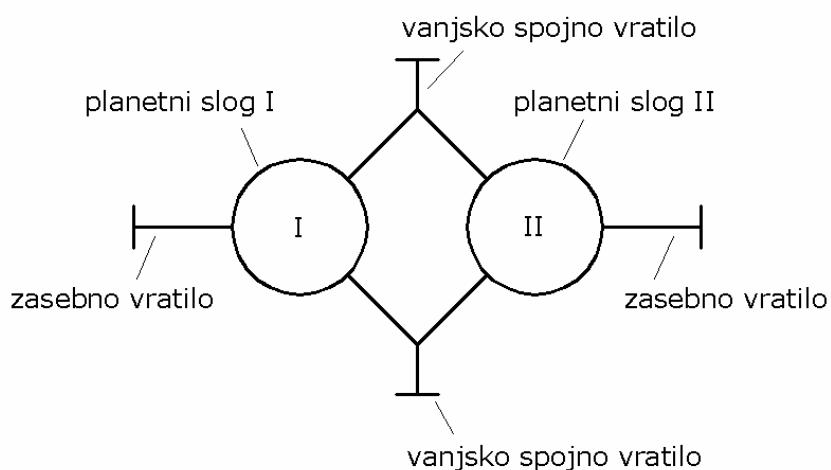
Dvovodilni pretvarači s dva spojna vratila mogu imati tri ili četiri vanjska vratila.

Na sl. 3.1.2 je simbolički prikazan dvovodilni planetni pretvarač s dva spojna i tri vanjska vratila. Svaki planetni slog ima po jedno *zasebno vratilo* koje je uvek vanjsko. Jedno spojno vratilo ima vanjski priključak (vanjsko spojno vratilo), a drugo spojno vratilo nema vanjski priključak (unutrašnje spojno vratilo).



Sl. 3.1.2 Simbolički prikaz dvovodilnog planetnog pretvarača s dva spojna i tri vanjska vratila

Na sl. 3.1.3 je simbolički prikazan dvovodilni planetni pretvarač s dva spojna i četiri vanjska vratila. To je u biti pretvarač prikazan na sl. 3.1.2 koji je izveden s vanjskim priključkom na oba spojna vratila.



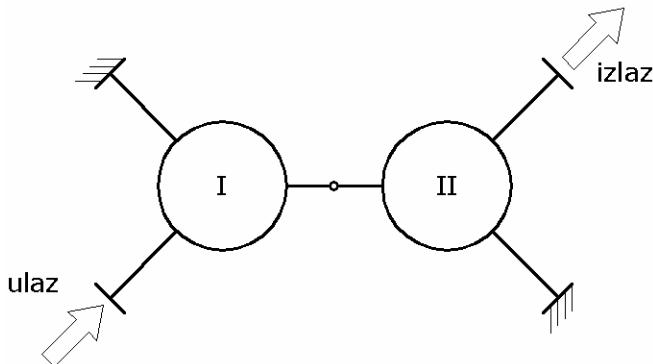
Sl. 3.1.3 Simbolički prikaz dvovodilnog planetnog pretvarača s dva spojna i četiri vanjska vratila

Pretvarači s dva spojna i tri vanjska vratila rade kao jednobrzinski pretvarači. Na jedno od tri vanjska vratila se spaja pogonski stroj, na drugo radni stroj, a treće je spojeno s mirujućim kućištem i ono je reaktivno (zakočeno).

Dvovodilni pretvarači s jednim spojnim i četiri vanjska vratila teoretski mogu raditi s jedan, dva ili čak tri stupnja slobode. Tako, u slučaju sumarnog rada, brzina vrtnje izlaznog vratila može ovisiti o jednoj, dvije ili čak tri nezavisne veličine (brzine ostalih vratila). Sumarni rad je rad kod kojega na više vratila energija ulazi, a na jedno izlazi.

Na sl. 3.1.4 je prikazan slučaj rada ovakvog pretvarača s jednim stupnjem slobode. Pogonska energija ulazi na jedno vratilo i izlazi na drugo vratilo. Ulazno i izlazno vratilo su na različitim planetnim slogovima. Preostala dva vratila su zakočena.

Dakle, ukoliko se na svakom od planetnih slogova jedno vanjsko vratilo zakoči i postane reaktivno tada svaki planetni slog radi u dvovratilnom režimu rada tj. s jednim stupnjem slobode. U tom slučaju složeni pretvarač kao cjelina radi s jednim stupnjem slobode.



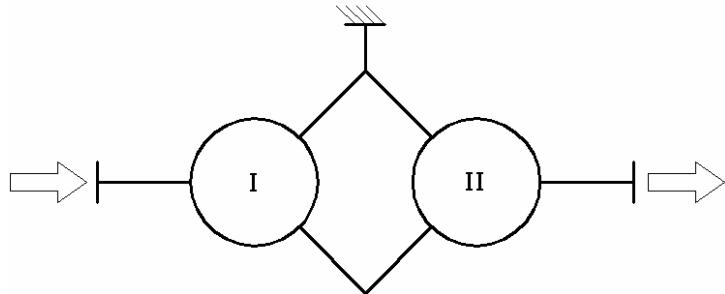
Sl. 3.1.4 Slučaj rada s jednim stupnjem slobode dvovodilnog pretvarača s jednim spojnim i četiri vanjska vratila

U ovom radu se razmatraju karakteristike rada složenih dvovodilnih pretvarača s jednim stupnjem slobode. Dvovodilni pretvarač s jednim spojnim vratilom će raditi s jednim stupnjem slobode, ako su dva od ukupno četiri vanjska vratila reaktivna i to po jedno na svakom od planetnih slogova.

Dvovodilni pretvarač s dva spojna vratila će raditi s jednim stupnjem slobode ako je jedno od ukupno tri ili četiri vanjska vratila reaktivno.

Ukoliko se kod dvovodilnog pretvarača s dva spojna vratila zakoči jedno spojno vratilo, blokirat će se po jedno vratilo svakog planetnog sloga pa će nastati identičan slučaj kao i kod dvovodilnih pretvarača s jednim spojnim vratilom u radu s jednim stupnjem slobode gibanja. Zbog toga će se takav pretvarač moći tretirati kao pretvarač s jednim spojnim vratilom.

Na sl. 3.1.5 je prikazan simbol pretvarača s dva spojna i tri vanjska vratila kod koga je zakočeno spojno vratilo.

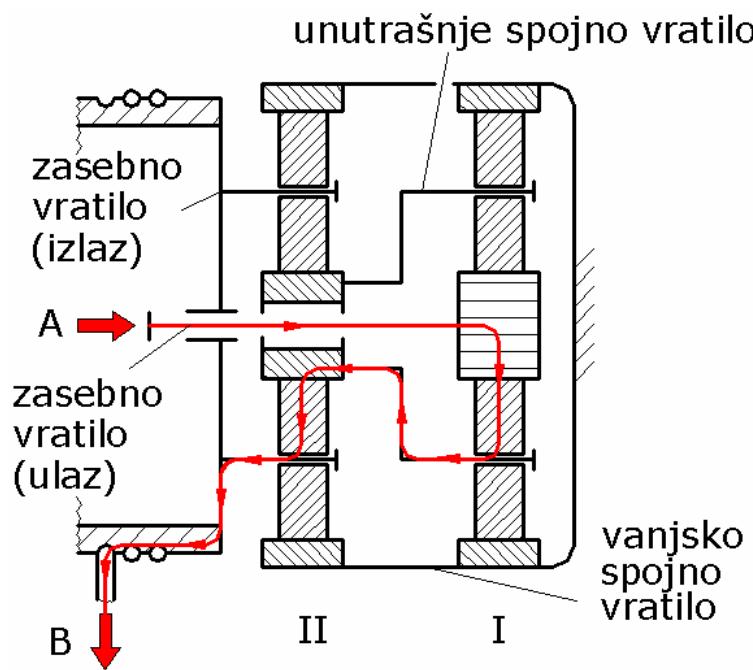


Sl. 3.1.5 Slučaj rada s jednim stupnjem slobode dvovodilnog pretvarača s dva spojna i tri vanjska vratila

Dakle, može se zaključiti da se pretvarač s dva spojna vratila uz zakočeno spojno vratilo može razmatrati kao pretvarač s jednim spojnim vratilom.

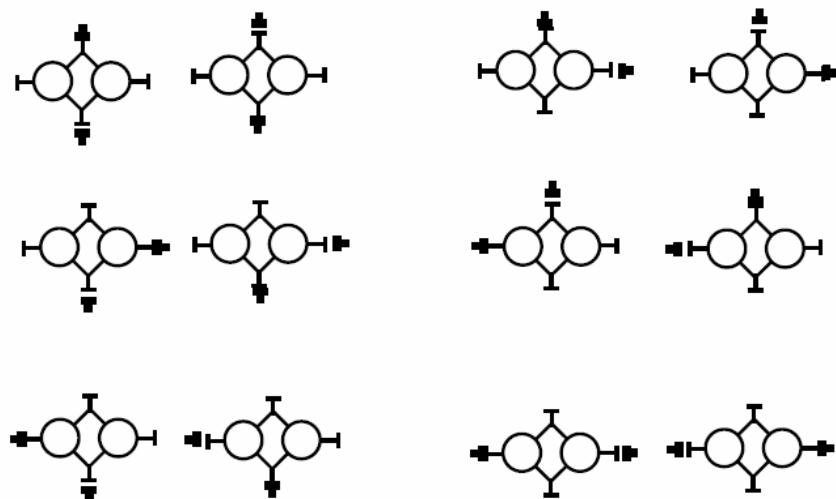
To omogućuje da se u okviru sustavnog istraživanja pretvarača s dva spojna vratila istraže i sve varijante pretvarača s jednim spojnim vratilom (pri radu s jednim stupnjem slobode).

Na sl. 3.1.6 je prikazana koncepcijska shema jednog pretvarača koji se može simbolički predstaviti kao pretvarač s jednim spojnim i četiri vanjska vratila od kojih su dva vanjska vratila zakočena (spojena s kućištem), a može se predstaviti i simbolom pretvarača s dva spojna i tri vanjska vratila od kojih je jedno spojno vratilo zakočeno (povezano s kućištem).



Sl. 3.1.6 Pretvarač koji se može razmatrati kao pretvarač s dva spojna i tri vanjska vratila i kao pretvarač s jednim spojnim i četiri vanjska vratila

Pretvarači s dva spojna vratila i četiri vanjska vratila mogu ostvariti dvobrzinske pogone. Naime, ako se na dva vanjska vratila montiraju kočnice tada se njihovim izmjeničnim uključivanjem mijenja reakcijski član pretvarača pa time i stupanj prijenosa. Kočnice je moguće razmjestiti na šest različitih načina, sl. 3.1.7 [59].



Sl. 3.1.7 Prikaz mogućih razmještaja kočnica na dvovodilnom planetnom pretvaraču s dva spojna i četiri vanjska vratila

3.2 Označavanje planetnih pretvarača

Da bi se mogla izvršiti analiza svih varijanti složenih planetnih pretvarača treba uvesti sustav označavanja. Izabrani sustav označavanja bi trebao omogućiti jednoznačno opisivanje strukture složenog pretvarača tj. povezanosti vratila njegovih planetnih slogova. Uz to bi trebao informirati o rasporedu reaktivnih članova i smještaju pogonskog i radnog stroja odnosno ulaznog i izlaznog vratila.

Povezanost vratila planetnih slogova složenog planetnog pretvarača se vidi na shemi pretvarača. Shematski prikaz je temeljen na modificiranom Wolf-ovom simbolu koji je objašnjen u poglavlju 2. Označavanje sheme je izvedeno na osnovu Tab. 3.2.1 u kojoj su pregledno prikazani svi mogući načini međusobnog spajanja različitih vratila planetnih slogova kod složenih pretvarača s dva spojna i četiri vanjska vratila [62]. Oznaka sheme se sastoji od slova «S» i dvoznamenkastog broja pri čemu prva znamenka predstavlja redak, a druga stupac u Tab. 3.2.1. Kosim strelicama u tablici je prikazana izomorfnost (identičan oblik) nekih shema.

Varijanta razmještaja informira o rasporedu reaktivnih članova i o položaju pogonskog i radnog stroja.

Tab. 3.2.1 Sistematisacija shema dvovodilnih pretvarača s dva spojna i četiri vanjska vratila

	...1	...2	...3	...4	...5	...6
						
	11	12 \triangleq 21	13 \triangleq 31	14 \triangleq 41	15 \triangleq 51	16 \triangleq 61
	21 \triangleq 12	22	23 \triangleq 32	24 \triangleq 42	25 \triangleq 52	26 \triangleq 62
	31 \triangleq 13	32 \triangleq 23	33	34 \triangleq 43	35 \triangleq 53	36 \triangleq 63
	41 \triangleq 14	42 \triangleq 24	43 \triangleq 34	44	45 \triangleq 54	46 \triangleq 64
	51 \triangleq 15	52 \triangleq 25	53 \triangleq 35	54 \triangleq 45	55	56 \triangleq 65
	61 \triangleq 16	62 \triangleq 26	63 \triangleq 36	64 \triangleq 46	65 \triangleq 56	66

Analizom svih mogućih načina spajanja dva planetna sloga (Tab. 3.2.1) može se zaključiti:

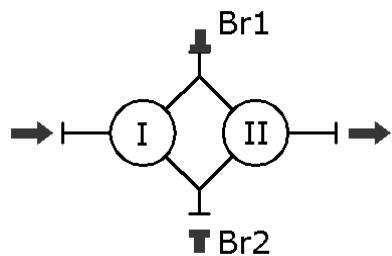
- Postoji 12 različitih (neizomorfnih) shema. Za njihovo označavanje će se usvojiti oznake iz neparnih redaka. Te sheme su: **S11, S12, S13, S14, S15, S16, S33, S34, S35, S36, S55, S56**;
- Sheme ispod glavne dijagonale su zrcalno (vertikalno) simetrične s odgovarajućim izomorfnim u gornjem trokutu matrice u Tab. 3.2.1;
- Sheme u parnim redcima su izomorfne odgovarajućim shemama u neparnim redcima (prikazano strelicama).

U okviru svake od shema planetnog pretvarača varijanta razmještaja je određena položajem vratila pogonskog i radnog stroja, a podvarijanta je određena položajem uključenog reaktivnog člana.

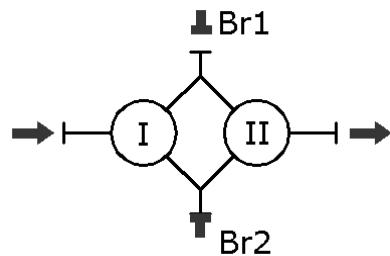
Oznake varijanti razmještaja su prilagođene kako mjenjačkim pretvaračima tako i jednobrzinskim pretvaračima. Jednobrzinski pretvarači uz oznaku sheme i varijante razmještaja obavezno imaju i oznaku podvarijante koja uz varijantu određuje položaj stavnog reaktivnog člana. To je oznaka Br1 ili Br2 (vidjeti prikaz varijanti razmještaja na sl. 3.2.1). Primjer oznake jednog jednobrzinskog pretvarača je S16V2Br2. Pri tom S16 predstavlja shemu iz prvog reda i šestog stupca Tab. 3.2.1. V2 predstavlja varijantu razmještaja kod koje je ulaz na zasebnom vratilu prvog planetnog sloga (lijevo na simbolu), a izlaz na spojnom vratilu na donjem dijelu simbola (sl. 3.2.1). Br2 pokazuje da je reaktivni član na zasebnom vratilu drugog (desnog) planetnog sloga (sl. 3.2.1).

Dvobrzinski pretvarač je u potpunosti određen oznakom sheme i varijante razmještaja. Oznaka podvarijante (Br1 ili Br2) određuje brzinu (stupanj prijenosa) u kojoj pretvarač trenutno radi. Primjer oznake jednog dvobrzinskog pretvarača je S55V4. Ako taj pretvarač radi s uključenom kočnicom Br2 onda se takav rad toga pretvarača označava s S55V4Br2. Na donjem varijanti razmještaja na sl. 3.2.1 je iznad svake simbolički prikazane varijante razmještaja i podvarijante navedena alfanumerička oznaka koja je jednoznačno definira.

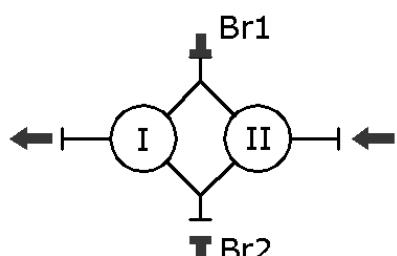
V1Br1



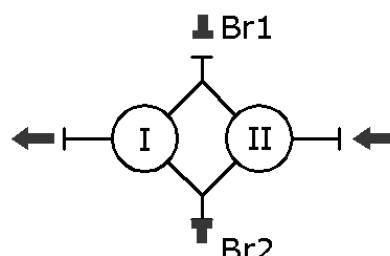
V1Br2



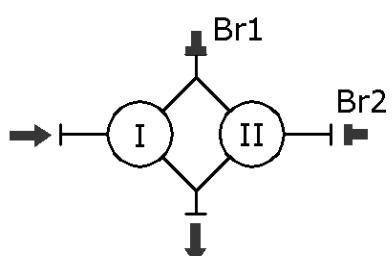
V7Br1



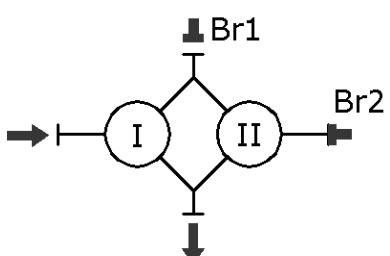
V7Br2



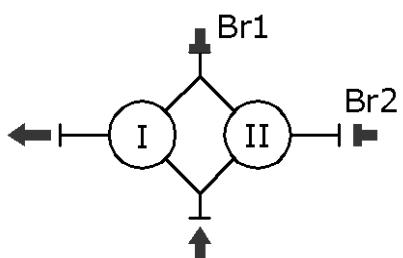
V2Br1



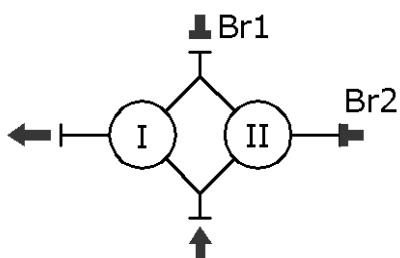
V2Br2

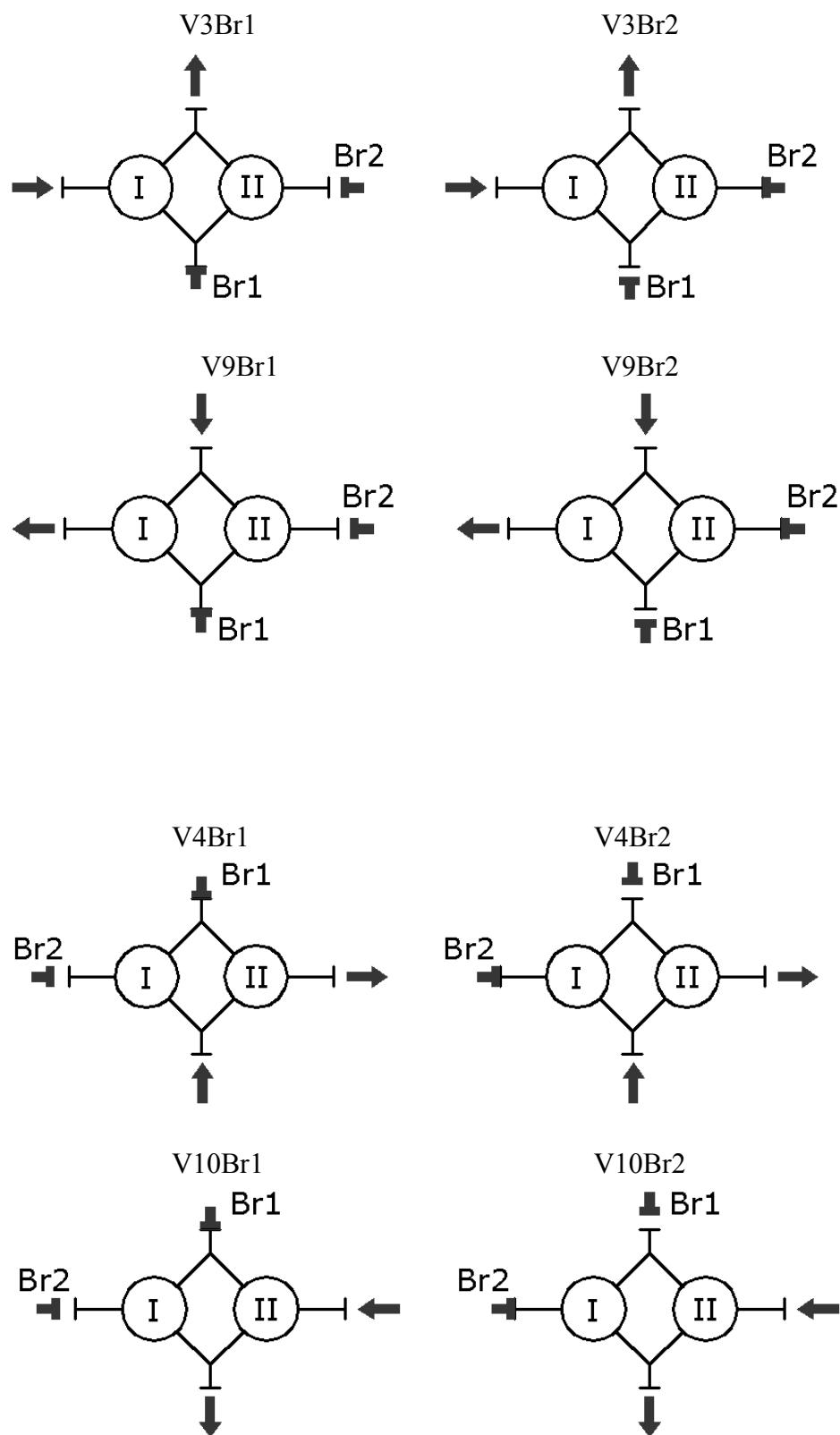


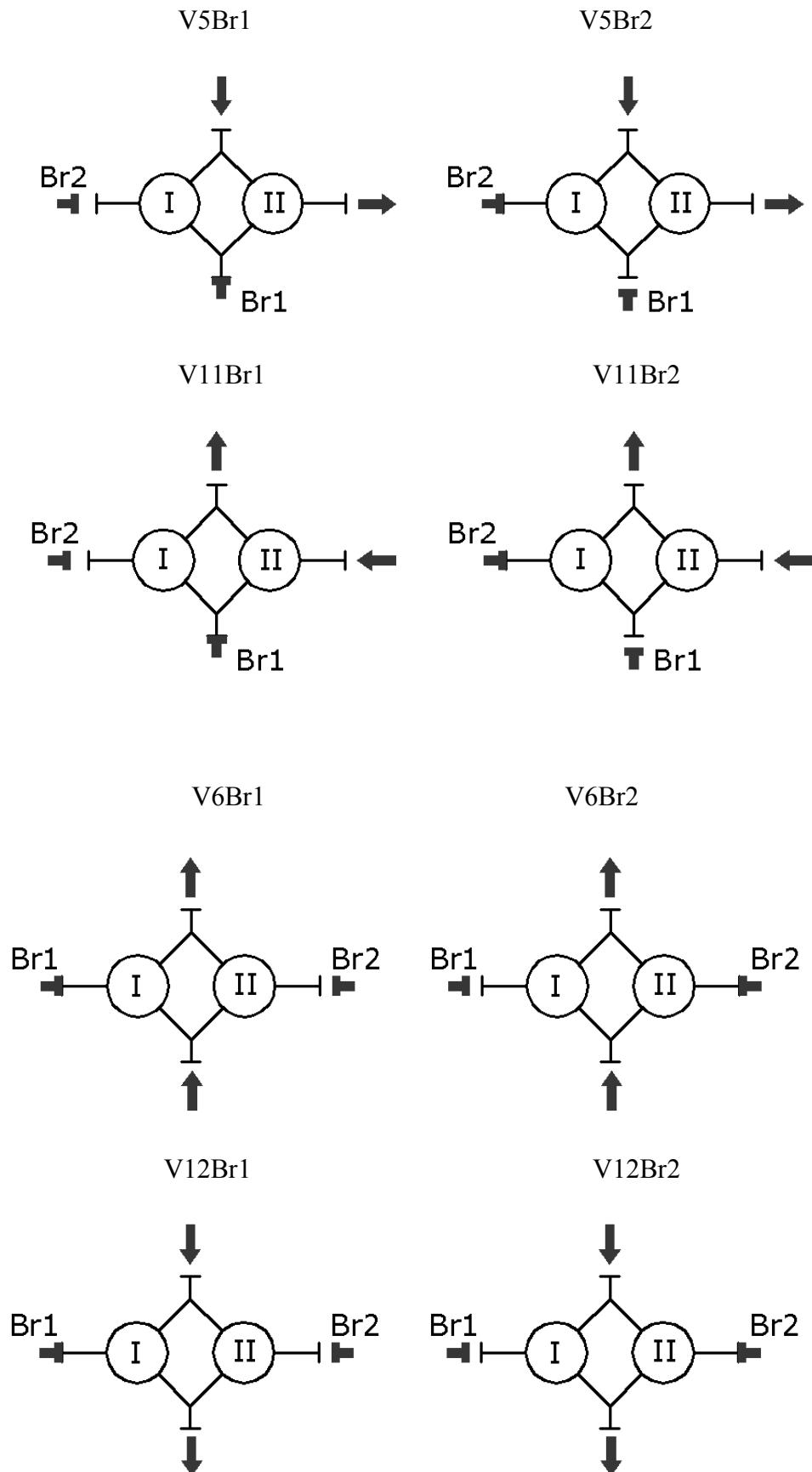
V8Br1



V8Br2







Sl. 3.2.1 Prikaz varijanti razmještaja kod dvovodilnih pretvarača

Analizom prikaza varijanti na sl. 3.2.1 su utvrđene sljedeće činjenice:

- postoji šest kombinacija mogućih razmještaja kočnica kod razmatranih shema pretvarača pri čemu se isti razmještaj javlja u parovima od po dvije varijante razmještaja
- varijante istog razmještaja kočnica se razlikuju po smještaju pogonskog odnosno radnog stroja koji su zamijenili mjesta i one su: **V1 i V7, V2 i V8, V3 i V9, V4 i V10, V5 i V11, V6 i V12**.
- jedna kombinacija razmještaja kočnica otpada na pretvarače s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima (V6 i V12)
- jedna kombinacija razmještaja kočnica otpada na pretvarače s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima (V1 i V7)
- četiri kombinacije razmještaja kočnica otpadaju na pretvarače s kočnicama raspoređenim na jednom spojnom i jednom zasebnom vratilu (V2 i V8, V3 i V9, V4 i V10, V5 i V11)

Navedenih šest parova varijanti razmještaja (**V1 i V7, V2 i V8, V3 i V9, V4 i V10, V5 i V11, V6 i V12**) sadrže varijante razmještaja kod kojih je zamijenjeno ulazno vratilo s izlaznim vratilom (zamijenjen položaj pogonskog i radnog stroja) te stoga imaju recipročne prijenosne omjere. Zbog recipročnosti u prijenosnim omjerima takve varijante se nazivaju inverznima (inverzna jedna u odnosu na drugu) [1].

Analizom Tab. 3.2.1 i prikaza varijanti (sl. 3.2.1) se može zaključiti da:

- u okviru 12 različitih strukturalnih shema (Tab. 3.2.1) postoji ukupno 24 varijante pretvaračkih sustava s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima
- u okviru 12 različitih strukturalnih shema (Tab. 3.2.1) postoji ukupno 24 varijante pretvaračkih sustava s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima
- u okviru 12 različitih strukturalnih shema (Tab. 3.2.1) postoji ukupno 96 varijanti pretvaračkih sustava s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu
- kod varijanti pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu neke od varijanti pretvarača su identične
- identične varijante pretvarača se javljaju kod shema kojima su spojna vratila sastavljena od dva raznovrsna pojedinačna vratila planetnih slogova (vratila planetnih slogova su: vratilo sunčanog zupčanika 1, vratilo vijenca 3 i vratilo vodila V)
- sheme kojima oba spojna vratila sadrže sva tri navedena vratila nemaju identične varijante

- kod strukturnih shema **S11, S33 i S55** s varijantom razmještaja **V4 (V10)** dobiva se identičan pretvarač kao i s varijantom razmještaja **V2 (V8)**, a s varijantom razmještaja **V3 (V9)** dobiva se identičan pretvarač i kao s varijantom razmještaja **V5 (V11)**.
- kod strukturnih shema **S12, S34 i S56** s varijantom razmještaja **V3 (V9)** dobiva se identičan pretvarač kao i s varijantom razmještaja **V10 (V4)**, a s varijantom razmještaja **V11 (V5)** dobiva se identičan pretvarač kao i s varijantom razmještaja **V2 (V8)**.
- postoji ukupno 72 različite varijante pretvaračkih sustava s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu
- kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu oba planetna sloga su aktivna ako je uključena kočnica Br2
- kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu je samo jedan planetni slog aktivan ako je uključena kočnica Br1

3.3 Zajedničke karakteristike pojedinih varijanti pretvarača s dva spojna vratila

Oznaka sheme informira o povezanosti vratila središnjih članova obaju planetnih slogova. Oznaka varijante razmještaja kod dvobrzinskih pretvarača definira razmještaj pogonskog i radnog stroja te kočnica. Oznaka podvarijante (Br1 ili Br2) određuje aktivnu kočnicu kod dvobrzinskih pretvarača ili fiksni reaktivni član kod jednobrzinskih pretvarača.

U nastavku će se navesti osnovne karakteristike pretvarača koje ovise o varijanti razmještaja i aktivnoj kočnici (podvarijanti), a vrijede kod svih shema.

Kod pretvarača s varijantom razmještaja **V6** ili njoj inverznoj **V12** pri radu uz aktivnu kočnicu Br1 ili Br2 uvijek je zakočeno zasebno vratilo, a ulaz i izlaz su na spojnim vratilima. U ovakvom slučaju aktivno radi samo jedan planetni slog dok je drugi u praznom hodu. Mehaničke pretvaračke karakteristike pretvarača su određene karakteristikama pojedinog planetnog sloga.

Kod pretvarača s varijantama razmještaja **V2**, **V3**, **V4**, **V5** ili njima inverznim varijantama razmještaja **V8**, **V9**, **V10**, **V11** pri radu uz aktivnu kočnicu Br1 (tzv. rad u brzini Br1) zakočeno je jedno spojno vratilo, a ulaz i izlaz su na drugom spojnom vratilu i zasebnom vratilu. Ovo je slučaj kod koga aktivno radi samo jedan planetni slog dok je drugi u praznom hodu.

Kod pretvarača s varijantama razmještaja **V2**, **V3**, **V4**, **V5** ili njima inverznim varijantama razmještaja **V8**, **V9**, **V10**, **V11** pri radu uz aktivnu kočnicu Br2 (tzv. rad u brzini Br2) zakočeno je jedno zasebno vratilo, a ulaz ili izlaz su na spojnom vratilu. U ovakvom slučaju planetni slog na kojem je aktivna kočnica radi s jednim stupnjem slobode, a drugi s dva stupnja slobode.

Kod pretvarača s varijantom razmještaja **V1** ili njoj inverznoj **V7** pri radu uz aktivnu kočnicu Br1 ili Br2 zakočeno je spojno vratilo, a ulaz i izlaz su na zasebnim vratilima. Ovo je slučaj dvaju redno povezanih planetnih slogova kod kojih oba rade s jednim stupnjem slobode.

3.4 Metoda analize dvovodilnih planetnih pretvarača

Kinematicka i dinamička analiza planetnih pretvarača je puno složenija nego analiza pretvarača s nepokretnim osima. Za određivanje prijenosnog omjera, opterećenja elemenata i definiranje energetskih tokova kod planetnih pretvarača je razvijeno više analitičkih, grafoanalitičkih i grafičkih metoda [3]. Navedene metode su vrlo efikasne i primjenjive kod jednostavnih (osnovnih) planetnih pretvarača. Kod složenih planetnih pretvarača koji mogu

ostvariti više radnih stanja (brzina) i koji se sastoje od više osnovnih pretvarača primjena standardnih metoda je vrlo složena i nepraktična [74, 75].

U ovom radu se istražuju pretvarači koji u svom sastavu imaju dva planetna sloga i koji mogu ostvariti dva stupnja prijenosa. U skladu s tim, za njihovu analizu treba izabrati prikladnu metodu. Metoda koja omogućuje da se kod ovakvih pretvarača na relativno jednostavan način i u kratkom vremenu dobiju informacije o osnovnim kinematičkim i dinamičkim parametrima je metoda torzijskih momenata [44, 50, 57, 75].

Za efikasnu primjenu ove metode je potrebno složeni planetni pretvarač predstaviti pomoću struktturnog simbola. To omogućuje bolje sagledavanje međusobnih veza elemenata pretvarača i analizu njegovih kinematičkih i dinamičkih karakteristika.

Na osnovu poznavanja odnosa momenata na planetnom slogu koji ovise o idealnom momentnom omjeru uz svako vratilo se upisuje relativni moment na dotičnom vratilu. U ovom radu se uvijek polazi od planetnog sloga I (lijevo smještenog na simbolu). Po prelasku na planetni slog II (smješten na desnoj strani simbola) uvažava se zakon akcije i reakcije pa se moment na unutrašnjem spojnom vratilu kod drugog planetnog sloga uzima sa suprotnim predznakom od momenta kod prvog planetnog sloga. Na vanjskom spojnom vratilu uvijek djeluje moment koji se dobije kao algebarski zbroj momenata njegovih sastavnih vratila. Metoda je detaljno opisana u [57, 75] pa stoga ovdje neće biti podrobnije opisivana. Nakon dobivanja idealnih relativnih momenata na svim vratilima pretvarača kod proizvoljne varijante pretvarača koja radi u proizvoljnoj brzini pristupa se određivanju kinematičkog prijenosnog omjera. Kinematički prijenosni omjer se dobije prema izrazu:

$$i = -\frac{T_B}{T_A} \quad (3.4.1)$$

Pri čemu je:

i - kinematički prijenosni omjer koji uz aktivnu kočnicu Br1 ima indeks Br1, a uz aktivnu kočnicu Br2 ima indeks Br2

T_A - moment bez gubitaka na ulazu u pretvarač, Nm

T_B - moment bez gubitaka na izlazu iz pretvarača, Nm

Nakon određivanja relativnih momenata i smjerova vrtnje svih vratila pretvarača mogu se odrediti aktivni energetski tokovi. Da bi se utvrdio energetski tok unutar pretvarača potrebno je voditi računa o odnosu smjerova vektora momenata na vratilu i vektora kutne brzine elementa. U općem slučaju ukoliko se smjer vektora momenta i vektora kutne brzine

poklapa radi se o elementu na koji energija ulazi i obratno, ako se smjer vektora kutne brzine i smjer vektora momenta ne poklapaju radi se o elementu s kojeg energija izlazi. Na taj način se određuje kako aktivan tako i jalov energetski tok. Aktivni i jalovi energetski tokovi u ovom radu označeni su punom crvenom crtom sa strelicama koje označavaju smjer prijenosa energije. Ovisno o smjerovima vektora momenata na vratilima kod pretvarača s dva spojna vratila moguće je grananje ili cirkulacija energije. Uvjeti kod kojih nastupa grananje energije i kod kojih se javlja jalova snaga (tzv. cirkulacija snage) su navedeni u [2, 57, 75].

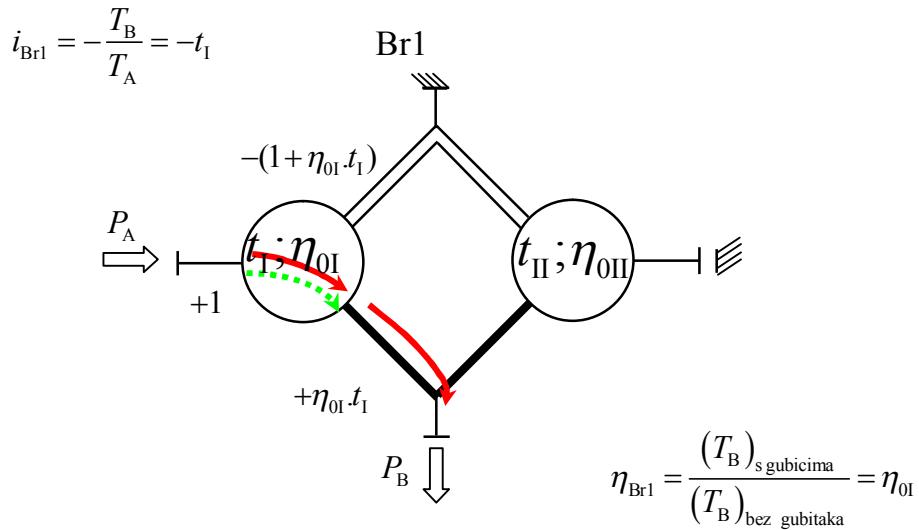
Nakon određivanja aktivnih energetskih tokova prelazi se na određivanje relativnih energetskih tokova unutar svakog planetnog sloga. Smjer relativne energije se određuje prema predznaku vrijednosti dobivenih iz izraza (2.8.3) ili (2.8.4). Kad se ustanovi smjer relativne energije na planetnom slogu onda se određuju stvarni relativni momenti na vratilima. Smjer relativne energije je u ovom radu označen isprekidanim zelenom crtom sa strelicom. Nakon određivanja smjerova relativne energije i stvarnih relativnih momenata na vratilima određuju se računski stupnjevi iskoristivosti prema izrazu (3.4.2):

$$\eta = \frac{\left(\frac{T_B}{T_A} \right)_{\text{sgubicima}}}{\left(\frac{T_B}{T_A} \right)_{\text{bez gubitaka}}} \quad (3.4.2)$$

Pri čemu je:

η - računski stupanj iskoristivosti koji uz aktivnu kočnicu Br1 ima indeks Br1, a uz aktivnu kočnicu Br2 ima indeks Br2

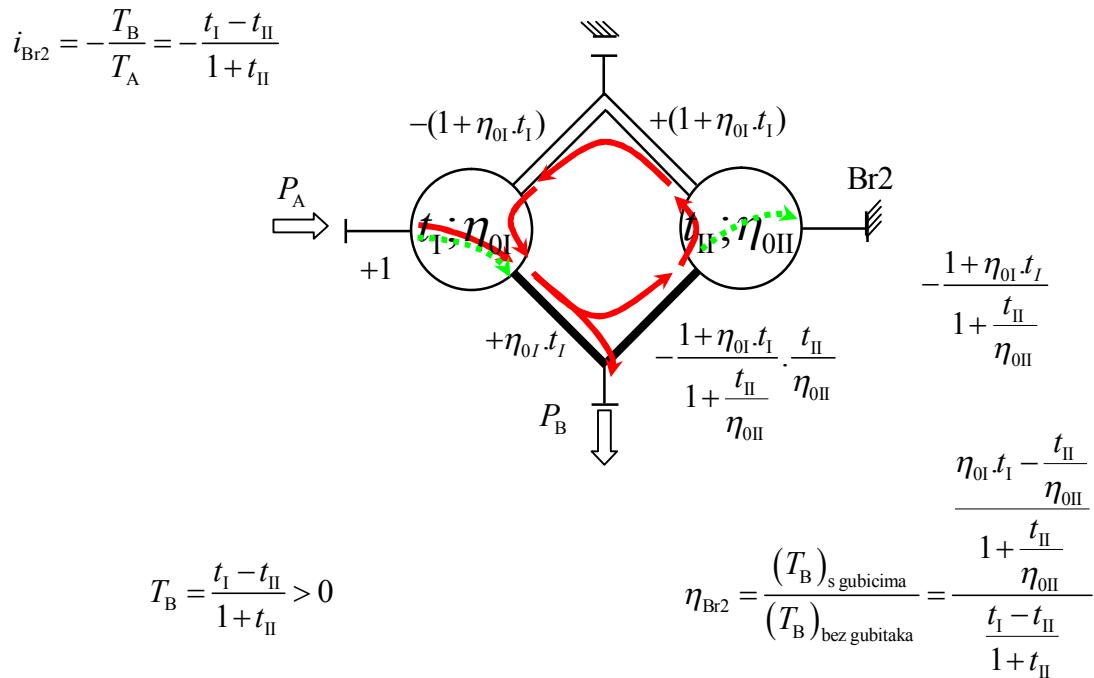
Ukoliko se žele opterećenja svih vratila izraziti u funkciji ulaznog momenta potrebno je svaki dobiveni relativni moment pomnožiti sa recipročnom vrijednosti relativnog momenta na ulazu. Na taj način relativni momenti na vratilima postaju specifični i određivanje opterećenja bilo kojeg vratila, za poznati ulazni moment, se svodi na množenje specifičnog relativnog momenta na tom vratilu s vrijednosti momenta na ulazu u pretvarač. Prema metodi torzijskih momenata je kod svake od 12 različitih shema dvobrzinskih pretvarača za šest različitih razmještaja kočnica napravljena struktturna analiza (kinematička i dinamička) koja je dana u Prilogu 1. Ovdje je kao primjer izdvojena analiza varijante S11V2 (sl. 3.4.1, sl. 3.4.2, sl. 3.4.3).

S11V2Br1

Sl. 3.4.1 Analiza varijante S11V2Br1

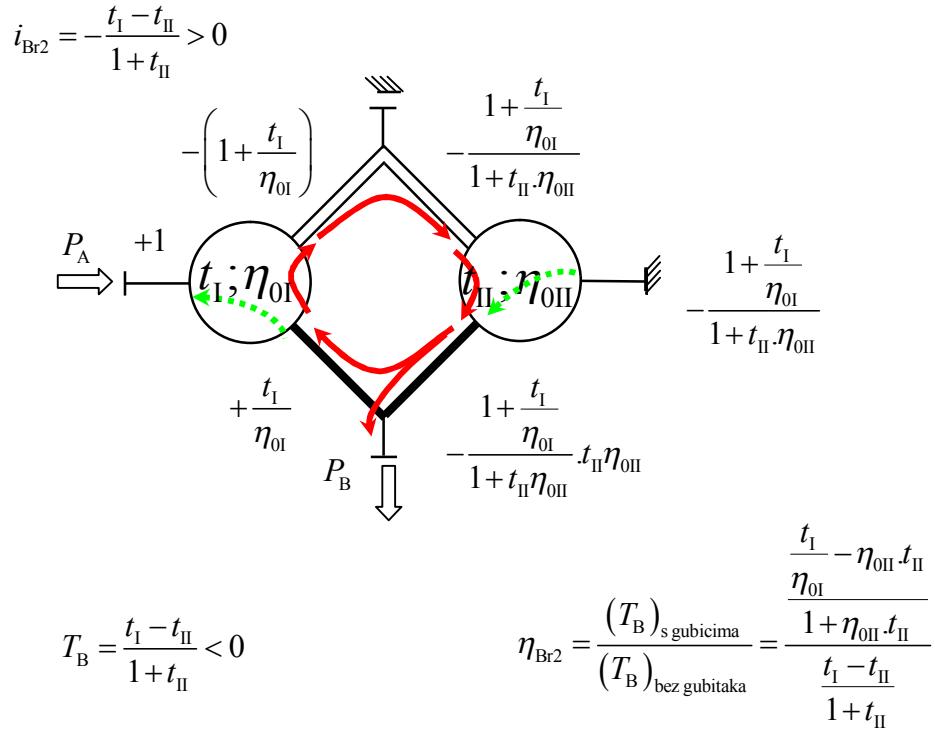
S11V2Br2 kod $t_I > t_{II}$ $i_{\text{Br2}} = -\frac{t_I - t_{II}}{1 + t_{II}} < 0$

Zadržavanje smjera izlaznog vratila kod promjene aktivnosti kočnica pri $t_I > t_{II}$

Sl. 3.4.2 Analiza varijante pretvarača S11V2Br2 pri $t_I > t_{II}$

$$\mathbf{S1V2Br2} \text{ kod } t_I < t_{II} \quad i_{Br2} = -\frac{t_I - t_{II}}{1 + t_{II}} > 0$$

Promjena smjera vrtnje izlaznog vratila kod promjene aktivnosti kočnica pri $t_I < t_{II}$



Sl. 3.4.3 Analiza varijante pretvarača S1V2Br2 pri $t_I < t_{II}$

4. KINEMATIČKE MOGUĆNOSTI DVOVODILNIH PLANETNIH PRETVARAČA

4.1 Dvobrzinski planetni pretvarači

U poglavlju 4. su obrađene kinematičke pretvaračke mogućnosti dvovodilnih planetnih pretvarača. Postavljanjem kočnica na dva vratila kod dvovodilnih pretvarača s dva spojna i četiri vanjska vratila dobiva se mehanizam pomoću kojega se može upravljati energetskim tokovima kroz pretvarač i time mijenjati prijenosni omjer. Ovisno o razmještaju kočnica na vratilima dobivaju se tri konstrukcijski različite skupine dvobrzinskih pretvarača. Svaka od varijanti svake od skupina ima svoje specifične karakteristike koje određuju mogućnosti pretvorbe. Može se pretpostaviti da će neke varijante u obje brzine omogućavati redukciju brzine vrtnje. Neke varijante će u jednoj brzini omogućavati redukciju, a u drugoj multiplikaciju. Kod nekih će se promjenom brzine vrtnje mijenjati smjer rotacije izlaznog vratila, a kod nekih će se zadržati isti smjer rotacije izlaznog vratila. U poglavlju 4. će se pokazati utjecaj omjera broja zubi vijenca i sunčanog zupčanika kod planetnih slogova tj. idealnih momentnih omjera planetnih slogova svake varijante na režim rada pretvarača u svakoj brzini. Prikazat će se mjenjačke mogućnosti svake varijante i to tako da se za svaku varijantu prikaže s kojim kombinacijama prijenosnih omjera može raditi pretvarač. Osim toga kod svake varijante će biti dati izrazi s kojim se mogu odrediti idealni momentni omjeri planetnih slogova za svaki mogući uređeni par prijenosnih omjera. Ovi izrazi su osnova za sintezu dvobrzinskih planetnih pretvarača.

