

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Механизми машина

Број индекса: 83/2015

Марија С. Ранковић

Таласни преносници - кинематика и примена завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Саша Јовановић, доцент - ментор

2. _____

3. _____

Датум

одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да да преглед и анализу постојећих конструкцијских решења таласних преносника. Посебно је потребно обрадити кинематику више варијатних решења овог типа преносника. На крају, потребно је навести најбитније предности и недеостатке таласних преносника као и њихове области примене.

Препоручена литература:

- [1] В. Николић: МАШИНСКИ ЕЛЕМЕНТИ, Крагујевац, 2004.
- [2] М. Трбојевић, М. Јанковић,...: РЕДУКТОРИ, Научна књига – Београд, 1988.
- [3] Б. Стијановић, М. Благојевић: Механички преносници, Крагујевац, 2015.

Крагујевац, 2018.

Ментор:

Др Саша Јовановић, доцент

Садржај

1. Увод.....	6
2. Таласни преносници	8
2.1. Предности таласних редуктора	9
2.2. Принцип рада таласних преносника.....	10
3. Конструисање таласног редуктора.....	14
3.1. Структурна решења таласних редуктора	14
3.2. Конструисање генератора таласа	21
3.3. Конструисање еластичног чврстог зупчаника	24
4. Кинематски прорачун таласног преносника	26
5. Примена таласних редуктора.....	31
6. Закључак	33
Литература	34

Резиме

Таласни редуктор се састоји из три елемента чије се осе међусобно поклапају. То су: еластични зупчаник, чврсти зупчаник и генератор таласа. Једностепени таласни редуктор обезбеђује веома велики преносни однос, чак до 250. Таласни редуктори се одликују високом поузданошћу и дугим радним веком. Таласни преносници примењују се у медицини, војној индустрији, роботизи итд.

Кључне речи: таласни редуктор, кинематика, констуркција

Apstract

A harmonic drive consists of a toothed mechanism, which is composed of three main elements: a rigid circular spline, an elliptical wave generator and a flexible spline, which is called the flexspline. Harmonic drive provides a very large gear ratio, up to 250. Their main advantages are high reliabillity and long lasting. Harmonic drives have purpose in making of medical devices, military industry, robotics etc.

Keywords: harmonic drive, kinematics, construction .

1. Увод

Развојем технике кроз време дошло је до примене знатно више видова енергије за погон машина. Због тога, данас машине могу да имају различите видове погона, као што су:

- Механички,
- Електрични,
- Хидраулични и
- Пнеуматски.

У пракси, најчешће се срећу комбиновани видови погона. Због тога што често енергија која се добија директно погоном није довољна потребно је користити различите елементе за побољшање конструкцијских карактеристика машине. Ти елементи називају се преносници и они служе за пренос енергије и побољшавање карактеристика машине. Три главне карактеристике коју преносници преносе су:

- Енергија,
- Снага и
- Кретање.

У склопу једне конструкције, преносник се најчешће поставља између погонске и радне машине. Пренос се може вршити на следеће начине:

- Механичким преносницима,
- Електричним преносницима,
- Хидрауличним преносницима и
- Комбинацијом неких од ових преносника.

Неопходност примене преносника између мотора и радне машине условљена је низом различитих потреба које зависе од конструкције уређаја или захтева корисника:

- Брзина кретања радне машине најчешће се знатно разликује од стандардних брзина погонске машине, што доводи до немогућности директног повезивања погонске и радне машине;
- Карактеристике и закони кретања обезбеђени мотором разликују се од потребних кретања радне машине. Често је потребно обртно кретање претворити у транслаторно и обратно;
- Понекад се конструктивно захтева да један мотор даје погон на више извршних органа радне машине, различитим брзинама;
- Код већих растојања између погонске и радне машине немогућа је непосредна веза, или је непожељна због безбедности, удобности опслуживања или габарита радне машине;

- У бројним конструкцијама, пренос снаге и кретања се врши између вратила која мењају положај оса у процесу експлоатације, или су постављена под извесним углом;
- Често се захтева да брзине кретања извршних органа радне машине буду променљиве у експлоатацији. Те промене се могу извести континуално или дискретно.
- Жељени обртни моменти радне машине, у процесу експлоатације, најчешће су у границама које се не могу остварити на мотору, или су неекономични. Према изразу за снагу машине:

$$P = T \cdot \omega \quad (1)$$

Где је $T[\text{Nm}]$ обртни момент машине, а $\omega[\text{s}^{-1}]$ угаона брзина, види се да се са смањењем броја обртаја (угаона брзина је директно пропорционална броју обртаја) који производи мотор, а који се доводи на радну машину, пропорционално повећава обртни момент радне машине. Тако се са малом снагом и великим бројем обртаја мотора (што је најчешћи случај код електромотора као најзаступљенијих), помоћу преносника на радној машини остварују потребни обртни моменти и бројеви обртаја вратила.

У зависности од принципа и начина преноса снаге и кретања, механички преносници, углавном се јављају у облику:

- фрикционих преносника,
- каишних преносника,
- ланчаних преносника,
- зупчастих преносника.

Поред ових основних типова механичких преносника, постоји већи број других, који могу представљати комбинацију постојећих, или специјални вид основних механичких преносника. Тако зупчасти каишни преносници конструкцијски представљају комбинацију зупчастог и ланчаног преносника, која укључује добре особине оба типа преносника и ствара нови квалитет. Планетарни преносник је тип зупчастог преносника, чије конструкцијско решење омогућава знатно боље карактеристике од класичног зупчастог преносника. Таласни преносници су вид планетарних преносника (такође и вид зупчастих преносника) специфичне конструкције неких класичних елемената која даје низ предности [1].

Сваки механички преносник одређују његове радне карактеристике. Најважније су:

- Број обртаја: $n, [\text{min}^{-1}]$;
- Обртни момент: $T, [\text{Nm}]$;
- Снага: $P, [\text{kW}]$;
- Радни преносни однос: i ;
- Степен искоришћења: η .

2. Таласни преносници

Први таласни преносник нашао је примену готово пре 40 година у оквиру „Аполо 15“ мисије. Због тога што таласни преносник поседује тј. користи еластичну деформабилну компоненту нашао је широк опсег примене и високу поузданост и перформансе. Због своје еластичне деформабилне компоненте, постиже висок коефицијент редукције. Овај вид преносника највише се развија у Немачкој, Јапану и САД-у.

Због тога што се захтеви перформанси опреме континуирано повећавају и због тога се константно ради на усавршавању технологије погона преносника, зупчаници у преносницима морају да задовоље низ захтева као што су: тачност позиционирања и поновљивост, висок капацитет обртног момента, отпорност на увијање, компактност и једноставан дизајн и конкурентну цену. Сви ови захтеви довели су до развитка новог система преносника „таласних преносника“. Ови преносници нашли су велику примену у роботизи, алатним машинама, машинама за штампање, медицинској опреми и машинама за производњу полупроводника [2].

Први таласни преносник је конструисан 1959. године од стране *Walt Musser*-а у САД, а прва примена била је у ваздухопловству због њихових габарита и мале тежине. Временом, таласни преносници нашли су примену и роботизи и производњи алата. На слици 1 приказан је расклопљен таласни преносник.



Слика 1. Расклопљен таласни преносник (1-генератор таласа, 2-еластични зупчаник, 3-чврсти зупчаник)

2.1. Предности таласних преносника

Таласни преносници сачињени су од три елемента што омогућава конструкторима слободу у пројектовању машине без нарушавања захтева у погледу масе и димензија. Због самог облика еластичног зупчаника у склопу таласног преносника, стиче се могућност да се постави електромотор или улазно/излазно вратило у унутрашњости редуктора и тиме се конструкција додатно смањују.

Стално конструкцијски напрегнути еластични зупчаник и скоро радијално спрезање зубаца, омогућавају класичном таласном редуктору рад са минималним “мртвим ходом”. Чак ако и постоји клизање код зупчаника, због великог преносног односа на излазном вратилу клизање постаје минимално. То смањује концентрацију оптерећења и појаву израженог хабања.

Степен искоришћења таласног редуктора не заостаје за другим врстама преносника. Посматрајући губитке настале од улазног до излазног вратила, а не само између зупчаника који се спрежу (као што се ради код других преносника), компанија *Harmonic drive* је добила степене искоришћења у распону од 0,8 до 0,9.

Обртни момент код таласног редуктора преноси се једноставним паром зупчаника. Не стварају се додатна радијална оптерећења што дозвољава да се у редуктору могу користити простији (самим тим и јефтинији) лежајеви. Исто тако су пратећа опрема, кућиште и поклопци једноставнији и лакши што утиче на габарите и масу редуктора и конструкције за коју је намењен.

Преносни односи једностепених таласних редуктора крећу се од 50 до 250 (*Harmonic drive* и до 320). Комбиновањем са другим типовима преносника могуће је остварити и веће преносне односе, што се релативно тешко постиже самосталном применом других преносника (који поред тога имају знатно веће димензије и масе).