Budući da se istraživanje provodi na razini strukturnog simbola moguće je da istraživane strukture imaju zadovoljavajuće pretvaračke funkcije za neku primjenu, ali su konstrukcijski neizvedive, primjerice zbog neprikladnog rasporeda kočnica. Zbog toga će se za sve simbolički prikazane varijante koncipirati kinematičke sheme koje daju uvid u mogućnost eventualne praktične primjene varijante. Pored toga kinematičke sheme daju polaznu osnovu za daljnji razvoj konstrukcije dvobrzinskog pretvarača.

Budući da razmatrani pretvarači mogu realizirati dva različita prijenosna omjera izlazno vratilo u različitim stupnjevima prijenosa rotira različitim brzinama vrtnje. Ponekad je konstruktoru zanimljiv omjer brzina vrtnje izlaznog vratila u različitim brzinama. Ovaj omjer se naziva skok prijenosa S_p i on je jednak po svojoj vrijednosti omjeru prijenosnih omjera dviju brzina. Ovdje je skok prijenosa definiran kao omjer većeg i manjeg prijenosnog omjera što znači da mu je uvijek absolutna vrijednost veća ili jednaka jedinici.

U ovom poglavlju će u cilju prikazivanja kinematičkih mogućnosti biti prikazane i ekstremne vrijednosti skokova prijenosa različitih varijanti.

4.2 Dvovodilni pretvarači s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima

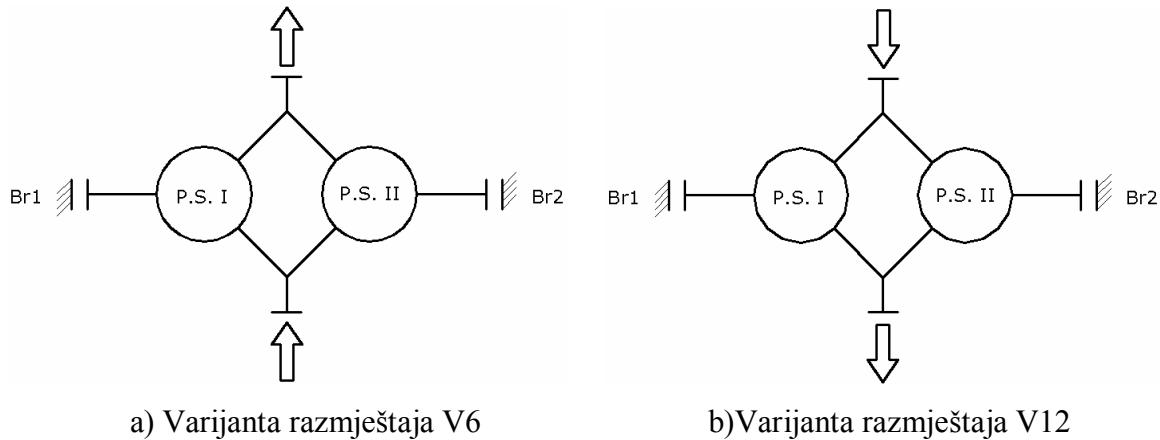
U ovom poglavlju su obrađene:

- kinematičke karakteristike pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima
- konstrukcijske koncepcije (kinematičke sheme) pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima
- mjenjačke mogućnosti i skokovi prijenosa pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima

4.2.1 Kinematičke karakteristike pretvarača s kočnicama na zasebnim vratilima

Kod varijanti pretvarača kod kojih su kočnice raspoređene na zasebna vratila (sl. 4.2.1a i sl. 4.2.1b), radni i pogonski stroj su spojeni na spojna vratila. Ove varijante omogućuju ostvarenje prijenosnih omjera ograničenih kinematičkim mogućnostima planetnog sloga. Moguće je ostvarenje dviju reduksijskih brzina, dviju multiplikacijskih brzina te redukciju u jednoj brzini i multiplikaciju u drugoj brzini. Moguće je ostvarenje pozitivnih i negativnih prijenosnih omjera. Prijenosni omjer svakog od stupnjeva prijenosa ovisi samo o idealnom momentnom omjeru aktivnog planetnog sloga u tom stupnju.

Ako su zahtijevani prijenosni omjeri i_1 i i_2 takvi da ih se oba može ostvariti s po jednim planetnim sloganom onda ovakvi pretvarači mogu biti prikladno rješenje.



Sl. 4.2.1 Simbolički prikaz pretvarača s kočnicama na zasebnim vratilima, a) varijanta razmještaja V6 i b) varijanta razmještaja V12

U Prilogu 1 su između ostalog izvedeni izrazi za kinematičke prijenosne omjere za obje brzine svih pretvarača s varijantom razmještaja V6. Izrazi su navedeni u Tab. 4.2.1.

Tab. 4.2.1 Prijenosni omjeri dvobrzinskih pretvarača s kočnicama na zasebnim vratilima

Oznaka varijante	Režim rada planetnog sloga I (Tab. 2.6.1)	Režim rada planetnog sloga II (Tab. 2.6.1)	Prijenosni omjer i_{Br1} (uključena kočnica Br1)	Prijenosni omjer i_{Br2} (uključena kočnica Br2)
S11V6	3	3	$\frac{t_1 + 1}{t_1}$	$\frac{t_{II} + 1}{t_{II}}$
S12V6	3	3M	$\frac{t_1 + 1}{t_1}$	$\frac{t_{II}}{t_{II} + 1}$
S13V6	3	1	$\frac{t_1 + 1}{t_1}$	$t_{II} + 1$
S14V6	3	1M	$\frac{t_1 + 1}{t_1}$	$\frac{1}{t_{II} + 1}$
S15V6	3	2M	$\frac{t_1 + 1}{t_1}$	$-\frac{1}{t_{II}}$
S16V6	3	2	$\frac{t_1 + 1}{t_1}$	$-t_{II}$
S33V6	1	1	$t_1 + 1$	$t_{II} + 1$
S34V6	1	1M	$t_1 + 1$	$\frac{1}{t_{II} + 1}$
S35V6	1	2M	$t_1 + 1$	$-\frac{1}{t_{II}}$
S36V6	1	2	$t_1 + 1$	$-t_{II}$
S55V6	2M	2M	$-\frac{1}{t_1}$	$-\frac{1}{t_{II}}$
S56V6	2M	2	$-\frac{1}{t_1}$	$-t_{II}$
Napomena: kod varijante razmještaja V12 svaka shema ima funkciju prijenosnog omjera recipročnu funkciju navedenoj u tablici				

Iz Tab. 4.2.1 je vidljivo da:

- postoji pet pretvarača s varijantom razmještaja V6 koji neovisno o vrijednosti idealnih momentnih omjera daju redukciju u oba stupnja prijenosa (S11V6, S13V6, S16V6, S33V6, S36V6) od kojih je kod tri pretvarača prisutna redukcija samo u

- smjeru vrtnje ulaznog vratila (S11V6, S13V6, S33V6), a kod preostala dva pretvarača izmjenom brzine dolazi do promjene smjera vrtnje (S16V6, S36V6);
- postoji šest pretvarača s varijantom razmještaja V6 koji neovisno o vrijednosti idealnih momentnih omjera daju u jednoj brzini redukciju, a u drugoj multiplikaciju (S12V6, S14V6, S15V6, S34V6, S35V6, S56V6) od kojih je kod tri pretvarača smjer rotacije izlaznog vratila uvijek u smjeru pogona (ulaznog vratila) (S12V6, S14V6, S34V6), kod dva pretvarača se smjer rotacije mijenja s promjenom brzine (S15V6, S35V6) i kod jednog pretvarača je u obje brzine smjer rotacije izlaznog vratila suprotan smjeru ulaznog vratila (S56V6);
 - postoji jedan pretvarač s varijantom razmještaja V6 koji omogućuje u obje brzine multiplikaciju sa smjerom vrtnje suprotnim od smjera vrtnje ulaznog vratila (S55V6).

Neke osnovne kinematičke karakteristike (redukcija, multiplikacija, odnos smjera rotacije izlaznog i ulaznog vratila) svih pretvarača ove skupine s varijantom razmještaja V6 su pregledno prikazane u Tab. 4.2.2. Pretvarači s varijantom razmještaja V12 su inverzni odgovarajućim pretvaračima s varijantom razmještaja V6 pa reduktorski rad kod sheme s varijantom razmještaja V6 postaje multiplikatorski rad kod te iste sheme s varijantom razmještaja V12 i obrnuto.

Tab. 4.2.2 Mogući režimi rada pretvarača s varijantom razmještaja V6

Oznaka varijante	U brzini Br1:		U brzini Br2:		Izlazno vratilo rotira uvijek u smjeru rotacije ulaznog	Izlazno vratilo rotira u suprotnom smjeru od smjera rotacije ulaznog vratila s uključenom kočnicom: Br1	Br2
	red.	mul.	red.	mul.			
S11V6	⊕		⊕		⊕		
S12V6	⊕			⊕	⊕		
S13V6	⊕		⊕		⊕		
S14V6	⊕			⊕	⊕		
S15V6	⊕			⊕			⊕
S16V6	⊕		⊕				⊕
S33V6	⊕		⊕		⊕		
S34V6	⊕			⊕	⊕		
S35V6	⊕			⊕			⊕
S36V6	⊕		⊕				⊕
S55V6		⊕		⊕		⊕	⊕
S56V6		⊕	⊕			⊕	⊕

Napomena:
- kod varijante razmještaja V12 svaka navedena shema mijenja režim rada iz redukcije (red.) u multiplikaciju (mul.) i obrnuto

Neke od ovih varijanti imaju posebno zanimljive kinematicke karakteristike s aspekta prakse.

Primjerice, kod varijante pretvarača S36V6 se kod promjene brzine mijenja smjer vrtnje. Ona je npr. pogodna za alatni stroj koji ima jedno radno gibanje s velikim otporima (i malom brzinom) i vraćanje u početni položaj s većom brzinom (za povećanje produktivnosti). Kod te strukturne sheme se također mogu dobiti jednakе po veličini i obrnute po smjeru izlazne brzine vrtnje pri $t_I = 1 + t_{II}$.

Ako je potrebno iz nekog razloga ostvariti recipročne prijenosne omjere tada se to može dobiti sa shemom S34 i S56 uz jednakе idealne momentne omjere $t_I = t_{II}$.

Pretvarači s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima imaju i svoja ograničenja. Jedno ograničenje je to da se kod izvedbe s tri satelita po planetnom slogu ne mogu ostvariti prijenosni omjeri veći od 13 i manji od 0,0769. U takvim slučajevima treba razmatrati varijante pretvarača s kočnicama na spojnim vratilima ili varijante pretvarača s kočnicama na spojnom i zasebnom vratilu.

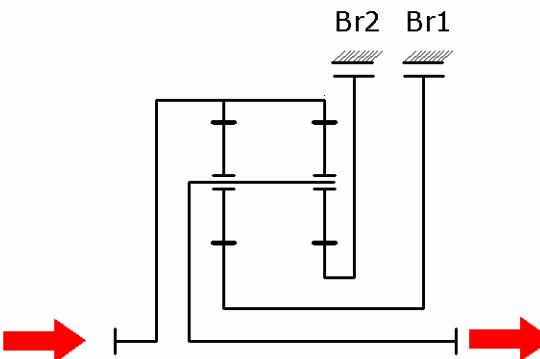
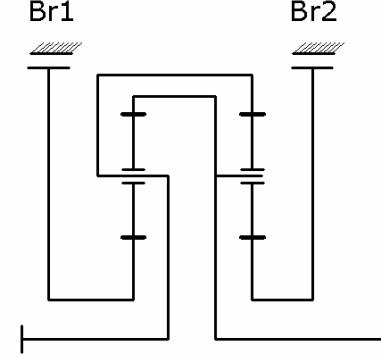
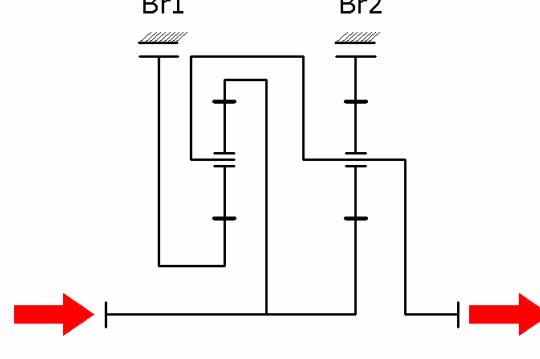
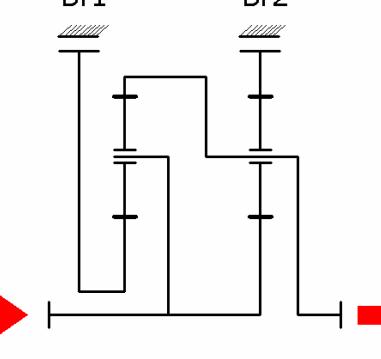
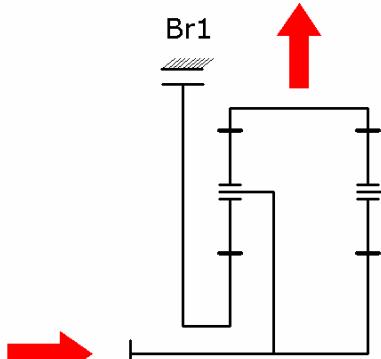
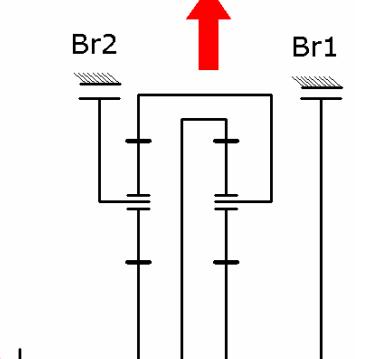
Druge ograničenje je vezano za praktičnu izvedivost varijante. O tome će biti riječi u poglavljju 4.2.2.

4.2.2 Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih planetnih pretvarača s kočnicama na zasebnim vratilima

U Tab. 4.2.3 su predstavljene konstrukcijske koncepcije varijanti (kinematičke sheme) pretvarača s kočnicama na zasebnim vratilima. One mogu pomoći konstruktoru kod osnivanja konstrukcije pretvarača. Crvenim strelicama je određen položaj pogonskog i radnog stroja. U gornjem lijevom kutu je oznaka varijante V6 ili V12, a u gornjem desnom kutu je oznaka režima rada pojedinih planetnih slogova. Prvi broj predstavlja režim rada u brzini Br1, a drugi u brzini Br2. Ova oznaka informira o kinematičkim karakteristikama planetnih slogova, a time i kinematičkim mogućnostima mjenjačkog pretvarača.

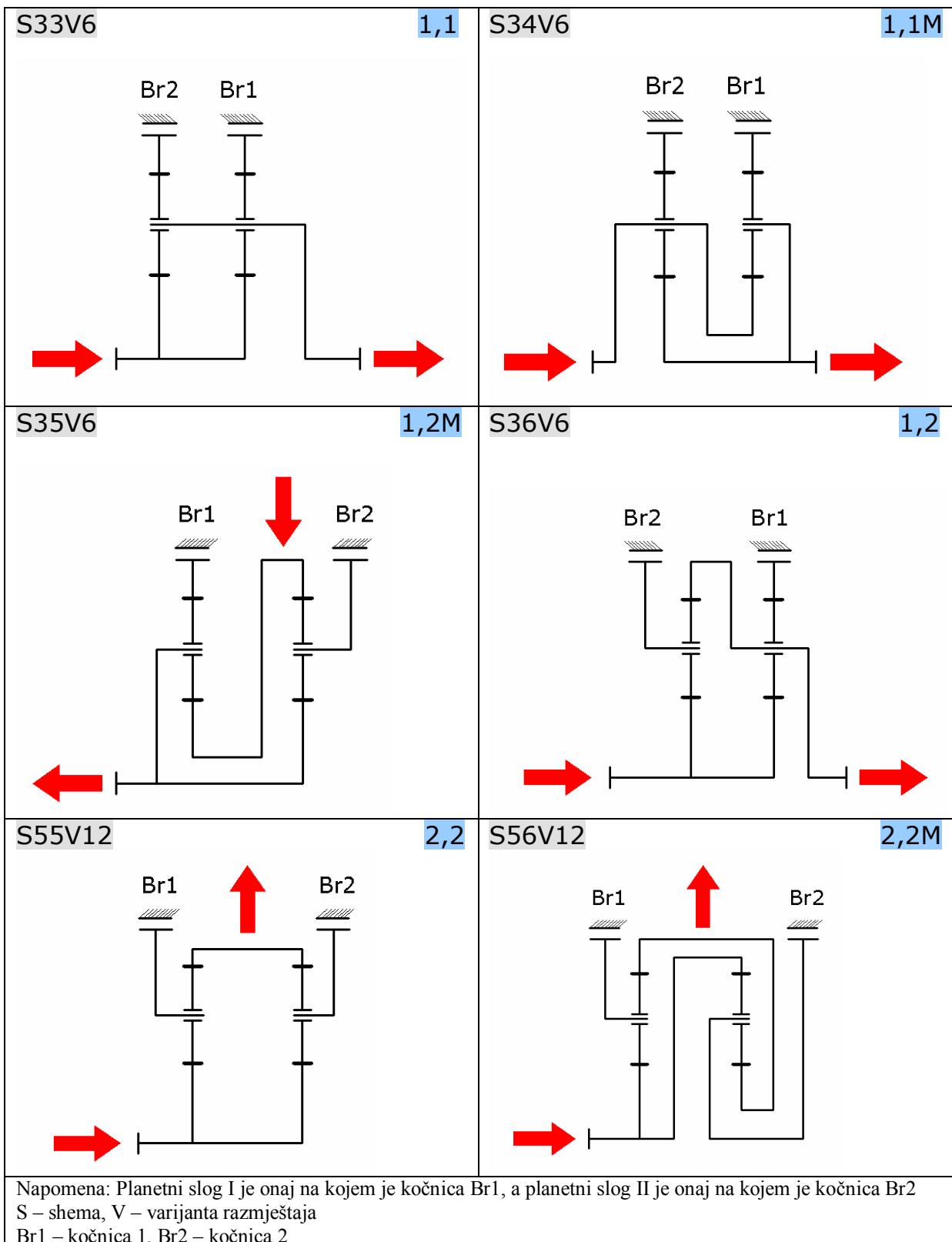
Pregledom koncepcijskih shema iz Tab. 4.2.3 se uviđa da se zbog svojih geometrijskih karakteristika pet shema ovih pretvarača od ukupno 12 ne mogu izvesti tako da ulazno i izlazno vratilo budu sa suprotnih strana što se najčešće zahtijeva. Razlog za to je zasebno vratilo kočnice koje ne dozvoljava prilaz ulaznom odnosno izlaznom vratilu s lijeve ili desne strane. To su sheme S15, S16, S35, S55 i S56. O ovome je važno voditi računa jer u nekim slučajevima može dovesti u pitanje primjenu navedenih shema.

Tab. 4.2.3 Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima

S11V6	3,3	S12V12	3M,3
			
S13V6	3,1	S14V12	3M,1
			
S15V12	3M,2	S16V6	3,2
			

Napomena: Planetni slog I je onaj na kojem je kočnica Br1, a planetni slog II je onaj na kojem je kočnica Br2
 S – shema, V – varijanta razmještaja
 Br1 – kočnica 1, Br2 – kočnica 2

Tab. 4.2.3 (nastavak) Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima



4.2.3 Mjenjačke mogućnosti i skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima

4.2.3.1 Mjenjačke mogućnosti dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima

Da bi bio moguć jednostavan izbor odgovarajuće varijante pretvarača i njenih idealnih momentnih omjera računalno su generirani odgovarajući grafovi. Na tim grafovima su zorno prikazane mjenjačke mogućnosti svih shema s varijantama razmještaja V6 i V12. Prepostavlja se da planetni slogovi imaju po tri satelita što je najčešći slučaj.

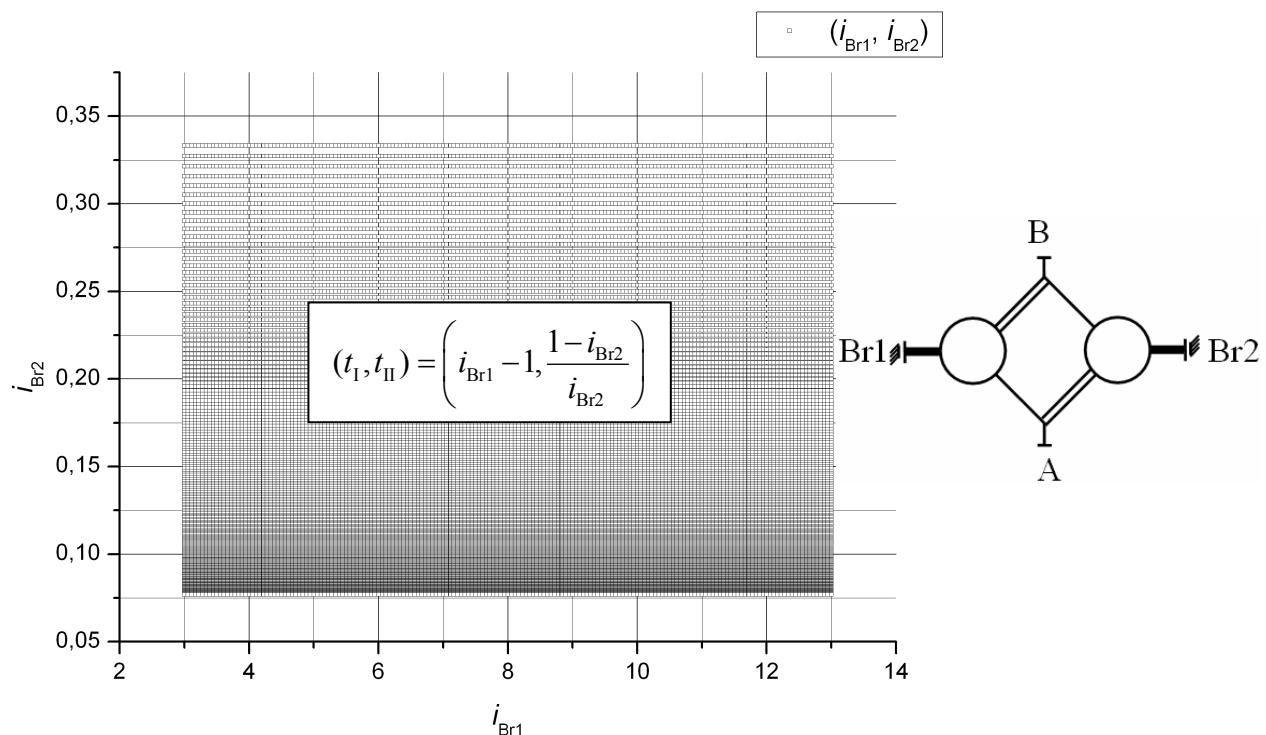
Izmjenom vrijednosti idealnih momentnih omjera t_I i t_{II} u konstrukcijski ograničenom intervalu ($2 \leq t_{I\min} \leq t_I \leq t_{I\max} \leq 12$, $2 \leq t_{II\min} \leq t_{II} \leq t_{II\max} \leq 12$) su izračunavane vrijednosti prijenosnih omjera i dobiven je skup uređenih parova (i_{Br1} , i_{Br2}). Za svaku shemu s varijantom razmještaja V6 i V12 izmjena vrijednosti idealnih momentnih omjera t_I i t_{II} je provođena tako da su se povećavale vrijednost idealnih momentnih omjera za korak od jednog zuba vijenca uz zadani broj zubi obaju sunčanih zupčanika. Brojevi zubi oba sunčana zupčanika su se držali konstantnim i u ovom slučaju su iznosili $z_{II} = z_{III} = 18$. Pri povećanju broja zubi vijenca za jedan zub su se respektirani nužni uvjeti sinteze planetnog sloga. Za svaku kombinaciju brojeva zubi koja udovoljava nužnim uvjetima sinteze planetnih slogova su se izračunavale vrijednosti prijenosnih omjera te je na taj način dobiven skup uređenih parova (i_{Br1} , i_{Br2}). Vrijednosti prijenosnih omjera su dobivene na osnovu izraza iz Tab. 4.2.1. Dobiven skup točaka u ravnini zorno prikazuje kinematičke mjenjačke mogućnosti pojedine varijante. Naime, teorijski je ostvariva svaka kombinacija prijenosnih omjera unutar rastera u obliku pravokutnika.

Na grafu se nalaze i izrazi koji su izvedeni iz Tab. 4.2.1, a omogućuju da se izračuna uređeni par idealnih momentnih omjera koji omogućuje traženi dvobrzinski pogon.

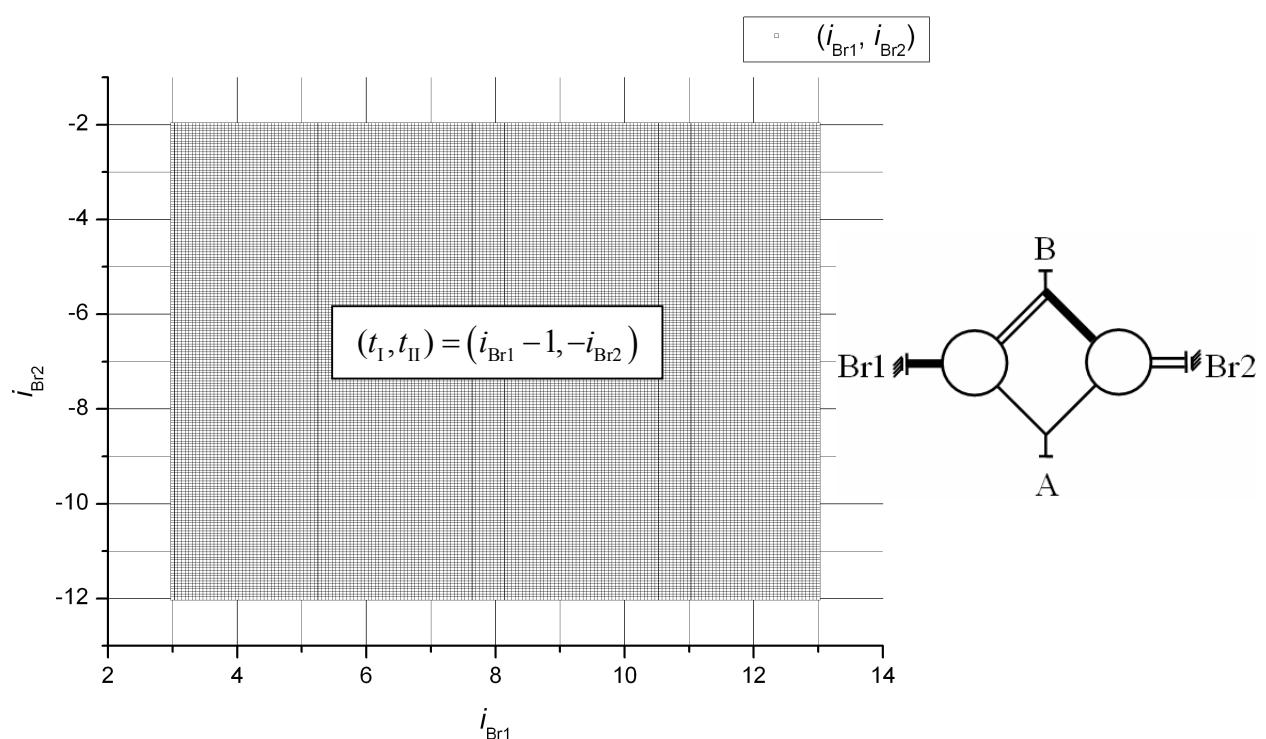
U nastavku su kao primjer istaknute dvije sheme s varijantom razmještaja V6 koje mogu biti izvedene s ulaznim i izlaznim vratilom smještenim sa suprotnih strana pretvarača. Uz graf koji predočava mjenjačke mogućnosti prikazan je i simbol varijante pretvarača koji omogućuje konstruktoru uvid u povezanost osnovnih članova pretvarača.

Na sl. 4.2.2 su prikazane mjenjačke mogućnosti varijante S34V6. Ova varijanta omogućuje redukciju uz uključenu kočnicu Br1 i multiplikaciju uz uključenu kočnicu Br2. U poglavlju 4.2.1 je navedeno da se pomoću ove varijante mogu dobiti recipročni prijenosni omjeri što se iz ovog grafa jasno vidi. Na sl. 4.2.3 su prikazane mjenjačke mogućnosti

varijante S36V6 koja je dobra za prekretne pogone. Na simboličkom prikazu pretvarača na slikama oznaka A predstavlja ulazno vratilo, a oznaka B izlazno vratilo.



Sl. 4.2.2 Mjenjačke mogućnosti varijante S34V6

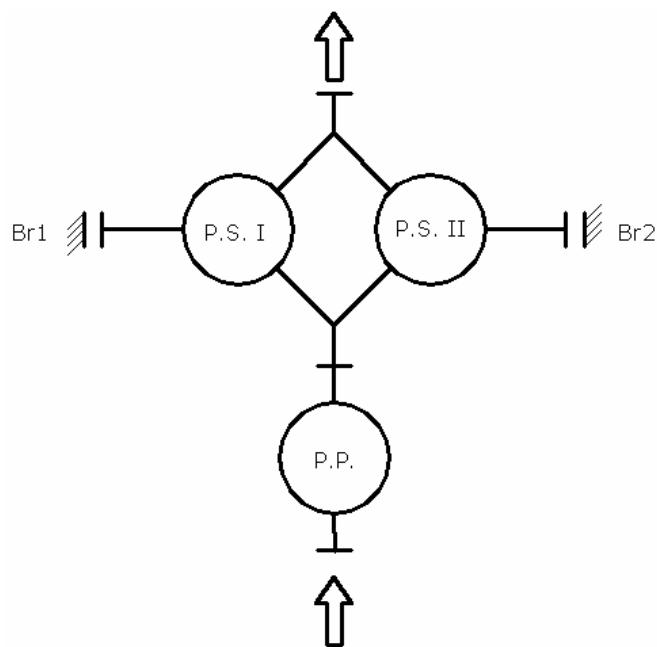


Sl. 4.2.3 Mjenjačke mogućnosti varijante S36V6

4.2.3.2 Skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima

U nekim slučajevima je zanimljiva mogućnost ostvarenja određenog odnosa prijenosnih omjera dviju brzina (skoka prijenosa) pri čemu sama vrijednost prijenosnih omjera nije toliko važna. Naime, u nekim slučajevima se vrijednost prijenosnih omjera može po volji podešiti primjenom dodatnog pretvarača uz zadržavanje njihovog međusobnog odnosa. Taj se pretvarač može postaviti na ulazno ili na izlazno vratilo mjenjačkog pretvarača (sl. 4.2.4).

$$S_p = \text{const.}$$



Sl. 4.2.4 Primjena predpretvarača za podešavanje vrijednosti prijenosnih omjera

Na sl. 4.2.4 je shematski prikazan pretvarač s varijantom razmještaja V6 kod kojega je na ulaz spojen predpretvarač prikladnog prijenosnog omjera. Na taj način se podešavaju vrijednosti prijenosnih omjera mjenjačkog pretvarača uz zadržavanje vrijednosti skoka prijenosa.

Korisno je znati kakve mogućnosti ostvarenja skoka prijenosa osiguravaju razmatrane varijante. U poglavlju 4.1 je definiran pojam skoka prijenosa. On se matematički može izraziti preko (4.2.1) odnosno (4.2.2):

$$\text{Ako je } |i_{Br1}| > |i_{Br2}| \text{ tada je: } S_p = \frac{i_{Br1}}{i_{Br2}} \quad (4.2.1)$$

$$\text{Ako je } |i_{\text{Br}2}| > |i_{\text{Br}1}| \text{ tada je: } S_p = \frac{i_{\text{Br}2}}{i_{\text{Br}1}} \quad (4.2.2)$$

Na osnovu izraza iz Tab. 4.2.1 je pomoću računala za varijantu razmještaja V6 kod svih 12 shema, u skladu s (4.2.1) određena minimalna i maksimalna ostvariva vrijednost skoka prijenosa. Uz svaku ekstremnu vrijednost je određena i pripadna kombinacija idealnih momentnih omjera koja joj odgovara.

Podaci su navedeni u Tab. 4.2.4, a određeni su u konstrukcijski izvedivom intervalu idealnih momentnih omjera (t_I i t_{II} se kreću od 2 do 12).

Tab. 4.2.4 Ekstremni skokovi prijenosa i njihovi odgovarajući idealni momentni omjeri kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima (varijanta razmještaja V6)

Varijanta pretvarača	S_p	t_I	t_{II}
	max min		
S11V6	1,38461	2 (12)	12 (2)
	1	$t_{II} = t_I$	
S12V6	2,25 1,17361	2 12	2 12
S13V6	12 2	12 2	12 2
S14V6	19,5 3,25	2 12	12 2
S15V6	-18 -2,16667	2 12	12 2
S16V6	-11,07692 -1,33333	12 2	12 2
S33V6	4,3333	2 (12)	12 (2)
	1	$t_{II} = t_I$	
S34V6	169 9	12 2	12 2
S35V6	-156 -6	12 2	12 2
S36V6	-6,5	12	2
	-1	$t_{II} = t_I + 1$	
S55V6	6	2 (12)	12 (2)
	1	$t_{II} = t_I$	
S56V6	144 4	12 2	12 2

Napomena: Sjenčano označena polja pripadaju varijantama pretvarača koje mogu ostvariti visoke skokove prijenosa ili pak prekretni rad

U Tab. 4.2.5 su navedene ekstremne vrijednosti skokova prijenosa uz njihove pripadne prijenosne omjere.

Tab. 4.2.5 Ekstremni skokovi prijenosa i njihovi odgovarajući prijenosni omjeri kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima (varijanta razmještaja V6)

Varijanta pretvarača	S_p	i_{Br1}	i_{Br2}
	max min		
S11V6	1,38461	1,5 (1,08333)	1,08333 (1,5)
	1	$i_{Br1} = i_{Br2}$	
S12V6	2,25	1,5	0,6667
	1,17361	1,0833	0,9231
S13V6	12	1,0833	13
	2	1,5	3
S14V6	19,5	1,5	0,0769
	3,25	1,0833	0,3333
S15V6	-18	1,5	-0,0833
	-2,16667	1,0833	-0,5
S16V6	-11,07692	1,0833	-12
	-1,33333	1,5	-2
S33V6	4,3333	3 (13)	13 (3)
	1	$i_{Br1} = i_{Br2}$	
S34V6	169	13	0,0769
	9	3	0,3333
S35V6	-156	13	-0,0833
	-6	3	-0,5
S36V6	-6,5	13	-2
	-1	$i_{Br1} = -i_{Br2}$	
S55V6	6	-0,5(-0,0833)	-0,0833(-0,5)
	1	$i_{Br1} = i_{Br2}$	
S56V6	144	-0,0833	-12
	4	-0,5	-2

Napomena: Sjenečano označena polja pripadaju varijantama pretvarača koje mogu ostvariti visoke skokove prijenosa ili pak prekretni rad

Iz Tab. 4.2.4 i Tab. 4.2.5 se vidi da neke varijante pretvarača mogu ostvariti vrlo široke raspone skokova prijenosa. Kod tih varijanti pretvarača vrijednost skoka prijenosa može biti vrlo velika. To su varijante S34V6, S35V6 i S56V6 (istaknute su sjenečanjem).

Pored navedenih varijanti pretvarača ističe se i varijanta S36V6 (istaknuta sjenečanjem) koja ima mogućnost prekretnog rada uz uvjet $t_{II} = t_I + 1$. Kod varijante razmještaja V12 (inverzna varijanta varijanti razmještaja V6) ekstremni skokovi prijenosa kod svih shema imaju jednaku vrijednost kao i kod varijante razmještaja V6. Razlog tome je sama definicija skoka prijenosa (4.2.1) i (4.2.2).

4.3 Dvobrzinski planetni pretvarači s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima

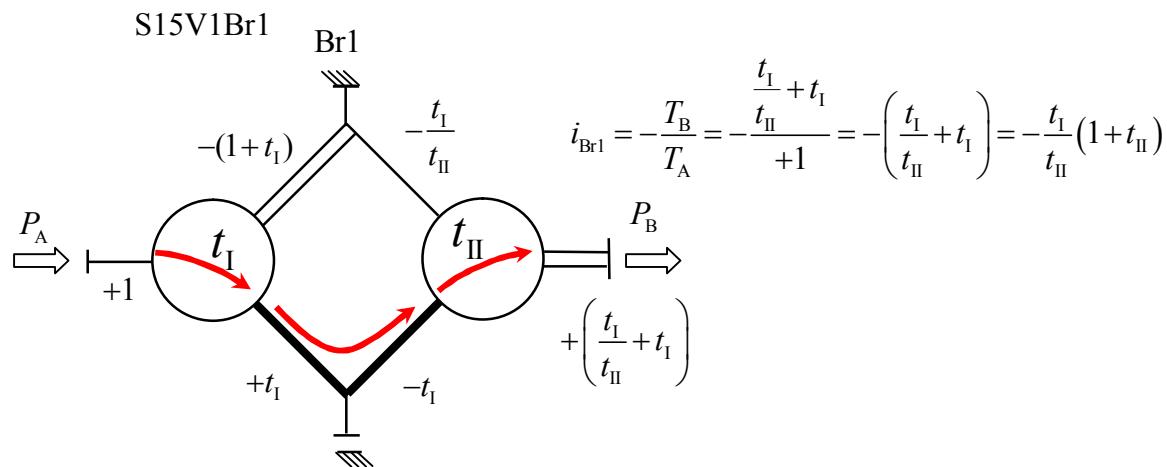
U ovom poglavlju su obrađene:

- kinematičke karakteristike pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima
- konstrukcijske koncepcije (kinematičke sheme) pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima
- mjenjačke mogućnosti i skokovi prijenosa pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima

4.3.1 Kinematičke karakteristike pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima

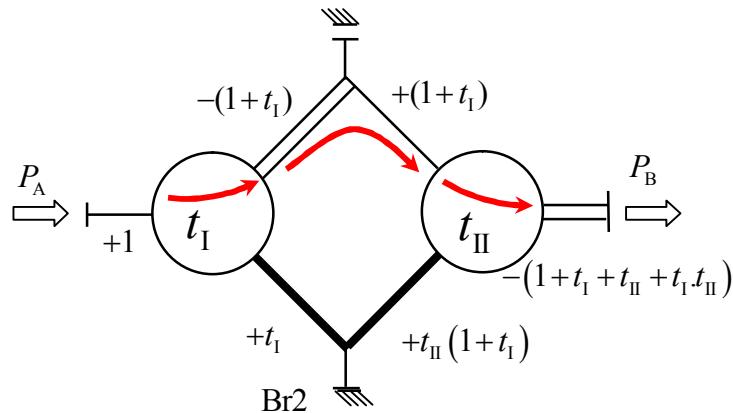
Ako se kod planetnog pretvarača s dva spojna i četiri vanjska vratila kočnice rasporede na spojnim vratilima dobiva se mjenjačka struktura koja omogućuje ostvarenje dviju brzina. Pri tom u svakoj brzini učestvuju dva redno povezana planetna sloga. Budući da ovakvi pretvarači dok rade imaju samo jedno rotirajuće vratilo koje povezuje planetne slogove postoji samo jedan energetski tok kroz to spojno vratilo. Ukupni prijenosni omjer svake od brzina ovakvog mjenjačkog pretvarača se zato može dobiti umnoškom prijenosnih omjera planetnih slogova.

Kao primjer, na sl. 4.3.1 i sl. 4.3.2 je prikazana strukturalna analiza varijante pretvarača S15V1 u radu s kočnicom Br1 i Br2. U skladu s odnosima idealnih momenata na planetnim slogovima te zakonom akcije i reakcije koji vlada između vratila planetnih slogova na svakom vratilu su navedeni njemu pripadni relativni momenti (idealni). Analizom varijante S15V1 su metodom torzijskih momenata dobivene funkcije prijenosnih omjera i_{Br1} i i_{Br2} .



Sl. 4.3.1 Određivanje prijenosnog omjera varijante S15V1Br1

S15V1Br2



$$i_{\text{Br}2} = -\frac{T_B}{T_A} = -\frac{-(1+t_I + t_{II} + t_I \cdot t_{II})}{+1} = +(1+t_I)(1+t_{II})$$

Sl. 4.3.2 Određivanje prijenosnog omjera varijante S15V1Br2

Analizom funkcija prijenosnih omjera se uočava da su kod ove varijante u obje brzine prisutne redukcije brzine vrtnje. Pored toga iz predznaka se zaključuje da kod promjene aktivnosti kočnica dolazi do promjene smjera rotacije izlaznog vratila.

Na isti način se analizom svih preostalih shema s varijantom razmještaja V1 dobivaju funkcije prijenosnih omjera. Prikaz postupka pomoću kojeg su se dobole funkcije prijenosnih omjera za pretvarače s varijantom razmještaja V1 je dat u Prilogu 1.

Varijanta razmještaja V7 je inverzna varijanta varijanti razmještaja V1 što znači da su prijenosni omjeri pretvarača s varijantom razmještaja V7 recipročni prijenosnim omjerima pretvarača s varijantom razmještaja V1 u okviru razmatrane sheme.

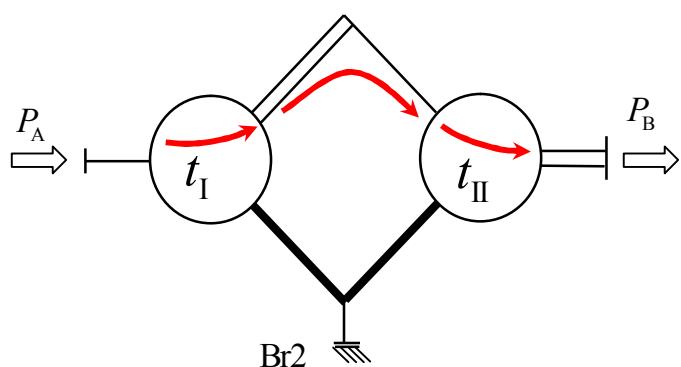
U Tab. 4.3.1 su sistematizirane funkcije prijenosnih omjera svih dvanaest shema pretvarača s varijantom razmještaja V1. Pored toga navedene su minimalna i maksimalna vrijednost prijenosnog omjera kod svake sheme za obje brzine.

Tab. 4.3.1 Prijenosni omjeri i ekstremne vrijednosti prijenosnih omjera pretvarača s varijantom razmještaja V1

Varijanta pretvarača	i_{Br1}	Vrijednost i_{Br1}	i_{Br2}	Vrijednost i_{Br2}
		max min		max min
S11V1	$+\frac{t_1}{t_{II}}$	+6 +1/6	$+\frac{1+t_1}{1+t_{II}}$	+4,333 +1/4,333
S12V1	$-\frac{t_1}{1+t_{II}}$	-1/6,5 -4	$-\frac{1+t_1}{t_{II}}$	-1/4 -6,5
S13V1	$+t_1 t_{II}$	+144 +4	$+t_{II} \frac{1+t_1}{1+t_{II}}$	+12 +2
S14V1	$-\frac{t_1 t_{II}}{1+t_{II}}$	-1,333 -11	$-(1+t_1) t_{II}$	-6 -156
S15V1	$-\frac{t_1}{t_{II}}(1+t_{II})$	-2,167 -18	$+(1+t_1)(1+t_{II})$	+169 +9
S16V1	$-t_1(1+t_{II})$	-6 -156	$+\frac{(1+t_1)(1+t_{II})}{t_{II}}$	+19,5 +3,25
S33V1	$+\frac{t_{II}}{t_1}$	+6 +1/6	$+\frac{t_{II} 1+t_1}{t_1 1+t_{II}}$	+1,385 +1/1,385
S34V1	$-\frac{t_{II}}{t_1 + t_1 t_{II}}$	-1/18 -1/2,167	$-\frac{t_{II} + t_1 t_{II}}{t_1}$	-2,167 -18
S35V1	$-\frac{1+t_{II}}{t_1 t_{II}}$	-1/11 -1/1,333	$+\frac{(1+t_1)(1+t_{II})}{t_1}$	+19,5 +3,25
S36V1	$-\frac{1+t_{II}}{t_1}$	-1/4 -6,5	$+\frac{(1+t_1)(1+t_{II})}{t_1 t_{II}}$	+2,25 +1,1736
S55V1	$+\frac{t_1 1+t_{II}}{t_{II} 1+t_1}$	+1,385 +1/1,385	$+\frac{1+t_{II}}{1+t_1}$	+4,333 +1/4,333
S56V1	$+\frac{t_1 + t_1 t_{II}}{1+t_1}$	+12 +2	$+\frac{1+t_{II}}{t_{II} + t_1 t_{II}}$	+1/2 +1/12
Napomena: Uz varijantu razmještaja V7 svaka shema ima funkciju prijenosnog omjera recipročnu navedenoj funkciji u tablici				

Kod varijanti pretvarača s jednim rotirajućim spojnim vratilom uvijek aktivno rade oba planetna sloga u dvovratilnom režimu rada.

Ako se ovakav pretvarač koristi kao jednobrzinski pretvarač tada nisu potrebne dvije kočnice nego je jedno spojno vratilo stalno zakočeno tj. ono je stalni reaktivni član. Za takve je jednobrzinske pretvarače u ovom radu usvojen isti sustav označavanja kao i za dvobrzinske međutim kod njih oznaka Br1 ili Br2 označava stalni reaktivni član, a ne izabranu kočnicu (brzinu). Na sl. 4.3.3 je dat simbolički prikaz takvog jednobrzinskog pretvarača označke 15V1Br2, pri čemu je Br2 stalni reaktivni član tj. čvrsta veza s kućištem.



Sl. 4.3.3 Simbolički prikaz jednobrzinskog pretvarača varijante 15V1Br2

Na osnovu analize izraza iz Tab. 4.3.1 je napravljena sistematizacija jednobrzinskih varijanti pretvarača ovisno o režimu rada te je prikazana u Tab. 4.3.2 i Tab. 4.3.3. U Tab. 4.3.2 su prikazane varijante pretvarača kojima je stalni reaktivni član Br1 (smješten na spojnom vratilu s gornje strane simbola), a u Tab. 4.3.3 su prikazane varijante pretvarača kojima je stalni reaktivni član Br2 (smješten na spojnom vratilu s donje strane simbola). Neke varijante pretvarača uvijek rade kao reduktori, neke kao multiplikatori, a neke mogu mijenjati režim rada promjenom idealnih momentnih omjera. Kako pri redukciji tako i pri multiplikaciji moguća je rotacija izlaznog vratila u suprotnom smjeru od pogona tj. reversivni rad. Slovom R su nakon označke varijante pretvarača označene reversivne varijante (varijante kod kojih izlazno i ulazno vratilo imaju suprotan smjer rotacije).

Tab. 4.3.2 Jednobrzinski pretvarači s varijantom razmještaja V1 i stalnim reaktivnim članom Br1

Samo reduktori	Samo multiplikatori	Mijenjaju ulogu ovisno o parametrima planetnih sloganova
S13V1Br1	S34V1Br1 R	S11V1Br1
S14V1Br1 R	S35V1Br1 R	S12V1Br1 R
S15V1Br1 R		S33V1Br1
S16V1Br1 R		S36V1Br1 R
S56V1Br1		S55V1Br1
Napomena: R- suprotan smjer vrtnje izlaznog i ulaznog vratila		

Tab. 4.3.3 Jednobrzinski pretvarači s varijantom razmještaja V1 i stalnim reaktivnim članom Br2

Samo reduktori	Samo multiplikatori	Mijenjaju ulogu ovisno o parametrima planetnih sloganova
S13V1Br2	S56V1Br2	S11V1Br2
S14V1Br2 R		S12V1Br2 R
S15V1Br2		S33V1Br2
S16V1Br2		S55V1Br2
S34V1Br2 R		
S35V1Br2		
S36V1Br2		
Napomena: R- suprotan smjer vrtnje izlaznog i ulaznog vratila		

Analizom funkcija prijenosnih omjera je utvrđeno da promjena idealnih momentnih omjera u okviru jedne brzine ovih varijanti ne može prouzročiti promjenu smjera vrtnje izlaznog vratila pretvarača tj. da je predznak prijenosnog omjera veličina koja se ne mijenja s promjenom idealnih momentnih omjera planetnih sloganova.

Analiza strukture varijanti jednobrzinskih pretvarača ove skupine isto kao i analiza funkcija prijenosnih omjera pokazuje da ne postoje dvije ili više identičnih varijanti pretvarača što znači da su sve 24 varijante jednobrzinskih pretvarača s varijantom razmještaja V1 različite po svojim karakteristikama.

Ove 24 varijante pretvarača (s varijantom razmještaja V1) imaju inverzne varijante (s varijantom razmještaja V7).

S aspekta praktične primjene neke od ovih varijanti imaju veću, a neke manju primjenjivost koja ovisi između ostalog o intervalu ostvarivih prijenosnih omjera (Tab. 4.3.1).

Devet jednobrzinskih pretvarača s varijantom razmještaja V1 (V7) od ukupno 24 (s varijantom razmještaja V1 odnosno V7) imaju promjenjivu karakteristiku režima rada (redukcija, multiplikacija) koja ovisi o idealnim momentnim omjerima planetnih slogova.

Kod dvobrzinskih pretvarača ove skupine može kod promjene brzine doći do promjene smjera vrtnje izlaznog vratila. U tom se slučaju stupanj prijenosa (brzina) na izvedenom pretvaraču ne može mijenjati dok se pogon ne zaustavi. Promjena smjera vrtnje izlaznog vratila pri promjeni brzine iz Br1 u Br2 će nastati kod varijanti S15V1, S16V1, S35V1 i S36V1 te kod njima inverznih varijanti.

Neke osnovne kinematičke karakteristike (redukcija, multiplikacija, odnos smjera rotacije izlaznog i ulaznog vratila) svih pretvarača ove skupine s varijantom razmještaja V1 su pregledno prikazane u Tab. 4.3.4. Pretvarači s varijantom razmještaja V7 su inverzni odgovarajućim pretvaračima s varijantom razmještaja V1 pa reduktorski rad kod sheme s varijantom razmještaja V1 postaje multiplikatorski rad kod te iste sheme s varijantom razmještaja V7 i obrnuto.

Tab. 4.3.4 Mogući režimi rada pretvarača s varijantom razmještaja V1

Oznaka varijante	S uključenom kočnicom Br1:			S uključenom kočnicom Br2:			Izlazno vratilo uvijek rotira u smjeru rotacije ulaznog	Izlazno vratilo rotira suprotno od smjera rotacije ulaznog vratila s uključenom kočnicom:
	red.	red. ili mul.	mul.	red.	red. ili mul.	mul.		
S11V1		⊕			⊕		⊕	
S12V1		⊕			⊕		⊕	⊕
S13V1	⊕			⊕			⊕	
S14V1	⊕			⊕			⊕	⊕
S15V1	⊕			⊕			⊕	
S16V1	⊕			⊕			⊕	
S33V1		⊕			⊕		⊕	
S34V1			⊕	⊕			⊕	⊕
S35V1			⊕	⊕			⊕	
S36V1		⊕		⊕			⊕	
S55V1		⊕			⊕		⊕	
S56V1	⊕					⊕	⊕	

Napomene:
- kod varijante razmještaja V7 ova tablica bi se razlikovala u tome što bi umjesto redukcije (red.) pisala multiplikacija (mul.) i obrnuto

Iz Tab. 4.3.4 je vidljivo:

- koje varijante pretvarača neovisno o idealnim momentnim omjerima omogućuju redukciju (multiplikaciju) u oba stupnja prijenosa koja kod nekih može biti u obije brzine u smjeru vrtnje ulaznog vratila, kod nekih u obje brzine reversivna, a kod nekih u jednoj brzini u smjeru vrtnje ulaznog vratila, a u drugoj protivna tom smjeru vrtnje;
- koje varijante pretvarača u jednoj brzini rade, neovisno o idealnim momentnim omjerima, u reduktorskom režimu, a u drugoj u multiplikatorskom režimu pri čemu kod različitih brzina izlazno vratilo može rotirati u smjeru vrtnje ulaznog vratila ili suprotno od smjera vrtnje ulaznog vratila;
- koje varijante pretvarača ovisno o idealnim momentnim omjerima mijenjaju svoj režim rada u okviru jedne brzine (redukcija ili multiplikacija), a izlazno vratilo im može rotirati u smjeru vrtnje ulaznog vratila ili protivno smjeru vrtnje ulaznog vratila.

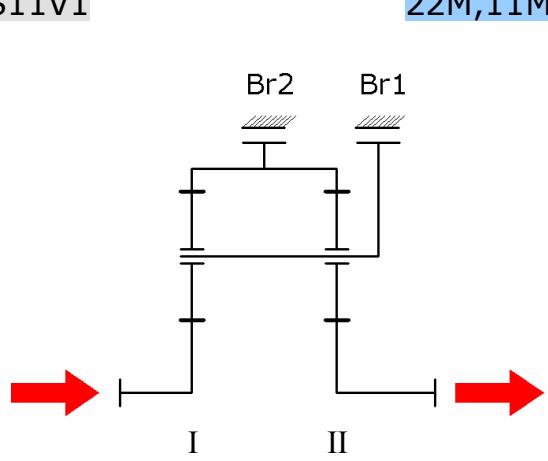
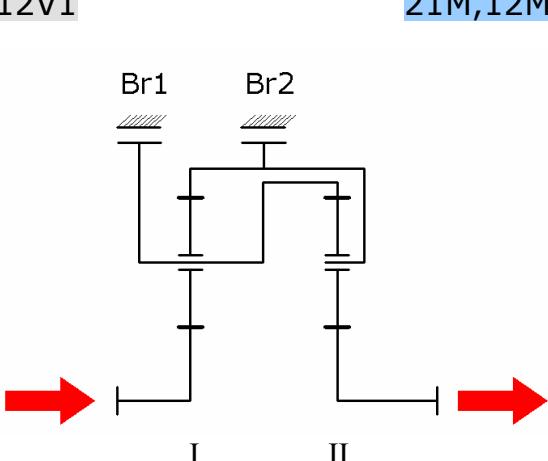
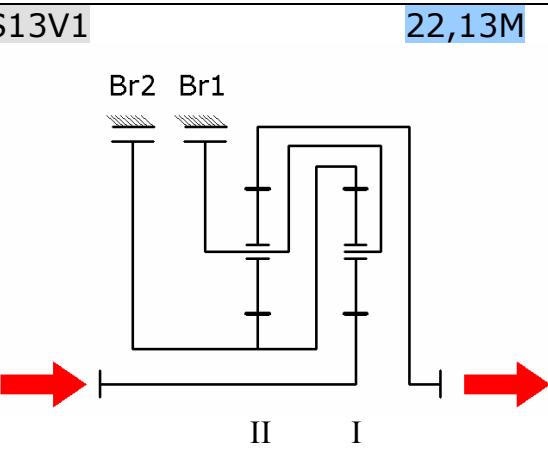
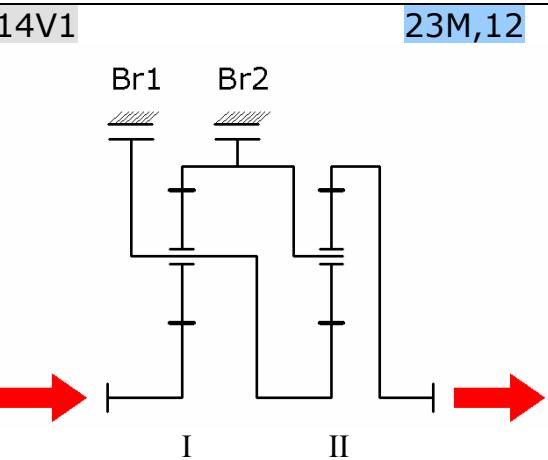
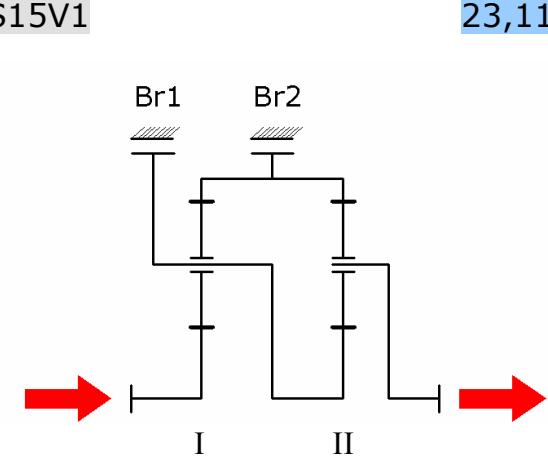
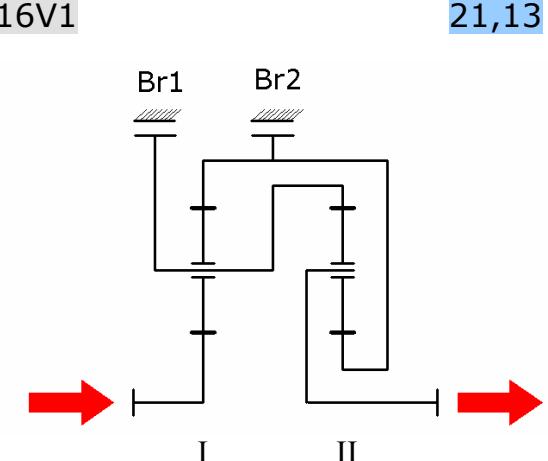
4.3.2 Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih planetnih pretvarača s kočnicama na spojnim vratilima

Razmatranje pretvarača na razini simboličkog prikaza ima svoje prednosti. To je u prvom redu preglednost. Na osnovu jedne simboličke sheme moguće je dobiti više konstrukcijskih koncepcija pogotovo ako se radi o jednobrzinskim pretvaračima [2].

U praksi je najčešće važno da planetni pretvarač ima ulazno i izlazno vratilo na suprotnim stranama. Simbolički prikaz ne daje informaciju o tome da li je to moguće i na koji način je to moguće postići. Iz tog razloga je potrebno kreirati konstrukcijske koncepcije (kinematičke sheme) na osnovu kojih se može započeti konstrukcijsko osnivanje pretvarača. U Tab. 4.3.5 je dat pregled 12 različitih varijanti dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima. Crvenim strelicama su prikazani ulaz u pretvarač i izlaz iz pretvarača. Oznakama Br1 i Br2 su prikazane dvije kočnice kojima se upravlja energetskim tokovima kroz pretvarač i time mijenja stupanj prijenosa odnosno brzinu. Rimskim brojevima I i II su obilježeni prvi i drugi planetni slog. Naime, u simboličkom prikazu je planetni slog I uvijek s lijeve strane, a planetni slog II uvijek s desne strane. U koncepcijskim varijantama to ne mora biti slučaj pa oznake određuju o kojem se planetnom slogu radi. U gornjem lijevom kutu iznad svake koncepcijske sheme se nalazi oznaka varijante pretvarača. U gornjem desnom kutu se nalazi oznaka koja ukazuje na režim rada planetnih slogova pretvarača. Prvi simbol, onaj ispred zareza, informira o režimu rada svakog od dva redno povezana planetna sloga koji rade uz uključenu kočnicu Br1, a drugi simbol, onaj poslije zareza, informira o režimu rada svakog od dva redno povezana planetna sloga koji rade uz uključenu kočnicu Br2 (Tab. 2.6.1). To olakšava konstruktoru uvid u kinematičke mogućnosti pojedine varijante na osnovu poznavanja karakteristika rada zasebnih planetnih slogova i njihove povezanosti.

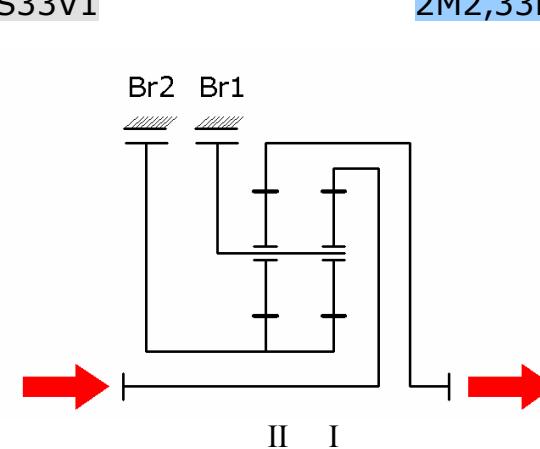
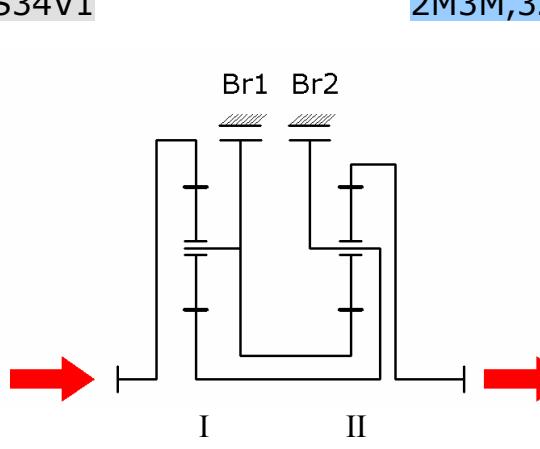
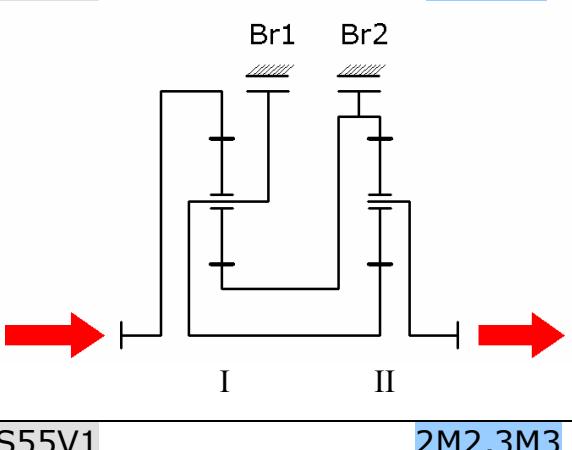
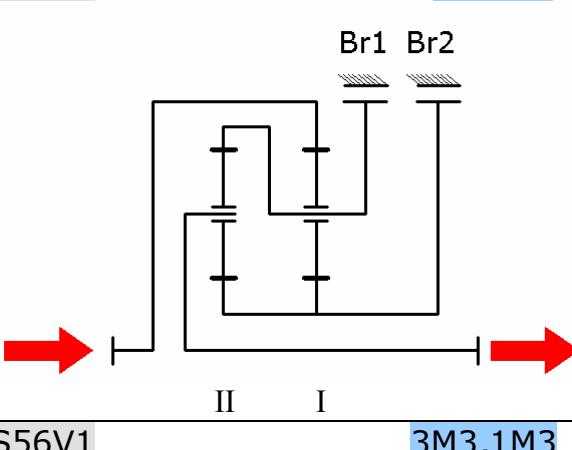
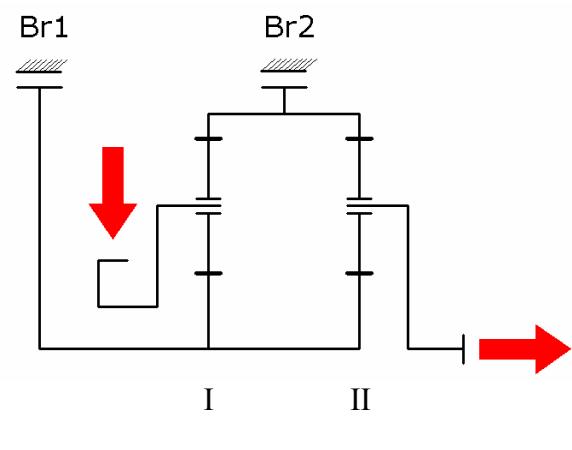
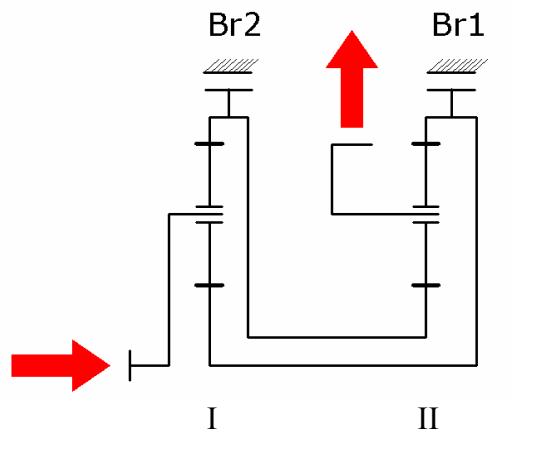
Sheme u Tab. 4.3.5 mogu također poslužiti za osnivanje bilo kojeg od 24 jednobrzinska pretvarača varijante razmještaja V1 odnosno V7. Sve kinematičke sheme pretvarača u Tab. 4.3.5 su sintetizirane vodeći računa o tome da se ulazno i izlazno vratilo nalaze sa suprotnih strana. Ipak za sve varijante to nije bilo moguće postići. Varijante pretvarača S55V1 i S56V1 ne mogu imati ulaz i izlaz sa suprotnih strana što može dovesti u pitanje njihovu praktičnu primjenu.

Tab. 4.3.5 Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih pretvarača s varijantom razmještaja V1

S11V1 	22M,11M	S12V1 	21M,12M
S13V1 	22,13M	S14V1 	23M,12
S15V1 	23,11	S16V1 	21,13

Napomena:
 S – shema, V – varijanta razmještaja
 Br1 – kočnica 1, Br2 – kočnica 2

Tab. 4.3.5 (nastavak) Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih pretvarača s varijantom razmještaja V1

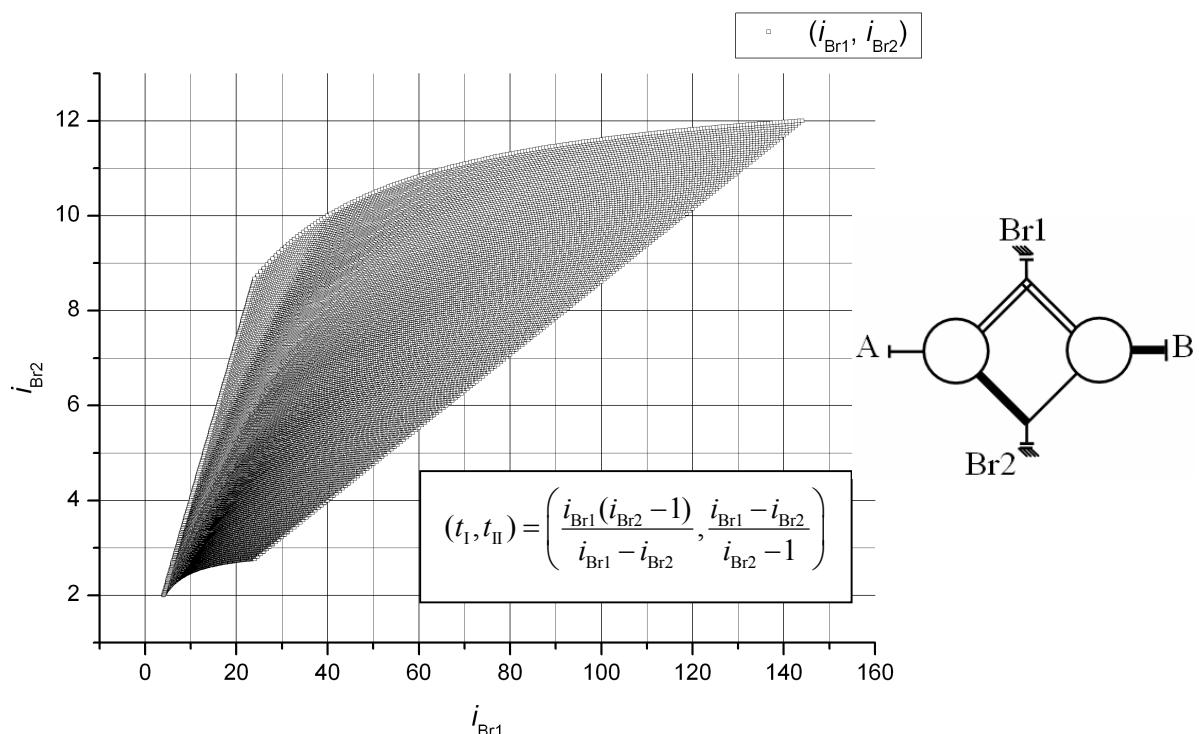
S33V1 	2M2,33M	S34V1 	2M3,32
S35V1 	2M3,31	S36V1 	2M1,22
S55V1 	2M2,3M3	S56V1 	3M3,1M3
<p>Napomena:</p> <p>S – shema, V – varijanta razmještaja</p> <p>Br1 – kočnica 1, Br2 – kočnica 2</p>			

4.3.3 Mjenjačke mogućnosti i skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima

4.3.3.1 Mjenjačke mogućnosti dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima

Kod ove varijante razmještaja mjenjačke mogućnosti se znatno razlikuju od sheme do sheme. Analiza mjenjačkih mogućnosti pokazuje da se između pretvarača ovakvog rasporeda kočnica može pronaći za praksu vrlo zanimljive varijante. Mjenjačke mogućnosti su i kod ovih pretvarača prikazane grafički. U nastavku su istaknute neke varijante pretvarača koje mogu biti vrlo korisne u praksi. I ovdje se podrazumijeva da svaki planetni slog ima u svom sastavu tri satelita te da se idealni momentni omjeri planetnih slogova kreću u intervalu od 2 do 12.

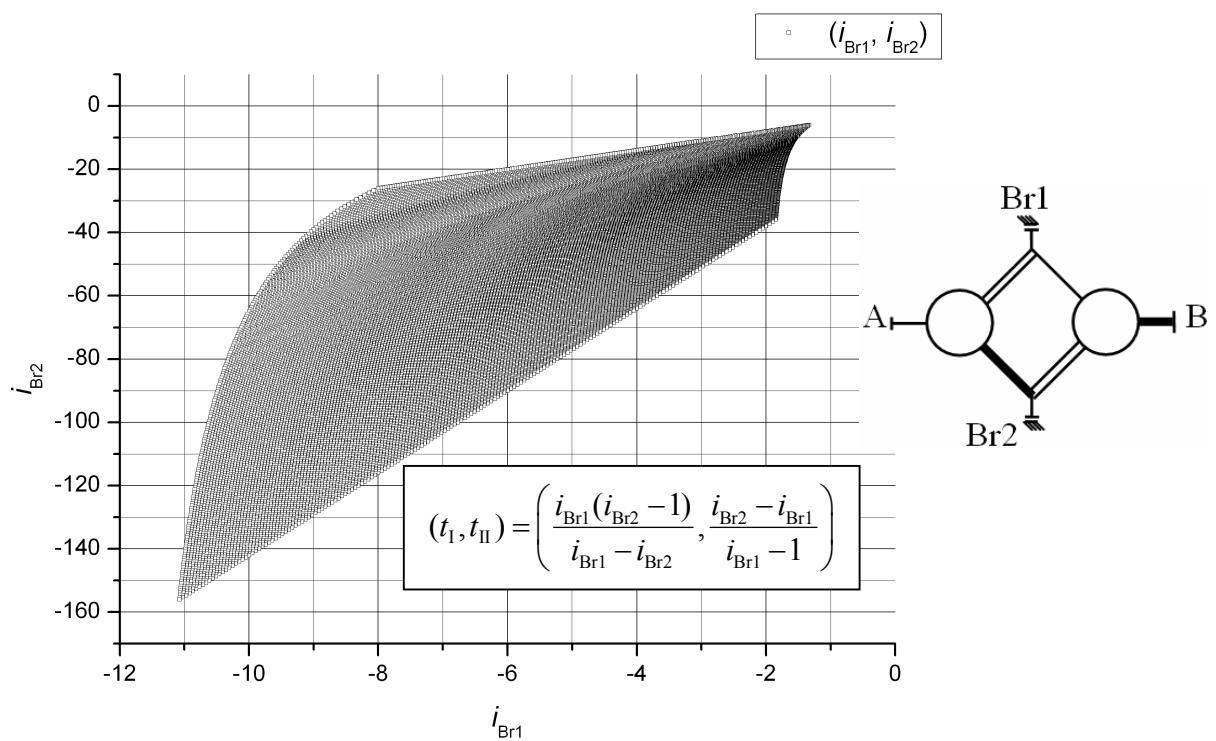
Na sl. 4.3.4. su grafički prikazane mogućnosti varijante S13V1. Na apscisi se nalaze prijenosni omjeri koji se mogu realizirati s uključenom kočnicom Br1, a na ordinati prijenosni omjeri koji se mogu realizirati s uključenom kočnicom Br2. Zatamnjeno područje sadrži uređene parove prijenosnih omjera koji se mogu ostvariti pomoću ove strukture. Grafu je pridružen i izraz za određivanje uređenog para idealnih momentnih omjera koji odgovaraju traženim prijenosnim omjerima. Simbolički prikaz pretvarača čitatelju olakšava vizualizaciju koncepcije pretvarača. Sa slovom A je označeno ulazno, a sa B izlazno vratilo.



Sl. 4.3.4 Mjenjačke mogućnosti varijante S13V1

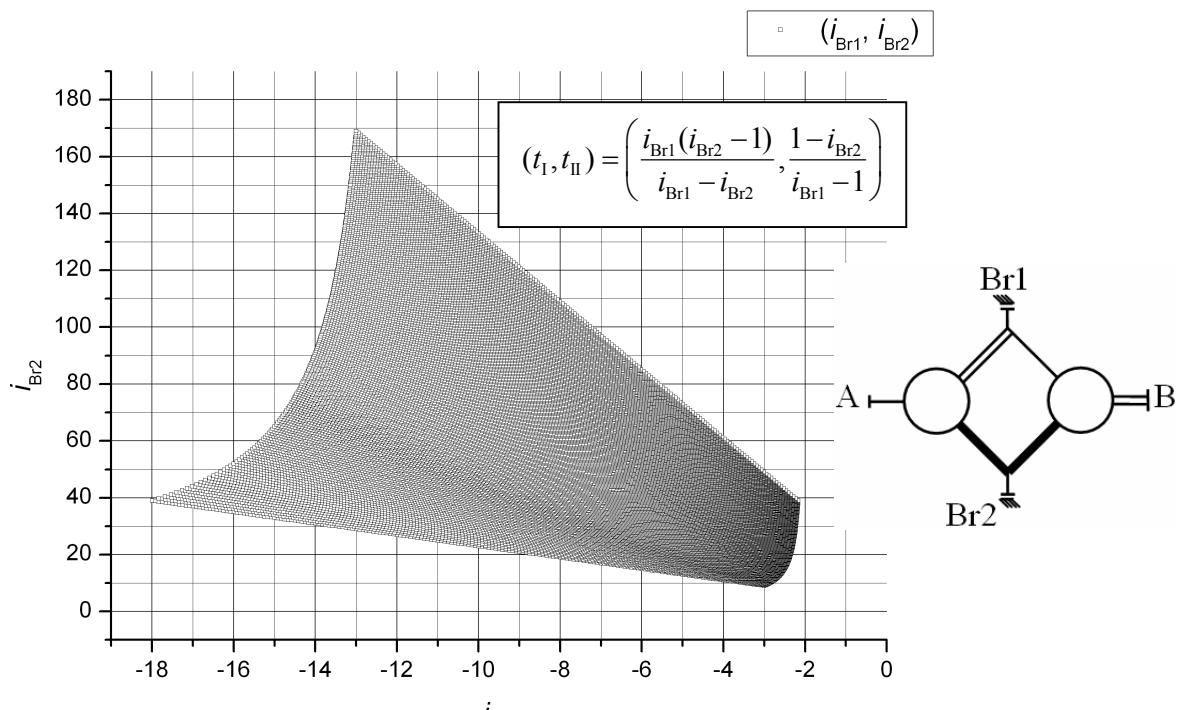
Varijanta S13V1 osigurava relativno široke mjenjačke mogućnosti. Izlazno vratilo u obje brzine rotira u istom smjeru kao i ulazno vratilo.

Na sl. 4.3.5 su prikazane mjenjačke mogućnosti pretvarača S14V1. Kod njega je vidljiv reversivni prijenos u obije brzine pa se takav pretvarač može primijeniti u slučajevima kada se traži rotacija izlaznog vratila u suprotnom smjeru od smjera pogona (ulaznog vratila).

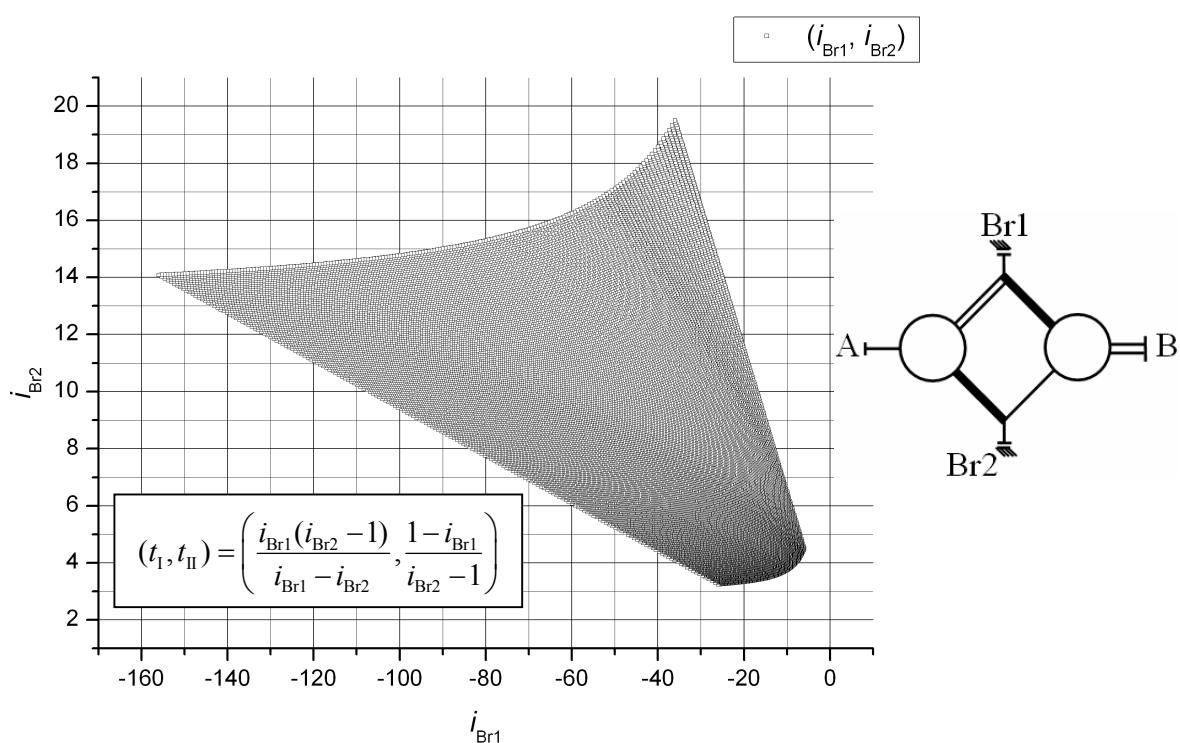


Sl. 4.3.5 Mjenjačke mogućnosti varijante S14V1

Na sl. 4.3.6 su prikazane mjenjačke mogućnosti pretvarača S15V1. Kod njega je vidljiv reversivni rad s uključenom kočnicom Br1. Ovakav pretvarač se može primijeniti kod potrebe za sporijom rotacijom izlaznog vratila u smjeru vrtnje ulaznog vratila i bržom reversivnom rotacijom izlaznog vratila. Ukoliko je potrebna brža rotacija izlaznog vratila u smjeru vrtnje ulaznog vratila i sporija reversivna rotacija može se primijeniti varijanta S16V1. Mjenjačke mogućnosti varijante S16V1 su prikazane na sl. 4.3.7.



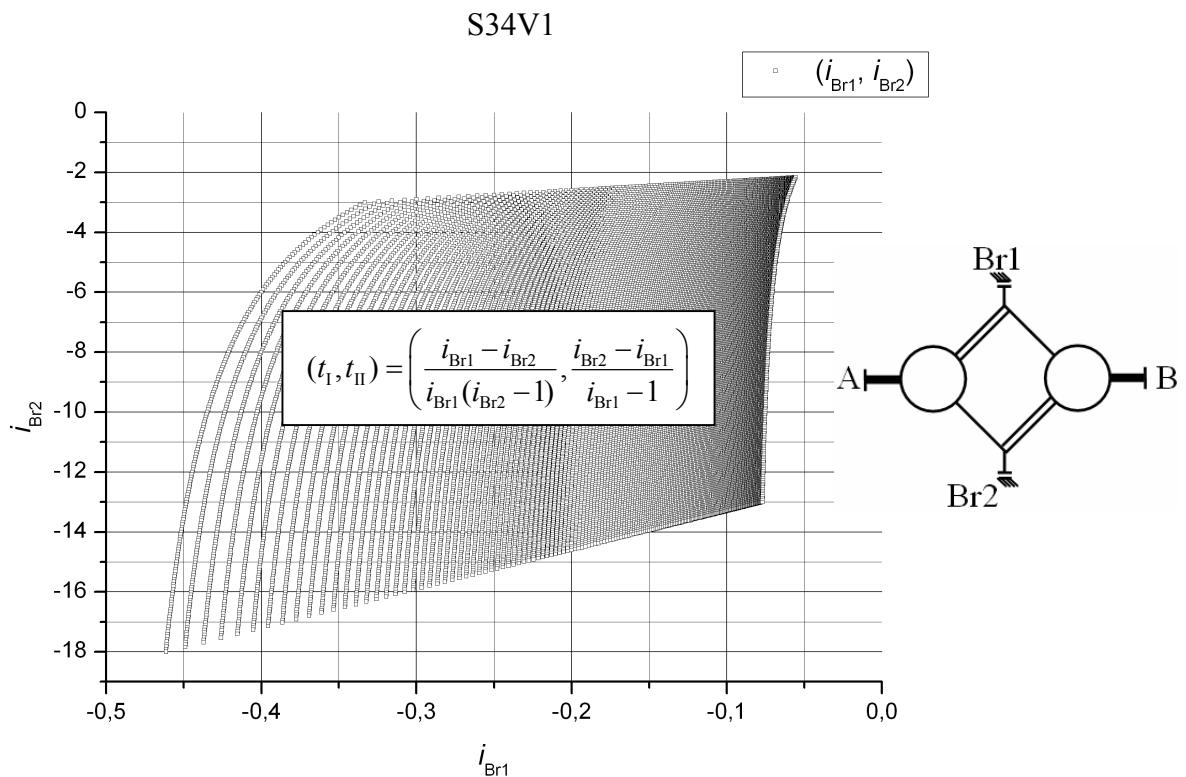
Sl. 4.3.6 Mjenjačke mogućnosti varijante S15V1



Sl. 4.3.7 Mjenjačke mogućnosti varijante S16V1

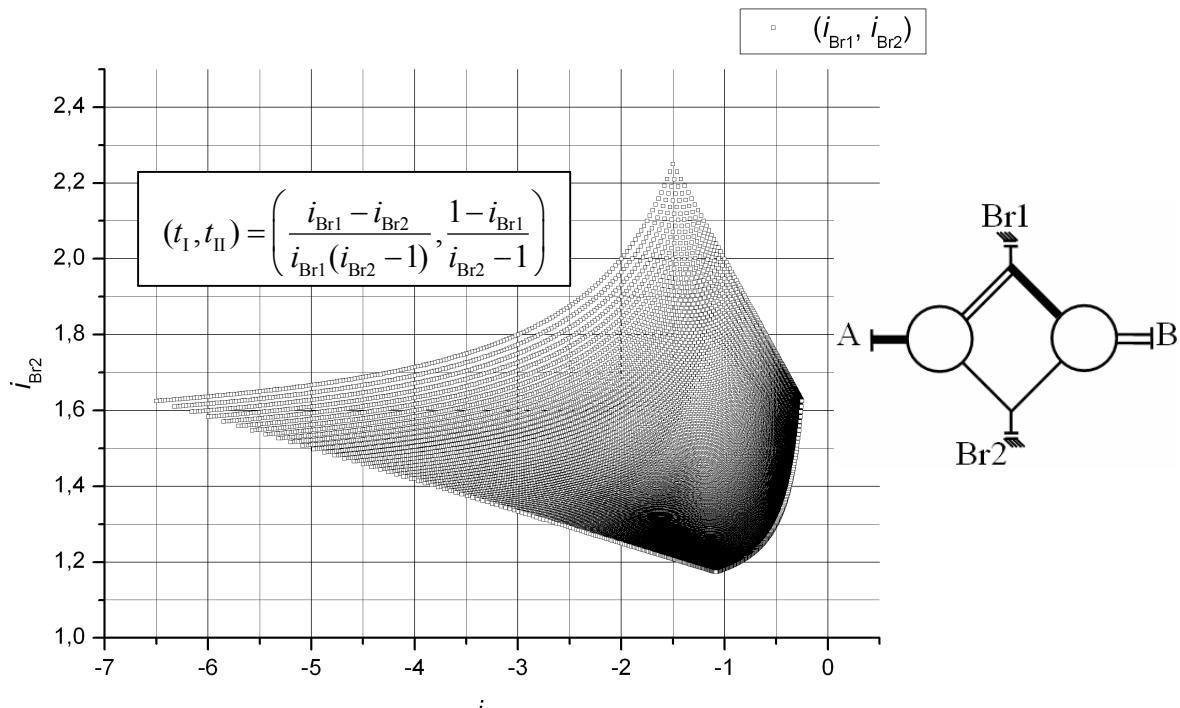
Ponekad je moguće da se traži pretvarač koji u jednoj brzini radi kao reduktor, a u drugoj kao multiplikator. Takvu mogućnost nudi primjerice varijanta S34V1. Kod dotične varijante se u obje brzine izlazno vratilo okreće u suprotnom smjeru od ulaznog vratila. Uz aktiviranu kočnicu Br1 pretvarač radi kao multiplikator, a uz aktiviranu kočnicu Br2 pretvarač radi kao reduktor.

Na sl. 4.3.8 je dat graf koji prikazuje mjenjačke mogućnosti varijante S34V1.



Sl. 4.3.8 Mjenjačke mogućnosti varijante S34V1

U praksi postoje slučajevi kod kojih se zahtjeva promjena smjera uz jednaku apsolutnu vrijednost prijenosnog omjera. Ovakav slučaj je moguć primjerice u brodogradnji gdje se može zahtijevati mogućnost prekretanja propelerskog vratila. Na sl. 4.3.9 su prikazane kinematičke mogućnosti pretvarača koji može uz određene idealne momentne omjere raditi kao prekretni pretvarač. Taj pretvarač ima oznaku S36V1. Primjerice, ako se traže prijenosni omjeri $i_{Br1,2} \approx \pm 1,8$ tada ovaj pretvarač može biti dobro rješenje. Ovakve prijenosne omjere će osigurati uređeni par idealnih momentnih omjera (2,5; 3,5).



Sl. 4.3.9 Mjenjačke mogućnosti varijante S36V1

Ostale varijante pretvarača čije mogućnosti nisu prikazane ovdje, nego u Prilogu 2, mogu biti također prikladne za neke primjene i važno ih je razmotriti.

4.3.3.2 Skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima

Na osnovu Tab. 4.3.1 i izraza (4.2.1) odnosno (4.2.2) su uz primjenu računala dobivene ekstremne vrijednosti skokova prijenosa svih shema s varijantom razmještaja V1. Sheme s varijantom razmještaja V7 imaju skokove prijenosa jednake kao kod varijante razmještaja V1. U Tab. 4.3.6 i Tab. 4.3.7 su navedene ekstremne vrijednosti skokova prijenosa svih shema varijante razmještaja V1. U Tab. 4.3.6 su uz navedene ekstremne vrijednosti upisane i odgovarajuće vrijednosti idealnih momentnih omjera planetnih slogova, a u Tab. 4.3.7 su navedene vrijednosti pripadnih prijenosnih omjera mjenjačkog pretvarača.