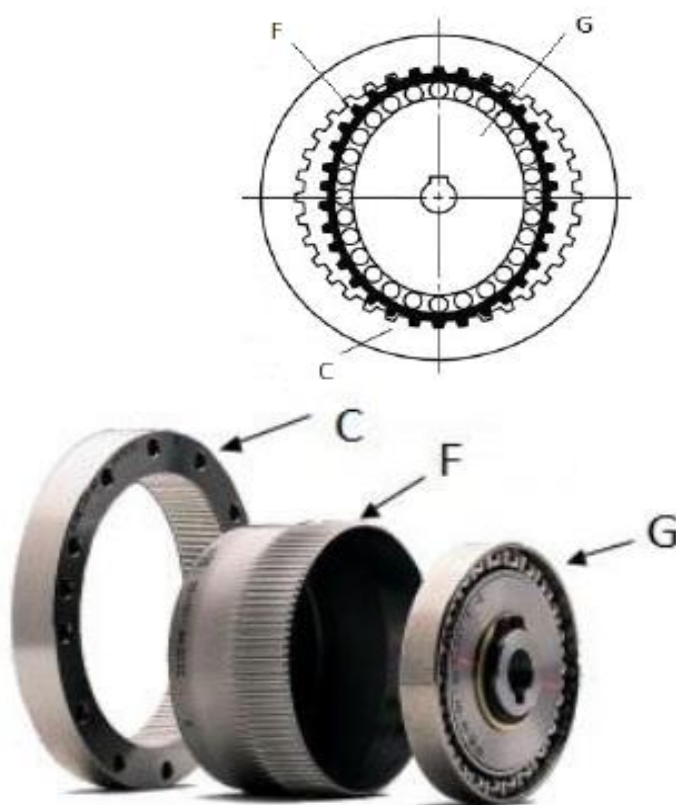
Обртни моменти који се могу пренети таласним редуктором једнаки су моментима код двоструко већих редуктора (у најбољем случају). У погледу релативне масе ниједан преносник не може се мерити са таласним редуктором.

Конструкција таласног редуктора обезбеђује стално спрезање до 10% од укупног броја зубаца. Тиме се минимизирају грешке “зубац на зубац”. То условљава велику позициону тачност.

Конструкцију таласног редуктора карактерише врло велика флексибилност. Конструктор поседује вишеструке могућности регулисања улазно/излазних решења. Концентричност вратила је идеална основа за конструкцију диференцијала. Таласни редуктори се одликују високом поузданошћу и дугим радним веком. Доказани су у тешким условима које захтевају космичка и војна индустрија. Просечан век трајања под радним оптерећењем је преко 15000 часова (за који временски период се обично конструишу). Поред тога, спрезање зупчаника остаје непромењено у условима рада степ мотора или фреквентних стартовања, заустављања и промене смера кретања.

2.2. Принцип рада таласних преносника

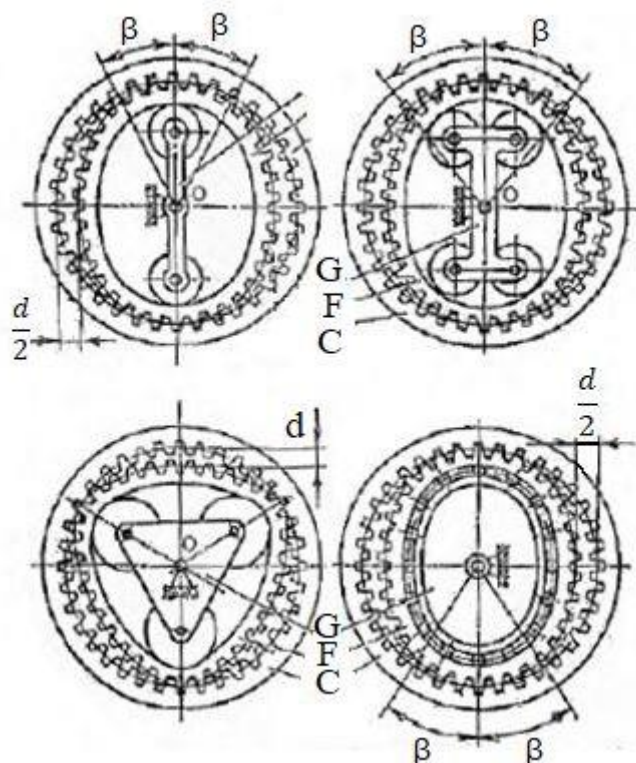
У основи, таласни преносник се састоји из три елемента чије се осе међусобно поклапају. То су: еластични зупчаник (F), чврсти зупчаник (C) и генератор таласа (G) (слика 2). Еластични зупчаник има облик танкозидног цилиндра са спољним озубљењем. То је нетипични конструктивни елемент који се јавља само код оваквог вида преносника. Зупчасти прстен налази се на “отвореном крају”, док је други крај повезан са излазним вратилом (постоје и други облици извођења таласних преносника). Пре монтирања генератора таласа, еластични зупчаник је концентричан са чврстим зупчаником.



Слика 2. Делови таласног редуктора [2]

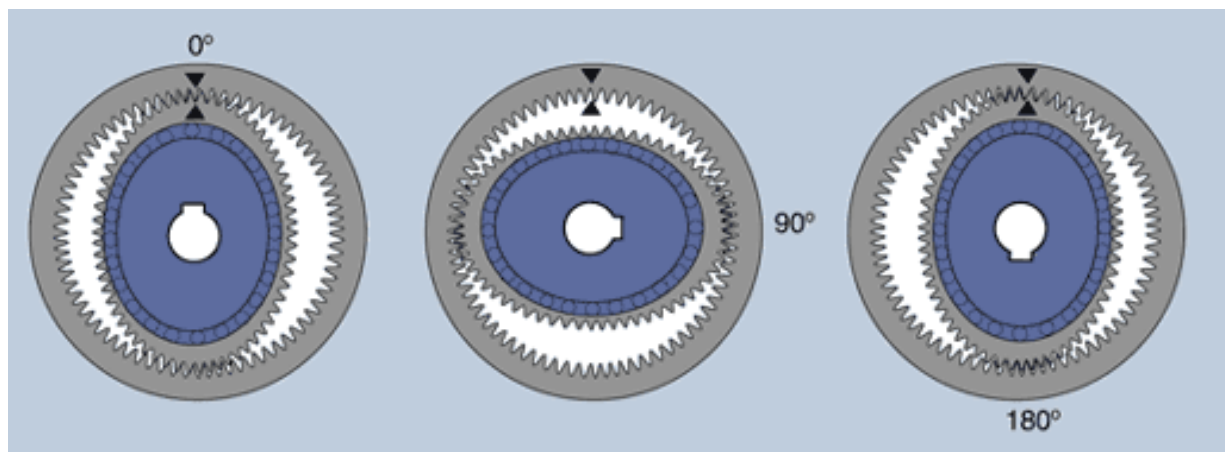
Чврсти зупчаник је кружног облика са унутрашњим озубљењем. Обично је чврсто везан за кућиште и не врши никакво кретање. Генератор таласа радијално деформише еластични зупчаник тако да овај добија облик елипсе и спреже се са чврстим зупчаником у правцу главне осе елипсе.

Сам генератор таласа може бити елипсастог или неког другог попречног пресека (са вијцима), зависно да ли је преносник двоталасни или троталасни (слика 3).



Слика 3. Врсте генератора таласа [1]

Начин преноса кретања таласним преносником најбоље је уочљив на слици 4.

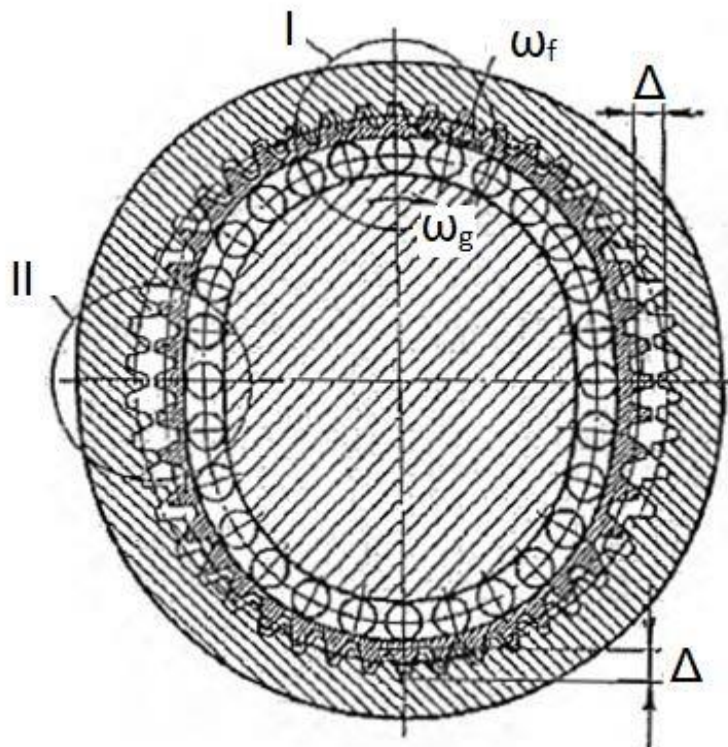


Слика 4. Пренос кретања код таласног преносника [2]

Број зубаца еластичног и чврстог зупчаника није једнак. Та разлика код двоталасног преносника је 2, 4, или 6, а код троталасног 3, 6, или 9 зубаца. На слици 4. претпостављено је да еластични зупчаник има два зупца мање од чврстог зупчаника. Зупци ова два зупчаника потпуно су спрегнути само на правцу главне осе елипсе. У почетном тренутку посматрања означен је положај осе са 0° и фиксирани су исправно спрегнути зупци.