Tab. 4.3.6 Ekstremni skokovi prijenosa i njihovi odgovarajući idealni momentni omjeri kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima

Varijanta pretvarača	S_p	t_I	t_{II}
		max	min
S11V1	1,38461	12 (2)	2 (12)
	1	$t_{II} = t_I$	
S12V1	2,25 1,17361	2 12	2 12
S13V1	12 2	12 2	12 2
S14V1	19,5 3,25	2 12	12 12
S15V1	-18 -2,16667	2 12	12 2
S16V1	-11,0769 -1,13333	12 2	12 2
S33V1	4,33333	2 (12)	12 (2)
	1	$t_{II} = t_I$	
S34V1	169 9	12 2	12 2
S35V1	-156 -6	12 2	12 2
S36V1	-6,5 -1	12	2
		$t_{II} = t_I + 1$	
S55V1	6	12 (2)	2 (12)
	1	$t_{II} = t_I$	
S56V1	144 4	12 2	12 2
Napomena: Sjenčano označena polja pripadaju varijantama pretvarača koje mogu ostvariti visoke skokove prijenosa ili pak prekretni rad			

Tab. 4.3.7 Ekstremni skokovi prijenosa i njihovi odgovarajući prijenosni omjeri kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima

Varijanta pretvarača	S_p	i_{Br1}	i_{Br2}
	max min		
S11V1	1,38461	6 (1,1666)	4,333 (0,231)
	1	1	1
S12V1	2,25	-0,6667	-1,5
	1,17361	-0,9231	-1,0833
S13V1	12	144	12
	2	4	2
S14V1	19,5	-1,8462	-36
	3,25	-8	-26
S15V1	-18	-2,1667	39
	-2,16667	-18	39
S16V1	-11,0769	-156	14,0833
	-1,13333	-6	4,5
S33V1	4,33333	6 (0,166)	1,385 (0,722)
	1	1	1
S34V1	169	-0,0769	-13
	9	-0,3333	-3
S35V1	-156	-0,0903	14,0833
	-6	-0,75	4,5
S36V1	-6,5	-0,25	1,625
	-1	$i_{Br1} = -i_{Br2}$	
S55V1	6	1,384 (0,722)	0,231 (4,333)
	1	1	1
S56V1	144	12	0,0833
	4	2	0,5

Napomena: Sjenčano označena polja pripadaju varijantama pretvarača koje mogu ostvariti visoke skokove prijenosa ili pak prekretni rad

Na osnovu analize Tab. 4.3.6 i Tab. 4.3.7 su identificirane tri varijante koje omogućuju ostvarenje velikog raspona skoka prijenosa kao i relativno velike vrijednosti skoka prijenosa. To su varijante S34V1, S35V1 i S56V1. Uz njih se ističe i varijanta S36V1 koja uz uvjet $t_{II} = t_1 + 1$ može raditi kao prekretač. Navedene četiri varijante su u tablicama označene sjenčano.

4.4 Dvobrzinski planetni pretvarači s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

U ovom poglavlju su obrađene:

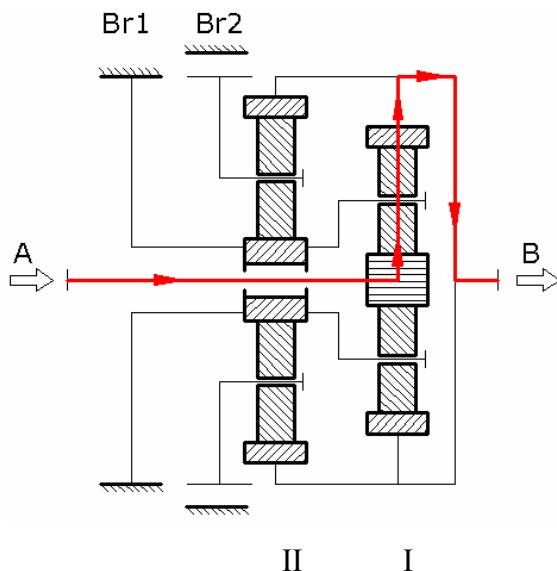
- kinematičke karakteristike pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu
- konstrukcijske koncepcije (kinematičke sheme) pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu
- mjenjačke mogućnosti i skokovi prijenosa pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

4.4.1 Kinematičke karakteristike pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

Ako se kod planetnog pretvarača s dva spojna i četiri vanjska vratila kočnice rasporede tako da se jedna montira na spojno vratilo, a druga na zasebno vratilo dobiva se mjenjačka struktura koja omogućuje ostvarenje dviju brzina.

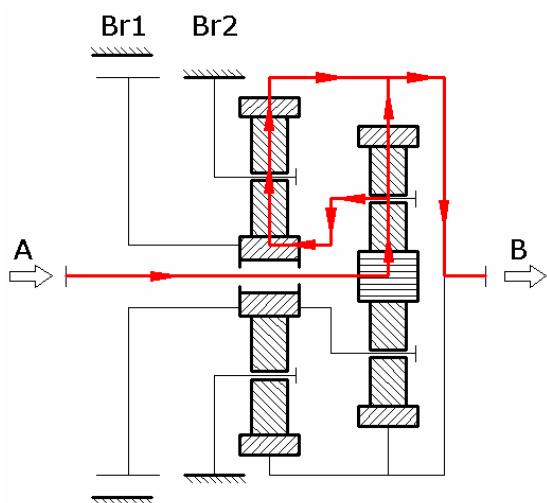
Koncepcijska shema jednog dvobrzinskog pretvarača s tako raspoređenim kočnicama je prikazana na sl. 4.4.1. Pretvarač ima dva planetna sloga koja su međusobno povezana s dva spojna vratila. Jedno spojno vratilo čine povezana vratila dvaju vijenaca i to je spojno vratilo spojeno s radnim strojem. Drugo spojno vratilo čine povezana vratila vodila prvog planetnog sloga (na sl. 4.4.1 smještenog desno) i sunčanog zupčanika drugog planetnog sloga na sl. 4.4.1 smještenog lijevo. To vratilo je moguće kočiti kočnicom Br1. Zasebna vratila su vratilo sunčanog zupčanika prvog planetnog sloga (desni planetni slog na sl. 4.4.1) i vratilo vodila drugog planetnog sloga (lijevi planetni slog na sl. 4.4.1). Na vratilo sunčanog zupčanika prvog planetnog sloga je spojen pogonski stroj. Na vratilo vodila drugog planetnog sloga je montirana kočnica Br2 koja se može po potrebi uključivati i zakočiti vratilo. Ukoliko je uključena kočnica Br1 zakočeno je jedno spojno vratilo (sl. 4.4.1). U tom slučaju radi samo prvi (desni) planetni slog i to kao standardni pretvarač jer je zakočeno vratilo vodila. Iz razloga što je vodilo sumarni član, pretvarač u toj brzini ima negativan prijenosni omjer. Uz rad pretvarača s kočnicom Br1 drugi planetni slog nema reaktivnog člana pa njegovi zupčanici rotiraju u praznom hodu. Upravo zbog toga što radi samo jedan planetni slog, kočnica kojom se aktivira to gibanje ima oznaku Br1 (jedinica u oznaci informira o tome da radi samo jedan planetni slog).

Ova simbolika u označavanju će biti primijenjena na svim shemama varijanti pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu .



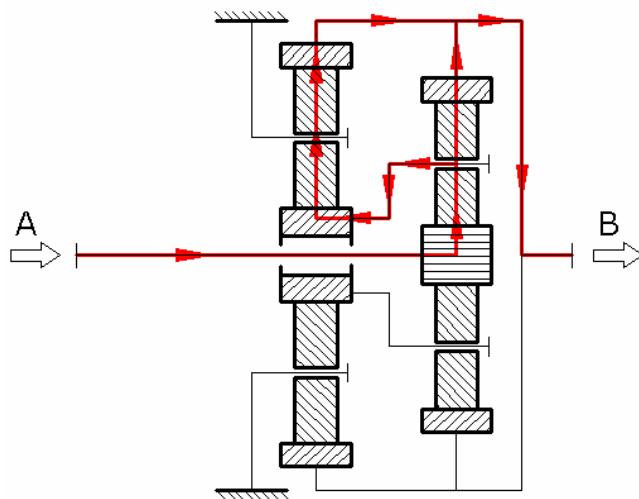
Sl. 4.4.1 Koncepcijska shema dvobrzinskog planetnog pretvarača S15V2 s prikazanim energetskim tokom (rad s aktivnom kočnicom Br1)

Ukoliko je uključena kočnica Br2 tada je zakočeno vratilo vodila drugog planetnog sloga (lijevi planetni slog) (sl. 4.4.2). U tom slučaju aktivno rade oba planetna sloga. Prvi (desni) planetni slog radi u trovratilnom režimu rada odnosno s dva stupnja slobode. To znači da rotiraju svi njegovi članovi. Drugi planetni slog radi u dvovratilnom režimu rada odnosno s jednim stupnjem slobode. Na sl. 4.4.2 je prikazana koncepcijska shema rada ovog složenog planetnog pretvarača s označenim aktivnim energetskim tokovima. Iz sl. 4.4.2 je vidljivo da se energetski tok razdvaja u dvije grane. Jedna grana je duža, a druga kraća. Analiza energetskih tokova je na razini simbola za sve različite varijante ovakvih pretvarača (osim inverznih varijanti) izvršena u Prilogu 1.



Sl. 4.4.2 Koncepcijska shema dvobrzinskog planetnog pretvarača S15V2 s prikazanim energetskim tokom (rad s aktivnom kočnicom Br2)

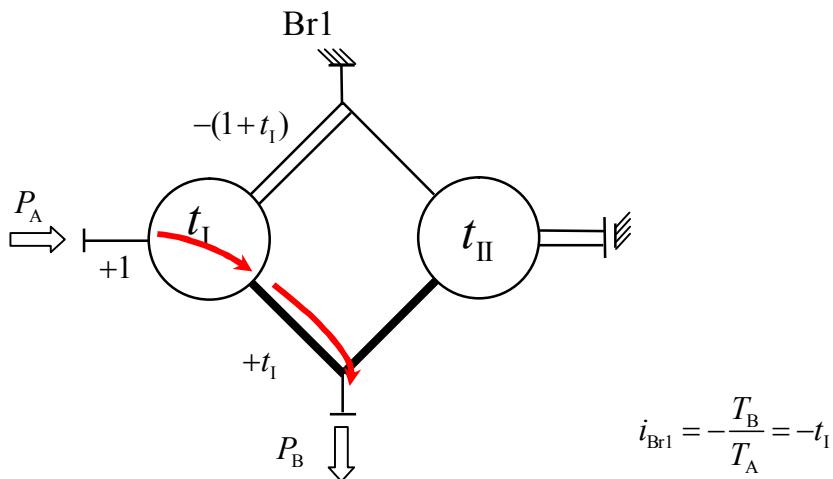
Ako složeni pretvarač ima dva spojna i tri vanjska vratila (sl. 4.4.3) onda može imati samo jedan stupanj prijenosa. Ukoliko takav jednobrzinski pretvarač ima stalni reaktivni član na zasebnom vratilu tada se u radu okreću oba spojna vratila i oba planetna sloga aktivno rade.



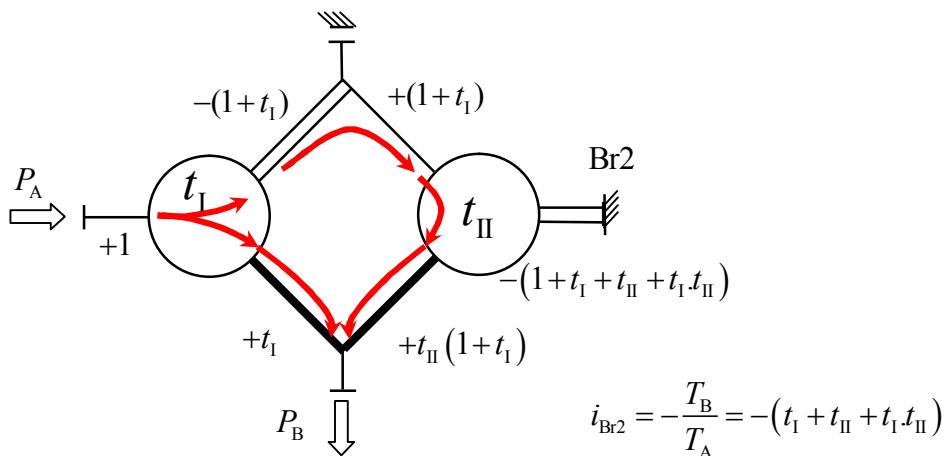
Sl. 4.4.3 Koncepcijska shema s prikazanim energetskim tokom jednobrzinskog planetnog pretvarača S15V2Br2

Kako bi se dobio uvid u energetske tokove planetnog pretvarača i kako bi se dobile funkcije prijenosnih omjera koje su neophodne za analizu i eventualnu sintezu pretvarača potrebno je izvršiti analizu momenata svih varijanti planetnih pretvarača (strukturnu analizu). U analizi se pošlo od prikaza strukture pretvarača pomoću modificiranog Wolf-ovog simbola [57]. U skladu s opisanom metodikom u poglavlju 3.4 određeni su relativni momentni na vratilima, energetski tokovi i funkcije prijenosnih omjera. Cjelokupna sustavna analiza prikazana je u Prilogu 1. Ovdje je kao primjer prikazan dio strukturne analize varijante S15V2 i to za obje brzine.

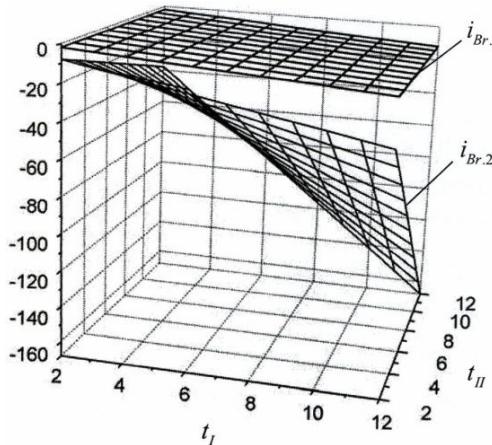
Na sl. 4.4.4 je na simbolu varijante između ostalog prikazan energetski tok kod uključene kočnice Br1. Uz sliku je navedena i funkcija prijenosnog omjera.

15V2Br1**Sl. 4.4.4 Struktura analiza varijante pretvarača S15V2 s uključenom kočnicom Br1**

Na sl. 4.4.5 je na simbolu varijante prikazan energetski tok kod uključene kočnice Br2. Energetski tok se razdvaja u dvije grane. Uz sliku je navedena i funkcija prijenosnog omjera.

15V2Br2**Sl. 4.4.5 Struktura analiza varijante pretvarača S15V2 s uključenom kočnicom Br2**

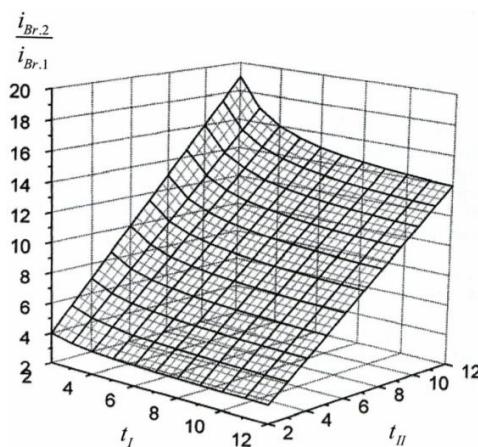
Na osnovu dobivenih funkcija prijenosnih omjera varijante S15V2, pomoću računala je generiran graf (sl. 4.4.6) koji pokazuje ovisnost prijenosnih omjera obiju brzina o idealnim momentnim omjerima. On na pregledan način informira o kinematičkim mogućnostima varijante pretvarača.



Sl. 4.4.6 Grafički prikaz kinematičkih mogućnosti pretvarača S15V2

Iz grafičkog prikaza se vidi da se radi o pretvaraču kod koga se u obje brzine izlazno vratilo okreće u suprotnom smjeru od ulaznog vratila. Brzina Br2 (uključena kočnica Br2) u cijeloj domeni idealnih momentnih omjera ima veću vrijednost prijenosnog omjera. Širok raspon vrijednosti prijenosnih omjera brzine Br2 ukazuje na prikladnost sheme za širu praktičnu uporabu.

Ponekad je zanimljiv odnos prijenosnih omjera tj. skok prijenosa. Na sl. 4.4.7 je prikazan odnos prijenosnih omjera ovisno o idealnim momentnim omjerima.



Sl. 4.4.7 Odnos prijenosnih omjera kod pretvarača S15V2

Ovakve grafove je na osnovu poznatih funkcija prijenosnih omjera za obije brzine moguće generirati za sve varijante pretvarača.

Aktivni energetski tok kroz planetni pretvarač se ne grana kod svih varijanti. Kod nekih je varijanti pored aktivne prisutna i jalova snaga. O tome će više riječi biti u poglavljju 5.

U Prilogu 1 je prikazan postupak pomoću kojeg se došlo do funkcija kinematičkih prijenosnih omjera za sve različite varijante pretvarača ove skupine (osim inverznih varijanti). Izvedeni analitički izrazi kinematičkih prijenosnih omjera za svaku brzinu svake navedene varijante su dati u Tab. 4.4.1. Budući da je za praktične potrebe redukcija važnija od množenja, u Tab. 4.4.1 su redom navedene oznake varijanti kod kojih se pojavljuje redukcija u brzini Br2 (s aktivnom kočnicom Br2). U Tab. 4.4.1 su navedene minimalna i maksimalna vrijednost prijenosnog omjera koje može ostvariti varijanta kada radi s kočnicom Br1 odnosno Br2.

Ovi izrazi su osnova za analizu i sintezu razmatranih dvobrzinskih pretvarača.

Tab. 4.4.1 Funkcije prijenosnih omjera i ekstremne vrijednosti prijenosnih omjera

Varijanta pretvarača	i_{Br1}	Vrijednost	i_{Br2}	Vrijednost
		i_{Br1}		i_{Br2}
		max		max
S11V4	$-\frac{1}{t_{II}}$	-0,0833	$\frac{1+t_I}{t_I-t_{II}}$	1,3 do ∞ ($t_I \geq t_{II}$)
		-0,5		- ∞ do -0,3 ($t_I \leq t_{II}$)
S11V5	$\frac{1}{t_{II}+1}$	0,333	$\frac{t_I}{t_I-t_{II}}$	1,2 do ∞ ($t_I \geq t_{II}$)
		0,0769		- ∞ do -0,2 ($t_I \leq t_{II}$)
S12V2	$-t_I$	-2	$+1 + \frac{1+t_I}{t_{II}}$	7,5
		-12		1,25
S12V3	$t_I + 1$	13	$+1 + \frac{t_I}{1+t_{II}}$	5
		3		1,15
S13V2	$-t_I$	-2	$-\frac{t_I t_{II} - 1}{1 + t_{II}}$	-1
		-12		-11
S13V3	$1 + t_I$	13	$-(t_I t_{II} - 1)$	-3
		3		-143
S13V4	$-t_{II}$	-2	$+\frac{t_{II} + t_I t_{II}}{t_I t_{II} - 1}$	2
		-12		1,09
S13V5	$\frac{t_{II}}{1 + t_{II}}$	0,923	$+\frac{t_I t_{II}}{t_I t_{II} - 1}$	1,33
		0,666		1,007
S14V2	$-t_I$	-2	$1 + t_{II} + t_I t_{II}$	157
		-12		7
S14V3	$1 + t_I$	13	$1 + \frac{t_I t_{II}}{1 + t_{II}}$	12,07
		3		2,33
S14V10	$\frac{1 + t_{II}}{t_{II}}$	1,5	$1 + \frac{1}{t_{II} + t_I t_{II}}$	1,16
		1,083		1,006

Tab. 4.4.1 (nastavak) Funkcije prijenosnih omjera i ekstremne vrijednosti prijenosnih omjera

Varijanta pretvarača	i_{Br1}	Vrijednost i_{Br1}	i_{Br2}	Vrijednost i_{Br2}
		max		max
		min		min
S14V11	$-\frac{1}{t_{II}}$	-0,0833 -0,5	$1 + \frac{1+t_{II}}{t_I t_{II}}$	1,75 1,09
S15V2	$-t_I$	-2 -12	$-(t_I + t_{II} + t_I t_{II})$	-8 -168
S15V3	$1+t_I$	13 3	$1+t_I + \frac{t_I}{t_{II}}$	19 3,16
S15V4	$\frac{1+t_{II}}{t_{II}}$	1,5 1,083	$1 + \frac{1}{t_I + t_{II} + t_I t_{II}}$	1,12 1,0059
S15V11	$\frac{1}{1+t_{II}}$	0,333 0,0769	$1 + \frac{t_{II}}{t_I + t_I t_{II}}$	1,46 1,05
S16V2	$-t_I$	-2 -12	$-(t_I + \frac{1+t_I}{t_{II}})$	-2,25 -18,5
S16V3	$1+t_I$	13 3	$1+t_I + t_I t_{II}$	157 7
S16V4	$1+t_{II}$	13 3	$1 + \frac{t_{II}}{1+t_I + t_I t_{II}}$	1,44 1,05
S16V11	$\frac{t_{II}}{1+t_{II}}$	0,923 0,666	$1 + \frac{1}{t_I + t_I t_{II}}$	1,16 1
S33V4	$-t_{II}$	-2 -12	$\frac{t_{II}(1+t_I)}{t_{II}-t_I}$	3,6 do ∞ ($t_I \geq t_{II}$) - ∞ do -2,6 ($t_I \leq t_{II}$)
S33V5(11)	$\frac{1+t_{II}}{t_{II}}$	1,5 1,083	$\frac{t_{II}}{t_{II}-t_I}$	1,2 do ∞ ($t_I \geq t_{II}$) - ∞ do -0,2 ($t_I \leq t_{II}$)

Tab. 4.4.1 (nastavak) Funkcije prijenosnih omjera i ekstremne vrijednosti prijenosnih omjera

Varijanta pretvarača	i_{Br1}	Vrijednost i_{Br1}	i_{Br2}	Vrijednost i_{Br2}
		max		max
		min		min
S34V2	$-\frac{1}{t_I}$	-0,0833 -0,5	$1 + t_{II} + \frac{t_{II}}{t_I}$	19 3,16
S34V3	$\frac{1+t_I}{t_I}$	1,5 1,083	$1 + \frac{t_{II}}{t_I + t_I t_{II}}$	1,46 1,05
S35V2	$-\frac{1}{t_I}$	-0,0833 -0,5	$-\left(t_{II} + \frac{1+t_{II}}{t_I} \right)$	-2,25 -18,5
S35V3	$\frac{1+t_I}{t_I}$	1,5 1,083	$1 + \frac{1+t_{II}}{t_I t_{II}}$	1,75 1,09
S35V4	$\frac{1+t_{II}}{t_{II}}$	1,5 1,083	$1 + \frac{t_I}{1 + t_{II} + t_I t_{II}}$	1,44 1,054
S35V11	$\frac{1}{1+t_{II}}$	0,333 0,0769	$1 + \frac{t_I t_{II}}{1 + t_{II}}$	12,08 2,33
S36V3	$\frac{1+t_I}{t_I}$	1,5 1,083	$1 + \frac{1+t_{II}}{t_I}$	7,5 1,25
S36V4	$1+t_{II}$	13 3	$1 + \frac{t_I t_{II}}{1 + t_I + t_{II}}$	6,76 1,8
S36V8	$-t_I$	-2 -12	$-\frac{t_I t_{II}}{1 + t_I + t_{II}}$	-0,8 -5,76
36V11	$\frac{t_{II}}{1+t_{II}}$	0,923 0,666	$1 + \frac{t_I}{1 + t_{II}}$	5 1,15

Tab. 4.4.1 (nastavak) Funkcije prijenosnih omjera i ekstremne vrijednosti prijenosnih omjera

Varijanta pretvarača	i_{Br1}	Vrijednost i_{Br1}	i_{Br2}	Vrijednost i_{Br2}
		max		max
		min		min
S55V4	$\frac{1+t_{II}}{t_{II}}$	1,5 1,083	$\frac{1+t_{II}}{t_{II}-t_I}$	1,3 do ∞ ($t_I \geq t_{II}$) - ∞ do -0,3 ($t_I \leq t_{II}$)
S55V5	$1+t_{II}$	13 3	$\frac{t_I+t_I t_{II}}{t_{II}-t_I}$	3,6 do ∞ ($t_I \geq t_{II}$) - ∞ do -2,6 ($t_I \leq t_{II}$)
S56V3	$\frac{1}{1+t_I}$	0,333 0,0769	$-\frac{t_I t_{II} - 1}{1+t_I}$	-1 -11
S56V5	$\frac{1+t_{II}}{t_{II}}$	1,5 1,083	$+\frac{t_I + t_I t_{II}}{t_I t_{II} - 1}$	2 1,09

Na osnovu Tab. 4.4.1 se može napraviti klasifikacija pretvarača prema brzini Br1 (uključena kočnica Br1). U brzini Br1 kod bilo koje varijante pretvarača ove skupine radi samo jedan planetni slog i on može raditi u jednom od 6 režima rada (1, 2, 3, 1M, 2M, 3M) (Tab. 2.9.1). U Tab. 4.4.2 su varijante pretvarača ove skupine grupirane prema režimu brzine Br1.

Tab. 4.4.2 Klasifikacija prema režimu rada u brzini Br1 varijanti pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu koje u brzini Br2 rade pretežno kao reduktori

1	2	3	1M	2M	3M
S12V3	S12V2	S14V10	S11V5	S11V4	S13V5
S13V3	S13V2	S15V4	S15V11	S14V11	S16V11
S14V3	S13V4	S33V5	S35V11	S34V2	S36V11
S15V3	S14V2	S34V3	S56V3	S35V2	
S16V3	S15V2	S35V3			
S16V4	S16V2	S35V4			
S36V4	S33V4	S36V3			
S55V5	S36V8	S55V4 S56V5			

Napomena: U prvom redku tablice je navedeno šest režima u kojima može raditi planetni slog (Tab. 2.9.1)

Iz Tab. 4.4.2 se vidi da uz reduktorski rad u brzini Br2 najviše varijanti ima reduktorski rad i u brzini Br1. To je 25 varijanti pretvarača iz prva tri stupca tablice koje u brzini Br1 imaju aktivan planetni slog u režimu 1, 2 ili 3. Varijante pretvarača u četvrtom, petom i šestom stupcu u brzini Br1 imaju aktivan planetni slog u režimu multiplikacije 1M, 2M ili 3M.

Analiza funkcija prijenosnih omjera brzine Br2 (uključena kočnica Br2) pokazuje da postoje razni oblici funkcija koji omogućuju ostvarenje od vrlo uskog do vrlo širokog raspona prijenosnih omjera u intervalu ostvarivih idealnih momentnih omjera t_I i t_{II} . Širi intervali ostvarivih prijenosnih omjera često znače veći stupanj univerzalnosti primjene varijante pretvarača s aspekta kinematike.

Neke osnovne kinematičke karakteristike (redukcija, multiplikacija, odnos smjera rotacije izlaznog i ulaznog vratila) svih pretvarača ove skupine koji u brzini Br2 rade pretežno kao reduktori su pregledno prikazane u Tab. 4.4.3.

Tab. 4.4.3. Mogući režimi rada pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

Oznaka varijante	U brzini Br1:			U brzini Br2:			Izlazno vratilo rotira suprotno od smjera rotacije ulaznog vratila s uključenom kočnicom:	Smjer rotacije izlaznog vratila u brzini Br2 ovisi o odnosu idealnih momentnih omjera
	red.	red. ili mul.	mul.	red.	red. ili mul.	mul.	Br1	Br2
S11V4			⊕		⊕		⊕	⊕
S11V5			⊕		⊕			⊕
S12V2	⊕			⊕			⊕	
S12V3	⊕			⊕				
S13V2	⊕			⊕			⊕	⊕
S13V3	⊕			⊕				⊕
S13V4	⊕			⊕			⊕	
S13V5			⊕	⊕				
S14V2	⊕			⊕			⊕	
S14V3	⊕			⊕				
S14V10	⊕			⊕				
S14V11			⊕	⊕			⊕	
S15V2	⊕			⊕			⊕	⊕
S15V3	⊕			⊕				
S15V4	⊕			⊕				
S15V11			⊕	⊕				
S16V2	⊕			⊕			⊕	⊕
S16V3	⊕			⊕				
S16V4	⊕			⊕				
S16V11			⊕	⊕				
S33V4	⊕				⊕		⊕	⊕
S33V5	⊕				⊕			⊕
S34V2			⊕	⊕			⊕	
S34V3	⊕			⊕				
S35V2			⊕	⊕			⊕	⊕
S35V3	⊕			⊕				
S35V4	⊕			⊕				
S35V11			⊕	⊕				
S36V3	⊕			⊕				
S36V4	⊕			⊕				
S36V8	⊕				⊕		⊕	⊕
S36V11			⊕	⊕				
S55V4	⊕				⊕			⊕
S55V5	⊕				⊕			⊕
S56V3			⊕	⊕			⊕	
S56V5	⊕			⊕				

Napomena:

- kod inverznih varijanti navedenim umjesto redukcije (red.) bi pisala multiplikacija (mul.) i obrnuto

Iz Tab. 4.4.3. se vidi da kod pretvarača sa shemama S11, S33 i S55 režim rada (redukcija, multiplikacija, smjer rotacije izlaznog vratila) u brzini Br2 ovisi i o odnosu idealnih momentnih omjera.

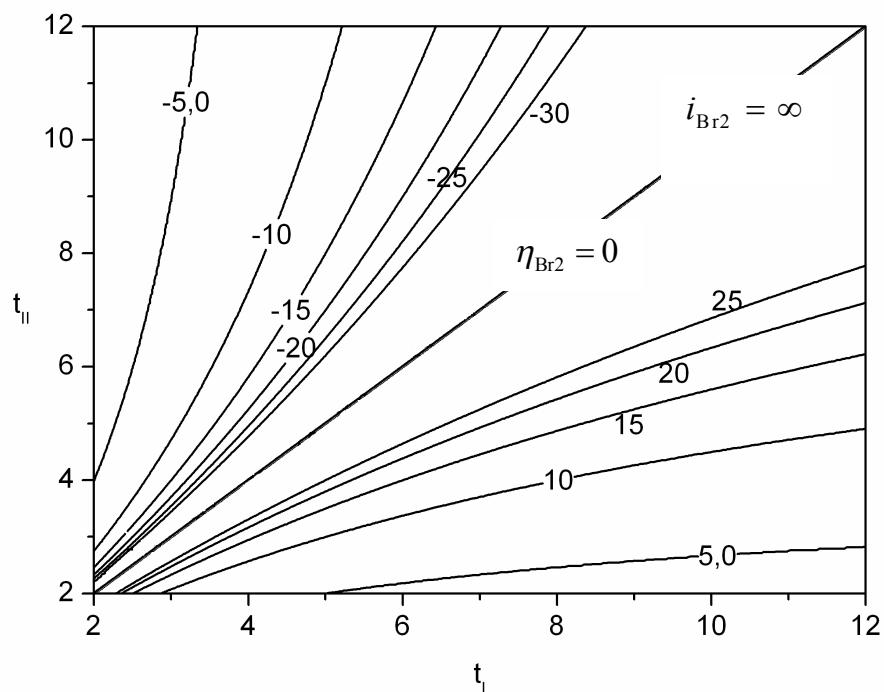
Osim pretvarača navedenih shema ističe se još varijanta pretvarača S36V8 kod koje je u brzini Br2 promjenom idealnih momentnih omjera moguć prijelaz iz redukcije u multiplikaciju.

Neke varijante mogu ostvariti, ovisno o idealnim momentnim omjerima planetnih slogova, relativno široke intervale prijenosnih omjera u brzini Br2 pri čemu ti prijenosni omjeri mogu dostići relativno veliku vrijednost. To su varijante: S13V3, S14V2, S15V2, S16V3, S11V4, S11V5, S33V4, S33V5, S55V4 i S55V5. Prve četiri navedene varijante rade kao reduktori u obje brzine i mogu biti primijenjene kao vrlo efikasni mjenjački pretvarači s relativno širokim mjenjačkim mogućnostima. Njihove mjenjačke mogućnosti će biti prikazane u poglavlju 4.4.3 Varijante S11V4 i S11V5 u brzini Br1 ostvaruju multiplikaciju koja za praksu nije toliko zanimljiva. Zbog toga što u brzini Br1 ostvaruju multiplikaciju, a u brzini Br2 mogu ostvariti relativno veliku redukciju ove varijante imaju mogućnost ostvarenja vrlo velikog odnosa prijenosnih omjera.

Varijanta S33V5 ima u brzini Br1 relativno uzak interval promjene prijenosnog omjera u cijelom intervalu idealnih momentnih omjera. Ona se može primijeniti kao jednobrzinski pretvarač. Isti je slučaj i s varijantom S55V4. Varijante S33V4 i S55V5 zbog relativnog šireg intervala brzine Br1 i brzine Br2 imaju šire mjenjačke mogućnosti.

Analizom funkcija prijenosnih omjera brzine Br2 varijanti S11V4, S11V5, S33V4, S33V5, S55V4 i S55V5 se uočava da ove funkcije imaju u nazivniku razliku idealnih momentnih omjera ($t_I - t_{II}$). Iz ovoga se može zaključiti da će prijenosni omjeri brzine Br2 ovih varijanti biti veći kada je razlika idealnih momentnih omjera manja. U slučaju da je razlika idealnih momentnih omjera jednaka nuli (kod jednakih idealnih momentnih omjera) prijenosni omjer je beskonačan. Numerički primjeri su pokazali izrazitu sklonost nagloj promjeni prijenosnog omjera navedenih varijanti u brzini Br2 kada se pri bliskim vrijednostima idealnih momentnih omjera njihova razlika promjeni za malu vrijednost. Ova činjenica je razlog mogućem otežanom postizanju proizvoljnog para prijenosnih omjera kod ovakvih dvobrzinskih pretvarača. Kroz proračune se pokazalo da kod većih prijenosnih omjera u brzini Br2 (cca.>40) mala promjena vrijednosti nazivnika koju uzrokuje povećanje ili smanjenje samo jednog zuba vijenca (zanemaren uvjet montaže planetnog sloga) može uzrokovati dvostruko povećanje ili smanjenje prijenosnog omjera.

Na sl. 4.4.8 je za varijantu pretvarača S55V5Br2 prikazan konturni graf iz kojeg je vidljivo da kod jednakih idealnih omjera planetnih slogova prijenosni omjer poprima beskonačno veliku vrijednost. Vrijednost prijenosnog omjera je negativna kada je idealni momentni omjer drugog planetnog sloga veći od idealnog momentnog omjera prvog planetnog sloga, a pozitivan je u obratnom slučaju. Kod beskonačno velikog prijenosnog omjera stupanj iskoristivosti pretvarača je jednak nuli. Iz grafa se vidi da su pri povećanju apsolutne vrijednosti prijenosnog omjera konture sve gušće smještene. To potvrđuje spomenutu činjenicu da se mala promjena u razlici idealnih momentnih omjera planetnih slogova značajno odražava na promjenu prijenosnog omjera pretvarača pogotovo kod velikih prijenosnih omjera.



Sl. 4.4.8 Konturni graf funkcije prijenosnog omjera varijante pretvarača S55V5Br2

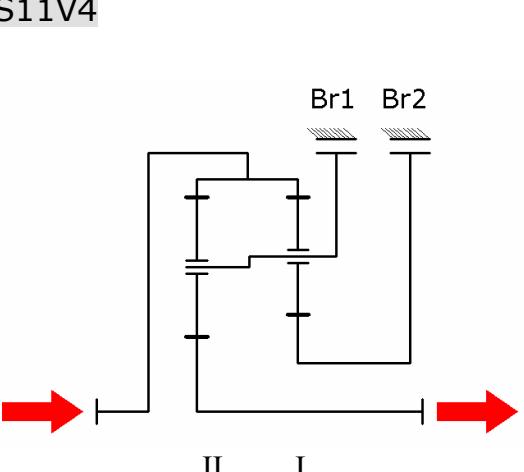
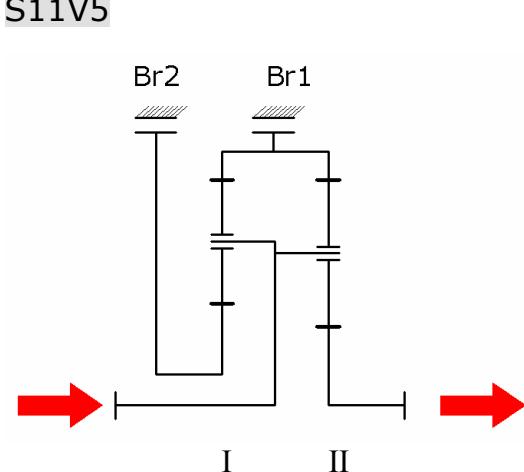
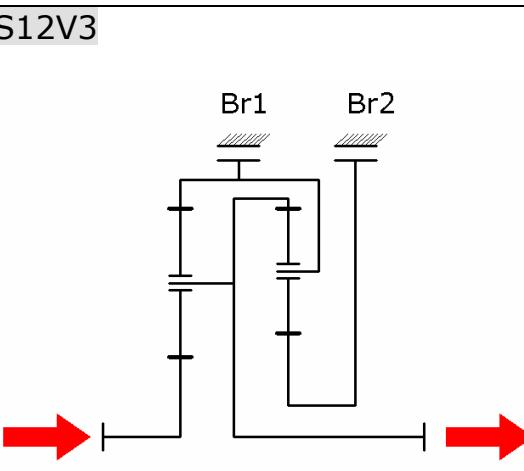
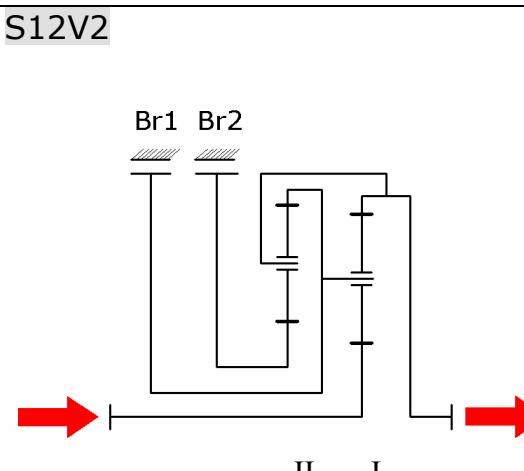
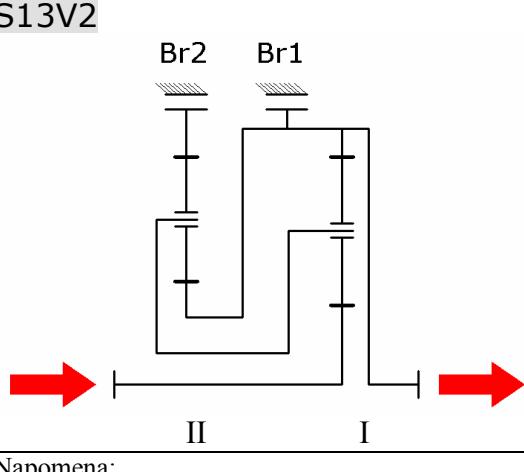
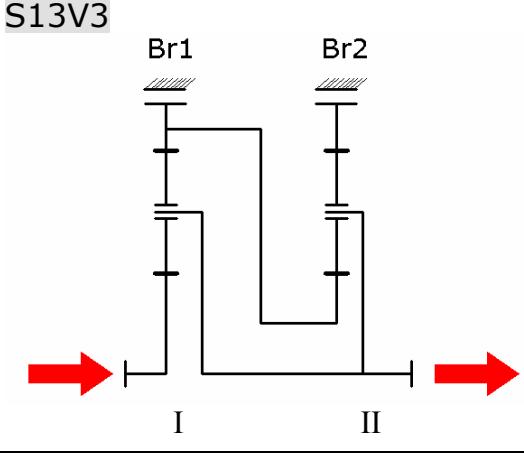
Sličan graf ovome imaju još varijante pretvarača S11V4Br2, S11V5Br2, S33V4Br2, S33V5Br2 i S55V4Br2. Kod njih se kod bliskih idealnih momentnih omjera planetnih slogova u brzini Br2 pojavljuje znatno povećanje jalove snage uslijed čega se naglo smanjuje stupanj iskoristivosti. Kod ovih varijanti je povećanje prijenosnog omjera praćeno smanjenjem stupnja iskoristivosti što će se vidjeti u poglavljju 5.

4.4.2 Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih planetnih pretvarača s kočnicama raspoređenima na spojnom i zasebnom vratilu

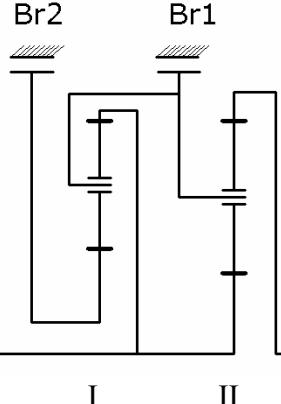
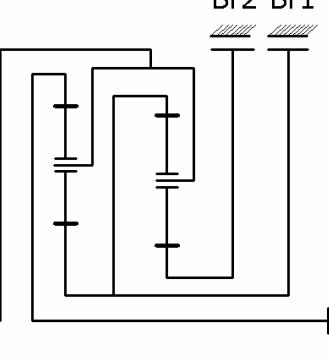
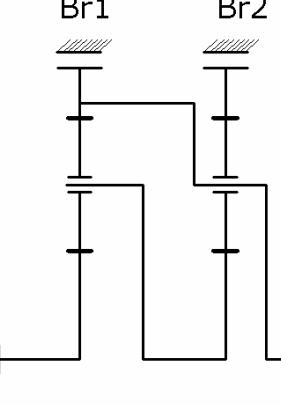
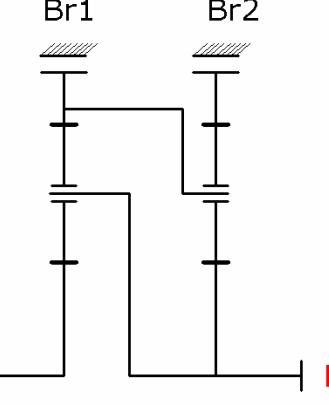
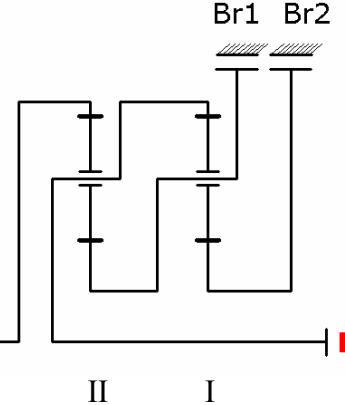
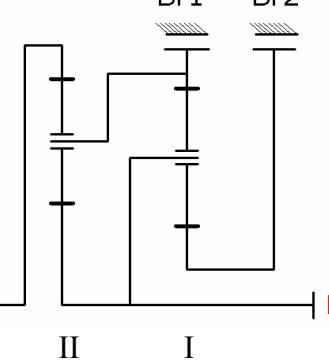
Simbolička struktura shema varijante pokazuje veze između članova pretvarača, ali ne pokazuje prostornu koncepciju razmještaja članova i njihovih vratila. U praksi se najčešće zahtjeva od planetnog pretvarača da mu se ulazno i izlazno vratilo nalaze sa suprotnih strana kako bi se nesmetano mogli spojiti na pogonski i radni stroj. Naime, najčešće su vratila pogonskog i radnog stroja suosna (koaksijalna).

Da bi se moglo konstrukcijski izvesti takve pretvarače kod određenih varijanti treba smjestiti jedno vratilo unutar drugoga tj. koncepciju izvesti sa šupljim vratilima. Pokazalo se da je sve varijante ove skupine pretvarača moguće izvesti tako da ulazno i izlazno vratilo budu sa suprotnih strana. U Tab. 4.4.4 su navedene sve koncepcijske sheme pretvarača koji u brzini Br2 rade pretežno kao reduktori. Ulazno i izlazno vratilo su označeni crvenim strelicama.

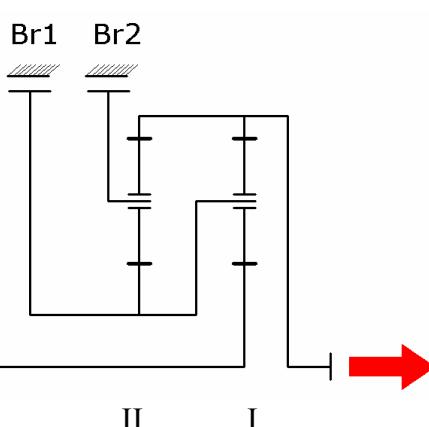
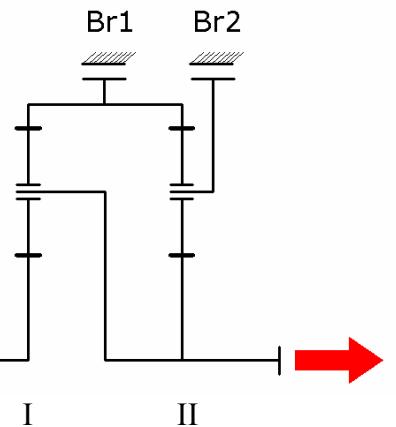
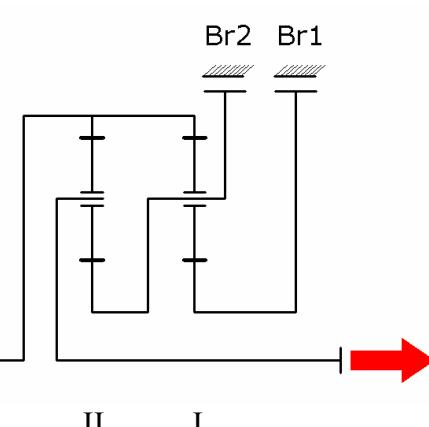
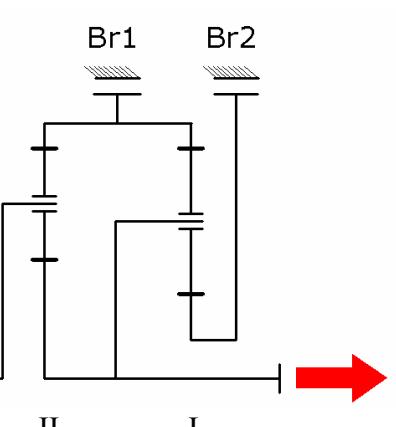
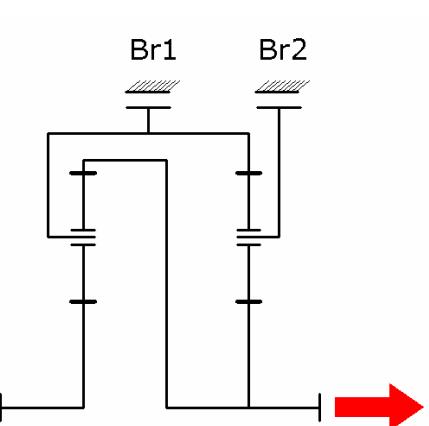
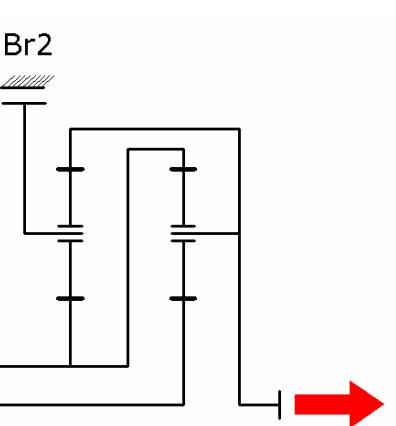
Tab. 4.4.4 Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih pretvarača s kočnicama na spojnom i zasebnom vratilu

S11V4	S11V5
	
S12V3	S12V2
	
S13V2	S13V3
	
<p>Napomena: S – shema, V – varijanta razmještaja Br1 – kočnica 1, Br2 – kočnica 2</p>	

Tab. 4.4.4 (nastavak) Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih pretvarača s kočnicama na spojnom i zasebnom vratilu

S13V4		S13V5	
S14V2		S14V3	
S14V10		S14V11	
<p>Napomena: S – shema, V – varijanta razmještaja Br1 – kočnica 1, Br2 – kočnica 2</p>			

Tab. 4.4.4 (nastavak) Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih pretvarača s kočnicama na spojnom i zasebnom vratilu

S15V2	S15V3
	
S15V4	S15V11
	
S16V2	S16V3
	
<p>Napomena:</p> <p>S – shema, V – varijanta razmještaja Br1 – kočnica 1, Br2 – kočnica 2</p>	

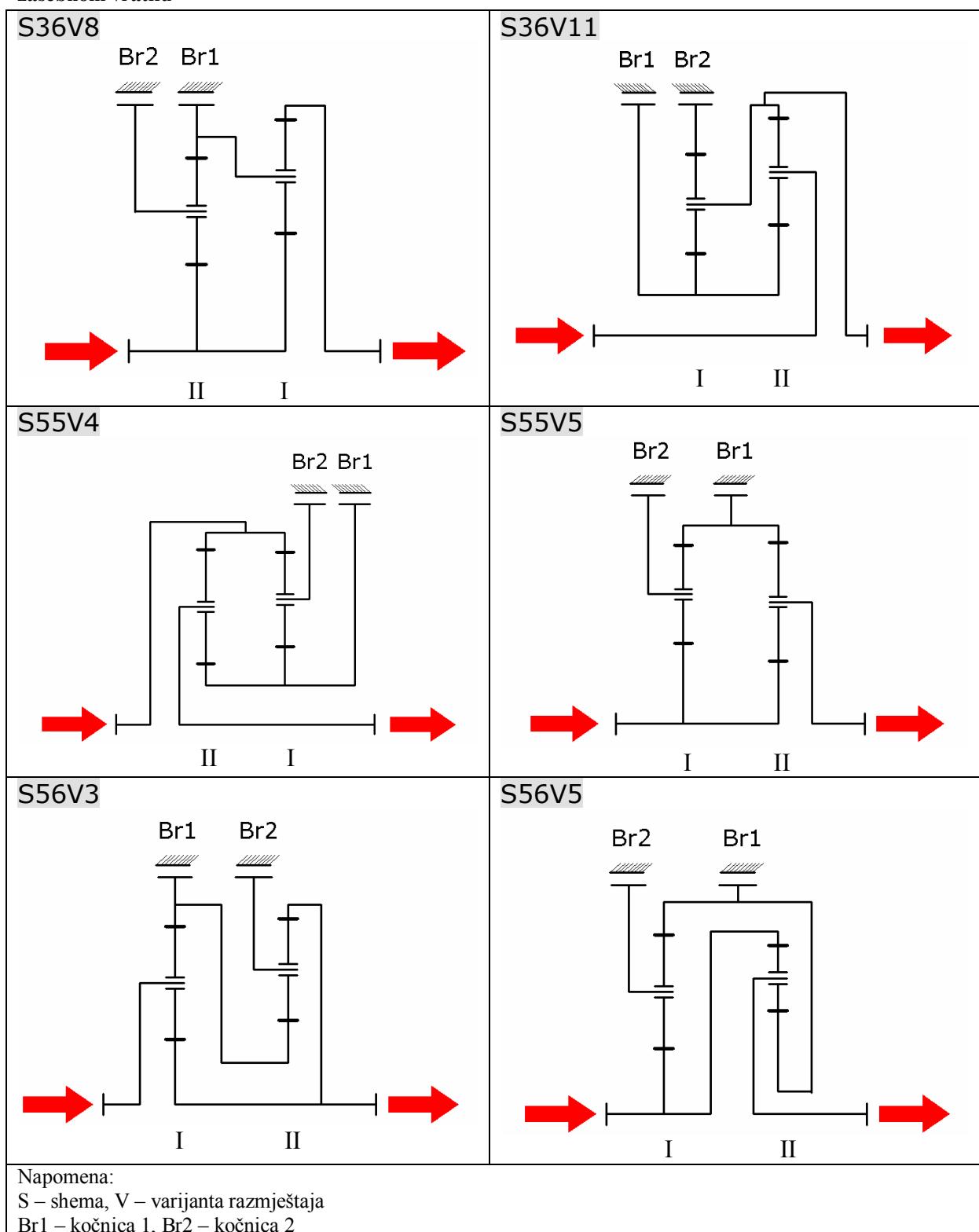
Tab. 4.4.4 (nastavak) Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih pretvarača s kočnicama na spojnom i zasebnom vratilu

S16V4	S16V11
S33V4	S33V5
S34V3	S34V2
<p>Napomena: S – shema, V – varijanta razmještaja Br1 – kočnica 1, Br2 – kočnica 2</p>	

Tab. 4.4.4 (nastavak) Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih pretvarača s kočnicama na spojnom i zasebnom vratilu

S35V2	S35V3
S35V4	S35V11
S36V3	S36V4
<p>Napomena: S – shema, V – varijanta razmještaja Br1 – kočnica 1, Br2 – kočnica 2</p>	

Tab. 4.4.4 (nastavak) Konstrukcijske koncepcije dvobrzinskih pretvarača s kočnicama na spojnom i zasebnom vratilu

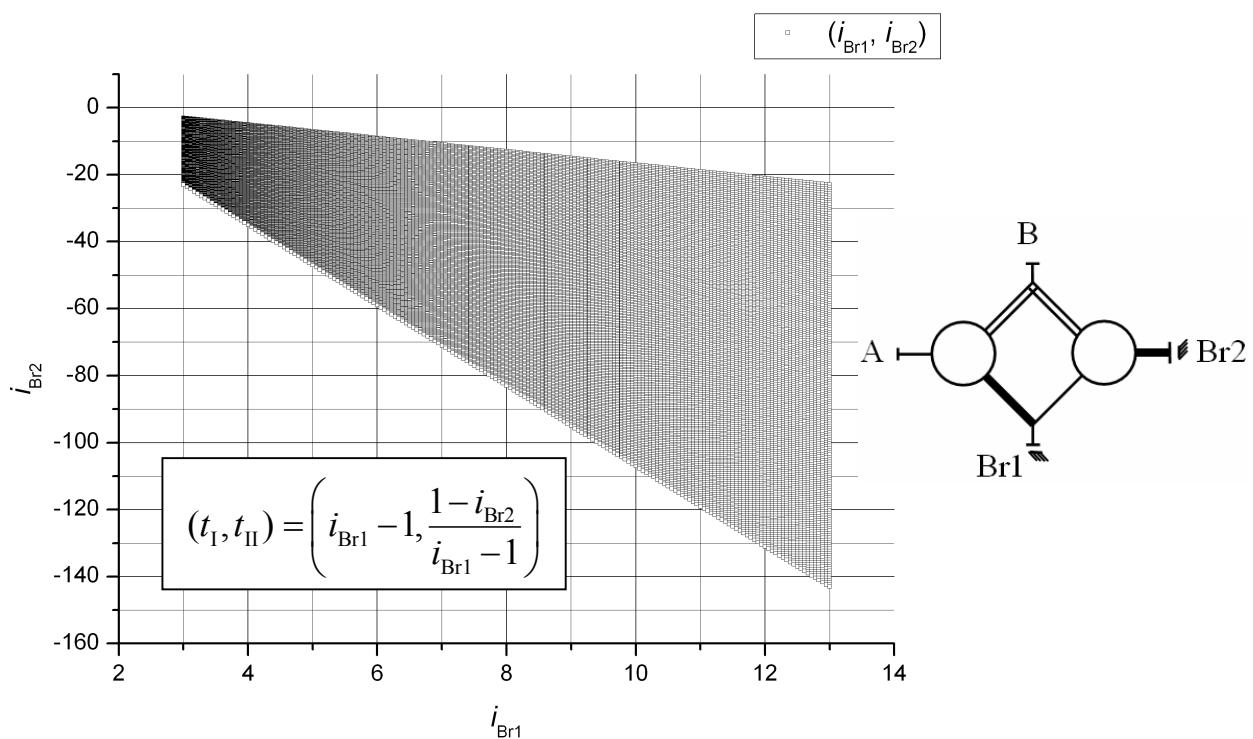


4.4.3 Mjenjačke mogućnosti i skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

4.4.3.1 Mjenjačke mogućnosti dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

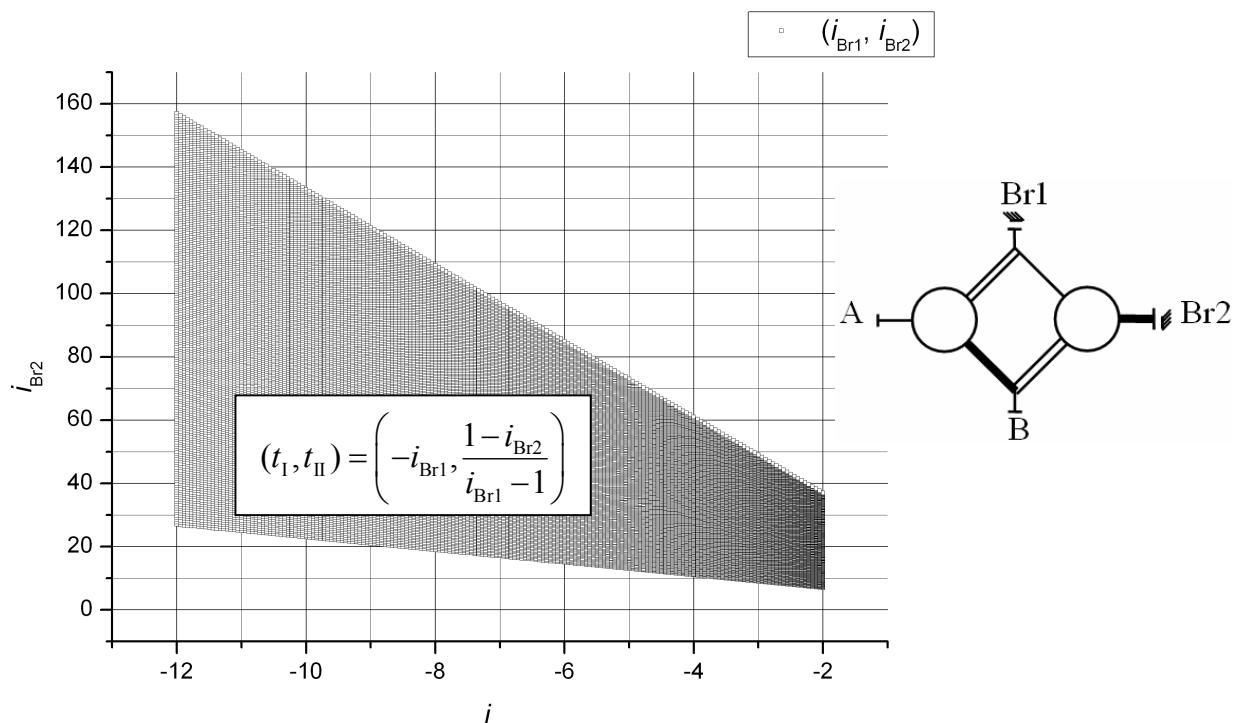
Ovo je najbrojnija skupina dvobrzinskih pretvarača koja obiluje varijantama pretvarača s različitim mjenjačkim mogućnostima. Među pretvaračima ovakvog rasporeda kočnica se nalaze varijante čije pretvaračke mogućnosti mogu biti često zahtijevane u praksi. Mjenjačke mogućnosti su i kod ove skupine pretvarača prikazane grafički. Uz grafički prikaz su navedeni izrazi za određivanje idealnih momentnih omjera koji odgovaraju zahtijevanim prijenosnim omjerima. Mjenjačke mogućnosti su za sve varijante pretvarača ove skupine su prikazane u Prilogu 2. U nastavku teksta su istaknute mjenjačke mogućnosti nekih varijanti pretvarača koje mogu imati učestaliju praktičnu primjenu.

Na sl. 4.4.9. su grafički prikazane mogućnosti varijante pretvarača S13V3. Ova varijanta pretvarača omogućuje relativno široke mjenjačke mogućnosti. Uz uključenu kočnicu Br1 pretvarač osigurava redukciju s jednakim smjerom vrtnje izlaznog i ulaznog vratila koja se ostvaruje samo s jednim planetnim slogom. Uz uključenu kočnicu Br2 u pretvorbi aktivno sudjeluju oba planetna sloga što rezultira reversivnom redukcijom prijenosnog omjera veće apsolutne vrijednosti nego kod onog s uključenom kočnicom Br1.



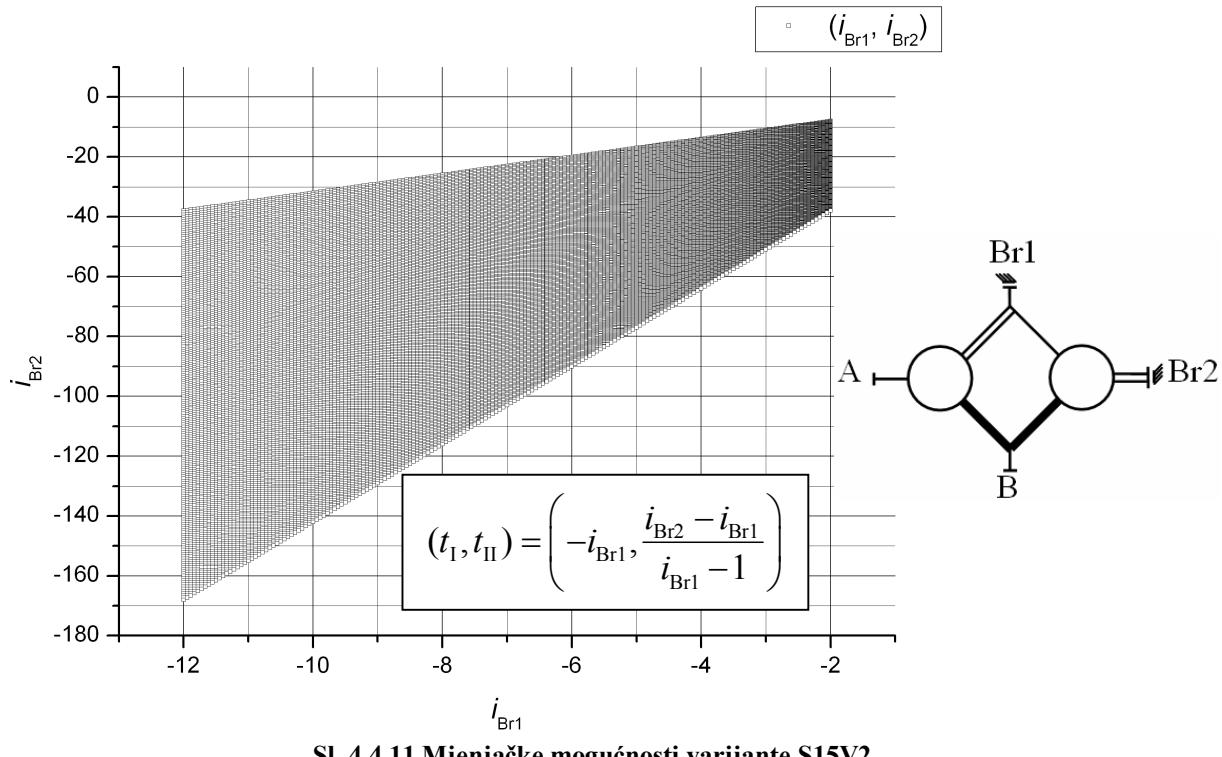
Sl. 4.4.9 Mjenjačke mogućnosti varijante S13V3

Na sl. 4.4.10 su prikazane mjenjačke mogućnosti varijante pretvarača S14V2 kod koje s uključenom kočnicom Br1 mjenjački pretvarač osigurava reversivnu redukciju. Uz uključenu kočnicu Br1 radi samo jedan planetni slog i to kao klasični pretvarač (zbog zakočenog vodila). Uz uključenu kočnicu Br2 u pretvorbi aktivno sudjeluju oba planetna sloga što rezultira redukcijom u smjeru vrtnje ulaznog vratila. I ovdje je absolutna vrijednost prijenosnog omjera u brzini Br2 (s uključenom kočnicom Br2) veća nego u brzini Br1 (s uključenom kočnicom Br1).



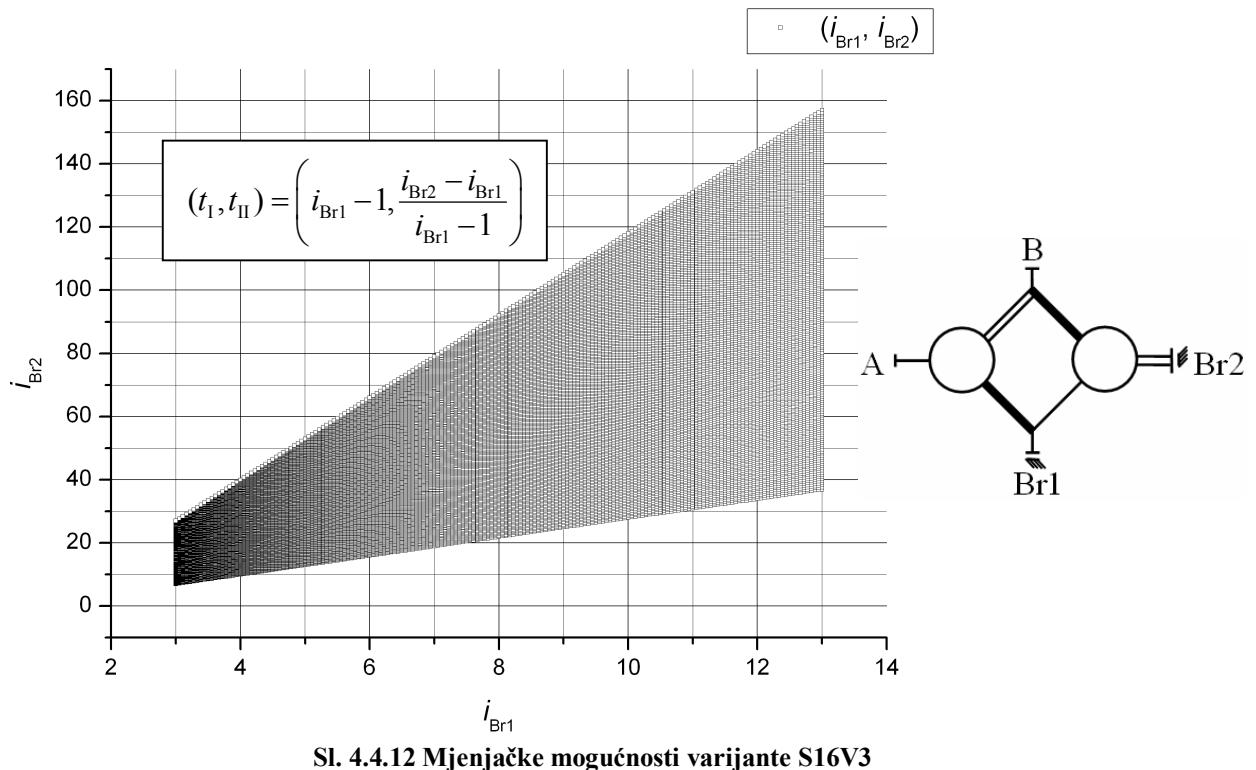
Sl. 4.4.10 Mjenjačke mogućnosti varijante S14V2

Na sl. 4.4.11 su prikazane mjenjačke mogućnosti varijante pretvarača S15V2. Ova varijanta u obje brzine omogućuje redukciju sa smjerom vrtnje suprotnim od smjera vrtnje ulaznog vratila (reversivna redukcija). Apsolutna vrijednost prijenosnog omjera u brzini Br1, kod koje aktivno radi samo jedan planetni slog, je manja nego u brzini Br2 kod koje aktivno rade oba planetna sloga.



Sl. 4.4.11 Mjenjačke mogućnosti varijante S15V2

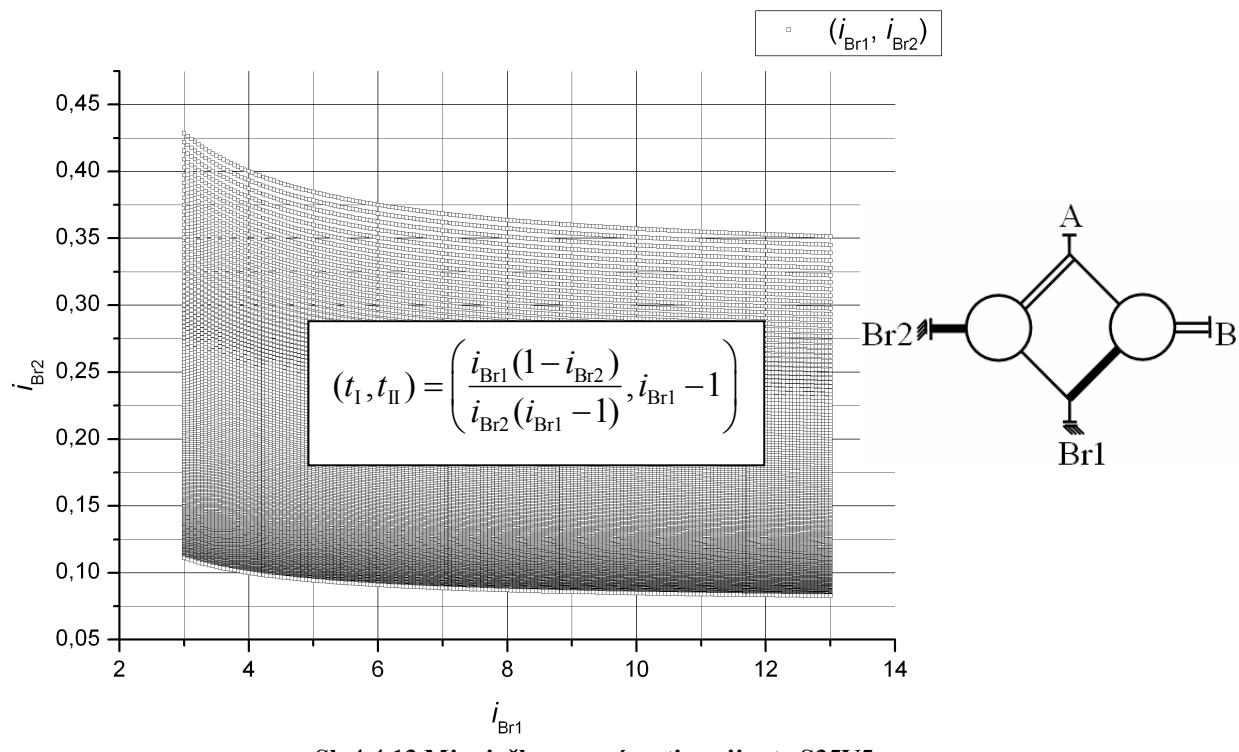
Na sl. 4.4.12 su prikazane mjenjačke mogućnosti varijante S16V3. Ova varijanta omogućuje da se u obje brzine ostvari redukcija u smjeru rotacije ulaznog vratila. Apsolutna vrijednost prijenosnog omjera u brzini Br2 (uz uključenu kočnicu Br2) je uvijek veća od absolutne vrijednosti prijenosnog omjera koji se dobiva u brzini Br1 (uz uključenu kočnicu Br1).



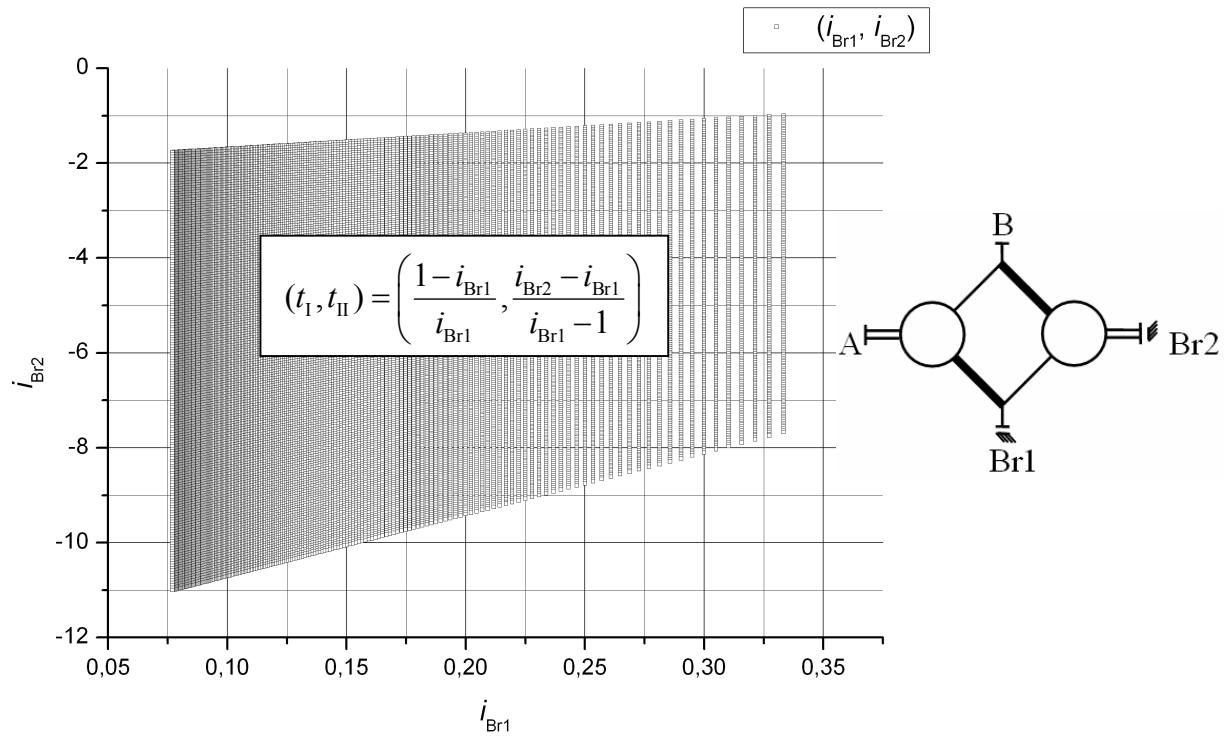
Prethodna četiri grafa opisuju mjenjačke mogućnosti pretvarača koji u oba stupnja prijenosa (brzine) omogućuju redukciju. Pored pretvarača koji u oba stupnja omogućuju redukciju kod ove skupine pretvarača postoje i varijante pretvarača koje u jednoj brzini omogućuju redukciju, a u drugoj multiplikaciju. Ovakve varijante pretvarača mogu biti primjenjene kako za prijenos gibanja tako i za prijenos mehaničke energije.

Na sl. 4.4.13 su prikazane mjenjačke mogućnosti pretvarača označe S35V5. Ova varijanta pretvarača uz uključenu kočnicu Br1 omogućuje redukciju u smjeru vrtnje ulaznog vratila. U brzini Br2 (uključena kočnica Br2) varijanta omogućuje multiplikaciju. Izborom različitih idealnih momentnih omjera se može dobiti različite kombinacije prijenosnih omjera redukcije i multiplikacije. U slučaju da se traže recipročni prijenosni omjeri ova varijanta pretvarača je dobar izbor.

Na sl. 4.4.14 su prikazane mjenjačke mogućnosti varijante pretvarača S56V3 koja također omogućuje u jednoj brzini redukciju, a u drugoj multiplikaciju. Ova varijanta ima mogućnost da uz određene idealne momentne omjere osigura suprotne i recipročne prijenosne omjere.

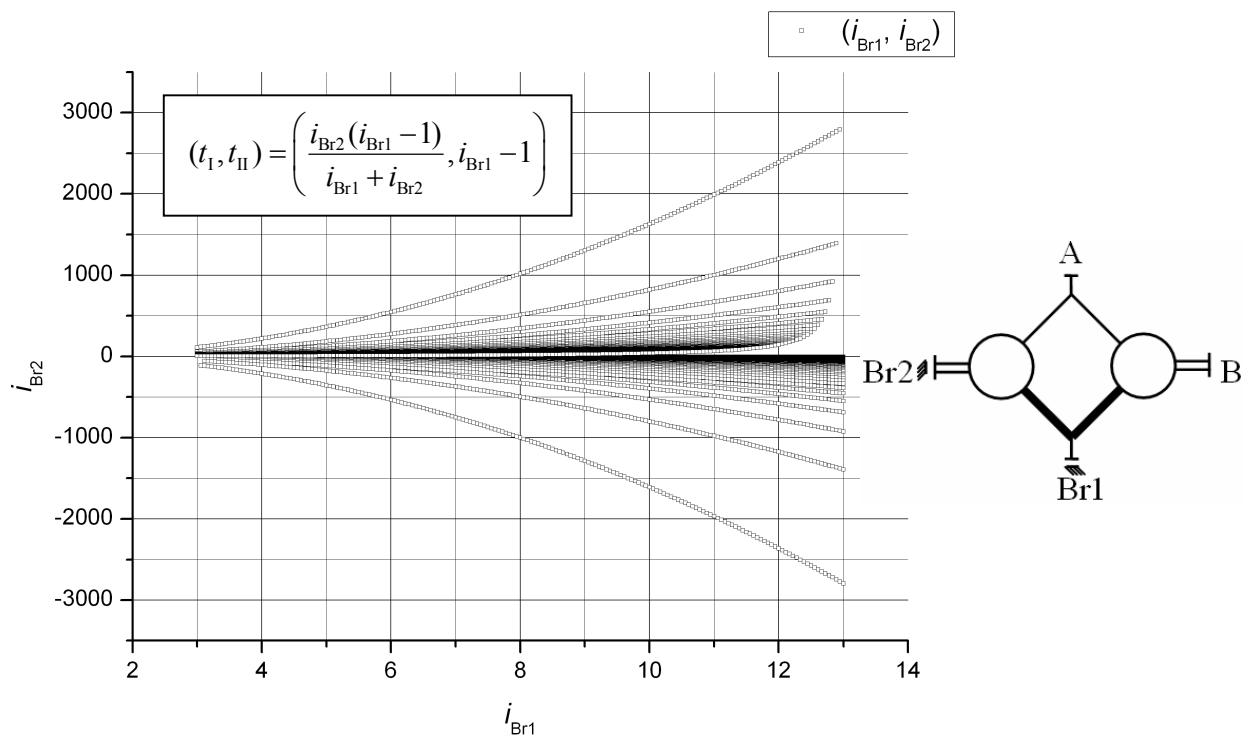


Sl. 4.4.13 Mjenjačke mogućnosti varijante S35V5



Sl. 4.4.14 Mjenjačke mogućnosti varijante S56V3

Među pretvaračima ove skupine postoje i oni čiji prijenosni omjeri mogu biti iznimno veliki. Jedna od varijanti pretvarača koja omogućuje vrlo velike prijenosne omjere je varijanta S55V5. Na sl. 4.4.15 su prikazane mjenjačke mogućnosti ove varijante. U brzini Br1 (s uključenom kočnicom Br1) ova varijanta daje prijenosne omjere koji se dobivaju i sa samostalnim planetnim slogom koji je najčešće u uporabi. U brzini Br2 (uključena kočnica Br2) aktivno rade oba planetna sloga i uz odgovarajuće idealne momentne omjere moguće je dobiti vrlo visoke prijenosne omjere. Teoretska najveća vrijednost prijenosnog omjera je beskonačna. U tom slučaju je stupanj iskoristivosti jednak nuli pa se energija ne može prenijeti. Beskonačna vrijednost prijenosnog omjera se dobiva kad su idealni momentni omjeri oba planetna sloga jednaki. Što je manja razlika idealnih momentnih omjera pretvarač osigurava veći prijenosni omjer. Ovakvi pretvarači se mogu primijeniti primjerice za prijenos gibanja u brzini Br2 i prijenos energije u brzini Br1. Za razliku od prethodno prikazanih pretvarača kod ovih pretvarača u brzini Br2 smjer rotacije izlaznog vratila ovisi o idealnim momentnim omjerima planetnih slogova.



Sl. 4.4.15 Mjenjačke mogućnosti varijante S55V5

4.4.3.2 Skokovi prijenosa dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

Na osnovu Tab. 4.4.1 i izraza (4.2.1) odnosno (4.2.2) uz primjenu računala su dobivene ekstremne vrijednosti skokova prijenosa varijanti pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu. U Tab. 4.4.5 i Tab. 4.4.6 su navedene ekstremne vrijednosti skokova prijenosa. U Tab. 4.4.5 su uz navedene ekstremne vrijednosti upisane i odgovarajuće vrijednosti idealnih momentnih omjera planetnih slogova, a u Tab. 4.4.6 su navedene vrijednosti pripadnih prijenosnih omjera mjenjačkog pretvarača.

Tab. 4.4.5 Ekstremni skokovi prijenosa i njihovi odgovarajući idealni momentni omjeri kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

Varijanta	S_p	t_I	t_{II}
	max min		
S12V2	- 5,76 -1	12 2,5	12 2,333
S12V3	6,76 1,8	12 2	12 2
S13V2	2 1,0909	2 12	2 12
S13V3	-11 -1	12 2	12 2
S13V4	-11 -1	12 2	12 2
S13V5	2 1,0909	2 12	2 12
S14V2	-18,5 -2,25	2 12	12 2
S14V3	1,44444 1,05405	12 2	2 12
S14V10	1,44444 1,05405	12 2	2 12
S14V11	-18,5 -2,25	2 12	12 2
S15V2	19 3,16667	2 12	12 2
S15V3	1,46154 1,05556	12 2	2 12
S15V4	1,46154 1,05556	12 2	2 12
S15V11	19 3,16667	2 12	12 2
S16V2	1,75 1,09028	2 12	2 12

Tab. 4.4.5 (nastavak) Ekstremni skokovi prijenosa i njihovi odgovarajući idealni momentni omjeri kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

Varijanta	S_p	t_I	t_{II}
	max min		
S16V3	12,07692 2,33333	12 2	12 2
S16V4	12,07692 2,33333	12 2	12 2
S16V11	1,75 1,09028	2 12	2 12
S34V2	-168 -8	12 2	12 2
S34V3	1,125 1,00595	2 12	2 12
S35V2	157 7	12 2	12 2
S35V3	1,16667 1,00641	2 12	2 12
S35V4	1,16667 1,00641	2 12	2 12
S35V11	157 7	12 2	12 2
S36V3	5 1,15385	2 12	12 2
S36V4	5 1,15385	2 12	12 2
S36V8	7,5 1,25	12 2	2 12
S36V11	7,5 1,25	12 2	2 12
S56V3	-143 -3	12 2	12 2
S56V5	1,33333 1,00699	2 12	2 12
Napomena: Sjenečano označena polja pripadaju varijantama pretvarača koje mogu ostvariti visoke skokove prijenosa ili pak prekretni rad			

Tab. 4.4.6 Ekstremni skokovi prijenosa i njihovi odgovarajući prijenosni omjeri kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

Varijanta	S_p	i_{Br1}	i_{Br2}
	max min		
S12V2	- 5,76 -1	-12 -2,5	2,0833 2,5
S12V3	6,76 1,8	13 3	1,9231 1,6667
S13V2	2 1,0909	-2 -12	-1 -11
S13V3	-11 -1	13 3	-143 -3
S13V4	-11 -1	-12 -2	1,0909 2
S13V5	2 1,0909	0,6667 0,9231	1,3333 1,007
S14V2	-18,5 -2,25	-2 -12	37 27
S14V3	1,44444 1,05405	13 1,0833	9 1,0278
S14V10	1,44444 1,05405	1,5 1,0833	1,0385 1,0278
S14V11	-18,5 -2,25	-0,0833 -0,5	1,5417 1,125
S15V2	19 3,16667	-2 -12	-38 -38
S15V3	1,46154 1,05556	13 3	19 3,1667
S15V4	1,46154 1,05556	1,5 1,0833	1,0263 1,0263
S15V11	19 3,16667	0,0769 0,3333	1,4615 1,0556
S16V2	1,75 1,09028	-2 -12	-3,5 -13,0833

Tab. 4.4.6 (nastavak) Ekstremni skokovi prijenosa i njihovi odgovarajući prijenosni omjeri kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

Varijanta	S_p	i_{Br1}	i_{Br2}
	max		
S16V3	12,07692 2,33333	13 3	157 7
S16V4	12,07692 2,33333	13 3	1,0764 1,2857
S16V11	1,75 1,09028	0,6667 0,9231	1,1667 1,0064
S34V2	-168 -8	-0,0833 -0,5	14 4
S34V3	1,125 1,00595	1,5 1,0833	1,3333 1,0760
S35V2	157 7	-0,0833 -0,5	-13,0833 -3,5
S35V3	1,16667 1,00641	1,5 1,0833	1,75 1,0903
S35V4	1,16667 1,00641	1,5 1,0833	1,2857 1,0764
S35V11	157 7	0,0769 0,3333	12,0769 2,3333
S36V3	5 1,15385	1,5 1,0833	7,5 1,25
S36V4	5 1,15385	13 3	2,6 2,6
S36V8	7,5 1,25	-12 -2	-1,6 -1,6
S36V11	7,5 1,25	0,6667 0,9231	5 1,1538
S56V3	-143 -3	0,0769 0,3333	-11 -1
S56V5	1,33333 1,00699	1,5 1,0833	2 1,0909

Napomena: Sjenčano označena polja pripadaju varijantama pretvarača koje mogu ostvariti visoke skokove prijenosa ili pak prekretni rad

Analizom Tab. 4.4.5 i Tab. 4.4.6 su identificirane četiri varijante pretvarača koje omogućuju ostvarenje velikog raspona skoka prijenosa kao i relativno velike vrijednosti skoka prijenosa. To su varijante S34V2, S35V2, S35V11 i S56V3 (označene su sivim poljima u tablici). Iz skupa varijanti se mogu izdvojiti i one koje imaju vrijednost minimalnog skoka prijenosa $S_p = -1$. To su varijante koje uz odgovarajuće idealne momentne omjere planetnih slogova mogu raditi kao prekretači (S12V2, S13V3, S13V4) (označene su sivim poljima u tablici). Varijante S13V3 i S13V4 se mogu primijeniti kao čisti teoretski prekretači samo kod jedne jedine kombinacije idealnih momentnih omjera tj. kod

jedne jedine kombinacije prijenosnih omjera. Iz tog razloga ove dvije varijante imaju suženu mogućnost primjene kao prekretne varijante. Varijanta S12V2 nije po tom pitanju puno bolje rješenje od njih. Kod nje se prekretanje može izvesti kod nekoliko različitih kombinacija prijenosnih omjera. U Tab. 4.4.5 i Tab. 4.4.6 je upisana samo jedna od nekoliko mogućih kombinacija podataka o odgovarajućim idealnim momentnim omjerima i o odgovarajućim prijenosnim omjerima (za računalni primjer $z_{1I} = z_{1II} = 18$ postoji četiri kombinacije idealnih momentnih omjera odnosno prijenosnih omjera). Ako se absolutne vrijednosti prijenosnih omjera kod prekretanja mogu malo razlikovati, što je najčešće opravdano, tada će naravno biti više rješenja.

Postoje varijante koje imaju jednakе raspone ostvarivih skokova prijenosa pri čemu kod rada s jednakim skokom prijenosa imaju različite prijenosne omjere. Neki od takvih parova varijanti su: S13V3 i S13V4 te S13V2 i S13V5.

4.5 Osvrt na kinematičke mogućnosti sve tri skupine varijanti pretvarača

Kinematičke mjenjačke mogućnosti kod sve tri skupine pretvarača se najbolje vide iz grafova mjenjačkih mogućnosti. Uz grafove se nalaze izrazi koji su osnova za izbor brojeva zubi izabrane varijante. Na osnovu analize grafova mjenjačkih mogućnosti raznih varijanti pretvarača dolazi se do zaključka da svaka skupina pretvarača sadrži varijante koje mogu s kinematičkog aspekta biti uspješno primijenjene u praksi. Najmanje primjenjivih varijanti ima u skupini pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima. Razlog tome je nemogućnost prikladne konstrukcijske izvedbe nekih varijanti ovih pretvarača (ulazno i izlazno vratilo ponekad ne mogu biti sa suprotnih strana pretvarača). Najviše praktički izvedivih varijanti ima u najbrojnijoj skupini pretvarača, a to su pretvarači s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu. Neke varijante ovih pretvarača pri određenim idealnim momentnim omjerima mogu zamijeniti u mjenjačkom pogledu neke konstrukcijski neprikladne varijante iz skupine pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima. Iz skupine pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima konstrukcijski su najproblematičnije varijante S55V1 i S56V1 koje je kod dvobrzinskih pogona nemoguće konstrukcijski izvesti s vratilima smještenim na suprotnim stranama pretvarača. Ove varijante također mogu biti zamijenjene kod određenih prijenosnih omjera s nekim varijantama najbrojnije skupine pretvarača.

U praksi su od posebne važnosti pretvarači koji mogu ostvariti visoku vrijednost prijenosnog omjera. Varijante pretvarača koje mogu ostvariti visoku absolutnu vrijednost

prijenosnog omjera i (većeg od 100) su: S13V1Br1, S14V1Br2, S15V1Br2, S16V1Br1, S13V3, S14V2, S15V2, S16V3, S11V4, S11V5, S33V4, S33V5, S55V4 i S55V5.

Od ovih 14 varijanti pretvarača, varijante S11V4, S11V5, S33V4, S33V5, S55V4 i S55V5 visok prijenosni omjer postižu na račun stupnja iskoristivosti što će biti prikazano u nastavku rada.

U cilju boljeg uvida u mjenjačke mogućnosti korisno je znati raspon skoka prijenosa koji se može ostvariti s pojedinom varijantom. Sustavnom analizom numeričkih rezultata navedenih u Tab. 4.2.4, Tab. 4.3.6 i Tab. 4.4.5 je utvrđeno da sheme S34, S35 i S56 uz odgovarajući razmještaj kočnica (varijantu razmještaja) mogu ostvariti vrlo velike skokove prijenosa.