Када се генератор таласа окрене за четвртину круга, главна оса елипсе долази у хоризонтални положај (90°) и ту су зупчаници потпуно спрегнути. Претходно фиксирани зупци налазе се на међусобно највећем растојању. Код окретања генератора за половину круга, оса долази поново у вертикалан положај (180°), међутим, сада нису исправно спрегнути фиксирани зупци. Пошто је број зубаца еластичног зупчаника мањи за два, при окретању генератора за 180° , а пошто је чврсти зупчаник непокретан, дошло је релативног обртања еластичног зупчаника за величину једног зупца. Приликом једног обртаја генератора, релативно обртање је два зупца (3, 4,... зависно од разлике зубаца два зупчаника). На тај начин се постижу велики преносни односи. Може се приметити да је смер обртања еластичног зупчаника (односно, излазног вратила) супротан смеру обртања генератора таласа (улазно вратило).

Код конструкције где је генератор таласа у облику елипсоидног диска, еластични зупчаник и генератор таласа одвојени су котрљајним лежајем који прати облик генератора. На правцу мале осе елипсе између зупчника постоји зазор Δ (слика 5). Зазор мора да је такав да су зупчаници потпуно одвојени (зона II) [1].



Слика 5. Генератор таласа у облику диска [1]

Основна карактеристика таласних редуктора, која им даје предност у односу на друге типове редуктора, је релативна маса:

$$\gamma = \frac{m}{T_{iz}} \quad (2)$$

где је m маса редуктора, а T_{iz} обртни момент на излазном вратилу. Зависно од типа конструкције, преносни однос код једностепених редуктора креће се од 50 до 250, а код двостепених од 2000 до 50000. Конструктивно је могуће извести и вишестепене редукторе, али се јављају проблеми при синхронизовању рада сваког наредног степена преноса. Присутне су комбинације таласних и планетарних преносника у конструкцијама.

Снага за коју се пројектују таласни редуктори креће се у интервалу од 0,02 до 3000 kW. Степен искоришћења обично се налази у распону од 0,9 до 0,7. На њега утиче тип редуктора, број обртаја улазног вратила и обртни момент на излазном вратилу.

Може се такође уочити да повећањем преносног односа опада ефикасност таласног редуктора. Међутим, степен корисности не представља препреку при избору таласног редуктора за пренос снаге и кретања у конструкцији.

Важан фактор у раду таласних редуктора је кинематска тачност. Сама конструкција обезбеђује минималан “мртви ход”, јер приликом спрезања зупчаника практично нема клизања. Сва три елемента која учествују у преношењу снаге и кретања су централно распоређени и осе им се поклапају, што елиминише појаву динамичких сила и додатно оптерећење улазног и излазног вратила [1].

Подмазивање код таласног редуктора може бити уљем (класично картерско подмазивање) и машћу. Може се користити свако уље постојано на температурама до 366.5K (93°C). Код конструкција код којих се захтева вертикалан положај редуктора, излазно вратило мора бити испод улазног. Код подмазивања машћу, уводе се ограничења за излазни број обртаја и излазни торзиони момент. Таласни редуктори обично се пројектују за радни век дужи од 15000 часова.

3. Конструисање таласног редуктора

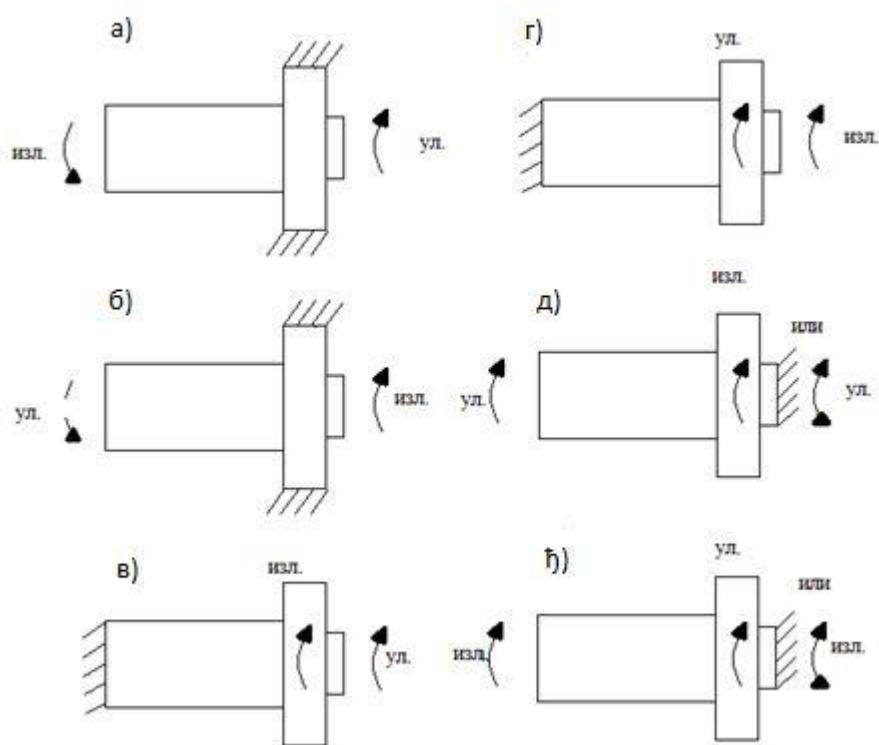
3.1. Структурна решења таласних редуктора

Структура зупчастих таласних преносника заснована је на трансформацији ротационог кретања путем деформисања еластичног зупчаника (F), од стране генератора таласа (G) и његовим спрезањем са чврстим зупчаником (C). Уобичајено конструкцијско решење ових елемената већ је приказано на слици 2. Еластични зупчаник је цилиндричан (пре деформисања), танкозид са спољним озубљењем, а генератор таласа је, или у облику елипсастог диска, или је са точкићима. Овај сет зупчаника таласног преносника примањује се код таласног редуктора. Ту је излазно вратило повезано са генератором таласа, еластични зупчаник је везан за излазно вратило, док је чврсти зупчаник непокретан. Смер обртања излазног вратила супротан је обртању улазног. Ово је уобичајено конструкцијско решење таласног редуктора, такође шематски приказано на слици 6а. Преносни однос добијен оваквом конструкцијом узима се као основни.

На слици 6 шематски су приказане све могућности које проистичу од истог типа таласног преносника са слике 3, комбиновањем везивања елемената преносника са улазним, излазним и непокретним елементима редуктора.

Преносник на слици 6б је мултипликатор, односно врши повећање излазног броја обртаја у односу на улазни. Улазно вратило је повезано са еластичним зупчаником, а излазно са генератором таласа.

Чврсти зупчаник је и даље непокретан. Преносни однос је једнак основном (који је усвојен са слике 6а, с тим што је сада у питању мултипликатор. Смерови обртања улазног и излазног вратила су супротни.



Слика 6. Конструкцијска решења таласних преносника

На слици 6в представљен је таласни редуктор. Улазно вратило повезано је са генератором таласа, излазно вратило са чврстим зупчаником, а непокретни елемент сада је еластични зупчаник. Смер обртања генератора (улазно вратило) исти је као и смер обртања чврстог зупчаника (излазно вратило). Преносни однос оваквог редуктора већи је за један од основног преносног односа (усвојеног).

На слици 6г такође је непокретни елемент еластични зупчаник, с тим што је улазно вратило везано за чврсти зупчаник, а излазно за генератор таласа. Овај таласни преносник је мултипликатор и преносни однос му је такође за један већи од основног (наравно број обртаја излазног вратила мањи је од улазног). Обртање улазног и излазног елемента су у истом смеру.

Шема на слици 6д представља редуктор; диференцијал. Непокретан елемент у овом случају је таласни генератор. Улазни елемент везан је за еластични зупчаник, а излазни елемент за чврсти зупчаник. Смер обртања ова два члана је исти. Преносни однос може се изразити изразом:

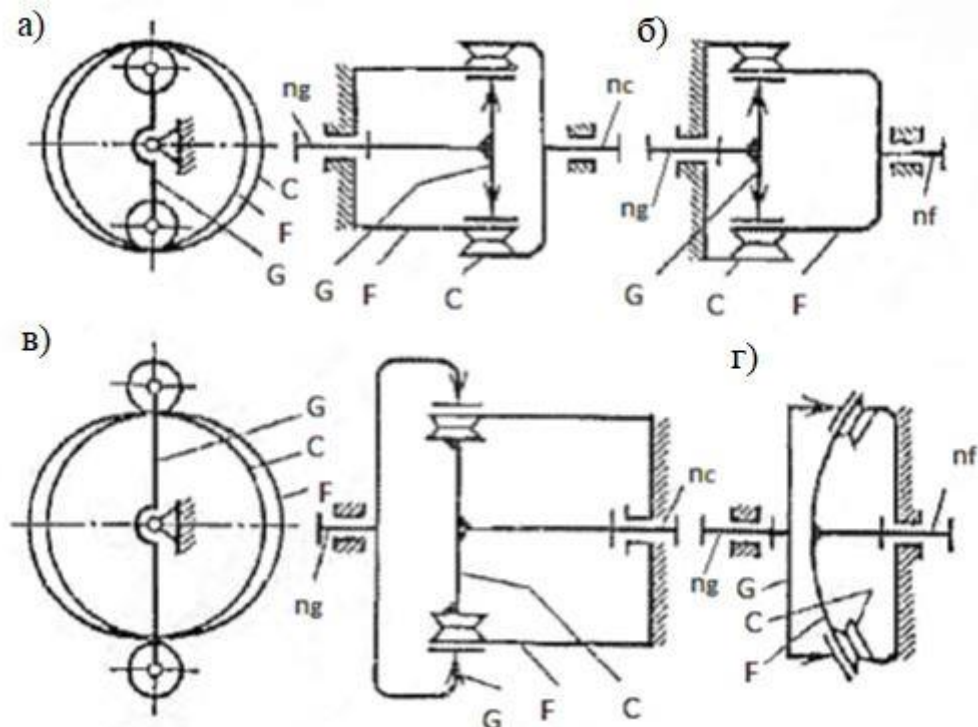
$$\text{преносни однос} = \frac{\text{основни преносни однос}}{\text{основни преносни однос} + 1}$$

Слично решење представљено је на слици 6ђ. Генератор таласа је такође фиксиран, док је улазни елемент везан за чврсти зупчаник, а излазни везан за еластични зупчаник. Преносник представља мултипликатор; диференцијал. Улазни и излазни елемент имају исти смер обртања, а смањење броја обртаја (угаоне брзине) на излазу се огледа кроз преносни однос дат изразом:

$$\text{преносни однос} = \frac{\text{основни преносни однос} + 1}{\text{основни преносни однос}}$$

Имајући у виду претходне варијанте таласних преносника, обзиром на начине повезивања улазних, излазних и непокретних елемената, уведена је конвенција у означавању једностепених преносника. Елементи таласних преносника се означавају словима F, C и G, тако што се прво представља елемент везан за улазно вратило, друго слово представља непокретни елемент, а треће се односи на елемент који је везан за излазно вратило, (у руској литератури еластични зупчаник означава се словом Г, чврсти зупчаник словом Ж, а генератор таласа са Н). Тако на пример, преносник са слике 6а има ознаку GCF (или НЖГ).