U Tab. 4.5.1 su navedene varijante pretvarača s relativno velikim rasponima skokova prijenosa kod kojih oni mogu biti vrlo veliki.

Tab. 4.5.1 Ekstremne vrijednosti skoka prijenosa S_p kod karakterističnih varijanti pretvarača

Varijanta razmještaja / Shema	S34	S35	S56
V1 (V7)	169 9	-156 -6	144 4
V2 (V8)	-168 -8	157 7	
V3 (V9)			-143 -3
V6 (V12)	169 9	-156 -6	144 4
V11 (V5)		157 7	

U Tab. 4.5.2 su navedene matematički modeli koji povezuju skok prijenosa s idealnim momentnim omjerima. Ovi matematički modeli omogućuju izbor idealnih momentnih omjera za određeni skok prijenosa.

Tab. 4.5.2 Izrazi za određivanje skoka prijenosa S_p kod karakterističnih varijanti pretvarača

Varijanta razmještaja / Shema	S34	S35	S56
V1 (V7)	$(1+t_1)(1+t_{II})$	$-t_{II}(1+t_1)$	$t_1 t_{II}$
V2 (V8)	$-(t_1 + t_{II} + t_1 t_{II})$	$1 + t_{II} + t_1 t_{II}$	
V3 (V9)			$1 - t_1 t_{II}$
V6 (V12)	$(1+t_1)(1+t_{II})$	$-t_{II}(1+t_1)$	$t_1 t_{II}$
V11 (V5)		$1 + t_{II} + t_1 t_{II}$	

Analizom Tab. 4.2.4, Tab. 4.3.6 i Tab. 4.4.5 se može zaključiti da:

- postoje 4 para varijanti pretvarača (jedan par - dvije međusobno inverzne varijante pretvarača) s kočnicama na zasebnom i spojnom vratilu, 3 para varijanti pretvarača s kočnicama na spojnim vratilima i 3 para varijanti pretvarača s kočnicama na zasebnim vratilima koje mogu ostvariti relativno velik skok prijenosa (označene sivim poljima u navedenim tablicama);
- se kod shema S34, S35, S56 najviši skokovi prijenosa postižu uz maksimalne idealne momentne omjere t_1 i t_{II} (12; 12);
- se maksimalne apsolutne vrijednosti skokova prijenosa kreću u intervalu od 143 do 169 kao i da svaka shema u nekoj od varijanti razmještaja kočnica može ostvariti i negativni skok prijenosa.
- bilo koja shema s varijantom razmještaja V6 (V12) ima jednake ekstremne skokove prijenosa kao i s varijantom razmještaja V1 (V7)

Analizom prijenosnih omjera varijanti pretvarača navedenih u Tab. 4.5.1 i Tab. 4.5.2 (varijante pretvarača s mogućnošću ostvarenja velikog skoka prijenosa) može se zaključiti da sve navedene varijante pretvarača spadaju u grupu reduktor-multiplikatora.

5. ENERGETSKA UČINKOVITOST KOD DVOVODILNIH PLANETNIH PRETVARAČA

5.1 Stupanj iskoristivosti planetnih pretvarača

Prilikom prolaza mehaničke energije kroz pretvarač i istovremene pretvorbe njenih parametara unutar pretvarača nastaju određeni gubici mehaničke energije. Dio mehaničke energije se pretvara u toplinsku energiju i pritom zagrijava dijelove pretvarača. Da bi se mogla okarakterizirati kakvoća pretvorbe energetskih parametara uveden je pojam stupnja iskoristivosti η . Njime se ocjenjuje sposobnost pretvarača da očuva mehaničku energiju koja kroz njega prolazi pa je zbog toga stupanj iskoristivosti parametar ocjene korisnog pretvaranja parametara energije. On je ujedno i jedan od najvažnijih kriterija ocjene ispravnosti izvedene konstrukcije.

Energetski gubici nastaju zbog sile trenja između dijelova u gibanju. Oni nastaju u ozubljenju, mazivu, ležajevima, brtvama i sl.

U poglavljju 2. je opisan postupak određivanja računskog stupnja iskoristivosti planetnog sloga. Tamo je prikazano kako stupanj iskoristivosti jednostavnog planetnog pretvarača sa zakočenim vodilom (relativni stupanj iskoristivosti) ovisi o broju zubi zupčanika. Također su navedeni izrazi koji omogućuju da se na osnovu poznavanja idealnog momentnog omjera planetnog sloga i njegovog relativnog stupnja iskoristivosti dobije stupanj iskoristivosti planetnog sloga koji radi u proizvoljnom dvovratilnom režimu rada.

Kod dvovodilnih planetnih pretvarača gubici nastaju u oba planetna sloga. Vrlo je važno još u fazi izbora varijante i njenih osnovnih parametara odrediti računski stupanj iskoristivosti budućeg pretvarača. Naime, moguće je da se kinematički zahtjevi koji se postavljaju na pretvarač mogu osigurati s nekoliko različitih varijanti. U tom je slučaju, s ciljem pravilnog izbora varijante, preporučljivo usporediti računske stupnjeve iskoristivosti tih varijanti. Računski stupnjevi iskoristivosti sigurno neće biti jednaki realnim stupnjevima iskoristivosti, izmjerenim na gotovom pretvaraču. Naime, zbog molekularno-mehaničke prirode trenja i ovisnosti trenja o velikom broju parametara skoro je nemoguće precizno matematički definirati gubitke koji se javljaju u pretvaraču [3, 16]. Ipak, računski stupnjevi iskoristivosti će omogućiti konstruktoru da uspoređuje različite varijante pretvarača koji mogu ostvariti zahtijevane prijenosne omjere.

5.1.1 Određivanje funkcije stupanja iskoristivosti

Kod svih varijanti dvovodilnih pretvarača računski stupanj iskoristivosti se može odrediti preko (3.4.2). Izraz (3.4.2) se može pisati na način:

$$\eta = -\frac{i_T}{i} \quad (5.1.1)$$

gdje je:

i_T - energetski prijenosni omjer,

i - kinematički prijenosni omjer.

Energetski prijenosni omjer i_T predstavlja omjer stvarnog momenta na izlazu i stvarnog momenta na ulazu u pretvarač.

Kinematički prijenosni omjer i je omjer kutne brzine ulaznog vratila i kutne brzine izlaznog vratila. Omjer ovih dviju kutnih brzina je kvantitativno jednak omjeru idealnog momenta na izlazu i idealnog momenta na ulazu u pretvarač.

Na osnovu poznavanja smjera relativnog energetskog toka moguće je odrediti energetski prijenosni omjer «nadopunom» algebarskog izraza za kinematički prijenosni omjer. Vrijedi pravilo: ako je relativni energetski tok usmjeren od sunčanog zupčanika prema vijencu tada se u izrazu za kinematički prijenosni omjer idealni momentni omjer tog planetnog sloga množi s pripadnim relativnim stupnjem iskoristivosti. Ako je relativni energetski tok usmjeren od vijenca prema sunčanom zupčaniku tada se u izrazu za kinematički prijenosni omjer momentni omjer tog planetnog sloga dijeli s relativnim stupnjem iskoristivosti tog planetnog sloga. Tako dobiven izraz se množi s -1 (energetski i kinematički prijenosni omjer su suprotnog predznaka).

Na osnovu ovog pravila u ovom radu su određivane funkcije stupnjeva iskoristivosti.

Funkcije kinematičkih prijenosnih omjera za pretvarače s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima su funkcije kinematičkog prijenosnog omjera planetnog sloga i navedene su u poglavljju 2. Funkcije kinematičkih prijenosnih omjera za pretvarače s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima i pretvarače s kočnicama raspoređenima na spojnom i zasebnom vratilu su navedene u poglavljju 4. Da bi se moglo odrediti funkcije stupnjeva iskoristivosti potrebno je još odrediti smjerove relativnih energetskih tokova na planetnim sloganima svih varijanti razmatranih pretvarača. Funkcije stupnjeva iskoristivosti u općem

slučaju kao argumente imaju idealne momentne omjere t_I i t_{II} te relativne stupnjeve iskoristivosti planetnih slogova η_{0I} i η_{0II} , odnosno vrijedi:

$$\eta_{Br1} = \eta_{Br1}(t_I, t_{II}, \eta_{0I}, \eta_{0II}) \quad (5.1.2)$$

$$\eta_{Br2} = \eta_{Br2}(t_I, t_{II}, \eta_{0I}, \eta_{0II}) \quad (5.1.3)$$

Ovdje su:

η_{Br1} - stupanj iskoristivosti pretvarača uz uključenu kočnicu Br1

η_{Br2} - stupanj iskoristivosti pretvarača uz uključenu kočnicu Br2

Kad su na osnovu zahtijevanih prijenosnih omjera određeni idealni momentni omjeri (omjeri broja zubi vijenaca i sunčanih zupčanika planetnih slogova) može se usvojiti broj zubi sunčanog zupčanika svakog od planetnih slogova te na osnovu zahtijevanih idealnih momentnih omjera uz poštivanje nužnih uvjeta sinteze planetnog sloga dobiti brojeve zubi ostalih zupčanika. Nakon što su poznati stvarni brojevi zubi zupčanika moguće je za svaki planetni slog ponaosob odrediti računski relativni stupanj iskoristivosti prema izrazima navedenim u poglavlju 2.

Dvovodilni planetni pretvarači su prema položaju kočnica u ovom radu podijeljeni u tri skupine (dvovodilni pretvarači s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima, dvododilni pretvarači s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima i dvovodilni pretvarači s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu). Stupnjevi iskoristivosti varijanti pretvarača svake skupine ponaosob su obrađeni u nastavku.

5.1.2 Ekvivalentni stupanj iskoristivosti

Mjenjački pretvarači u svom radnom vijeku rade u različitim brzinama. Dvobrzinski pretvarači rade u dvije različite brzine i to s jednom brzinom jedan udio radnog vijeka, a s drugom brzinom drugi udio radnog vijeka. Pri osnivanju dvobrzinskog pretvarača je obično poznato za koju svrhu će se primjenjivati i mogu se procijeniti udjeli rada u svakoj od brzina. U općem slučaju se prilikom promjene brzine mijenja i stupanj iskoristivosti pretvarača. U jednoj brzini stupanj iskoristivosti može biti veći, a u drugoj manji. Na osnovu poznatih udjela rada u svakoj od brzina i na osnovu poznatih stupnjeva iskoristivosti pretvarača u svakoj od brzina moguće je odrediti ekvivalentni stupanj iskoristivosti pretvarača. Ekvivalentni stupanj iskoristivosti predstavlja pokazatelj efikasnosti pretvorbe pogonske energije u radnom vijeku mjenjačkih pretvarača, a kod dvobrzinskih pretvarača izračunava se preko (5.1.4) :

$$\eta_{\text{ekv}} = \alpha_{\text{Br1}} \cdot \eta_{\text{Br1}} + \alpha_{\text{Br2}} \cdot \eta_{\text{Br2}} \quad (5.1.4)$$

Ovdje su:

α_{Br1} - udio rada pretvarača u brzini Br1 (uz uključenu kočnicu Br1) sa stupnjem iskoristivosti η_{Br1} ($0 \leq \alpha_{\text{Br1}} \leq 1$)

α_{Br2} - udio rada pretvarača u brzini Br2 (uz uključenu kočnicu Br2) sa stupnjem iskoristivosti η_{Br2} ($0 \leq \alpha_{\text{Br2}} \leq 1$)

Zbroj udjela rada je jednak jedinici ($\alpha_{\text{Br1}} + \alpha_{\text{Br2}} = 1$).

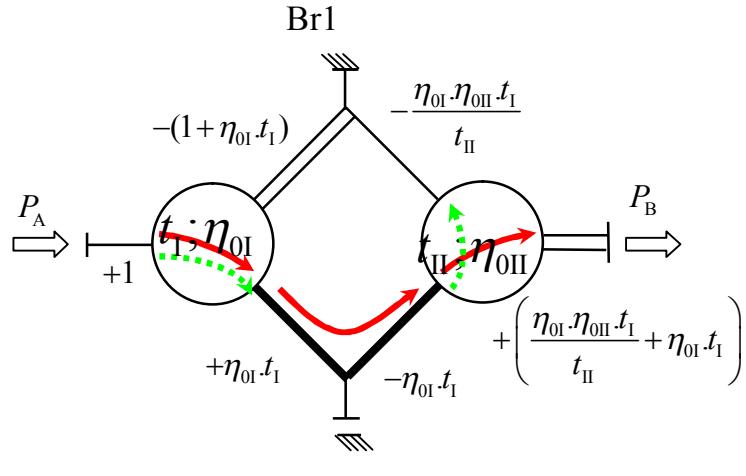
5.2 Stupanj iskoristivosti pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima

Kod dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima u svakoj brzini aktivno radi po jedan planetni slog u dvovratilnom režimu rada. Za vrijeme aktivnog rada jednog planetnog sloga drugi planetni slog radi u praznom hodu. Dakle, u drugom planetnom slogu nastaju samo gubici praznog hoda i oni nisu ovisni o opterećenju pretvarača. U proračunima stupnjeva iskoristivosti varijanti pretvarača s kočnicama raspoređenim na zasebnim vratilima u ovom radu se zanemaruju gubici planetnog sloga koji ne radi pod opterećenjem. Kod ovih pretvarača računski stupnjevi iskoristivosti se dobivaju na osnovu računskog relativnog stupnja iskoristivosti i idealnog momentnog omjera planetnog sloga prema izrazima iz poglavlja 2. Funkcije stupnjeva iskoristivosti svih varijanti pretvarača ove skupine (V6 ili V12) su izvedene u Prilogu 1.

5.3 Stupanj iskoristivosti pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima

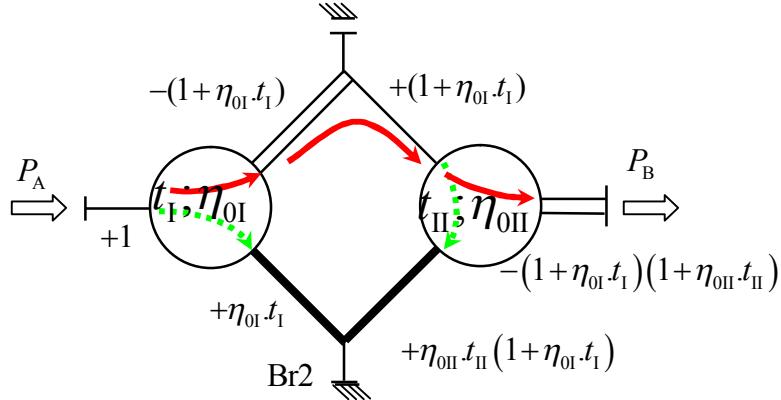
Kod ovih varijanti planetnih pretvarača u svakoj od brzina rade dva redno spojena planetna sloga. Oba planetna sloga rade u dvovratilnom režimu rada. Računski stupanj iskoristivosti za svaku brzinu ponaosob se može dobiti množenjem stupnjeva iskoristivosti svakog planetnog sloga ponaosob. Računski stupanj iskoristivosti se može dobiti i prema postupku navedenom u poglavlju 5.1.

Na sl. 5.3.1 i sl. 5.3.2 je prikazan primjer određivanja funkcije stupnja iskoristivosti za obje brzine varijante S15V1. Stupanj iskoristivosti je funkcija idealnih momentnih omjera t_I i t_{II} te relativnih stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova η_{0I} i η_{0II} . Prema smjeru relativnog energetskog toka koji je prikazan zakriviljenom isprekidanim crtama sa strelicom (sl. 5.3.1, sl. 5.3.2 i Prilog 1) se mogu odrediti realni relativni momenti na vratilima.



$$\eta_{Br1} = \frac{(T_B)_{sgubicima}}{(T_B)_{bez gubitaka}} = \frac{\frac{\eta_{0I} \cdot \eta_{0II} \cdot t_I}{t_{II}} \left(1 + \frac{t_{II}}{\eta_{0II}} \right)}{\frac{t_I}{t_{II}} (1 + t_{II})} = \frac{\eta_{0I} \cdot \eta_{0II} \left(1 + \frac{t_{II}}{\eta_{0II}} \right)}{(1 + t_{II})}$$

Sl. 5.3.1 Specifični realni relativni momenti na vratilima, energetski tokovi i stupanj iskoristivosti varijante S15V1Br1



$$\eta_{Br2} = \frac{(T_B)_{sgubicima}}{(T_B)_{bez gubitaka}} = \frac{(1 + \eta_{0I} \cdot t_I)(1 + \eta_{0II} \cdot t_{II})}{(1 + t_I)(1 + t_{II})}$$

Sl. 5.3.2 Specifični realni relativni momenti na vratilima, energetski tokovi i stupanj iskoristivosti varijante S15V1Br2

Prema prikazanom postupku su određeni smjerovi relativnih energetskih tokova za različite sheme s varijantama razmještaja V1. U Tab. 5.3.1 su navedeni smjerovi relativnih energetskih tokova svake varijante ponaosob pri čemu malo slovo "e" označava relativni energetski tok usmjeren od sunčanog zupčanika prema vijencu dok veliko slovo "E" označava relativni energetski tok usmjeren od vijenca prema sunčanom zupčaniku. Analiza relativnih snaga temeljena na izrazima (2.8.3) i (2.8.4) pokazuje da smjer relativnog

energetskog toka ovisi samo o varijanti pretvarača, a ne i o njenim parametrima (t_1 i t_{II}). Uz poznavanje smjerova relativnih energetskih tokova na planetnim slogovima složenog planetnog pretvarača (Tab. 5.3.1) te na osnovu poznavanja funkcije kinematičkog prijenosnog omjera (Tab. 4.3.1) je moguće doći do izraza za računske stupnjeve iskoristivosti ovakvih pretvarača kao funkcije idealnih momentnih omjera i relativnih stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova.

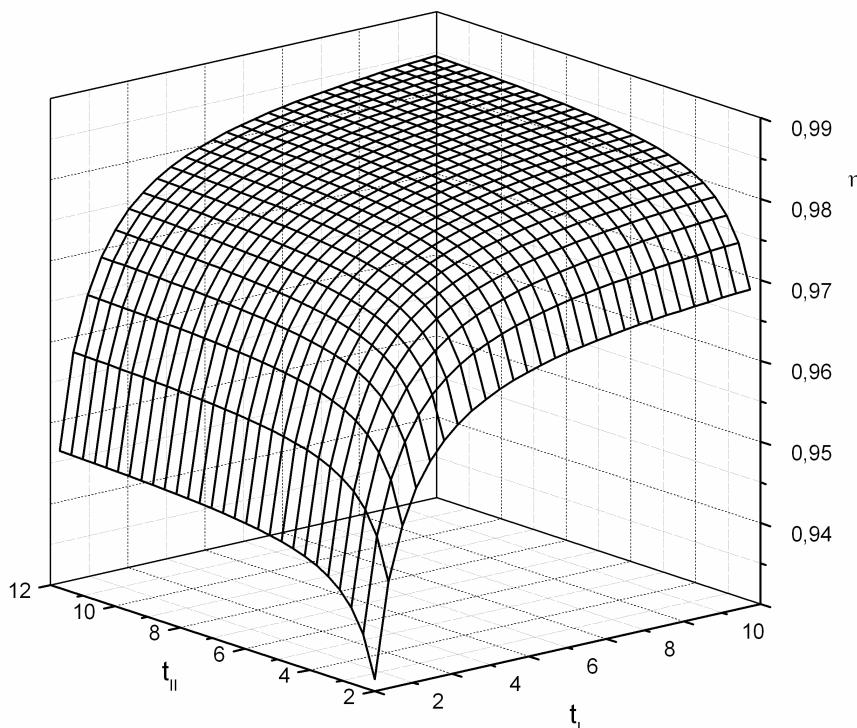
Kod pretvarača s varijantom razmještaja V7 aktivni i relativni energetski tokovi su suprotnog smjera što znači da u slučaju varijante razmještaja V7 mala slova "e" prelaze u velika slova "E" i obratno. U posljednja dva stupca Tab. 5.3.1 su minimalna i maksimalna vrijednost računskog stupnja iskoristivosti svake sheme s varijantom razmještaja V1 za brzine Br1 i Br2 i služe kao orijentacijske vrijednosti. Naime, te su vrijednosti dobivene računski uzimajući u obzir da sunčani zupčanici obaju planetnih slogova imaju po 18 zubi uz srednje vrijednosti koeficijenata gubitaka ($k_B = 0,065$, $k_S = 0,05$, $k_C = 0,135$), prema izrazima u poglavljju 2.9.

Tab. 5.3.1 Smjerovi relativnih energetskih tokova i ekstremne vrijednosti orijentacijskih stupnjeva iskoristivosti dvobrzinskih pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima

oznaka varijante	(e, E) Br1		(e, E) Br2		η_{Br1}	η_{Br2}
	pl. sl. I (lijevo)	pl. sl. II (desno)	pl. sl. I (lijevo)	pl. sl. II (desno)	max min	max min
S11V1	e	E	e	E	0,973 0,898	0,975 0,931
S12V1	e	E	e	E	0,974 0,914	0,974 0,915
S13V1	e	e	e	e	0,973 0,898	0,986 0,948
S14V1	e	e	e	e	0,985 0,931	0,974 0,915
S15V1	e	E	e	e	0,985 0,931	0,975 0,931
S16V1	e	e	e	E	0,974 0,915	0,986 0,948
S33V1	E	e	E	e	0,973 0,898	0,998 0,965
S34V1	E	e	E	e	0,985 0,931	0,985 0,931
S35V1	E	E	E	e	0,985 0,931	0,986 0,948
S36V1	E	e	E	E	0,974 0,915	0,998 0,965
S55V1	e	E	E	e	0,998 0,965	0,975 0,931
S56V1	e	e	E	E	0,986 0,948	0,986 0,948
Napomena: Kod navedenih shema s varijantom rasporeda V7 smjer energetskog toka na planetnim sloganima se mijenja ($e \rightarrow E$, $E \rightarrow e$)						

Analiza matematičko-mehaničkih modela stupnjeva iskoristivosti iz Priloga 1 pokazuje da je svim shemama s varijantom razmještaja V1 i V7 zajedničko da stupanj iskoristivosti ima minimum uz idealne momentne omjere (2; 2), a maksimum uz idealne momentne omjere (12; 12). Graf na sl. 5.3.3 je dobiven uz pretpostavku da broj zubi sunčanog zupčanika na oba planetna sloga iznosi 18. Pri generiranju grafa usvojeni su koeficijenti gubitaka sa srednjom vrijednosti. ($k_B = 0,065$, $k_S = 0,05$, $k_C = 0,135$)

Sve varijante ove skupine pretvarača imaju sličan graf funkcije stupnja iskoristivosti grafu na sl. 5.3.3.



Sl. 5.3.3 Graf funkcije stupnja iskoristivosti kod varijante S15V1Br1

5.4 Energetske karakteristike kod pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu

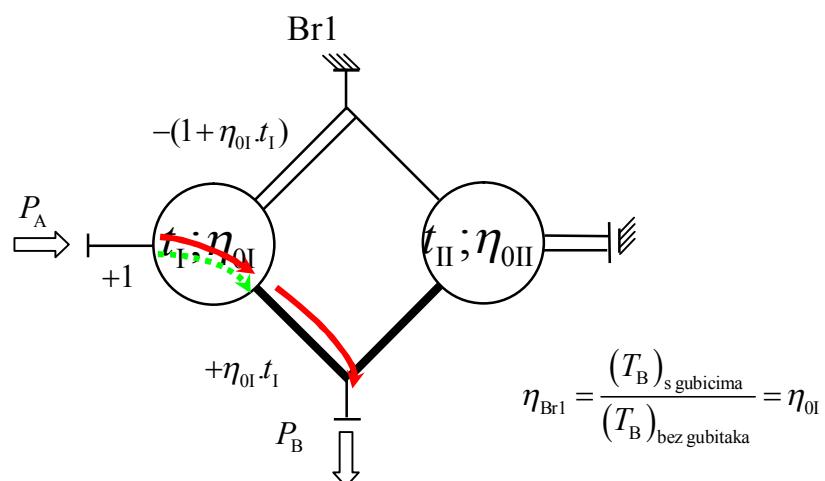
5.4.1 Određivanje računskog stupnja iskoristivosti

Kod ove skupine pretvarača pri radu s uključenom kočnicom Br1 radi samo jedan planetni slog s jednim stupnjem slobode u jednom od 6 mogućih režima (1, 2, 3, 1M, 2M, 3M). Uz uključenu kočnicu Br2 rade oba sloga planetnog pretvarača i to jedan u dvovratilnom, a jedan u trovratilnom režimu rada. Računski stupnjevi iskoristivosti se mogu

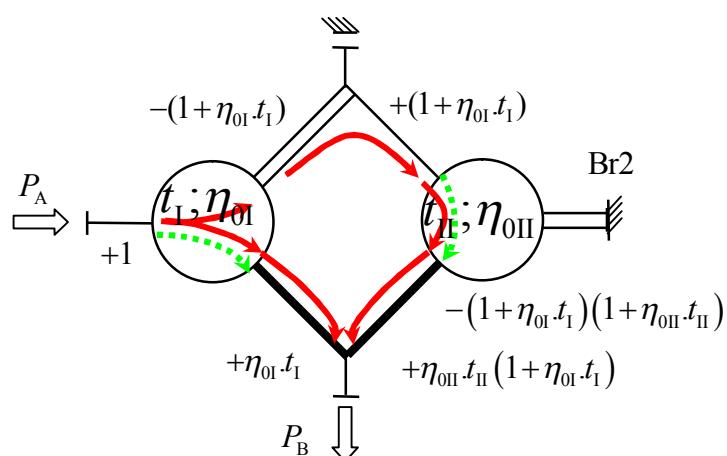
odrediti prema (5.1.1). Da bi se odredile funkcije stupnjeva iskoristivosti treba poznavati smjerove relativnih energetskih tokova na planetnim sloganima.

Nakon što su za primjer za varijantu S15V2 u poglavlju 4.4.1 određeni specifični relativni idealni momenti na vratilima (sl. 4.4.4 i sl. 4.4.4), aktivni energetske tokovi i prijenosni omjeri može se odrediti smjerove relativnih energetskih tokova na planetnim sloganima. Metodom prikazanom u [57] i poglavlju 3.4 su određeni smjerovi relativnih energetskih tokova različitih varijanti ovih pretvarača što je prikazano u Prilogu 1.

Kao primjer je na sl. 5.4.1 i sl. 5.4.2 za varijantu S15V2 prikazano određivanje smjerova relativnih energetskih tokova i funkcije stupnja iskoristivosti. Smjerovi relativnih energetskih tokova na planetnim sloganima su prikazani zakriviljenom isprekidanim crtom sa strelicom.



Sl. 5.4.1 Specifični realni relativni momenti, smjer relativnog energetskog toka i funkcija stupnja iskoristivosti kod rada s uključenom kočnicom Br1 varijante S15V2



$$\eta_{Br2} = \frac{(T_B)_{sgubicima}}{(T_B)_{bez\ gubitaka}} = \frac{\eta_{0I} \cdot t_I + \eta_{0II} \cdot t_{II} + \eta_{0I} \cdot \eta_{0II} \cdot t_I \cdot t_{II}}{t_I + t_{II} + t_I \cdot t_{II}}$$

Sl. 5.4.2 Specifični realni relativni momenti, smjerovi relativnih energetskih tokova i funkcija stupnja iskoristivosti kod rada s uključenom kočnicom Br2 varijante S15V2

U Tab. 5.4.1 su uz izraze za kinematički prijenosni omjer u brzini Br2 navedene i oznake koje određuju smjerove relativnih energetskih tokova na planetnim slogovima kod rada pretvarača s uključenom kočnicom Br2. Kod nekih varijanti, kao što je npr. S11V4 je smjer relativnog energetskog toka uvjetovan međusobnim odnosom idealnih momentnih omjera planetnih slogova. Kod varijanti pretvarača kod kojih je to slučaj naveden je i uvjet o kojem ovise smjerovi relativnih energetskih tokova. Smjerovi relativnih energetskih tokova označeni su velikim ili malim slovom "e". Malo slovo "e" označava relativni energetski tok usmjeren od sunčanog zupčanika prema vijencu, dok veliko slovo "E" označava relativni energetski tok usmjeren od vijenca prema sunčanom zupčaniku. U zadnjem stupcu je u cilju orijentacije navedena je minimalna i maksimalna vrijednost stupnja iskoristivosti svake razmatrane varijante pretvarača. Vrijednosti su dobivene pomoću računala. Pošlo se od pretpostavke da svaki planetni slog ima sunčani zupčanik s 18 zubi. Stupnjevi iskoristivosti su dobiveni u konstrukcijski izvedivom intervalu idealnih momentnih omjera u granicama od $2 \leq t_I \leq 12$ i $2 \leq t_{II} \leq 12$.

Pri izračunu su usvojene srednje vrijednosti koeficijenta gubitaka ($k_B = 0,065$, $k_S = 0,05$, $k_C = 0,13$).

U Tab. 5.4.1 su navedeni podaci koji omogućuju izvođenje funkcija stupnja iskoristivosti kod brzine Br2 za sve različite varijante pretvarača ove skupine. Uz oznaku varijante pretvarača na koju se odnose navedeni podaci iz tablice, u zagradi je navedena i njoj inverzna varijanta pretvarača. Kod varijanti pretvarača u zagradama izrazi za prijenosni omjer su recipročni navedenima, a smjerovi relativnih energetskih tokova su suprotni navedenima. Varijante u zagradama u brzini Br2 pretežno rade kao multiplikatori.

Tab. 5.4.1 Podaci potrebni za određivanje funkcije stupnja iskoristivosti η_{Br2}

Varijanta pretvarača	i_{Br2}	Uvjet	Relativni energetski tokovi na pl. slogu		Vrijednost η_{Br2}
			I	II	
S11V4 (S11V10)	$\frac{1+t_I}{t_I - t_{II}}$	$t_I > t_{II}$ $t_I < t_{II}$	E e	e E	0,986 0
S11V5 (S11V11)	$\frac{t_I}{t_I - t_{II}}$	$t_I > t_{II}$ $t_I < t_{II}$	E e	e E	0,987 0
S12V2 (S12V8)	$+1 + \frac{1+t_I}{t_{II}}$		e	E	0,991 0,945
S12V3 (S12V9)	$+1 + \frac{t_I}{1+t_{II}}$		e	E	0,992 0,961
S13V2 (S13V8)	$-\frac{t_I t_{II} - 1}{1 + t_{II}}$		e	e	0,985 0,896
S13V3 (S13V9)	$-(t_I t_{II} - 1)$		e	e	0,973 0,865
S13V4 (S13V10)	$+ \frac{t_{II} + t_I t_{II}}{t_I t_{II} - 1}$		E	E	0,999 0,950
S13V5 (S13V11)	$+ \frac{t_I t_{II}}{t_I t_{II} - 1}$		E	E	0,999 0,967
S14V2 (S14V8)	$1 + t_{II} + t_I t_{II}$		e	e	0,974 0,927
S14V3 (S14V9)	$1 + \frac{t_I t_{II}}{1 + t_{II}}$		e	e	0,986 0,961
S14V10 (S14V4)	$1 + \frac{1}{t_{II} + t_I t_{II}}$		E	E	0,999 0,988
Napomene: - varijante u zagradama imaju recipročan prijenosni omjer navedenom i kod njih je smjer relativnih energetskih tokova suprotan navedenom ($e \rightarrow E$, $E \rightarrow e$) - e - tok relativne energije od sunčanog zupčanika prema vijencu - E - tok relativne energije od vijenca prema sunčanom zupčaniku					

Tab. 5.4.1 (nastavak) Podaci potrebni za određivanje funkcije stupnja iskoristivosti η_{Br2}

Varijanta pretvarača	i_{Br2}	Uvjet	Relativni energetski tokovi na pl. slogu		Vrijednost η_{Br2}
			I	II	
S14V11 (S14V5)	$1 + \frac{1+t_{II}}{t_I t_{II}}$		E	E	0,999 0,971
S15V2 (S15V8)	$-(t_I + t_{II} + t_I t_{II})$		e	e	0,975 0,923
S15V3 (S15V9)	$1 + t_I + \frac{t_I}{t_{II}}$		e	E	0,986 0,949
S15V4 (S15V10)	$1 + \frac{1}{t_I + t_{II} + t_I t_{II}}$		E	E	0,999 0,991
S15V11 (S15V5)	$1 + \frac{t_{II}}{t_I + t_I t_{II}}$		E	e	0,999 0,983
S16V2 (S16V8)	$-\left(t_I + \frac{1+t_I}{t_{II}}\right)$		e	E	0,985 0,934
S16V3 (S16V9)	$1 + t_I + t_I t_{II}$		e	e	0,974 0,927
S16V4 (S16V10)	$1 + \frac{t_{II}}{1 + t_I + t_I t_{II}}$		E	e	0,999 0,984
S16V11 (S16V5)	$1 + \frac{1}{t_I + t_I t_{II}}$		E	E	0,999 0,988
S33V4 (S33V10)	$\frac{t_{II}(1+t_I)}{t_{II}-t_I}$	$t_I > t_{II}$ $t_I < t_{II}$	E e	e E	0,964 0
S33V5 (S33V11)	$\frac{t_{II}}{t_{II}-t_I}$	$t_I > t_{II}$ $t_I < t_{II}$	E e	e E	0,987 0
Napomene:					
- varijante u zagradama imaju recipročan prijenosni omjer navedenom i kod njih je smjer relativnih energetske tokova suprotan navedenom (e → E, E → e)					
- e - tok relativne energije od sunčanog zupčanika prema vijencu					
- E - tok relativne energije od vijenca prema sunčanom zupčaniku					

Tab. 5.4.1 (nastavak) Podaci potrebni za određivanje funkcije stupnja iskoristivosti η_{Br2}

Varijanta pretvarača	i_{Br2}	Uvjet	Relativni energetski tokovi na pl. slogu		Vrijednost η_{Br2}
			I	II	
S34V2 (S34V8)	$1 + t_{II} + \frac{t_{II}}{t_I}$		E	e	0,986 0,949
S34V3 (S34V9)	$1 + \frac{t_{II}}{t_I + t_I t_{II}}$		E	e	0,999 0,983
S35V2 (S35V8)	$-\left(t_{II} + \frac{1+t_{II}}{t_I} \right)$		E	e	0,985 0,934
S35V3 (S35V9)	$1 + \frac{1+t_{II}}{t_I t_{II}}$		E	E	0,999 0,971
S35V4 (S35V10)	$1 + \frac{t_I}{1+t_{II}+t_I t_{II}}$		e	E	0,999 0,984
S35V11 (S35V5)	$1 + \frac{t_I t_{II}}{1+t_{II}}$		e	e	0,986 0,961
S36V3 (S36V9)	$1 + \frac{1+t_{II}}{t_I}$		E	e	0,991 0,945
S36V4 (S36V10)	$1 + \frac{t_I t_{II}}{1+t_I+t_{II}}$		e	e	0,988 0,971
S36V8 (S36V2)	$-\frac{t_I t_{II}}{1+t_I+t_{II}}$		e	e	0,986 0,938
S36V11 (S36V5)	$1 + \frac{t_I}{1+t_{II}}$		e	E	0,992 0,961

Napomene:

- varijante u zagradama imaju recipročan prijenosni omjer navedenom i kod njih je smjer relativnih energetskih tokova suprotan navedenom ($e \rightarrow E$, $E \rightarrow e$)
- e - tok relativne energije od sunčanog zupčanika prema vijencu
- E - tok relativne energije od vijenca prema sunčanom zupčaniku

Tab. 5.4.1 (nastavak) Podaci potrebni za određivanje funkcije stupnja iskoristivosti η_{Br2}

Varijanta pretvarača	i_{Br2}	Uvjet	Relativni energetski tokovi na pl. slogu		Vrijednost η_{Br2}
			I	II	
S55V4 (S55V10)	$\frac{1+t_{II}}{t_{II}-t_I}$	$t_I > t_{II}$	E	e	0,986
		$t_I < t_{II}$	e	E	0
S55V5 (S55V11)	$\frac{t_I+t_I t_{II}}{t_{II}-t_I}$	$t_I > t_{II}$	E	e	0,964
		$t_I < t_{II}$	e	E	0
S56V3 (S56V9)	$-\frac{t_I t_{II} - 1}{1 + t_I}$		e	E	0,985
					0,896
S56V5 (S56V11)	$+\frac{t_I + t_I t_{II}}{t_I t_{II} - 1}$		E	E	0,999
					0,951
Napomene: - varijante u zagradama imaju recipročan prijenosni omjer navedenom i kod njih je smjer relativnih energetskih tokova suprotan navedenom ($e \rightarrow E$, $E \rightarrow e$) - e - tok relativne energije od sunčanog zupčanika prema vijencu - E - tok relativne energije od vijenca prema sunčanom zupčaniku					

Kao primjer je u nastavku za varijantu S55V5 prikazan postupak dobivanja funkcije stupnja iskoristivosti u brzini Br2.

Za varijantu S55V5 pri radu s uključenom kočnicom Br2 izraz za kinematički prijenosni omjer prema Tab. 5.4.1 je:

$$i = \frac{t_I + t_I t_{II}}{t_{II} - t_I} \quad (5.4.1)$$

U Tab. 5.4.1 je također navedeno da je za varijantu S55V5 pri radu s uključenom kočnicom Br2 relativni energetski tok kod prvog planetnog sloga usmjeren od sunčanog zupčanika prema vijencu (e), a relativni energetski tok kod drugog planetnog sloga usmjeren od vijenca prema sunčanom zupčaniku (E).

Energetski prijenosni omjer uz uvjet $t_I < t_{II}$ je:

$$i_T = -\frac{\eta_{0I}t_I + \eta_{0I}t_I \frac{t_{II}}{\eta_{0II}}}{\frac{t_{II}}{\eta_{0II}} - \eta_{0I}t_I} \quad (5.4.2)$$

Negativna vrijednost odnosa energetskog prijenosnog omjera i kinematičkog prijenosnog omjera predstavlja matematički model računskog stupnja iskoristivosti pretvarača varijante S55V5 koji radi u brzini Br2 (uključena kočnica Br2). Ovaj model pokazuje ovisnost stupnja iskoristivosti varijante S55V5 u brzini Br2 η_{Br2} o relativnim stupnjevima iskoristivosti planetnih slogova η_{0I} i η_{0II} i idealnim momentnim omjerima planetnih slogova t_I i t_{II} .

$$\eta_{Br2} = -\frac{\frac{\eta_{0I}t_I + \eta_{0I}t_I \frac{t_{II}}{\eta_{0II}}}{\frac{t_{II}}{\eta_{0II}} - \eta_{0I}t_I}}{\frac{t_I + t_I t_{II}}{t_{II} - t_I}} \quad (5.4.3)$$

U slučaju da je kod varijante S55V5 pri radu s uključenom kočnicom Br2 $t_{II} < t_I$, relativni energetski tokovi u planetnim slogovima mijenjaju smjer pa je funkcija stupnja iskoristivosti nešto drugačijeg oblika:

$$\eta_{Br2} = -\frac{\frac{t_I + \frac{t_I}{\eta_{0I}} \eta_{0II} t_{II}}{\eta_{0II} t_{II} - \frac{t_I}{\eta_{0I}}}}{\frac{t_I + t_I t_{II}}{t_{II} - t_I}} \quad (5.4.4)$$

Za sve druge varijante postupak izvođenja mehaničko-matematičkih modela je provediv na isti način. Dakle, pomoću Tab. 5.4.1 je moguće za sve navedene varijante dobiti funkciju stupnja iskoristivosti u brzini Br2 prema prikazanom postupku. Stupanj iskoristivosti u brzini Br1 se može dobiti prema izrazima navedenim u Tab. 2.9.1.

5.4.2 Energetski tokovi i jalova snaga

Analizom svih varijanti pretvarača koji imaju kočnice raspoređene na spojnom i zasebnom vratilu je utvrđeno da u okviru jedne varijante postoje četiri različite mogućnosti protjecanja energije [57]. U Tab. 5.4.2 su prikazani mogući energetski tokovi kod međusobno inverznih varijanti razmještaja i to: V5 odnosno V11. Kod drugih varijanti kod kojih su kočnice montirane na spojnom i zasebnom vratilu su mogući isti smjerovi

energetskih tokova u odnosu na ulazno i izlazno vratilo kao i kod varijanti V5 odnosno V11. Ti smjerovi ovise o izabranoj shemi. Analiza energetskih tokova za šest različitih varijanti razmještaja kočnica kod svih shema je napravljena u Prilogu 1.

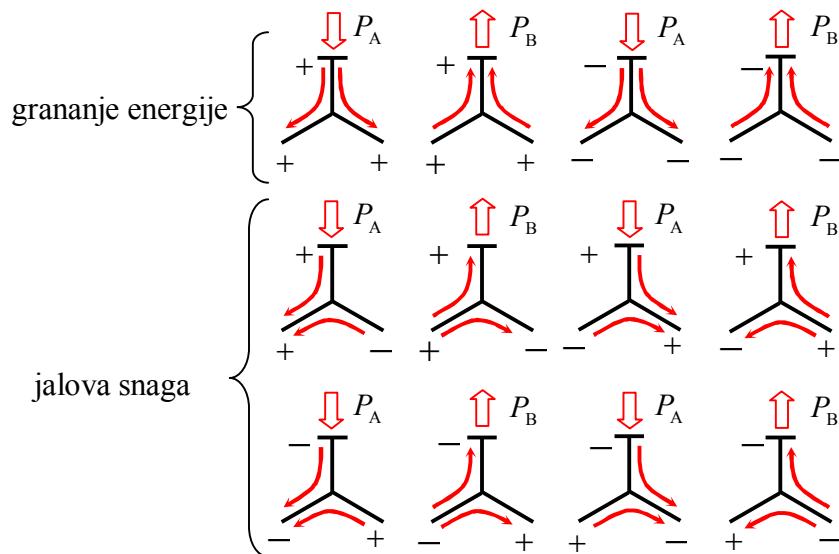
Tab. 5.4.2 Mogući načini energetskih tokova kod pretvarača s varijantom razmještaja V5 odnosno V11

Energetski tok u brzini Br1	Grananje energetskih tokova u brzini Br2	Jalov energetske tok u brzini Br2	Jalov energetske tok u brzini Br2

U prvom stupcu Tab. 5.4.2 je prikazan energetski tok kod pretvarača pri radu uz zakočeno spojno vratilo, dakle s aktivnom kočnicom Br1. U drugom stupcu su simbolički prikazane varijante kod kojih je prisutno grananje energetskih tokova. U trećem i četvrtom stupcu su prikazani energetski tokovi s jalovom komponentom (cirkulacija snage) koji mogu biti u dva različita smjera.

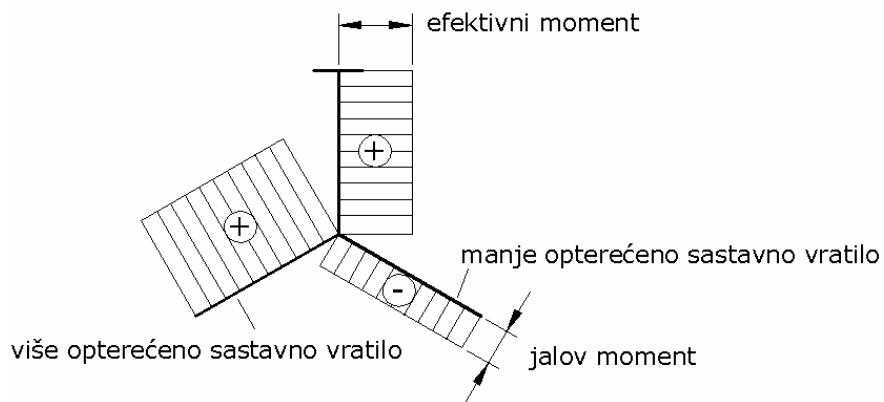
U [1] je navedeno da kod shema s prisutnom jalovom snagom može doći do neželjenih pojava, a to je niži stupanj iskoristivosti pretvarača i relativno veća opterećenja njegovih elemenata što uzrokuje njegove relativno veće dimenzije.

Jalova snaga se javlja kod nekih pretvarača ove skupine u radu s aktivnom kočnicom Br2. Na osnovu poznavanja smjera momenata na pojedinim vratilima može se zaključiti kod kojih varijanti se pojavljuju jalovi energetski tokovi, a kod kojih grananje energetskog toka. Naime, promatrajući predznake relativnih momenata na sastavnim vratilima vanjskog spojnog vratila može se zaključiti radi li se o granjanju energije ili o pojavi jalove snage. Ako su predznaci specifičnih momenata na oba sastavna vratila jednaki radi se o granjanju energetskih tokova. Ako se radi o različitim predznacima na sastavnim vratilima prisutna je jalova snaga (sl. 5.4.3) [57, 75].