Једностепени таласни преносник је првобитни и уједно најједноставнији облик таласних преносника. До сада је показано класично (уобичајено) извођење његових елемената. На слици 7 дате су упоредне шеме могућих извођења једностепених таласних преносника обзиром на конструкцијска решења појединих елемената.



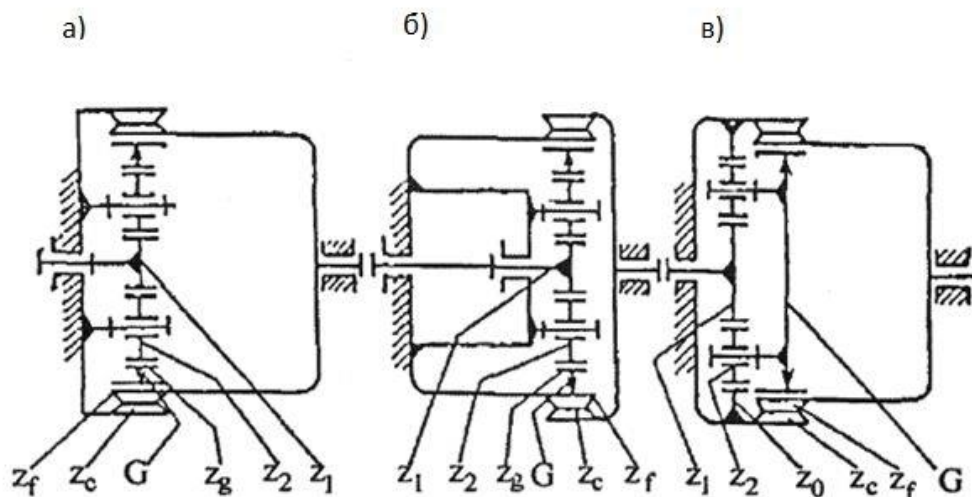
Слика 7. Конструкцијска решења једностепених редуктора [1]

Шема на слици 7а представља већ описани таласни преносник типа GCF. Генератор таласа представљен је стрелицама које показују правац деформација еластичног зупчаника. Шема таласног преносника типа GCF је дата на слици 7б.

На слици 7в представљена је шема таласног преносника типа GFC код кога је генератор таласа израђен са ваљцима који се наслањају на спољни прстен еластичног зупчаника и тако га деформишу. Еластични зупчаник је у овом случају озубљен са унутрашње стране, док чврсти зупчаник има спољно озубљење. Овакво конструктивно решење таласних преносника је врло ретко јер се непотребно увећавају димензије преносника. Еластични зупчаник је већег пречника од чврстог и има више зубаца, док ваљци генератора додатно повећавају конструкцију.

На слици 7г приказана је шема таласног преносника типа GCF код кога је еластични зупчаник у облику равног диска када је недеформисан. Зупци му се налазе на чеоној површини, док су зупци чврстог зупчаника на конусној површини. У овом случају двоталасни генератор таласа наслања се на диск еластичног зупчаника на два места супротно постављена у односу на осу преносника. На тај начин се врши спрезање два зупчаника, а пошто је чврсти зупчаник непокретан, еластични зупчаник врши релативно кретање које се преноси на излазно вратило. Овај вид конструкције се избегава јер је технолошки тешко изводљив.

Технолошки су лако изводљиве конструкције код којих се врши комбинација таласних преносника са зупчастим и планетарним преносницима. На слици 8 дате су шеме конструкција које представљају комбинацију планетарних и таласних преносника.

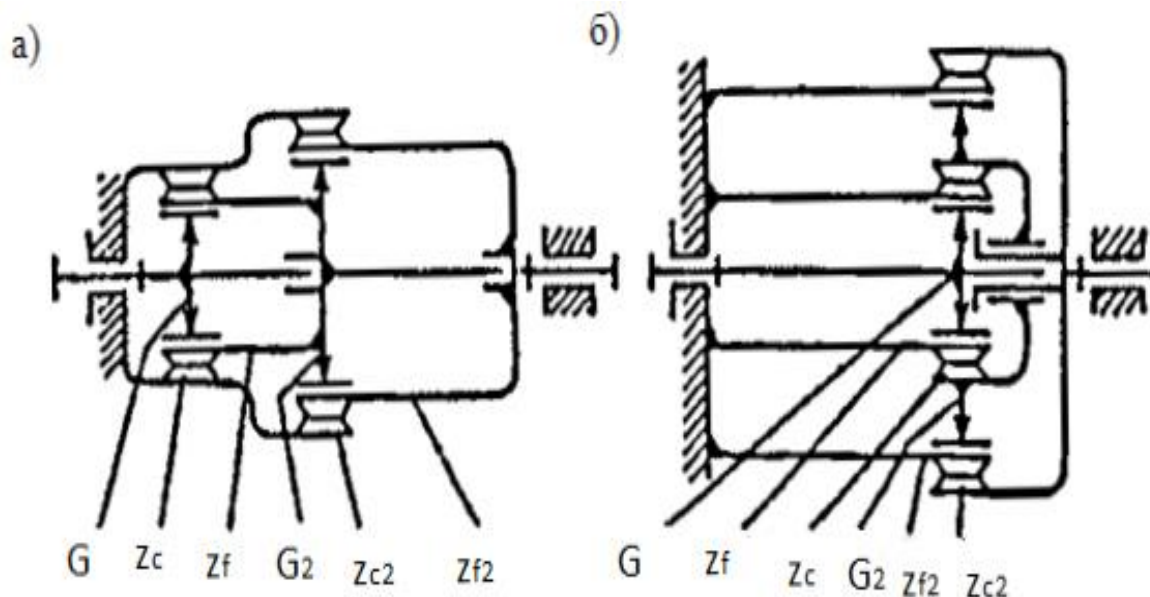


Слика 8. Конструкцијска решења комбинације планетарних и таласних преносника

Слике 8а и 8б представљају шеме преносника код којих се кретање на генератор таласа доводи помоћу планетарног преносника. Конвенцијом ови типови преносника обележавају се ознаком KGFC (генератор таласа је улазни елемент, чврсти зупчаник је непокретан, а еластични зупчаник је излазни елемент) за 8а и KGFC за слику 8б (генератор таласа је улазни елемент, чврсти зупчаник је излазни, а еластични зупчаник је непокретан). Слово К означава да се кретање доводи преко планетарног преносника, а остале ознаке су задржале претходно објашњено значење.

Комбинација на слици 8в шематски приказује преносник типа KPGCF. У овом случају кретање пролази једну редукцију у планетарном преноснику и тек тада се доводи до генератора таласа. Планетарни преносник се састоји од непокретног носећег зупчаника z_0 , централног зупчаника z_1 , чија се оса поклапа са осом таласног преносника и три сателита. Осовине сателита везане су за генератор таласа, који деформише еластични зупчаник. Чврсти зупчаник таласног преносника чврсто је везан тако да се кретање на излазно вратило преноси релативним обртањем еластичног зупчаника у смеру супротном обртању генератора таласа.

Захваљујући томе што таласни преносник има еластични зупчаник, комбиновање са таласним преносником даје конструкције малих габарита и великих преносних односа.