Sl. 5.4.3 Smjerovi energetskih tokova ovisno o predznaku momenata na vratilima

Intenzitet jalove snage je jednak umnošku intenziteta kutne brzine vanjskog spojnog vratila i intenziteta jalovog momenta. Jalov moment je jednak momentu manje opterećenog sastavnog vratila. Na sl. 5.4.4 je prikazan dijagram momenata vanjskog spojnog vratila.



Sl. 5.4.4 Dijagram momenata na vanjskom spojnem vratilu

Analizom predznaka je određeno na kojim varijantama dvovodilnih pretvarača dolazi do grananja energije i kod kojih dolazi do pojave jalovog energetskog toka. U Tab. 5.4.3 je dat pregled varijanti ove skupine pretvarača kod kojih je prisutno grananje energetskog toka odnosno kod kojih je prisutan jalov energetski tok (jalova snaga).

Tab. 5.4.3 Pregled varijanti pretvarača kod kojih se javlja grananje energetskog toka ili jalov energetski tok

Jalov energetski tok	Grananje energetskog toka
S11V4(V10) ili S11V8(V2)	S15V2(V8)
S11V5(V11) ili S11V9(V3)	S15V3(V9)
S12V2(V8) ili S12V11(V5)	S15V4(V10)
S12V3(V9) ili S12V10(V4)	S15V11(V5)
S13V2(V8)	S16V2(V8)
S13V3(V9)	S16V3(V9)
S13V4(V10)	S16V4(V10)
S13V5(V11)	S16V11(V5)
S14V2(V8)	S35V2(V8)
S14V3(V9)	S35V3(V9)
S14V10(V4)	S35V4(V10)
S14V11(V5)	S35V11(V5)
S33V4(V10) ili S33V8(V2)	S36V3(V9)
S33V5(V11) ili S33V9(V3)	S36V4(V10)
S34V2(V8) ili S34V11(V5)	S36V8(V2)
S34V3(V9) ili S34V10(V4)	S36V11(V5)
S55V4(V10) ili S55V8(V2)	
S55V5(V11) ili S55V9(V3)	
S56V3(V9) ili S56V10(V4)	
S56V5(V11) ili S56V8(V2)	
Napomena: U zagradama su navedene inverzne varijante razmještaja dotične sheme	

Postoji 20 parova međusobno inverznih varijanti pretvarača kojima je imanentna jalova snaga i 16 parova međusobno inverznih varijanti pretvarača kod kojih je prisutno grananje energetskog toka.

Ako je jalova snaga velika može doći do značajnijeg smanjenja stupnja iskoristivosti. U Tab. 5.4.4 su za navedene varijante pretvarača kod kojih je imanentna jalova snaga date minimalne i maksimalne vrijednosti specifične jalove snage. Specifična jalova snaga je omjer jalove snage P_j i snage na ulazu u pretvarač P_A .

Tab. 5.4.4 Minimalni i maksimalni intenziteti specifične jalove snage (poredak prema maksimalnoj vrijednosti od manje na više)

Varijanta pretvarača	Minimalna ostvariva vrijednost specifične jalove snage P_J / P_A	Maksimalna ostvariva vrijednost specifične jalove snage P_J / P_A
S34V2(V8)	0,06	0,12
S34V3(V9)	0,06	0,12
S56V5(V11)	0,07	0,29
S56V3(V9)	0,07	0,35
S14V10(V4)	0,05	0,42
S14V11(V5)	0,05	0,42
S14V2(V8)	0,05	0,44
S14V3(V9)	0,05	0,45
S13V5(V11)	0,09	0,9
S13V4(V10)	0,09	0,9
S13V3(V9)	0,09	0,97
S13V2(V8)	0,09	1
S12V2(V8)	0,76	5,68
S12V3(V9)	0,77	6,69
S55V4(V10)	0,18	35,81
S55V5(V11)	0,18	35,81
S33V5(V11)	0,28	38,83
S33V4(V10)	0,28	38,83
S11V5(V11)	2,43	471,43
S11V4(V10)	2,43	471,43

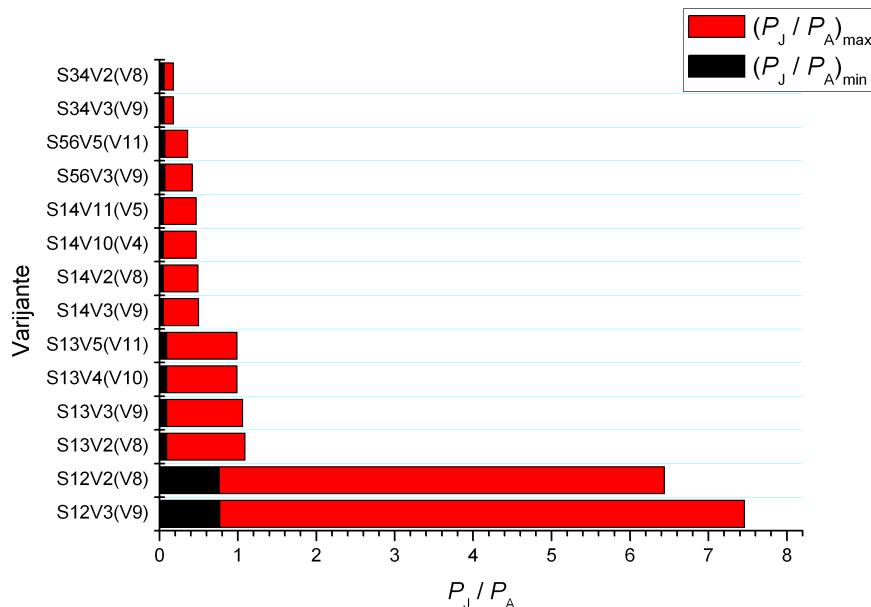
Napomena: Kod S11, S33 i S55 veličina jalove snage kod jednakih idealnih momentnih omjera je beskonačna. Kod brojeva zubi $z_{II} = z_{III} = 18$ te sheme pri najbližoj vrijednosti razlike idealnih momentnih omjera različitoj od nula dostižu vrijednosti napisane tablici.
U zagradama su navedene inverzne varijante razmještaja dotične sheme.

Iz Tab. 5.4.4 se vidi da se kod shema S11, S33 i S55 mogu pojaviti izrazito velike vrijednosti jalove snage. Velika jalova snaga kakva može nastati kod navedene tri sheme zasigurno ima značajan utjecaj na smanjenje stupnja iskoristivosti.

Osim kod navedenih shema relativno velika jalova snaga može nastati još kod varijanti S12V2 i S12V3.

Ako jedna varijanta pretvarača ima kod određenih idealnih momentnih omjera veću specifičnu jalovu snagu od druge varijante to ne znači da će ta varijanta nužno imati i manji stupanj iskoristivosti od druge. To dokazuju podaci u Tab. 5.4.1. Primjerice varijanta S12V2, prema Tab. 5.4.1 ima minimalni stupanj iskoristivosti veći od minimalnog stupnja iskoristivosti varijante S13V2 kod koje se javlja relativno manja specifična jalova snaga. Dakle jalova snaga ima različite utjecaje na stupanj iskoristivosti kod različitih varijanti pretvarača.

Na sl. 5.4.5 su grafički predstavljene minimalna i maksimalna vrijednost specifične jalove snage kod svih shema osim S11, S33 i S55 kod kojih ona može postati ekstremno velika.



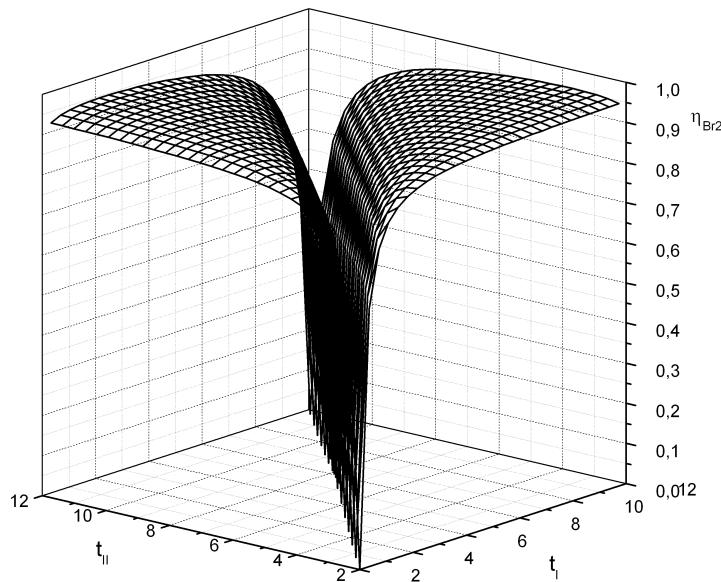
Sl. 5.4.5 Grafički prikaz maksimalnih i minimalnih intenziteta specifične jalove snage kod izabranih varijanti

5.4.3 Stupnjevi iskoristivosti određenih pretvarača kod kojih se povećanjem

prijenosnog omjera uz aktivnu kočnicu Br2 smanjuje stupanj iskoristivosti

Od svih varijanti pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu najveću promjenu stupnja iskoristivosti ovisno o idealnim momentnim omjerima imaju pretvarači shema S11, S33 i S55. Kod njih se u brzini Br2 mogu ostvariti izrazito veliki prijenosni omjeri pri čemu se stupanj iskoristivosti može značajno smanjiti. U cilju prikaza funkcije stupnja iskoristivosti ovih pretvarača pri radu u brzini Br2 generiran je graf stupnja iskoristivosti varijante S55V5. Graf je prikazan na sl. 5.4.6. Funkcija stupnja iskoristivosti definirana izrazima (5.4.3) i (5.4.4) je izračunata u domeni idealnih momentnih omjera ($2 \leq t_I \leq 12$, $2 \leq t_{II} \leq 12$).

Pri izračunavanju vrijednosti stupnja iskoristivosti η_{Br2} , računato je s relativnim stupnjevima iskoristivosti planetnih slogova (η_{0I} i η_{0II}), dobivenih uz pretpostavku da sunčani zupčanici obaju planetnih slogova imaju po 18 zubi ($z_{II}=18$ i $z_{III}=18$). Pored toga usvojene su srednje vrijednosti koeficijenata gubitaka u mazivu ($k_C = 0,135$), ležajevima ($k_B = 0,065$) i brtvama ($k_S = 0,05$).

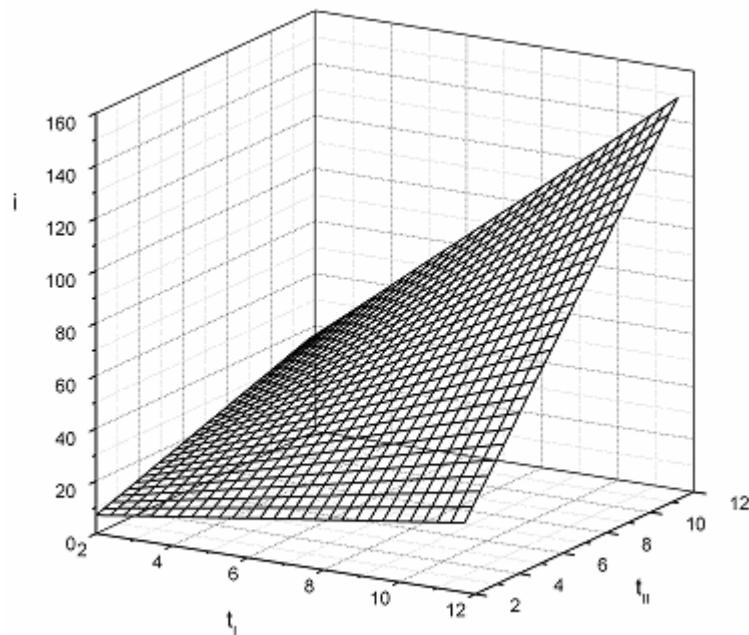


Sl. 5.4.6 Graf funkcije stupnja iskoristivosti varijante S55V5Br2

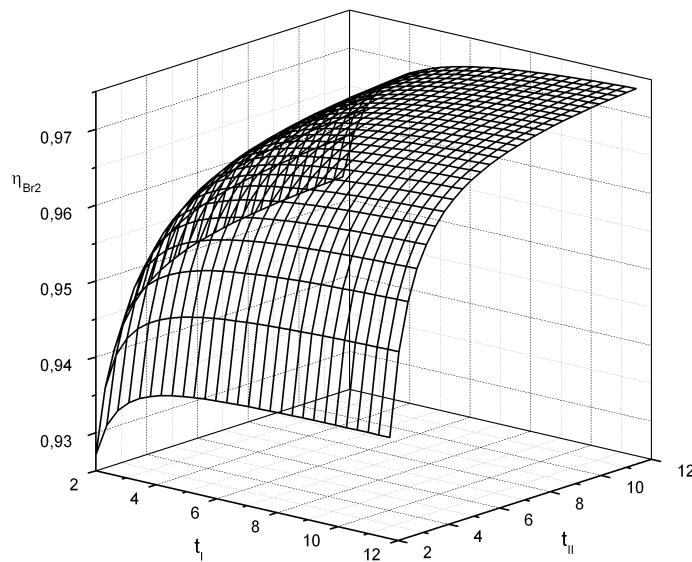
Iz sl. 5.4.6 se vidi da je vrijednost ove funkcije stupnja iskoristivosti kod jednakih vrijednosti idealnih momentnih omjera jednaka nuli. Tada se energija ne prenosi. Iz sl. 5.4.6 se vidi da funkcija naglo pada kada se približavaju vrijednosti idealnih momentnih omjera. Sličan graf ovome imaju varijante S11V4Br2, S11V5Br2, S33V4Br2, S33V5Br2 i S55V4Br2. Kod njih se pri bliskim idealnim momentnim omjerima planetnih slogova pojavljuje znatno povećanje jalove snage uslijed čega se naglo smanjuje stupanj iskoristivosti. Kod ovih varijanti pretvarača (u brzini Br2) je povećanje prijenosnog omjera praćeno smanjenjem stupnja iskoristivosti.

5.4.4 Stupnjevi iskoristivosti karakterističnih pretvarača kod kojih se povećanjem prijenosnog omjera uz aktivnu kočnicu Br2 povećava stupanj iskoristivosti

Postoje i varijante pretvarača kod kojih se povećanjem prijenosnog omjera kod uključene kočnice Br2 stupanj iskoristivosti povećava. Jedan od primjera koje to potvrđuju je varijanta S14V2. Varijanti S14V2 je imanentna jalova snaga. Kod ove varijante pretvarača je pri radu u brzini Br2 energetska efikasnost pretvorbe veća kod većeg prijenosnog omjera. Da bi se to vidjelo dati su grafovi prijenosnog omjera (sl. 5.4.7) i stupnja iskoristivosti (sl. 5.4.8) pri radu u brzini Br2.



Sl. 5.4.7 Funkcija prijenosnog omjera varijante S14V2Br2

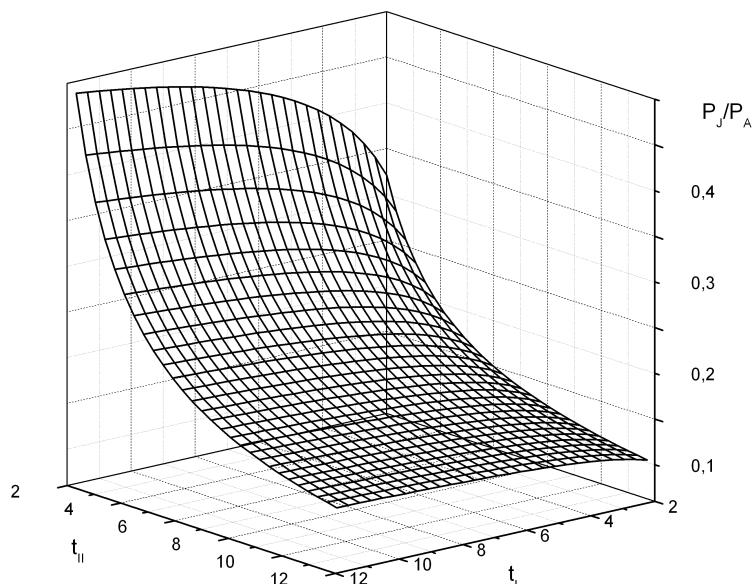


Sl. 5.4.8 Funkcija stupnja iskoristivosti varijante S14V2Br2

Na sl. 5.4.7 je prikazana ovisnost prijenosnog omjera o idealnim momentnim omjerima planetnih slogova. Vidljivo je da se porastom idealnih momentnih omjeru povećava prijenosni omjer varijante S14V2 kad radi s uključenom kočnicom Br2.

Na sl. 5.4.8 je prikazana ovisnost stupnja iskoristivosti varijante S14V2 o idealnim momentnim omjerima u brzini Br2. Vidljivo je da se povećanjem idealnih momentnih omjera stupanj iskoristivosti povećava. Usporedbom oba grafa se može zaključiti da veći prijenosni omjeri imaju za posljedicu povećani stupanj iskoristivosti.

Na sl. 5.4.9 je prikazana funkcija omjera jalove snage i snage na ulazu u pretvarač (specifične jalove snage) kod varijante S14V2 pri radu s uključenom kočnicom Br2 u domeni idealnih momentnih omjera t_I i t_{II} . Iz grafa se vidi da je kod idealnih momentnih omjera $t_I=12$ i $t_{II}=12$, kod kojih se postiže maksimalan prijenosni omjer, omjer jalove snage i snage na ulazu u pretvarač blizak minimalnom pa je prema tome negativni utjecaj jalove snage na sniženje stupnja iskoristivosti vrlo mali.



Sl. 5.4.9 Prikaz odnosa jalove snage i snage na ulazu u ovisnosti o idealnim momentnim omjerima t_I i t_{II} kod varijante S14V2 pri radu s uključenom kočnicom Br2

Slično se dešava sa stupanjem iskoristivosti kod varijante S13V3 u brzini Br2 (uključena kočnica Br2). Kod te varijante u brzini Br2 prijenosni omjer ima negativnu vrijednost.

Od varijanti pretvarača s kočnicama na spojnom i zasebnom vratilu koje mogu ostvariti velike prijenosne omjere povećanje stupnja iskoristivosti pri povećanju prijenosnog omjera pokazuju i varijante S15V2 i S16V3 u brzini Br2. Kod ovih varijanti pretvarača se ne pojavljuje jalova snaga.

Veliku sličnost pretvaračima S13V3, S14V2, S15V2 i S16V3 u pogledu funkcije prijenosnih omjera i stupnja iskoristivosti pokazuju i neki pretvarači s kočnicama raspoređenim na spojnim vratilima. To su pretvarači S13V1, S14V1, S15V1 i S16V1. Analiza pokazuje da se i kod njih povećava stupanj iskoristivosti povećanjem prijenosnog omjera.

5.4.5 Stupanj iskoristivosti međusobno inverznih varijanti pretvarača

Prema opisanom postupku određivanja stupnja iskoristivosti izведен je izraz i za stupanj iskoristivosti u brzini Br2 inverzne varijante varijanti S55V5 tj. varijante S55V11 koji ima recipročan prijenosni omjer. Dotični izraz (5.4.5) vrijedi kod $t_1 < t_{II}$ i on je:

$$\eta_{Br2} = \frac{\frac{t_{II}\eta_{0II} - \frac{t_1}{\eta_{0I}}}{\frac{t_1 + \frac{t_1}{t_{II}}t_{II}\eta_{0II}}{\frac{\eta_{0I} - \eta_{0I}}{t_{II} - t_1}}}}{t_1 + t_1 t_{II}} \quad (5.4.5)$$

Taj izraz ima nešto drugačiji oblik od izraza (5.4.3), ali nakon uvrštavanja istih vrijednosti idealnih momentnih omjera i relativnih stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova u (5.4.3) i (5.4.5) i izračunavanja vrijednosti stupnjeva iskoristivosti prema oba navedena izraza dobiva se vrlo bliska vrijednost (graf funkcije se neprimjetno razlikuje od grafa na sl. 5.4.6).

Za sve međusobno inverzne varijante pretvarača razmatrane u ovom radu dobivaju se različite funkcije stupnja iskoristivosti. Programski sustav napravljen u ovom radu generira ove izraze i za određene ulazne podatke određuje im vrijednost. Numeričkim izračunavanjima računskog stupnja iskoristivosti međusobno inverznih varijanti uz iste ulazne podatke neovisno o kinematičkom prijenosnom omjeru dobivaju se vrlo bliske vrijednosti računskog stupnja iskoristivosti. Kroz brojne usporedbe uočeno je najveće odstupanje rezultata od 0,07 % što praktično znači da izrazi dobiveni kod bilo koje varijante pretvarača vrijede i za njoj inverznu varijantu.

5.4.6 Ekvivalentne varijante pretvarača s aspekta brzine Br2

Usporedbom analitičkih izraza prijenosnih omjera pretvarača s kočnicama raspoređenim na spojnom i zasebnom vratilu pri radu u brzini Br2 pokazalo se da postoje parovi varijanti pretvarača čije varijante imaju potpuno jednake funkcije prijenosnih omjera. Za njih se može reći da su ekvivalentne po svojim vanjskim kinematičkim karakteristikama (funkcija prijenosnog omjera).

Analiza relativnih energetskih tokova na planetnim slogovima ovih pretvarača pokazuje da oni u brzini Br2 (uz uključenu kočnicu Br2) imaju i jednake smjerove relativnih energetskih tokova na planetnim slogovima. To znači da su im jednake i funkcije stupnja

iskoristivosti u brzini Br2. Zbog toga se može reći da su te varijante ekvivalentne i po računskom stupnju iskoristivosti u brzini Br2. U Tab. 5.4.5 i Tab. 5.4.6 su navedeni parovi ekvivalentnih varijanti u brzini Br2. U Tab. 5.4.5 je u prvom stupcu varijanta s imanentnom jalovom snagom, a do nje u drugom stupcu je njoj ekvivalentna varijanta kod koje se ne pojavljuje jalova snaga.

Tab. 5.4.5 Popis parova ekvivalentnih varijanti pretvarača

S jalovom snagom	Bez jalove snage
S12V2	S36V3
S12V3	S36V11
S13V2	S56V3
S13V4	S56V5
S14V2	S16V3
S14V3	S35V11
S14V10	S16V11
S14V11	S35V3
S34V2	S15V3
S34V3	S15V11

U Tab. 5.4.6 su navedeni ekvivalentni parovi varijanti pretvarača kod kojih se ne pojavljuje jalova snaga.

Tab. 5.4.6 Popis parova ekvivalentnih varijanti pretvarača bez jalove snage

Bez jalove snage	Bez jalove snage
S16V2	S35V2
S16V4	S35V4

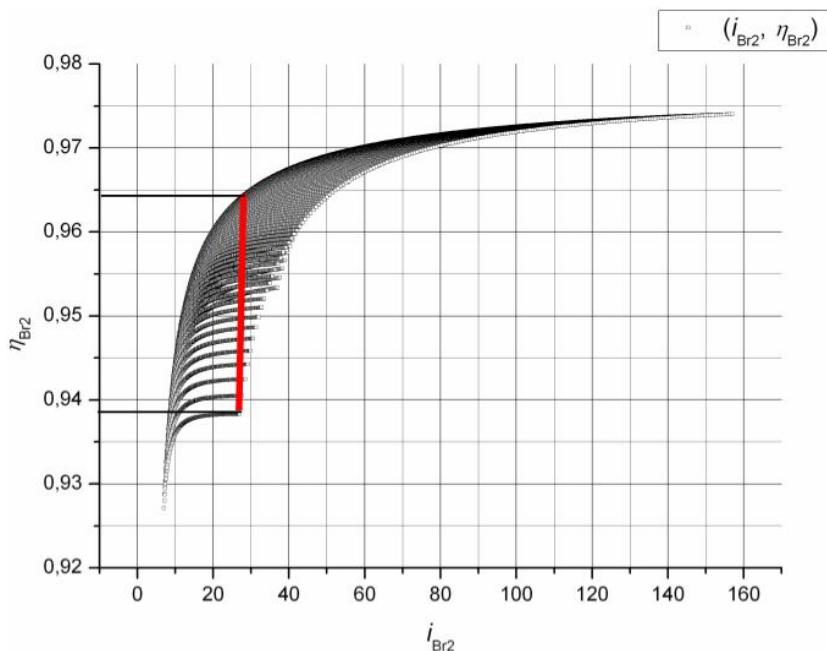
Ekvivalentnu varijantu u brzini Br2 nemaju slijedeće navedene varijante i njima inverzne varijante: S13V3, S13V5, S15V2, S15V4, S36V4, S36V8, S11V4, S11V5, S33V4, S33V5, S55V4 i S55V5.

Od svih navedenih ekvivalentnih parova varijanti pretvarača zbog mogućnosti ostvarenja velikog prijenosnog omjera ističe se par S14V2 – S16V3. Pomoću ove dvije varijante pretvarača se uz idealne momentne omjere u intervalu $2 \leq t_I \leq 12$ i $2 \leq t_{II} \leq 12$ u brzini Br2 može ostvariti kinematički prijenosni omjer od $i = 7$ do $i = 157$. Iako varijanta S14V2 sadrži komponentu jalove snage ona po računskoj energetskoj efikasnosti (računskom stupnju iskoristivosti) nije ništa lošija od varijante S16V3 koja nema komponentu jalove snage. Ova činjenica potvrđuje da prisutnost jalove snage ne mora imati uvijek zamjetan utjecaj na stupanj iskoristivosti.

5.4.7 Rad s fiksnom kočnicom Br2-jednobrzinski pretvarači

Kod bilo koje varijante dvobrzinskih dvovodilnih pretvarača svaki par prijenosnih omjera je (i_{Br1}, i_{Br2}) određen s odgovarajućim parom idealnih momentnih omjera (t_I, t_{II}). U tom slučaju se računski stupanj iskoristivosti ne može povećavati varirajući idealne momentne omjere jer bi se time narušili kinematički zahtjevi na pretvarač.

Ako pogon ne zahtijeva dvobrzinski pretvarač nego samo jednobrzinski onda se kod ovih pretvarača kad rade u brzini Br2 u općem slučaju jedan prijenosni omjer može dobiti s različitim kombinacijama idealnih momentnih omjera. U tom slučaju svaka kombinacija idealnih momentnih omjera rezultira određenim stupnjem iskoristivosti. Ukoliko se želi osnovati pretvarač s maksimalnim stupnjem iskoristivosti treba odabrati odgovarajući par idealnih prijenosnih omjera. Optimalni izbor idealnih momentnih omjera opisan je u poglavlju 8. i provodi se pomoću računala. Na sl. 5.4.10 je prikazan dijagram varijante S14V2Br2 kod kojeg se vidi kako stupanj iskoristivosti ovisi o prijenosnom omjeru. Iz grafa sa slike se za svaki prijenosni omjer može odrediti interval mogućih računskih stupnjeva iskoristivosti. Primjerice kod varijante S14V2 za zahtijevani prijenosni omjer $i_{Br2}=28$ računski stupanj iskoristivosti se ovisno o odabranim idealnim momentnim omjerima može kretati između $\eta_{Br2} = 0,938 \dots 0,964$. Taj interval je obilježen širokom crvenom crtom. Kod prijenosnika koji rade pri velikim snagama i vrlo malo povećanje stupnja iskoristivosti je važno.



Sl. 5.4.10 Ovisnost stupnja iskoristivosti o prijenosnom omjeru kod varijante S14V2Br2

Iz sl. 5.4.10 je vidljivo da se kod većih prijenosnih omjera može postići relativno manje povećanje stupnja iskoristivosti odgovarajućom kombinacijom idealnih momentnih omjera. Kod prijenosnih omjera $i_{Br2} > 80$ se vrlo malo može utjecati na stupanj iskoristivosti izborom kombinacije idealnih momentnih omjera.

5.5 Utjecaj relativnih stupnjeva iskoristivosti na ukupni stupanj iskoristivosti

Pored brojeva zubi kao faktora čija promjena najviše utječe na relativni stupanj iskoristivosti planetnog sloga utjecaj imaju i faktori koji nisu obuhvaćeni matematičkim modelom u ovom radu. Ti faktori su kvaliteta izrade ozubljenja, faktori prekrivanja profila, modul zupčanika, izbor ležaja, način i uvjeti podmazivanja itd. U cilju optimizacije pretvarača prema kriteriju stupnja iskoristivosti dobro je poznavati utjecaj relativnog stupnja iskoristivosti svakog planetnog sloga na stupanj iskoristivost pretvarača u određenoj brzini. Funkciju stupnja iskoristivosti pretvarača je dobro predočiti grafički. Za izabrane idealne momentne omjere funkcije stupnja iskoristivosti za obje brzine kod dvobrzinskih pretvarača u općem slučaju imaju oblike:

$$\eta_{BrI} = \eta_{BrI}(\eta_{0I}, \eta_{0II}) \quad (5.5.1)$$

$$\eta_{BrII} = \eta_{BrII}(\eta_{0I}, \eta_{0II}) \quad (5.5.2)$$

Funkcije stupnja iskoristivosti oblika prema (5.5.1) i (5.5.2) prikazane grafički mogu dati konstruktoru korisne informacije o osjetljivosti stupnja iskoristivosti. Moguće je da se stupanj iskoristivosti u određenoj brzini manje mijenja s promjenom relativnog stupnja iskoristivosti kod jednog planetnog sloga, a više kod drugog. Moguće je da relativno veliko smanjenje stupnja iskoristivosti nekog planetnog sloga utječe relativno malo na smanjenje stupnja iskoristivosti cijelog planetnog pretvarača. Isto tako je moguće da je stupanj iskoristivosti planetnog pretvarača znatnije osjetljiv na promjenu relativnog stupnja iskoristivosti pojedinog planetnog sloga. U slučaju kad je utjecaj relativnog stupnja iskoristivosti na stupanj iskoristivosti pretvarača relativno mali može se izvršiti racionalizacija u konstruiranju koja će pojeftiniti izradu, a neće bitno utjecati na karakteristike planetnog pretvarača. Primjerice, u slučaju kad je osjetljivost stupnja iskoristivosti pretvarača u određenoj brzini relativno mala pri promjenama relativnog stupnja iskoristivosti jednog od planetnih slogova može se na dotičnom planetnom slogu primijeniti grublje izrađene zupčanike ili zupčanike s manjim brojem zubi, ako se to ne protivi drugim konstrukcijskim zahtjevima.

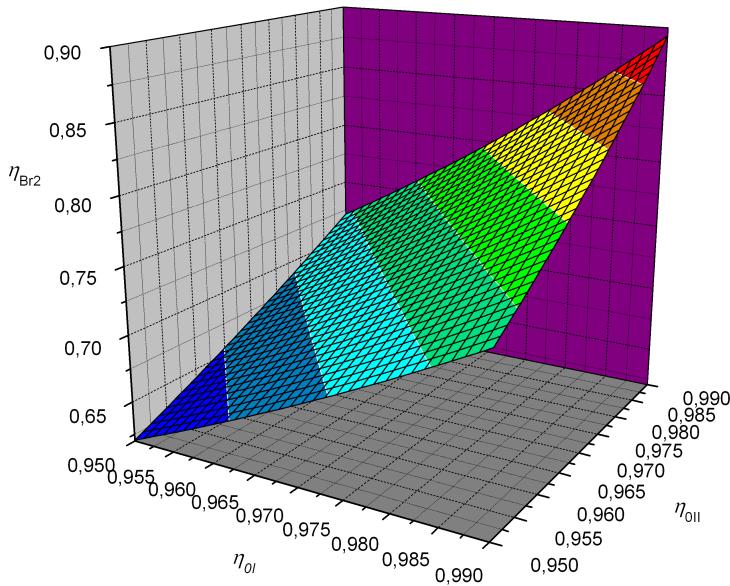
U slučajevima u kojim mala promjena relativnog stupnja iskoristivosti određenog planetnog sloga značajnije utječe na ukupni stupanj iskoristivosti dobro je posvetiti veću pažnju utjecajnom planetnom slogu.

Može se zaključiti da poznavanje utjecaja relativnih stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova na ukupni stupanj iskoristivosti može doprinijeti optimiziranju konstrukcije jer kazuje kojem planetnom slogu treba pokloniti veću pažnju.

Kao primjer je za eksperimentalni pretvarač S55V5 koji radi s uključenom kočnicom Br2 prikazana funkcija stupnja iskoristivosti. Za parametre planetnih slogova $t_1 = 3,3636$ i $t_{II} = 4$ ($i_{Br2} = -26,427$) funkcija (5.4.3) poprima oblik:

$$\eta_{Br2} = \frac{3,3636 \cdot \eta_{0I} + 13,4544 \cdot \frac{\eta_{0I}}{\eta_{0II}}}{26,42678 \left(\frac{4}{\eta_{0II}} - 3,3636 \cdot \eta_{0I} \right)} \quad (5.5.3)$$

Uz praktički mogući raspon relativnih stupnjeva iskoristivosti $\eta_{0I} \in (0,95; 0,99)$ i $\eta_{0II} \in (0,95; 0,99)$, na osnovu (5.5.3) je generiran graf (sl. 5.5.1). Graf na sl. 5.5.1 pokazuje da smanjenje relativnog stupnja iskoristivosti drugog planetnog sloga nešto manje utječe na smanjenje ukupnog stupnja iskoristivosti nego što je to slučaj kod prvog planetnog sloga.



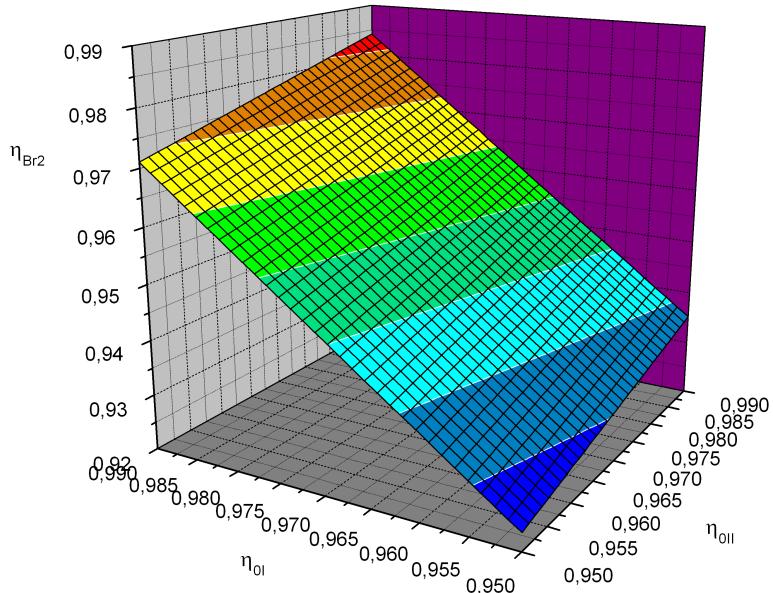
Sl. 5.5.1 Stupanj iskoristivosti pretvarača varijante S55V5Br2 kao funkcija relativnih stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova u intervalu $\eta_{0I} \in (0,95; 0,99)$ i $\eta_{0II} \in (0,95; 0,99)$ za parametre $t_1 = 3,3636$ i $t_{II} = 4$ ($i_{Br2} = -26,427$)

Za druge vrijednosti idealnih momentnih omjera graf funkcije je nešto drugačiji.

Tako uz $t_I = 2$ i $t_{II} = 10$ ($i_{Br2} = 2,75$) funkcija stupnja iskoristivosti ima oblik:

$$\eta_{Br2} = \frac{2 \cdot \eta_{0I} + 20 \cdot \frac{\eta_{0I}}{\eta_{0II}}}{2,75 \left(\frac{10}{\eta_{0II}} - 2 \cdot \eta_{0I} \right)} \quad (5.5.4)$$

Graf generiran u domeni relativnih stupnjeva iskoristivosti $\eta_{0I} \in (0,95; 0,99)$ i $\eta_{0II} \in (0,95; 0,99)$ (sl. 5.5.2) prikazuje da smanjenje relativnog stupnja iskoristivosti drugog planetnog sloga puno manje utječe na smanjenje ukupnog stupnja iskoristivosti nego što slučaj kod prvog planetnog sloga.



Sl. 5.5.2 Stupanj iskoristivosti pretvarača oznake S55V5 kao funkcija relativnih stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova u intervalu $\eta_{0I} \in (0,95; 0,99)$ i $\eta_{0II} \in (0,95; 0,99)$ za parametre $t_I = 2$ i $t_{II} = 10$ ($i_{Br2} = 2,75$).

Na osnovu funkcije stupnja iskoristivosti oblika $\eta_{Br} = \eta_{Br}(t_I, t_{II}, \eta_{0I}, \eta_{0II})$ je kod bilo koje varijante pretvarača moguće za određene parametre t_I i t_{II} dobiti oblike funkcija $\eta_{BrI} = \eta_{BrI}(\eta_{0I}, \eta_{0II})$ i $\eta_{BrII} = \eta_{BrII}(\eta_{0I}, \eta_{0II})$ koje mogu jasno grafički prikazati utjecaje relativnih stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova na ukupni stupanj iskoristivosti u određenoj brzini. Stoga ove funkcije mogu biti putokaz u dalnjem osnivanju optimalne konstrukcije pretvarača.

5.6 Eksperimentalna provjera mehaničko-matematičkog modela stupnja iskoristivosti

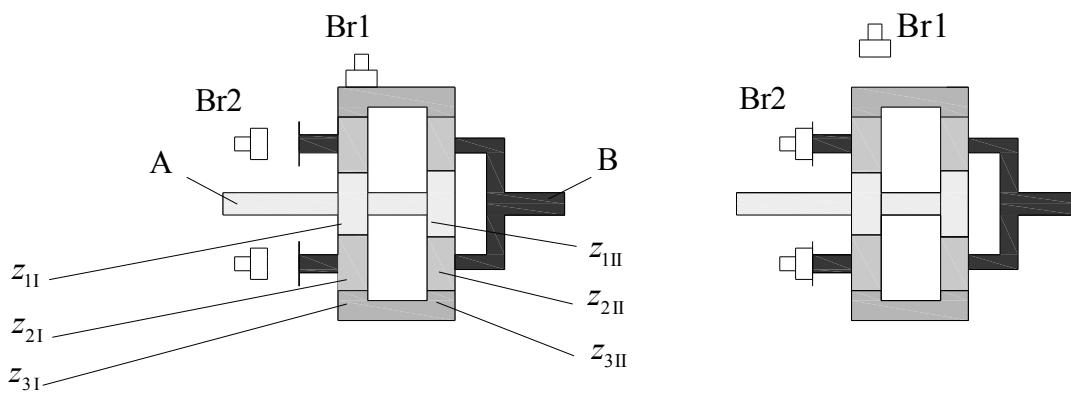
U poglavlju 5.6. je opisana provedena verifikacija matematičkog modela stupnja iskoristivosti za brzinu Br1 i brzinu Br2 na pretvaraču oznake S55V5 eksperimentalnim putem.

5.6.1 Prikaz eksperimentalnog pretvarača i eksperimentalna oprema

Stvarni stupanj iskoristivosti planetnog pretvarača može biti ustanovljen tek nakon što je planetni pretvarač izrađen. U cilju verifikacije izvedenih mehaničko-matematičkih modela stupnjeva iskoristivosti izrađen je dvobrzinski pretvarač varijante S55V5 na kojem je provedeno eksperimentalno određivanje stupnjeva iskoristivosti.

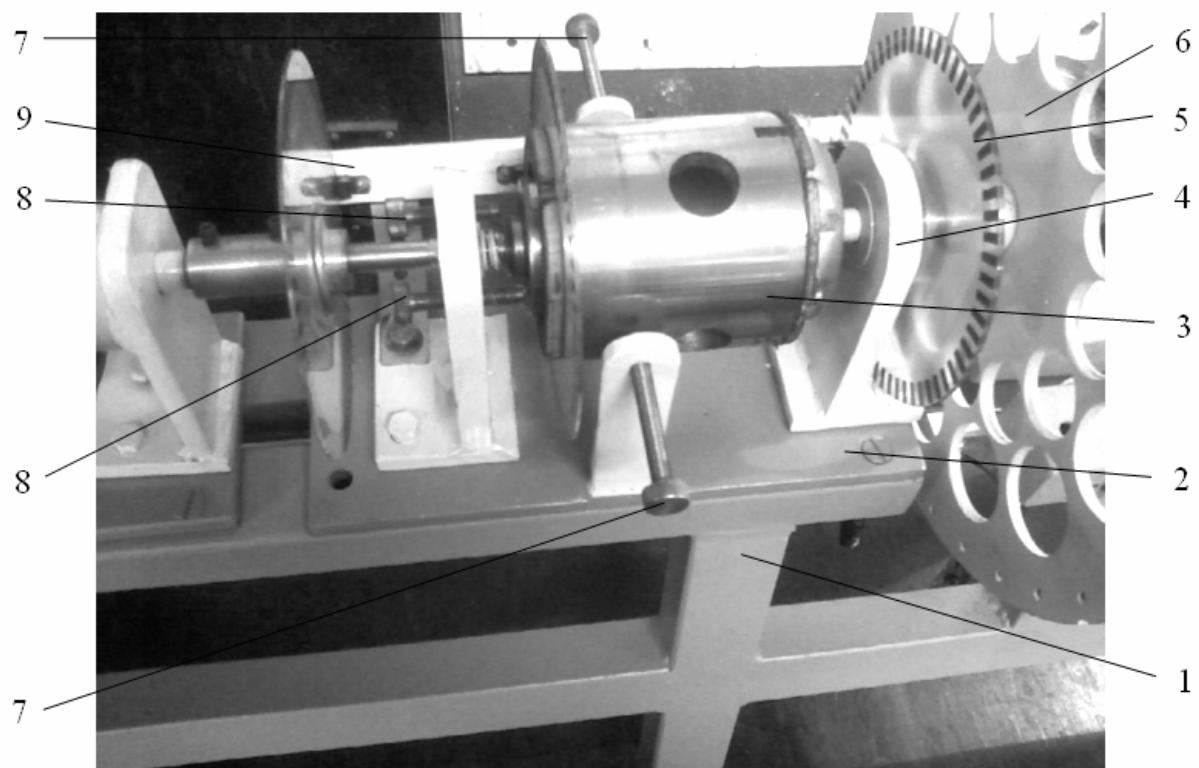
U brzini Br1 pretvarač ostvaruje prijenosni omjer $i_{Br1} = 5$, a u brzini Br2 prijenosni omjer $i_{Br2} = -26,4267$. Uz pretvarač je izrađen ispitni stol na kojem se može provoditi mjerjenje mehaničkih veličina potrebnih za određivanje stupnjeva iskoristivosti.

Na sl. 5.6.1 je pojednostavljen prikaz eksperimentalnog pretvarača. Lijevi dio slike prikazuje pretvarač s uključenom kočnicom Br1 uz koju aktivno radi samo drugi planetni slog (desni). Desni dio slike prikazuje pretvarač s uključenom kočnicom Br2 uz koju u pretvorbi aktivno sudjeluju oba planetna sloga. Uz sliku su navedeni brojevi zubi sunčanih zupčanika i vijenaca planetnih slogova, idealni momentni omjeri i moduli ozubljenja. Slovom A je označeno ulazno, a slovom B izlazno vratilo pretvarača.



Sl. 5.6.1 Pojednostavljen prikaz eksperimentalnog pretvarača i neki njegovi osnovni parametri

Na sl. 5.6.2 je prikazan vanjski izgled planetnog pretvarača. Kraći vijci (pozicija 8), čija je os paralelna s središnjom osi pretvarača, omogućuju kočenje vodila prvog planetnog sloga te na taj način simuliraju kočnicu Br2. Duži vijci (pozicija 7), postavljeni okomito na središnju os pretvarača, imaju zadatak zakočiti oba vijenca. Oni simuliraju kočnicu Br1.



Sl. 5.6.2 Vanjski izgled eksperimentalnog pretvarača; 1 – stol; 2 – temeljna ploča pretvarača; 3 – spojno vratilo dvaju vijenaca; 4 – nosač ležaja; 5 – disk s rasterom; 6 – disk izlaznog vratila; 7 – dulji vijak (kočnica Br1); 8 – kraći vijak (kočnica Br2); 9 – nosač foto-davača.

Zahvaljujući izvedenom ispitnom stolu, eksperimentalnom pretvaraču i mjernoj opremi moguće je provesti mjerena na osnovu kojih se može odrediti stupanj iskoristivosti dvovodilnog dvobrzinskog planetnog pretvarača oznake S55V5 u obje brzine. Eksperiment se provodi prema tzv. statičkoj metodi opisanoj u [64, 76, 77] (sl. 5.6.3). Pomoću dopunskih elemenata je moguće odrediti i statičke relativne stupnjeve iskoristivosti svakog od planetnih sloganova.



Sl. 5.6.3 Oprema za određivanje statičkog stupnja iskoristivosti; 1 – uteg; 2 – nosač pretvarača; 3 – remenica na ulaznom vratilu pretvarača; 4 – pretvarač; 5 – disk na izlaznom vratilu pretvarača; 6 – element za prenošenje sile s diska na dinamometar; 7 – digitalni dinamometar.