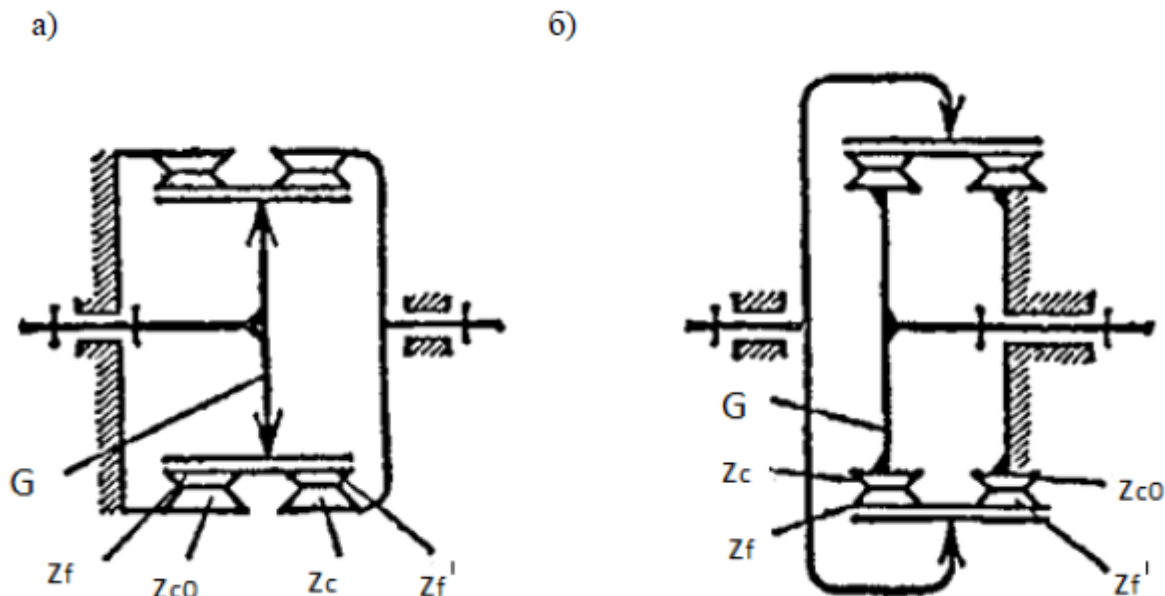


Слика 9. Шема двостепеног таласног преносника

Двостепени таласни преносници могу се конструисати једноставном комбинацијом два једноступена таласна преносника. На слици 9а приказана је шема двостепеног таласног преносника GCFGCF, а на слици 9б је шема двостепеног таласног преносника типа GFCGFC. Примећује се да се спајање два једноступена таласна преносника у двостепени може вршити у радијалном правцу или у правцу осе преносника.

Низом спајања три једноступена таласна преносника може се конструисати тростепени, а истим начином и вишестепени таласни преносник. Међутим, такве конструкције се избегавају јер при сваком следећем везивању таласног преносника за таласни преносник јављају се све већи проблеми симетричног спрезања зубаца еластичног зупчаника, који се релативно креће, са зупцима чврстог зупчаника. Према томе, да би се добио што већи степен искоришћења таласних преносника, таласне деформације еластичног зупчаника треба преусмеравати или на излазно вратило, или на обод кућишта таласног преносника.

Други вид усложњавања таласних преносника иде у правцу усложњавања еластичног зупчаника. Он може да се израђује са озубљењем на другој страни на којој се спреже са другим чврстим зупчаником. Ово значи да овај тип таласног преносника има један елемент више од класичног једностепеног таласног преносника. На слици 10 приказани су овакви таласни преносници.



Слика 10. Шема таласног редуктора са сложеним еластичним зупчаником [1]

На слици 10а је шема таласног преносника код кога је генератор таласа унутар преносника, а еластични зупчаник је озубљен споља, док је на слици 10б таласни преносник код кога еластични зупчаник има унутрашње озубљење и таласни генератор који га обухвата и притиска по спољном ободу. Ознака оба типа ових таласних преносника је GCFFC. Таласни преносник типа *pancake* је конкретан облик преносника приказаног на слици 10а.

Овакав вид конструкције омогућава лакше деформисање еластичног зупчаника од стране генератора таласа. Други чврсти зупчаник (назива се још и динамички) је покретан и обично има исти број зубаца као и еластични зупчаник. Релативно окретање еластичног зупчаника које настаје његовом деформацијом и спрезањем са статичким (непокретним) чврстим зупчаником преноси се (без редукције) на динамички чврсти зупчаник. Овим је еластични зупчаник растерећен, јер је динамички зупчаник везан за излазно вратило, што условљава могућност скраћења дужине цилиндра еластичног зупчаника, а тиме и читавог преносника. Недостатак овог конструкцијског решења је појава "мртвог хода" (већег него код класичног таласног преносника) насталог због клизања при спрезању еластичног и чврстог динамичког зупчаника који имају исти број зубаца, а различите основне пречнике.

Могућа су и друга конструкцијска решења таласних преносника. Међуим, у свим тим случајевима када конструкција одступа од класичне, долази до појаве “мртвог хода” (који је код класичне конструкције практично сведен на нулу), и одређених кинематских нетачности. Из тих разлога уведен је појам сувишне везе q , који оцењује оправданост сложене конструкције.

Број сувишних веза одређује се изразом:

$$q = W - 6n + (5p_5 + 4p_4 + 3p_3 + 2p_2 + p_1) - p_0 \quad (3)$$

Овде је:

W - број покретачких механизма,

n - број покретних веза,

p_5, p_4, p_3, p_2, p_1 -број кинематских парова, пете, четврте,.... прве класе. Класа кинематског пара одређује се бројем веза.

p_0 - број веза допунских услова, односно, број преклапања која трансформишу еластичну везу у чврсту. Такав спој се налази код еластичног зупчаника чија је деформација неопхдан услов за стварање кинематског таласа спрезања са чврстим зупчаником.

Одсуство сувишних веза ($q=0$) је неопходан услов да би дошло до самоподешавања спојева у конструкцији. За самоподешавање је, још у фази конструисања преносника, потребно одредити минималне зазоре између елемената, такве да искључују могућност било каквог заглављивања у раду. Осим тога самоподешавање спојева захтева укључивање грешака при изради и монтажи делова и њихову зависност од кинематске тачности елемената таласног преносника.

Коначно, на избор структурне шеме таласних зупчастих редуктора утиче више фактора. Најзначајнији су функционални фактори, односно, изабрано конструкцијско решење мора да задовољи захтеве постављене у погледу траженог преносног односа и снаге машине за коју је преносник намењен, као и максималне димензије које том приликом мора да има. Не треба занемарити факторе монтаже и тежине израде преносника. У последње време све више се као примарни постављени експлоатациони услови које зупчасти таласни преносник мора да задовољи, а заједно са њима и услови економске оправданости и исплативости овог вида преноса снаге и кретања [1].

3.2. Конструисање генератора таласа

Генератор таласа је предодређен за стварање таласних деформација на еластичном зупчанику. Може бити конструисан тако да ствара два, три или више таласа деформација. При томе генератор таласа може се извести унутар еластичног зупчаника или споља тако да је ослоњен на спољашњи обод еластичног зупчаника са унутрашњим озубљењем. Избор количине створених таласа зависи од врсте таласног преносника и мора да задовољи тражену кинематску тачност конструкције таласног редуктора. Генератор таласа има велики утицај на начин спрезања зупчаника и величине највећих напрезања у материјалу деформабилног еластичног прстена код таласног редуктора.

Према томе, избор конструкције генератора таласа је веома важна етапа при конструисању таласног редуктора и најбоље је размотрити све варијанте које се нуде и на основу добијених резултата одабрати најпогоднију конструкцију таласног генератора. Према врсти енергије која обезбеђује појаву и покретање таласа деформација, генератори таласа могу се поделити на механичке, пнеуматске, хидрауличне и електромагнетне (слика 11).

Хидраулични и пнеуматски генератори таласа примењују се код таласних редуктора који се конструишу за пренос снаге и броја обртаја на улазном вратилу. Поседују врло малу инерцију. Деформације еластичног елемента таласног редуктора обезбеђују се помоћу покретног клипа на кога делује притисна сила течности (хидраулични генератори), или гасова (пнеуматски генератори).



Слика 11. Подела генератора таласа

Електромагнетни генератори таласа обезбеђују најмању инерцију при обртању, што им омогућава примену код брзоходних машина мале снаге. Овакви редуктори су обично у саставу пратећих система, а примењују се и код машина где се промена броја обртаја врши континуално. Међутим, степен искоришћења је врло мали и креће се од 8 до 10%.

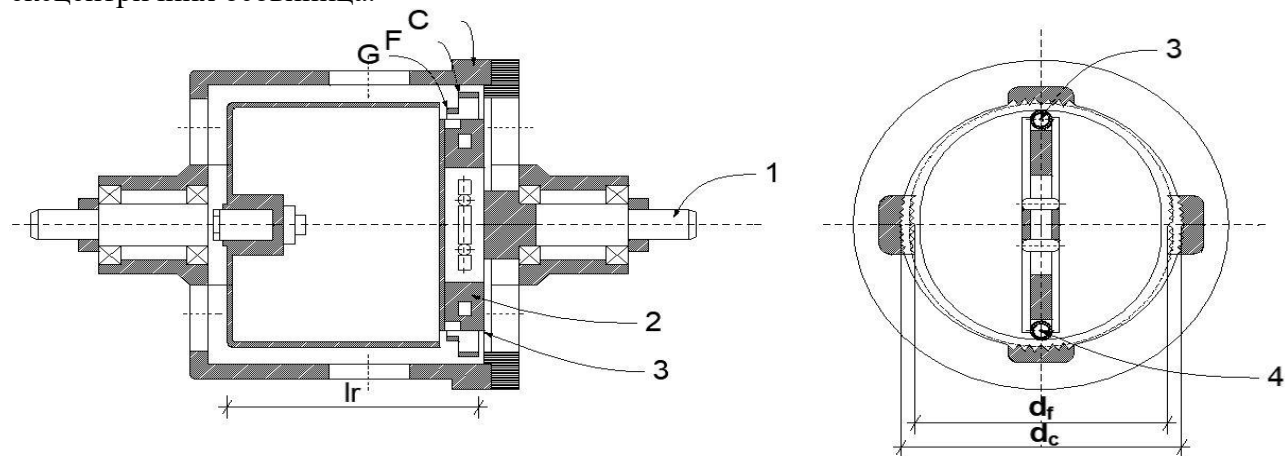
Ови набројани генератори таласа захтевају непрекидни утрошак енергије не само за обртање, него и при стварању и одржавању таласа деформације.

Тај додатни утросак енергије битно утиче на смањење степена искоришћења таласних редуктора са овом врстом генератора таласа, тако да је њихова примена врло ограничена.

Једноставнији, а уједно и сигурнији су механички генератори таласа. За стварање таласних деформација није потребан додатни извор енергије, већ је то узроковано самим геометријским обликом генератора. Према облику линије деформисања еластичног зупчаника разликују се генератори слободних таласа деформација и генератори принудних деформација. Сваки од ова два типа генератора таласа, зависно од вида трења између геометријских елемената унутрашње површине еластичног зупчаника и површине ослонаца генератора, може бити генератор са вишим или нижим паровима. Код таласних редуктора у примени су обе врсте генератора, док се код таласних мултипликатора примењују само генератори са вишим паровима. Код генератора слободних таласа деформација, еластични прстен обично причвршћује котрљајне лежаје притиснуте на унутрашњу површину еластичног зупчаника на два, или ређе, три места. Генератор таласа принудне деформације има облик елипсастог диска, одређеног профила, тако да се често назива брегасти генератор таласа.

Широка примена таласних преносника захтева конструкцију са механичким генератором таласа слободне деформације са унутрашњим распоредом вијака који осигуравају двоталасну деформацију еластичног зупчаника. Генератори таласа који обезбеђују троталасну деформацију ређе се употребљавају.

Двоталасни генератор код једноставних конструкција састоји се од вођице која се окреће око непокретне осе и два котрљајна лежаја мањег пречника која се ослањају на унутрашњи обод еластичног зупчаника и деформишу га (слика 11). У том случају обезбеђује се мањи појас спрезања еластичног и чврстог зупчаника на таласу деформације. Преносници са овим таласним генератором имају већи момент инерције што им отежава рад и повећава оптерећења на лежајима. Зато се обично користе код машина на ручни погон (где је улазни број обртаја редуктора мањи него када је погонска машина електромотор) и квалитетнијих преносника пројектованих за већи радни век. Пример такве конструкције приказан је на слици 12. Улазно вратило 1 прави се изједна са вођицом 2. На двама ексцентричним осовиницама 3 монтирани су радијални куглични лежаји 4. Радијални зазор при спрезању бира се померањем двају ексцентричних осовиница.



Слика 12. Таласни редуктор са двоталасним генератором [1]

Генератор таласа слободне деформације са четири ваљчића даје два таласа деформација, али обезбеђује знатно већу зону спрезања два зупчаника. Захваљујући томе, повећава се дозвољена граница оптерећења и побољшава кинематска тачност. Међутим, као и у претходном случају задржава се висока инертност конструкције. Оваква конструкција могућа је код машина са повећаним оптерећењем у раду где је дозвољена извесна инертност. Ваљци се обично распоређују тако да угао између њих буде $2\beta = 60^\circ$. Челични прстен који је обично уметнут између генератора и еластичног зупчаника, умањује концентрацију напона вођице на зупчаник, и отклања опасност пластичне деформације унутрашње површине еластичног зупчаника таласног редуктора. Тврдоћа прстена креће се од 56 до 58 HRC. Битан недостатак генератора слободне деформације је изражена форма неутралне линије еластичног зупчаника који је деформисан. То повећава напрезање у самом еластичном зупчанику и ремети равномерност рада и тачност таласног преносника.

Генератор таласа принудне деформације даје радијални ослонац еластичном зупчанику по целом обиму. Израђује се у облику диска специјалног профила. Облик диска одређује тражени облик деформације еластичног зупчаника. По целом обиму диска смештене су куглице еластичног лежаја да би се избегло трење између генератора таласа и еластичног зупчаника. Овакав генератор таласа обезбеђује већу област спрезања, али зато поседује значајан момент инерције.

Према облику котрљајних тела разликују се три типа генератора таласа:

- без унутрашњег прстена,
- са ненапрегнутим унутрашњим прстеном,
- са напрегнутим унутрашњим прстеном.

У првом случају генератор таласа има облик елипсастог диска са једном или две стазе са куглицама.

Генератор таласа са ненапрегнутим унутрашњим прстеном састоји се из цилиндричног диска са главчином на који је пресован прстен. Прстен има цилиндричан отвор, спољашња површина има облик елипсе на којој су стазе (једна или две) за куглице.

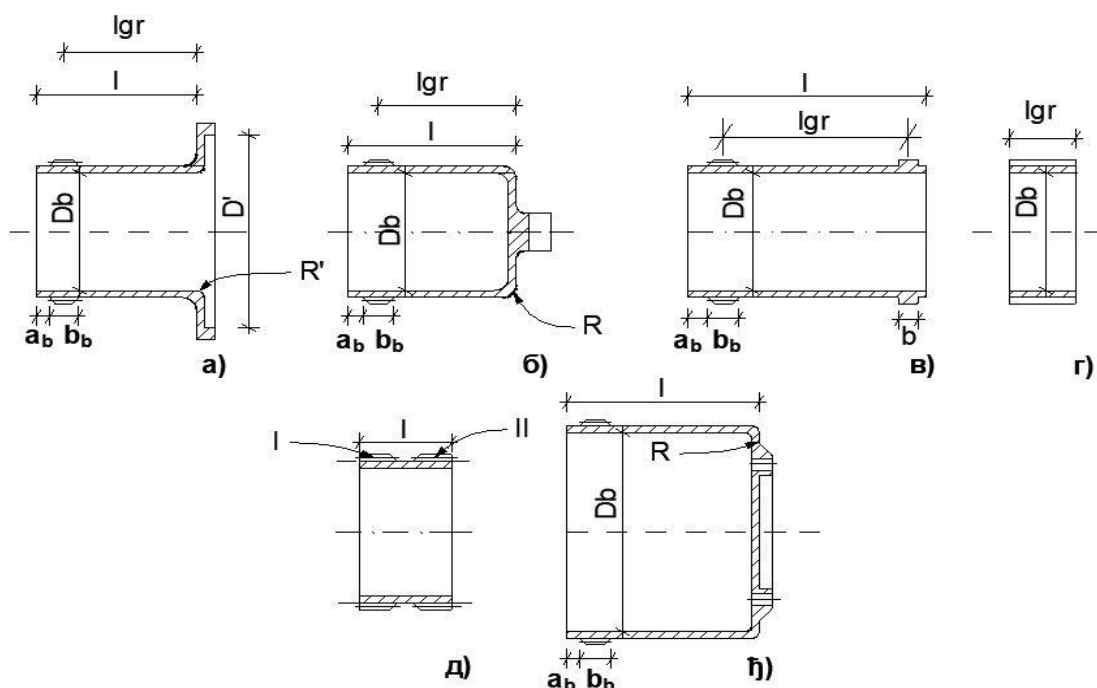
Генератор таласа са напрегнутим прстеном састоји се од прстена у који је упресован унутрашњи прстен са стазама за куглице. Пре склапања, спољни прстен има цилиндрични облик са постојаном дебљином зида. После упресовања унутрашњег прстена облика елипсе, јављају се угиби код спољашњег прстена. Дебљину спољашњег прстена треба рачунати из услова довољног угиба.

Спољашњи челични прстен генератора таласа који се ослања на еластични зупчаник код таласног редуктора обично је раван, без стаза за куглице. Ако се на елипсастом диску генератора таласа директно монтира еластични котрљајни лежај, онда спољашњи прстен у њему треба да је тањи него код стандардних лежаја, а еластичност (моћ деформисања) мора да буде једнака моћи деформисања еластичног зупчаника.

Двоталасни једноступени малоинерциони таласни редуктор има генератор таласа који се састоји из два (ређе три) округла диска већег пречника, који се везују за ексцентричне чауре. Захваљујући томе, у зони спрезања еластични зупчаник се деформише по лучној линији која је део круга. То обезбеђује еластичном зупчанику чврстоћу у радијалном правцу на већем делу његовог обима. Такође, дискови генератора таласа обезбеђују већу количину истовремено спрегнутих зубаца (и до 30%). Овакви генератори користе се за јаче машине (где се преноси већа снага).