Pomoću vijaka (sl. 5.6.2) se koće različiti dijelovi eksperimentalnog pretvarača. Vijci također omogućuju zadavanje različitog stupnja ekscentričnosti na vijencu (isti za oba planetna sloga) i vodilu (na prvom planetnom slogu) što omogućuje istraživanje utjecaja ekscentričnosti na stupanj iskoristivosti. Transparentni diskovi s rasterom (pozicija 5, sl. 5.6.2), postavljeni na tri vanjska vratila pretvarača, omogućuju mjerjenje kuta zakretanja vratila i brzine vrtnje članova pretvarača u pogonu uz pomoć foto-davača TL2001.

Pri statičkom se ispitivanju (sl. 5.6.3) ulazno vratilo opterećuje pomoću remenice polumjera 46 milimetara (pozicija 3) i utega (pozicija 1) pogonskim torzijskim momentom $T_A \equiv T'_A$. Torzijski moment na izlaznom vratilu T'_B se određuje na osnovu izmjerene obodne sile pomoću digitalnog dinamometra oznake FWL5000 koja djeluje na kraku jednakom polumjeru diska (krak od 125 mm). Ovaj dinamometar može mjeriti silu ekvivalentnu masi od 5000 gramova s rezolucijom od 1 gram.

5.6.2 Cilj eksperimenta

Za ispitivani planetni pretvarač stupanj iskoristivosti u brzini Br1 (nepokretan vijenac) (sl. 5.6.1 lijevo) se određuje preko izraza (5.6.1), (Tab. 2.9.1):

$$\eta_{Br1} = \frac{1 + \eta_{0II} \cdot t_{II}}{1 + t_{II}} \quad (5.6.1)$$

U brzini Br2 kod koje je zakočeno vodilo na prvom planetnom slogu (sl. 5.6.1 desno) stupanj iskoristivosti se određuje preko (5.6.2), (određeno prema poglavlju 5.4.1):

$$\eta_{Br2} = \frac{\frac{\eta_{0I} \cdot t_I + \frac{\eta_{0I}}{\eta_{0II}} \cdot t_I \cdot t_{II}}{\eta_{0II}}}{\frac{\eta_{0I} \cdot t_I - \frac{t_{II}}{\eta_{0II}}}{t_I + t_I \cdot t_{II}}} \quad (5.6.2)$$

U izrazima (5.6.1) i (5.6.2) idealni momentni omjeri iznose: $t_I = 3,3636$ i $t_{II} = 4$.

Cilj je utvrditi da li se vrijednost η_{Br1} dobivena preko izraza (5.6.1) približno slaže s neposredno izmjerrenom vrijednosti stupnja iskoristivosti u brzini Br1, η_{Br1}' . Računska vrijednost η_{Br1} je dobivena preko izraza (5.6.1) na osnovu poznatog idealnog momentnog omjera drugog planetnog sloga ($t_{II} = 4$) i eksperimentalno utvrđenog relativnog stupnja iskoristivosti drugog planetnog sloga η_{0II}' .

Također je cilj utvrditi da li se vrijednost η_{Br2} dobivena preko izraza (5.6.2) približno slaže s neposredno izmjerrenom vrijednosti stupnja iskoristivosti u brzini Br1, η_{Br2}' . Računska vrijednost η_{Br2} je dobivena preko izraza (5.6.2) na osnovu poznatih idealnih momentnih omjera drugog planetnog sloga ($t_I = 3,3636$ i $t_{II} = 4$) i eksperimentalno utvrđenih relativnih stupnjeva iskoristivosti prvog i drugog planetnog sloga η_{0I}' i η_{0II}' .

Ukoliko se navedene vrijednosti slažu tada se može zaključiti da se izmjereni stupnjevi iskoristivosti doista vladaju prema navedenim mehaničko-matematičkim modelima te da je te modele opravdano primjenjivati.

5.6.3 Teorijski temelji eksperimenta

Poznato je da se stupanj iskoristivosti može izraziti preko dva prijenosna omjera, energetskog i kinematičkog. Dakle uz poznati moment na ulazu T_A' i izmjereni moment na izlazu iz pretvarača T_B' te poznavanjem kinematičkog prijenosnog omjera, može se odrediti stupanj iskoristivosti.

$$\eta = -\frac{i_T}{i} = \left| \frac{\frac{T_B'}{T_A'}}{i} \right| \quad (5.6.3)$$

5.6.4 Metodika eksperimenta

Eksperimentalno određivanje statičkog stupnja iskoristivosti se provodi po sljedećoj proceduri:

- Kočenje jednog dijela prijenosnika (npr. vijenaca s kočnicom Br1);
- Opterećenje ulaznog vratila s torzijskim momentom T_A' pomoću remenice i utega;
- Određivanje intenziteta torzijskog momenta na izlaznom vratilu T_B' pomoću digitalnog dinamometra i zapisivanje rezultata;

Eksperiment se provodi u različitim položajima (kutovima zakreta) ulaznog vratila u okvirima kinematičkog ciklusa s različitim vrijednostima momenta opterećenja te uz neizbjegnu minimalnu promjenu ekscentričnosti pomoću vijaka (sl. 5.6.2).

Ista procedura se ponavlja uz blokirano vodilo za složeni pretvarač (rad s Br2) i za zasebne planetne slogove (da bi se odredili relativni stupnjevi iskoristivosti η_{0I}' i η_{0II}').

5.6.5 Rezultati eksperimenta

5.6.5.1 Određivanje stupnja iskoristivosti η_{Br1}'

Nakon kočenja spojnog vratila (dva vijenca) te opterećivanja ulaznog vratila s utezima masa od 500, 550, 600 i 700 grama čije težine djeluju na polumjeru od 46 mm, dobivaju se rezultati navedeni u Tab. 5.6.1.

Tab. 5.6.1 Rezultati mjerena dobiveni pri zakočenom spojnom vratilu (dva vijenca)

Masa za generiranje ulaznog momenta, g	500	550	600	700
Intenzitet ulaznog momenta T_A' , Nm	0,226	0,248	0,271	0,316
Izmjerena masa ekvivalentna obodnoj sili, g	min	661	719	791
	m	671	732	799
	max	689	741	809
Intenzitet izlaznog momenta T_B' , Nm	min	0,811	0,882	0,970
	m	0,823	0,898	0,980
	max	0,845	0,909	0,992
Intenzitet energ. prijenosnog omjera i_T	min	3,587	3,557	3,578
	m	3,640	3,620	3,616
	max	3,740	3,664	3,659
Stupanj iskoristivosti η_{Br1}'	min	0,717	0,711	0,716
	m	0,728	0,724	0,723
	max	0,748	0,733	0,731

Za svaku razinu pogonskog opterećenja je napravljeno 7 mjerena za redom uz polako otpuštanje tereta. U Tab. 5.6.1 su prikazane minimalne, srednje i maksimalne absolutne vrijednosti izmjerene izlaznog torzijskog momenta T_B' , pripadnog energetskog prijenosnog omjera i_T i dobivenog stupnja iskoristivosti η_{Br1}' .

Srednja vrijednost izmjerene stupnja iskoristivosti iznosi: $\eta_{Br1}' = 0,722$.

5.6.5.2 Određivanje stupnja iskoristivosti η_{Br2}'

Nakon kočenja vratila vodila prvog planetnog sloga i postepenog opterećivanja ulaznog vratila s utezima masa od 500, 550, 600 i 700 grama čije težine djeluju na polujeru od 46 mm, dobivaju se rezultati navedeni u Tab. 5.6.2:

Tab. 5.6.2 Rezultati mjerena dobiveni pri zakočenom zasebnom vratilu

Masa za generiranje ulaznog momenta, g	500	550	600	700
Intenzitet ulaznog momenta T_A' , Nm	0,226	0,248	0,271	0,316
Izmjerena masa ekvivalentna obodnoj sili, g	min	933	1035	1141
	m	942	1045	1151
	max	950	1059	1161
Intenzitet izlaznog momenta T_B' , Nm	min	1,144	1,269	1,399
	m	1,155	1,282	1,412
	max	1,165	1,299	1,424
Intenzitet energ. prijenosnog omjera i_T	min	5,061	5,115	5,163
	m	5,109	5,170	5,210
	max	5,156	5,237	5,254
Stupanj iskoristivosti η_{Br2}'	min	0,1915	0,1935	0,1953
	m	0,1933	0,1956	0,1971
	max	0,1951	0,1982	0,1989

Za svaku razinu pogonskog opterećenja je napravljeno 7 mjerena za redom uz polako otpuštanje tereta. U Tab. 5.6.2 su prikazane minimalne, srednje i maksimalne absolutne vrijednosti izmjerene izlaznog torzijskog momenta T_B' , pripadnog energetskog prijenosnog omjera i_T i dobivenog stupnja iskoristivosti η_{Br2}' .

Dobiveni srednji statički stupanj iskoristivosti iznosi: $\eta_{Br2}' = 0,196$.

Relativno niska vrijednost statičkog stupnja iskoristivosti je posljedica jalovog momenta koji se javlja u pretvaraču kod brzine Br2.

5.6.5.3 Određivanje relativnih stupnjeva iskoristivosti planetih slogova η_{0I}' i η_{0II}'

Uz pomoć dodatnih elemenata provedeno je određivanje statičkog relativnog stupnja iskoristivosti planetnih slogova. Opterećenje pretvarača, mjereno izlaznog momenta i određivanje statičkog stupnja iskoristivosti planetnih slogova provodeno je na isti način kao u podpoglavlјima 5.6.5.1 i 5.6.5.2, a rezultati su navedeni u Tab. 5.6.3 i Tab. 5.6.4.

Određen je stupanj iskoristivosti planetnog sloga kod predavanja energije od sunčanog zupčanika prema vodilu uz zakočeni vijenac nakon čega je izračunat relativni stupanj iskoristivosti za oba planetna sloga.

Tab. 5.6.3 Rezultati eksperimentalnog određivanja stupnja iskoristivosti na prvom planetnom slogu pri prijenosu energije od sunčanog zupčanika prema vodilu uz zakočen vjenac

Masa za generiranje ulaznog momenta, g	500	550	600	700
Intenzitet ulaznog momenta T_A' , Nm	0,226	0,248	0,271	0,316
Izmjerena masa ekvivalentna obodnoj sili, g	min	651	715	784
	m	652	718	787
	max	655	719	789
Intenzitet izlaznog momenta T_B' , Nm	min	0,798	0,877	0,961
	m	0,800	0,881	0,965
	max	0,803	0,882	0,967
Intenzitet energ. prijenosnog omjera i_T	min	3,530	3,535	3,548
	m	3,539	3,552	3,561
	max	3,552	3,557	3,570
Stupanj iskor. $\eta_{IV(3)}'$ uz ($i = 4,3636$)	min	0,809	0,810	0,813
	m	0,811	0,814	0,816
	max	0,814	0,815	0,818
Rel. stupanj iskoristivosti η_{01}'	min	0,753	0,754	0,757
	m	0,755	0,759	0,761
	max	0,759	0,760	0,764

Srednja vrijednost statičkog relativnog stupnja iskoristivosti prvog planetnog sloga je $\eta_{01}' = 0,760$.

Tab. 5.6.4 Rezultati eksperimentalnog određivanja stupnja iskoristivosti na drugom planetnom slogu pri prijenosu energije od sunčanog zupčanika prema vodilu uz zakočen vijenac

Masa za generiranje ulaznog momenta, g	500	550	600	700
Intenzitet ulaznog momenta T_A' , Nm	0,226	0,248	0,271	0,316
Izmjerena ekvivalentna masa obodnoj sili, g	min	700	770	844
	m	702	776	850
	max	708	779	854
Intenzitet izlaznog momenta T_B' , Nm	min	0,859	0,944	1,035
	m	0,861	0,951	1,042
	max	0,868	0,955	1,047
Intenzitet energ. prijenosnog omjera i_T	min	3,800	3,805	3,820
	m	3,810	3,835	3,845
	max	3,840	3,850	3,865
Stupanj iskoristivosti $\eta_{1V(3)}'$ uz ($i = 5$)	min	0,760	0,761	0,764
	m	0,762	0,767	0,769
	max	0,768	0,770	0,773
Rel. stupanj iskoristivosti η_{0II}'	min	0,700	0,701	0,705
	m	0,703	0,709	0,711
	max	0,710	0,713	0,716

Srednja vrijednost statičkog relativnog stupnja iskoristivosti drugog planetnog sloga je $\eta_{0II}' = 0,710$.

5.6.6 Usporedba rezultata

5.6.6.1 Stupanj iskoristivosti složenog pretvarača pri radu s uključenom kočnicom Br1

Pri radu složenog pretvarača s uključenom kočnicom Br1 (nepokretno spojno vratilo – dva vijenca) radna energija se prenosi samo kroz drugi planetni slog.

Nakon uvrštavanja eksperimentalno dobivene vrijednosti relativnog stupnja iskoristivosti drugog planetnog sloga η_{0II}' u (5.6.1) dobiva se vrijednost η_{Br1} :

$$\eta_{Br1} = \frac{1 + \eta'_{0II} \cdot t_{II}}{1 + t_{II}} = \frac{1 + 0,710 \cdot 4}{5} = 0,768$$

Ovo je više od eksperimentalnog rezultata dobivenog pri radu pretvarača u brzini Br1 koji iznosi $\eta'_{Br1} = 0,722$. To je logično, ako se ima u vidu, da pri određivanju η'_{Br1} prvi planetni slog radi u praznom hodu te i on oduzima dio pogonske energije. Pri većim pogonskim opterećenjima od primjenjenih u ovom eksperimentu bi bio manji utjecaj gubitaka praznog hoda prvog planetnog sloga što bi rezultiralo s manjom razlikom η_{Br1} i η'_{Br1} .

5.6.6.2 Stupanj iskoristivosti složenog pretvarača pri radu s uključenom kočnicom Br2

U ovom slučaju su elementi pretvarača opterećeni s jalovim momentom.

Nakon uvrštavanja eksperimentalno dobivenih vrijednosti za relativne stupnjeve iskoristivosti planetnih slogova η'_{0I} i η'_{0II} (navedeni u podpoglavlju 5.6.5.3) u izraz (5.6.2) za stupanj iskoristivosti složenog pretvarača, dobiva se:

$$\eta_{Br2} = \frac{\frac{\eta'_{0I} \cdot t_I + \frac{\eta'_{0I}}{\eta'_{0II}} \cdot t_I \cdot t_{II}}{\eta'_{0II}}}{\frac{\eta'_{0I} \cdot t_I - \frac{t_{II}}{\eta'_{0II}}}{t_I + t_I \cdot t_{II}}} = \frac{0,76 \cdot 3,3636 + \frac{0,76}{0,71} \cdot 3,3636 \cdot 4}{0,76 \cdot 3,3636 - \frac{4}{0,71}} = \frac{3,3636 + 3,3636 \cdot 4}{3,3636 - 4} = 0,20355$$

Na ovaj način određena vrijednost stupnja iskoristivosti je vrlo bliska vrijednosti iz podpoglavlja 5.6.5.2 koja je dobivena mjeranjem na složenom eksperimentalnom pretvaraču i ima vrijednost $\eta'_{Br2} = 0,196$.

5.6.7 Zaključak eksperimenta

Rezultati eksperimenta dobiveni na osnovu mjeranja na pretvaraču S55V5 potvrđuju da su eksperimentalno dobivene vrijednosti stupnjeva iskoristivosti vladaju prema izrazima (5.6.1) i (5.6.2). Budući da su matematičko-mehanički modeli kod svih varijanti pretvarača razmatranih u ovom radu dobiveni na isti način kao i modeli za varijantu S55V5 može se zaključiti da je njihova primjenjivost opravdana.

5.7 Eksperimentalno određivanje stupnja iskoristivosti pretvarača u radu

5.7.1 Cilj eksperimenta

Gubici energije izraženi stupnjem iskoristivosti planetnih pretvarača ovise o nizu parametara: vrsti zupčanika, modulu i broju zubi zupčanika, hrapavosti kontaktnih površina, karakteru opterećenja, točnosti izrade, načinu podmazivanja, vrsti maziva itd.

U ovom radu su računski stupnjevi iskoristivosti kod razmatranih pretvarača izraženi preko idealnih momentnih omjera i relativnih stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova. Točnost rezultata dobivenih preko tih izraza je uvjetovana točnošću određivanja relativnih stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova.

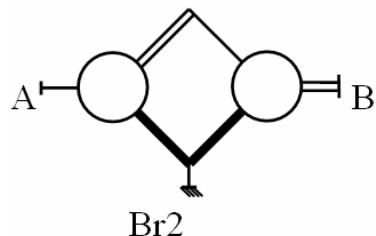
Relativni stupanj iskoristivosti planetnog sloga u fazi usporedne analize varijanti se može odrediti samo približno jer nisu poznati brojni konstrukcijski detalji. Za određivanje stupnja gubitaka u ozubljenju može se primijeniti izraz (2.9.3). Stupanj gubitaka u planetnom slogu se dobiva na osnovu stupnja gubitaka u ozubljenju i koeficijenata kojima su paušalno uzeti u obzir ostali utjecajni gubici u planetnom slogu prema (2.9.6). Na osnovu računskog relativnog stupnja gubitaka dobiva se računski relativni stupanj iskoristivosti prema (2.9.1). O točnosti računskog relativnog stupnja iskoristivosti ovisi točnost izračunatog stupnja iskoristivosti pretvarača.

Cilj ovog poglavlja je ocijeniti usklađenost računski dobivenog stupnja iskoristivosti i stupnja iskoristivosti dobivenog eksperimentalnim ispitivanjem.

5.7.2 Eksperimentalni pretvarač

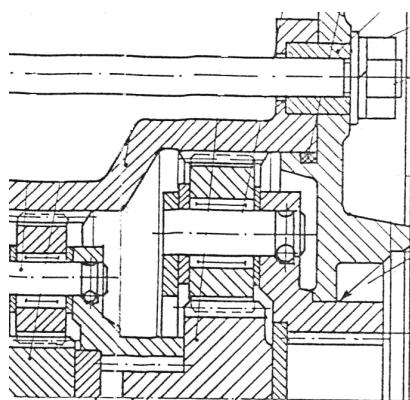
U cilju realizacije eksperimentalnog istraživanja izabran je trostupanjski pretvarač koji se primjenjuje za horizontalno gibanje električnog vitla. Pretvarač je proizvod tvornice "Подемкран" iz grada Gabrovo u Bugarskoj. Po nabavci pretvarač je bio u sklopu s odgovarajućim elektromotorom tvoreći tako trostupanjski motor-reduktor. U cilju provođenja eksperimenta naknadno je odvojen motor od reduktora te je uklonjen prvi stupanj prijenosa. Izведен je ulaz na drugom stupnju prijenosa koji je ovom preinakom postao prvi stupanj prijenosa dobivenog dvostupanjskog (dvovodilnog) planetnog pretvarača na kojem se provelo mjerjenje. Ovaj dvovodilni pretvarač prema sustavu označavanja u ovom radu ima oznaku S15V1Br2.

Na sl. 5.7.1 je dat simbolički prikaz eksperimentalnog pretvarača varijante S15V1Br2.



Sl. 5.7.1 Simbolički prikaz eksperimentalnog pretvarača oznake S15V1Br2

Na sl. 5.7.2 je prikazan dio sklopnog crteža eksperimentalnog pretvarača na kojem se vide oba planetna sloga. Ulaz je na vratilu sunčanog zupčanika lijevog planetnog sloga, a izlaz na vratilu vodila desnog planetnog sloga (sl. 5.7.2).



Sl. 5.7.2 Dio sklopnog crteža eksperimentalnog pretvarača S15V1Br2

Osnovni parametri pretvarača su:

Modul ozubljenja na prvom stupnju: $m_{nI} = 1 \text{ mm}$

Brojevi zubi zupčanika prvog stupnja: $z_{1I} = 21$; $z_{2I} = 24$; $z_{3I} = 69$

Idealni momentni omjer prvog stupnja $t_I = 3,286$

Prijenosni omjer prvog stupnja: $i_I = 4,286$

Modul ozubljenja na drugom stupnju: $m_{nII} = 1,25 \text{ mm}$

Brojevi zubi zupčanika drugog stupnja: $z_{1II} = 21$; $z_{2II} = 27$; $z_{3II} = 75$

Idealni momentni omjer drugog stupnja $t_{II} = 3,571$

Prijenosni omjer drugog stupnja: $i_{II} = 4,571$

Prijenosni omjer pretvarača: $i = 19,591$

Nominalni moment na ulazu u pretvarač je $T_A = 5 \text{ Nm}$

Sredstvo za podmazivanje je univerzalno ulje za reduktore ER 90 BDS 14368-82.

5.7.3 Ispitni stol

U cilju provedbe eksperimenta konstruiran je ispitni stol koji se nalazi u laboratoriju Katedre za primijenjenu mehaniku Sveučilišta za kemijsku tehnologiju u Sofiji. Ispitni stol s pripadnom opremom omogućuje statičko i dinamičko ispitivanje pretvarača.

Na sl. 5.7.3 je prikazana varijanta stola za određivanje stupnja iskoristivosti pretvarača s otvorenim tokom snage [69]. Pretvarač se pokreće pomoću asinkronog elektromotora označe KT 71B nominalne snage 0,63 kW i nominalne brzine vrtnje 2830 min^{-1} (nominalni ulazni torzijski moment $T_A = 2,12 \text{ Nm}$). Brzina vrtnje elektromotora se regulira pomoću frekventnog pretvarača ELDI / M – 0,75 kW. Kontrola brzine vrtnje se vrši s bezkontaktnim tahometrom ADD503. Između elektromotora i eksperimentalnog pretvarača je ugrađen torziometar označe TK20, prilagođen za svrhu ovog mjerjenja na Tehničkom sveučilištu u Sofiji. Na izlazu iz pretvarača se nalazi vratilo s kočnim bubnjem promjera 100 mm koje je uležišteno na dva dvoredna kuglična ležaja. Kočnica za simulaciju opterećenja je izvedena od kočnice za dizalicu firme TKT. Moment kočenja (izlazni torzijski moment reduktora T_B') se regulira vijkom na kočnici pomoću posebnog ključa, a mjeri se pomoću digitalnog tenziometarskog dinamometra označe FWL5000. Ovaj dinamometar može mjeriti silu ekvivalentnu masi od 5000 grama s rezolucijom od 1 gram. Naime, na kočnici se nalazi poluga koja na kraku duljine 900 mm od osi bubnja djeluje silom na digitalni tenziometarski dinamometar. Iz digitalnog dinamometra i iz torziometra TK20 se provode signali do mjerne opreme označe ИМ-131 i računala. Na sl. 5.7.4 se nalazi dio mjerne opreme.

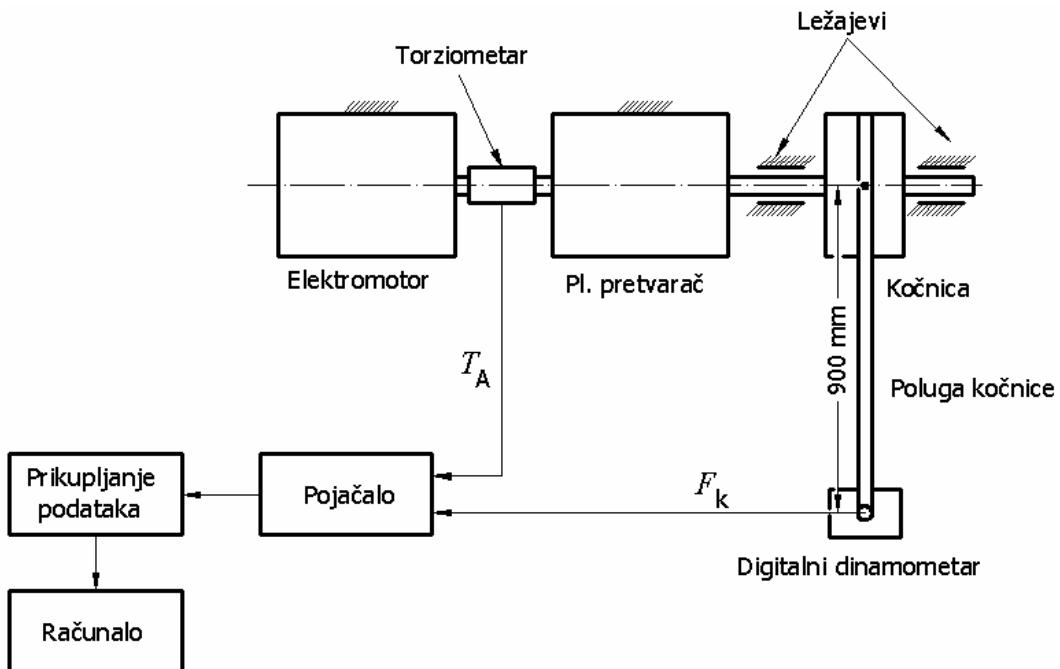


Sl. 5.7.3 Ispitni stol za dinamičko ispitivanje planetnih pretvarača; 1 – elektromotor; 2 – vratilo za mjerjenje momenta torzije; 3 – planetni pretvarač; 4 – zupčasta spojka; 5 – kočni bubanj ; 6 – ležaj; 7 – kočnica; 8 – poluga; 9 – dinamometar; 10 – tenziometrijska oprema.



Sl. 5.7.4 Dio mjerne opreme za određivanje stupnja iskoristivosti

Na sl. 5.7.5 je shematski prikazan ispitni stol s mjernom opremom.



Sl. 5.7.5 Shematski prikaz ispitnog stola s mjernom opremom

5.7.4 Plan i metodika eksperimenta

Mjerenje je provođeno pri četiri različita srednja opterećenja ulaznog vratila \bar{T}_A' (0,53 Nm, 1,06 Nm, 1,59 Nm, 2,12 Nm) i to kod svakog opterećenja s dvije različite brzine vrtnje (750 min^{-1} i 1500 min^{-1}) te dvije različite temperature ulja (35°C i 75°C). Mjerenja s istim ulaznim parametrima su ponavljana nekoliko puta poslije određenog vremenskog perioda zbog vjerodostojnosti rezultata.

Metodika mjerenja je slijedeća:

- uključivanje mjerne aparature
- ulijevanje ulja određene temperature u pretvarač
- uključivanje elektromotora
- izbor brzine vrtnje elektromotora pomoću frekventnog pretvarača uz kontrolu tahometrom
- izbor odgovarajućeg opterećenja pomoću zatezanja vijka kočnice i nadzor opterećenja torziometra na zaslonu računala
- fino podešavanje brzine vrtnje motora i opterećenja na ulaznom vratilu pretvarača prema planu eksperimenta i uspostavljanje stacionarnog režima rada
- provjera ispravnosti rada mjernih uređaja
- pokretanje procesa registriranja mjernih veličina u trajanju od 10 s.

5.7.5 Dobivanje rezultata eksperimenta

Mjerenjem u vremenu od 10 sekundi dobiva se 3000 podataka po mjernoj veličini. Za svaku mjernu veličinu je određena srednja vrijednost. Srednja vrijednost stupanja iskoristivosti je odredena prema izrazu (5.7.1)

$$\bar{\eta} = \frac{0,9 \cdot \overline{F_k}}{i \cdot \overline{T_A'}} \quad (5.7.1)$$

U izrazu (5.7.1) je:

$\overline{F_k}$ / N – srednja sila na poluzi kočnice

$\overline{T_A'}$ / Nm – srednji moment na ulazu u pretvarač

i - prijenosni omjer pretvarača

$\bar{\eta}$ - srednja vrijednost stupanja iskoristivosti

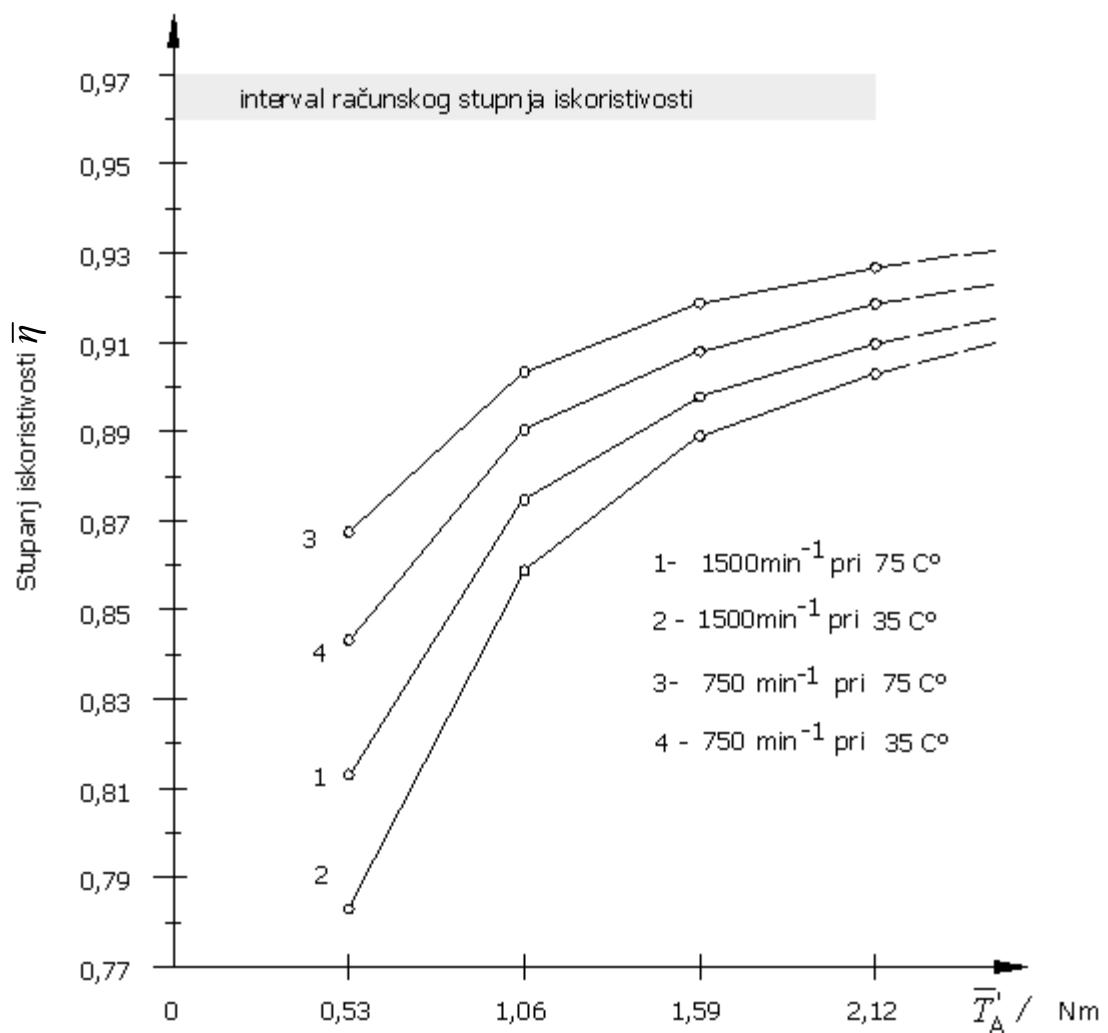
Dobivene srednje vrijednosti mjernih veličina i određene srednje vrijednosti stupnja iskoristivosti su navedene u Tab. 5.7.1 za svaku kombinaciju ulaznih parametara.

Tab. 5.7.1 Izmjerena srednja sila na poluzi kočnice \bar{F}_k , srednji moment na ulaznom vratilu \bar{T}_A' i izračunat srednji stupanj iskoristivosti $\bar{\eta}$ za dvije različite brzine vrtnje i temperature ulja te četiri različita pogonska opterećenja

ciljano srednje opter. \bar{T}_A'' / Nm	0,53	1,06	1,59	2,12
$\bar{F}_k / \text{N} (1500 \text{ min}^{-1} \text{ i } 75^\circ\text{C})$	9,56	20,19	30,72	41,40
$\bar{T}_A' / \text{Nm} (1500 \text{ min}^{-1} \text{ i } 75^\circ\text{C})$	0,54	1,06	1,57	2,09
$\bar{\eta} (1500 \text{ min}^{-1} \text{ i } 75^\circ\text{C})$	0,813	0,875	0,899	0,910
$\bar{F}_k / \text{N} (1500 \text{ min}^{-1} \text{ i } 35^\circ\text{C})$	8,86	19,07	30,77	42,26
$\bar{T}_A' / \text{Nm} (1500 \text{ min}^{-1} \text{ i } 35^\circ\text{C})$	0,52	1,02	1,59	2,15
$\bar{\eta} (1500 \text{ min}^{-1} \text{ i } 35^\circ\text{C})$	0,783	0,859	0,889	0,903
$\bar{F}_k / \text{N} (750 \text{ min}^{-1} \text{ i } 75^\circ\text{C})$	10,00	19,87	32,41	42,38
$\bar{T}_A' / \text{Nm} (750 \text{ min}^{-1} \text{ i } 75^\circ\text{C})$	0,53	1,01	1,62	2,10
$\bar{\eta} (750 \text{ min}^{-1} \text{ i } 75^\circ\text{C})$	0,867	0,904	0,919	0,927
$\bar{F}_k / \text{N} (750 \text{ min}^{-1} \text{ i } 35^\circ\text{C})$	10,09	20,75	32,02	42,63
$\bar{T}_A' / \text{Nm} (750 \text{ min}^{-1} \text{ i } 35^\circ\text{C})$	0,55	1,07	1,62	2,14
$\bar{\eta} (750 \text{ min}^{-1} \text{ i } 35^\circ\text{C})$	0,843	0,891	0,908	0,919

5.7.6 Analiza dobivenih podataka i usporedba s računskim stupnjem iskoristivosti

Kako bi se omogućio bolji uvid u promjenu vrijednosti stupnja iskoristivosti za različite ulazne parametre dobiveni rezultati su prikazani grafički na sl. 5.7.6. Na sl. 5.7.6 su četiri izlomljene crte koje prikazuju linearne interpolirane vrijednosti stupnja iskoristivosti u domeni srednjeg ulaznog momenta \bar{T}_A' . Svaka od izlomljenih crta je dobivena uz različitu kombinaciju brzine vrtnje motora i temperature ulja prilikom mjerjenja. Sjenečano je označen interval računskog stupnja iskoristivosti. Gornja i donja granica tog intervala unutar kojih se procjenjuje da bi trebao biti stupanj iskoristivosti pretvarača je dobivena na osnovu osnovnih podataka o ozubljenju planetnih slogova i izraza navedenih u Tab. 5.7.2.



Sl. 5.7.6 Eksperimentalno dobivene vrijednosti stupnjeva iskoristivosti pretvarača i interval računskog stupnja iskoristivosti

Tab. 5.7.2 Odredivanje gornje i donje granice računskog stupnja iskoristivosti planetnih slogova

I stupanj	II stupanj
$z_{1I} = 21$	$z_{1II} = 21$
$t_1 = 3,286$	$t_{II} = 3,571$
$\psi_{zI} = 0,0188261$ prema izrazu (2.9.3)	$\psi_{zII} = 0,017441$ prema izrazu (2.9.3)
$\psi_{0I\max} = 1,41 \cdot \psi_{zI} = 0,02654$ prema (2.9.6)	$\psi_{0II\max} = 1,41 \cdot \psi_{zI} = 0,02459$ prema (2.9.6)
$\psi_{0I\min} = 1,09 \cdot \psi_{zI} = 0,02052$ prema (2.9.6)	$\psi_{0II\min} = 1,09 \cdot \psi_{zI} = 0,01901$ prema (2.9.6)
$\eta_{0I\min} = 0,9734$	$\eta_{0II\min} = 0,9754$
$\eta_{0I\max} = 0,9795$	$\eta_{0II\max} = 0,981$
$\eta_{IV(3)} = \frac{1 + \eta_0 t}{1 + t}$ prema Tab. 2.9.1	$\eta_{IV(3)} = \frac{1 + \eta_0 t}{1 + t}$ prema Tab. 2.9.1
$\eta_{IV(3)I\min} = 0,9793$	$\eta_{IV(3)II\min} = 0,98079$
$\eta_{IV(3)I\max} = 0,9842$	$\eta_{IV(3)II\max} = 0,98515$

Kod ovog pretvarača je ukupni stupanj iskoristivosti jednak umnošku stupnjeva iskoristivosti planetnih slogova $\eta_{uk} = \eta_{IV(3)I} \cdot \eta_{IV(3)II}$. Vrijednost računskog stupnja iskoristivosti se kreće u intervalu: $\eta_{uk} = 0,9605 \div 0,9696$.

Analizom grafa sa sl. 5.7.6 može se zaključiti sljedeće:

- Povećanjem opterećenja, pri istoj brzini vrtnje i temperaturi ulja (viskoznosti) se postižu veće vrijednosti stupnja iskoristivosti. Razlog tome je taj što je kod veće vrijednosti ulaznog momenata veća razlika između tog ulaznog momenta i momenta praznog hoda (moment praznog hoda je neovisan o opterećenju);
- Stupanj iskoristivosti ima veću vrijednost pri temperaturi ulja od $75C^\circ$ nego pri temperaturi od $35C^\circ$. Razlog tome je manja viskoznost ulja pri višoj temperaturi pa su manji hidraulički gubici;
- Razlika vrijednosti stupnja iskoristivosti pri temperaturi od $75C^\circ$ i $35C^\circ$ je najveća kod minimalne vrijednosti ulaznog momenta;
- Stupanj iskoristivosti je veći pri brzini vrtnje od 750 min^{-1} nego pri brzini vrtnje od 1500 min^{-1} . Razlog su veći hidraulički gubici pri većoj brzini vrtnje;

- Stupanj iskoristivosti se brže mijenja kod nižih vrijednosti ulaznog momenta nego kod viših vrijednosti ulaznog momenta;
- Utjecaj brzine vrtnje i temperature na stupanj iskoristivosti je veći kod manjih opterećenja;
- Najveća razlika teorijskih i eksperimentalnih rezultata nastaje pri minimalnoj vrijednosti ulaznog momenta. Kako se opterećenje povećava vrijednosti računskog stupnja iskoristivosti i eksperimentalno dobivenog stupnja iskoristivosti su sve bliže;
- Relativno velika razlika između eksperimentalnih i teoretskih rezultata nastaje zbog toga što je ispitivanje provođeno na relativno malom reduktoru s relativno manjim opterećenjem (kakvo je omogućila oprema). Naime, kod reduktora manjih dimenzija može se očekivati i manji stupanj iskoristivosti [5]. Prema trendu dobivenih grafova se može zaključiti da bi se pri opterećenjima koja su bliska nazivnom (5 Nm) mogla očekivati manja razlike između izračunatih vrijednosti stupnja iskoristivosti i eksperimentalnih rezultata. Također na sl. 5.7.2 se može vidjeti da je eksperimentalni pretvarač u cilju smanjenja troškova izведен bez adekvatnog uležištenja dijelova kakvo imaju industrijski reduktori za velike snage. Ovo je zasigurno jedan od uzroka dobivanja manjeg stupnja iskoristivosti od izračunatog na osnovu terijskih izraza koji uključuju koeficijente dobivene mjerljem na većim industrijskim reduktorima.

5.7.7 Usporedba provedenog eksperimenta s drugim sličnim eksperimentom

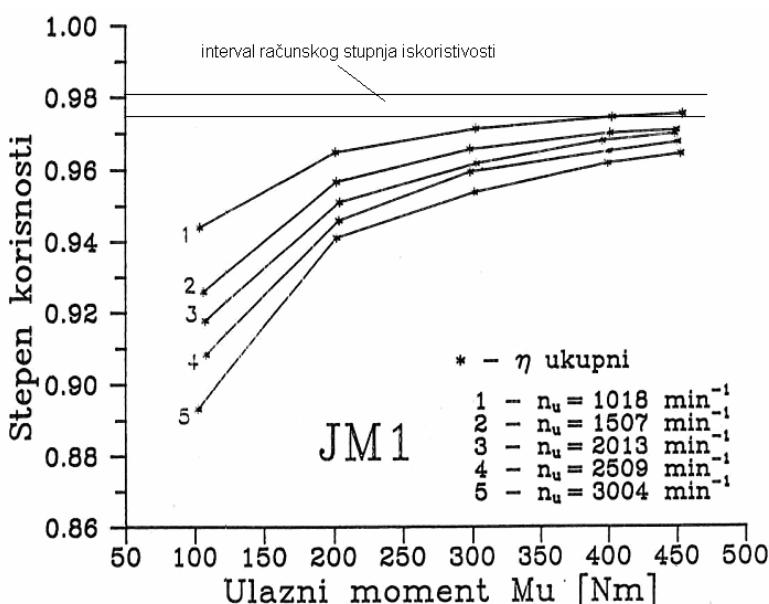
Eksperimentalno određivanje stupnja iskoristivosti je opisano u više radova. Neki od njih su [1, 5, 32, 66, 71]. Uspostavljeni rezultati su svojstveni samo za eksperimentalni pretvarač na kojem su dobiveni. Plan eksperimenta opisanog u ovom radu je sličan planu jednog od eksperimenata prikazanog u [1]. Eksperimentalni pretvarač u [1] je bio jednostavni planetni pretvarač tipa 1UV. Osnovni parametri tog pretvarača su:

- broj zubi sunčanog zupčanika $z_1=22$,
- broj zubi satelita $z_2=17$
- broj zubi vijenca $z_3=56$
- modul zupčanika $m_n=5 \text{ mm}$
- širina zupčanika $b=30 \text{ mm}$

Točnost izrade zupčanika u pogledu geometrijskih parametara radnih površina zubi je srednja (odgovara kvaliteti 7 točnosti izrade). Zupčanici su toplinski obrađeni, a za podmazivanje i hlađenje pretvarača je primijenjeno ulje S1 SAE 50, koje je u širokoj uporabi u prijenosnicima koji prenose velika opterećenja i rade s čestim dinamičkim udarima.

Određivanje stupnja iskoristivosti kod zakočenog vijenca i prijenosa energije od sunčanog zupčanika na vodilo provedeno je na ispitnom stolu s otvorenim tokom snage mjeranjem relevantnih mehaničkih veličina. Ulazni moment se kretao u intervalu od 50 Nm do 450 Nm, a brzina vrtnje motora je bila od 1018 min^{-1} do 3004 min^{-1} . Ovisno o ulaznom opterećenju i brzini vrtnje motora određeni stupanj iskoristivosti se kretao između 0,893 i 0,976. Radna temperatura ulja nije poznata.

Dobiveni rezultati stupnja iskoristivosti pretvarača prikazani su grafički na sl. 5.7.7.



Sl. 5.7.7 Graf stupnja iskoristivosti eksperimentalnog pretvarača iz [1]

Za eksperimentalni pretvarač iz [1] se može odrediti minimalna i maksimalna vrijednost računskog stupnja iskoristivosti na isti način kao i kod eksperimentalnog pretvarača ispitivanog u ovom radu.

Idealni momentni omjer: $t=2,545454$

Relativni računski stupanj gubitaka u ozubljenju: $\psi_z = 0,023835$

Minimalni relativni računski stupanj gubitaka u pretvaraču:

$$\psi_{0\min} = 1,09 \cdot 0,02383 = 0,02598$$

Maksimalni relativni računski stupanj gubitaka u pretvaraču:

$$\psi_{0\max} = 1,41 \cdot 0,023835 = 0,033607$$

Maksimalni relativni računski stupanj iskoristivosti: $\eta_{0\max} = 0,974$

Minimalni relativni računski stupanj iskoristivosti: $\eta_{0\min} = 0,966$

$$\text{Računski stupanj iskoristivosti: } \eta_{1V(3)} = \frac{1 + \eta_0 \cdot t}{1 + t} \quad (\text{Tab. 2.9.1})$$

Maksimalni računski stupanj iskoristivosti: $\eta_{1V(3)\max} = 0,981$

Minimalni računski stupanj iskoristivosti: $\eta_{1V(3)\min} = 0,975$

U grafu na sl. 5.7.7 su ucrtane vrijednosti $\eta_{1V(3)\min}$ i $\eta_{1V(3)\max}$. Analizom grafa se vidi da samo kod brzine vrtnje $n_A = 1018 \text{ min}^{-1}$ i vrijednosti ulaznog momenta bliskoj nazivnoj postoji potpuna usuglašenost računskih i eksperimentalnih rezultata.

Usporedbom grafova eksperimenta provedenog u ovom radu (sl. 5.7.6) i usporednog eksperimenta (sl. 5.7.7) iz [1] se vidi da postoji potpuna sličnost trendova. Bolja usuglašenost rezultata s teoretskim modelom je kod usporednog eksperimenta pri nazivnom opterećenju. To je i logično jer se radi o većem pretvaraču. Naime, poznato je da veći pretvarači rade s većim stupnjem iskoristivosti [5].

Može se zaključiti da su računski dobiveni stupnjevi iskoristivosti preko izraza primjenjenih u ovom radu najbliži realnim stupnjevima iskoristivosti kad su opterećenja pretvarača bliska nazivnom opterećenju. To potvrđuju rezultati oba prikazana eksperimenata u poglavlju 5.7.