3.3. Конструисање еластичног и чврстог зупчаника

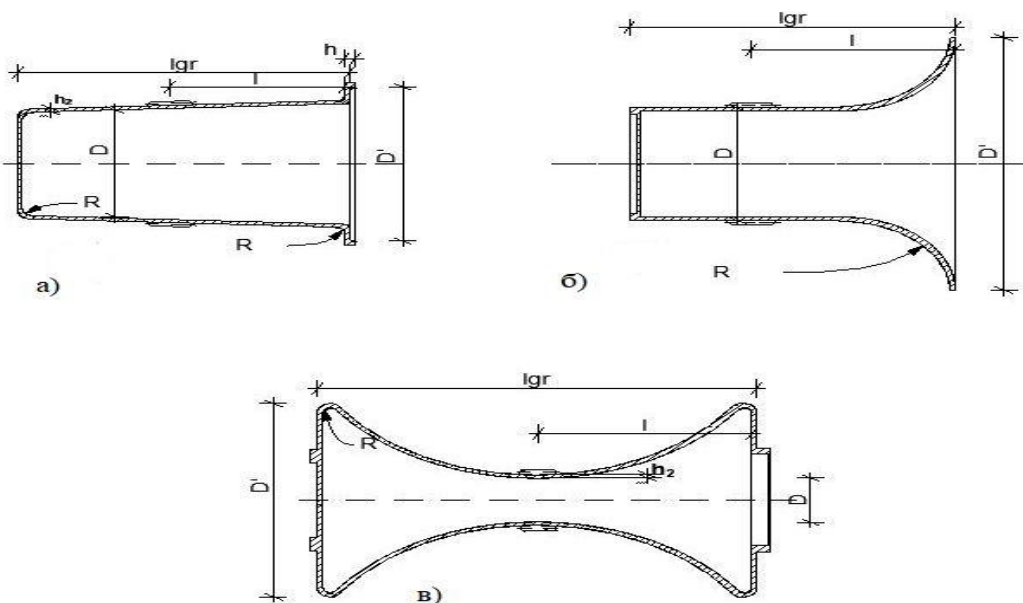
При поређењу таласних преносника са другим врстама преносника, може се приметити да еластични зупчаник представља основну новину која се не јавља ни у једном од раније познатих преносника. Због тога конструкција еластичног зупчаника захтева низ специфичности које овај зупчаник разликују од класичних облика. Таласне деформације које производи генератор таласа преносе се на еластични зупчаник који током рада таласног преносника циклично мења облик. Те деформације и њихово свођење у оквир дозвољених граница еластичности материјала еластичног зупчаника условиле су облик и конструисање овог елемента таласног преносника. На слици 13 дата су могућа конструкцијска решења еластичног зупчаника.



Слика 13. Конструкцијска решења еластичног зупчаника (L -укупна дужина, L_{gr} -дужина до зубаца, D_b -унутрашњи пречник еластичног зупчаника, D' -већи унутрашњи пречник еластичног зупчаника, b -дебљина дна, a_b -растојање од зубаца до дна, b_b -ширина зубаца, R -радијус заобљења подножја) [1]

Све приказане конструкције еластичног зупчаника имају у основи облик танкозидног цилиндра, с тим што су специфичности таласних преносника у које се уграђују условиле разлике у детаљима међу њима. Еластични зупчаник на слици 13а има спољно озубљење на предњем крају цилиндра. Намењен је за таласни преносник код кога је еластични зупчаник непокретан, тако да цилиндар на десној страни прелази у прирубницу која омогућава лако везивање зупчаника за кућиште преносника, обично, вијцима. Еластични зупчаници на слици 13б и 13г намењени су за преноснике код којих је еластични зупчаник покретан и везан за вратило (било да је улазно или излазно). Због тога цилиндар на десној страни прелази у дно. Зупчаник на слици 13б израђује се изједна са вратилом, док се код зупчаника на слици 13г вратило везује вијцима. Вијци којима се еластични зупчаник везује било за кућиште, било за вратило, праве се без зазора, односно то су вијци подешеног типа. Врло често еластични зупчаник је у облику цилиндра на чијем се једном крају налазе зупци који служе за остваривање везе се елементима вратила (слика 13в).

Леви крај зупчаника деформише се, и само на местима деформисања долази до спрезања са чврстим зупчаником (који је овом приликом непокретан), док се десни не деформише и зубци на њему су стално спрегнути, тако да овај елемент представља вид зупчасте спојнице. Број зубаца и њихов профил идентични су на оба краја, али су зупци спојнице нешто краћи. Најпогоднија је конструкција на слици 13б јер је код ње “мртви ход” минималан, а самим тим се минимизирају губици таласног преносника. Да би се смањила радна површина по којој се котрљају куглице еластичног лежаја, еластични зупчаник се конструише са челичним прстеном упресованим унутар обода. Еластични зупчаници на сликама 13г и 13д намењени су за таласне преноснике са два зупчаника. Најчешће се израђују са два зупчаста венца који се међусобно разликују у броју зубаца, или величини модула зупца. Ова два зупчаста венца утичу на повећање чврстине еластичног зупчаника. Дужина цилиндра обично је двоструко мања него код еластичних зупчаника са претходних слика.



Слика 14. Еластични зупчаници херметички затворених таласних преносника (l -укупна дужина, l_{gr} -дужина до зубаца, R -радијус заобљења, h -дебљина еластичног зупчаника, D -унутрашњи пречник, D' -већи унутрашњи пречник) [1]

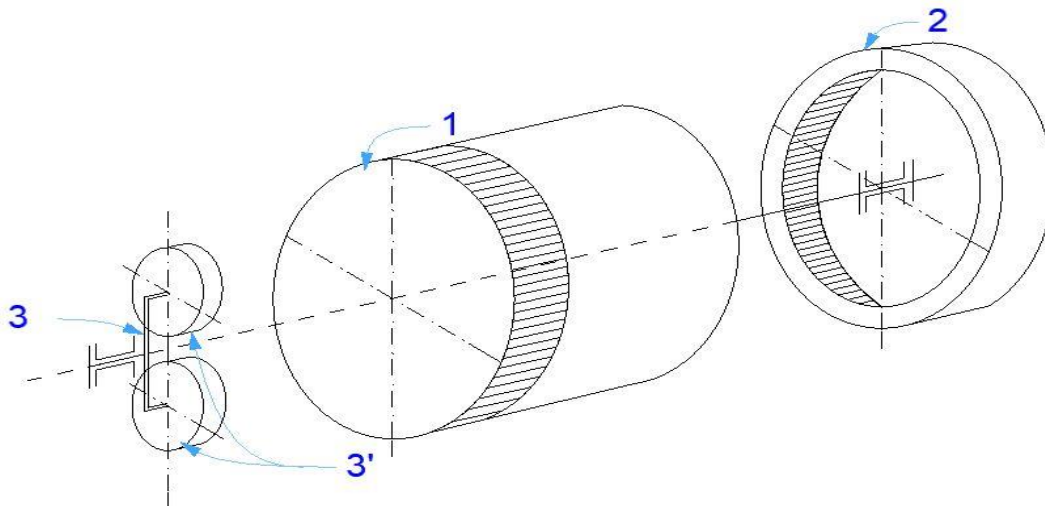
На слици 14 приказани су еластични зупчаници херметички затворених таласних преносника. То су обично танкозидни цилиндрични омотачи са дном. Зупчасте венце се налази на средини еластичног зупчаника.

Сигурност рада таласног преносника и радни век у основи зависе од еластичног зупчаника. Он трпи стална наизменична оптерећења и изложен је цикличним таласним деформацијама. При свему томе долази до интензивног замора материјала. У вези са тим, узимајући у обзир заморна напрезања, потребно је приликом конструисања еластичног зупчаника извршити не само најрационалнији избор облика и димензија зупчаника, већ обратити посебну пажњу на избор материјала.

Чврсти зупчаник таласног преносника је обичан цилиндрични зупчаник са унутрашњим озубљењем. Зупци су израђени рендисањем. Ширина венца је обично једнака дужини зупчастог венца код еластичног зупчаника, мада је могуће да ширина зубаца чврстог зупчаника буде мало мања. Материјали чврстог и еластичног зупчаника су, углавном, исти, мада, према неким ауторима тврдоћа чврстог зупчаника треба да је мања за 20 до 30 НВ [3].

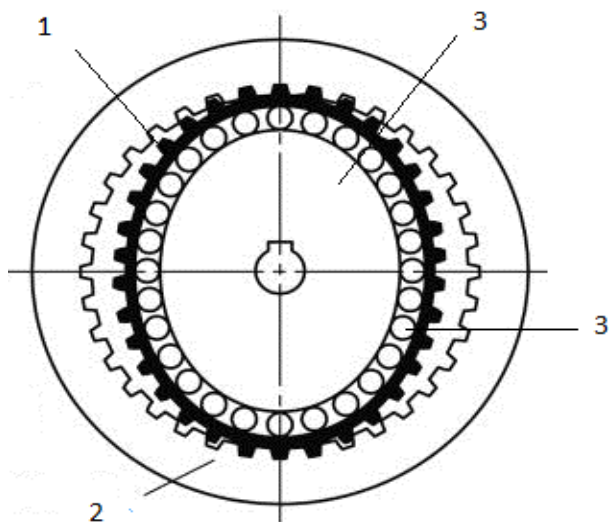
4. Кинематски прорачун таласног преносника

Таласни преносник (слика 15) спада у групу четворочланих механизма и састоји се од еластичног зупчаника са спољашњим озубљењем (1), крутог зупчаника са унутрашњим озубљењем (2), генератора таласа (3) и ваљака (3').



Слика 15. Елементи таласног преносника [1]

Зупчаници 1 и 2 налазе се у захвату у области већег пречника генератора таласа. Генератор таласа, приказан на слици 15, састоји се од полуге (3) и два точка (3'). Другачије извођење генератора таласа, у облику елипсе, приказано је на слици 16. Ваљци (3') претварају трење клизања између чланова 1 и 3 у трење котрљања.



Слика 16. Генератор таласа у облику елипсе [1]

Број зубаца крутог зупчаника (z_2) већи је од броја зубаца еластичног зупчаника (z_1). Најчешћа разлика је $z_2 - z_1 = 2$. Подеони корак зупчаника је $p_1 = p_2$. Угаони корак је према томе $\phi_{01} = 2\pi/z_1$, односно $\phi_{02} = 2\pi/z_2$.

Као последица разлике броја зубаца јавља се релативно кретање зупчаника 1 и 2. Таласни преносник карактерише врло висок преносни однос ($i = 320$), степен искоришћења до $\eta = 0,9$, могу се пренети обртни моменти до 6000 Nm, а лакши је и мањи (компактнији) од других познатих редуктора.

Таласни преносник има два степена слободе кретања и због тога спада у групу диференцијалних преносника. Сложено кретање преносника може се описати функцијом $\varphi_3(\varphi_1, \varphi_2)$.

Диференцирањем по времену добија се:

$$\frac{d\varphi_3}{dt} = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} \frac{d\varphi_1}{dt} + \frac{d\varphi_3}{d\varphi_2} \frac{d\varphi_2}{dt} \quad (4)$$

Где су угаоне брзине чланова преносника:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_3}{dt} &= \omega_3 \\ \frac{d\varphi_1}{dt} &= \omega_1 \\ \frac{d\varphi_2}{dt} &= \omega_2 \end{aligned} \quad (5)$$

Ако члан 2 мирује, преносни однос чланова 3 и 1 је:

$$i_{31}^{(2)} = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} = \frac{\omega_3}{\omega_1} \quad (6)$$

Ако члан 1 мирује, преносни однос чланова 3 и 2 је:

$$i_{32}^{(1)} = \frac{d\varphi_3}{d\varphi_2} = \frac{\omega_3}{\omega_2} \quad (7)$$

Ако је зупчаник 2 непокретан, за један обртај генератора таласа 3 $\varphi_3 = 2\pi$ еластични зупчаник 1 се окрене у супротном смеру за:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{Z_1} (Z_1 - Z_2) \quad (8)$$

Па је:

$$i_{31}^{(2)} = \frac{2\pi}{-\frac{2\pi}{Z_1} (Z_2 - Z_1)} = \frac{Z_1}{Z_2 - Z_1} \quad (9)$$

Ако је зупчаник 1 непокретан, за један обртај генератора таласа 3 $\varphi_3 = 2\pi$ еластични зупчаник 2 се окрене у супротном смеру за:

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{Z_2} (Z_2 - Z_1) \quad (10)$$

Одакле следи:

$$i_{21}^{(1)} = \frac{Z_2}{Z_2 - Z_1} \quad (11)$$

Из предходних једначина може се извести:

$$\omega_3 = -\frac{Z_2}{Z_2 - Z_1} \omega_1 + \frac{Z_2}{Z_2 - Z_1} \omega_2 \quad (12)$$

Уочава се да је:

$$i_{31}^{(2)} + i_{32}^{(1)} = 1 \quad (13)$$

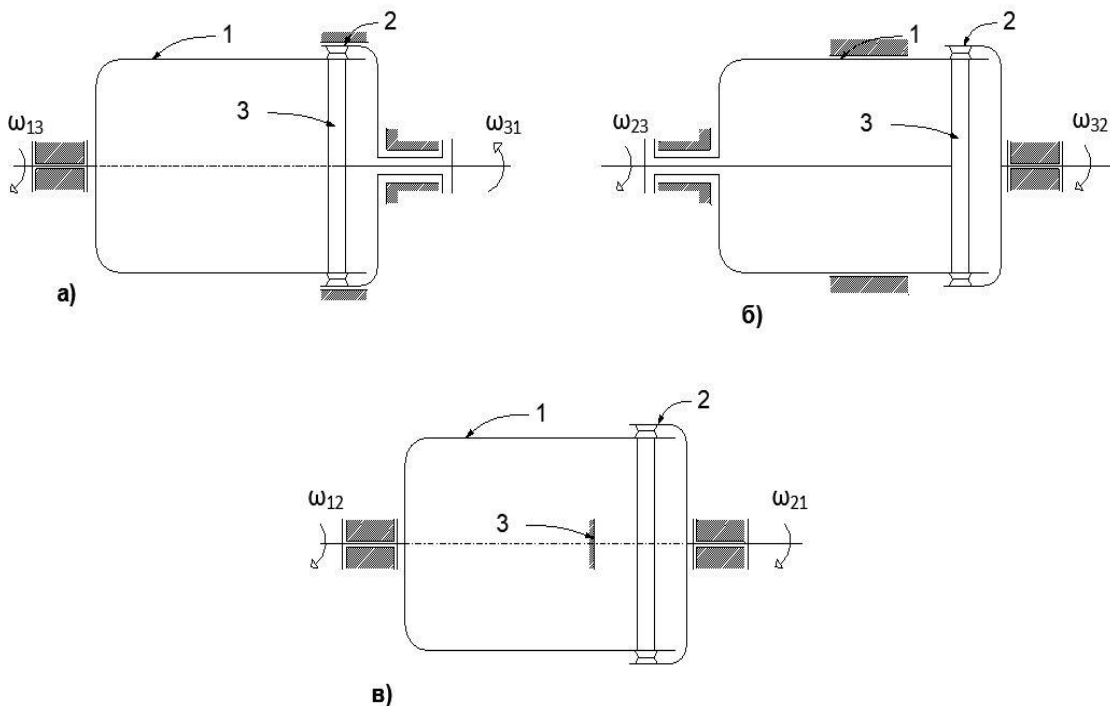
Заустављањем једног од покретних чланова добија се преносник са једним степеном слободе кретања. Различитим изборима непокретног и погонског члана добијају се преносници различитих преносних односа:

а) Члан 2 је непокретан (слика 17а). Погонски члан (1) и вођени члан (3) okreћу се у супротном смеру. Преносник ради као мултипликатор и има преносни однос:

$$i_{13}^{(2)} = -\frac{Z_2}{Z_2 - Z_1} \quad (14)$$

Када је члан 3 погонски, а члан 1 вођени, преносник ради као редуктор и има преносни однос:

$$i_{31}^{(2)} = \frac{Z_2}{Z_2 - Z_1} \quad (15)$$



Слика 17. Преносник са једним степеном слободе кретања [1]

б) Члан 1 је непокретан (слика 17б). Погонски члан (2) и вођени члан (3) okreћу се у истом смеру. Преносник ради као мултипликатор и има преносни однос:

$$i_{23}^{(1)} = \frac{Z_2}{Z_2 - Z_1} \quad (16)$$

Када је члан 3 погонски, а члан 2 вођени, преносник ради као редуктор и има преносни однос:

$$i_{32}^{(1)} = \frac{Z_2}{Z_2 - Z_1} \quad (17)$$

ц) Члан 3 је непокретан (слика 17в). Погонски члан (1) и вођени члан (2) okreћу се у истом смеру.

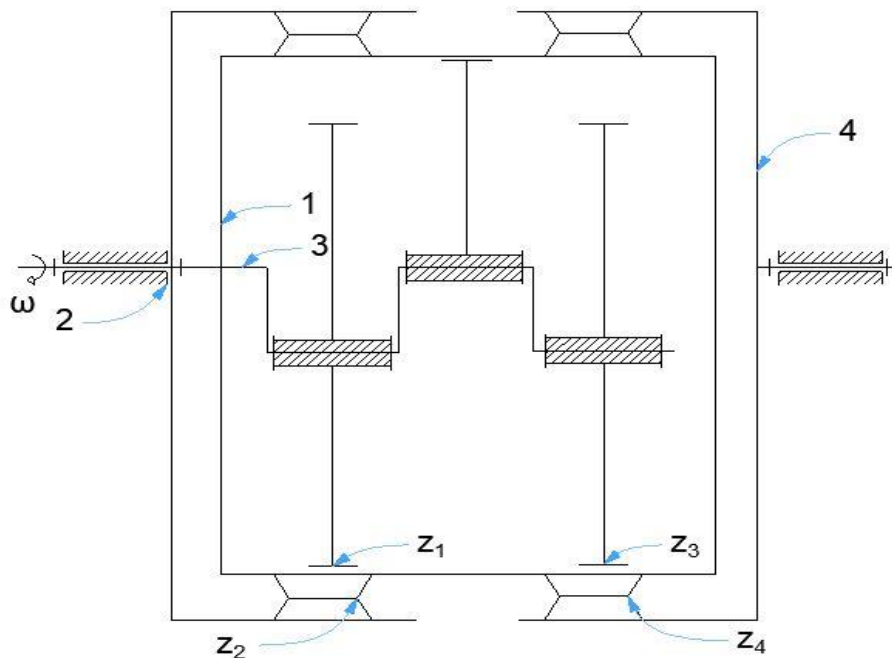
Преносник ради као редуктор и има преносни однос:

$$i_{12}^{(3)} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (18)$$

Када је члан 2 погонски, а члан 1 вођени, преносник ради као мултипликатор и има преносни однос:

$$i_{21}^{(3)} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (19)$$

Таласни преносник може бити и двостепен (слика 18). Члан 1 изведен је у облику цилиндра, са два еластична зупчаника са спољашњим озубљењем; број зубаца првог зупчаника је z_1 , а другог z_3 . Еластични зупчаници спрегнути су са крутим зупчаницима са унутрашњим озубљењем и бројем зуба z_2 , односно z_4 .



Слика 18. Двостепени таласни преносник [1]

Крути зупчаник (2) је непокретан. Кретање генератора таласа (3) се двостепено преноси до крутог зупчаника (4).

Први степен преноса чини погонски члан - генератор таласа (3), еластични зупчаник z_1 са бројем зубаца и непокретни члан - крути зупчаник са z_2 бројем зубаца:

$$\omega_1 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1} \omega_3 \quad (20)$$

Други степен је диференцијални преносник чији су погонски чланови - генератор таласа (3) и еластични зупчаник са z_3 бројем зубаца, а вођени члан - крути зупчаник са z_4 бројем зубаца.

Једначина за овај случај гласи:

$$\omega_3 = -\frac{Z_4}{Z_4 - Z_3} \omega_1 + \frac{Z_4}{Z_4 - Z_3} \omega_4 \quad (21)$$

Одакле се заменом ω_1 добија:

$$\omega_4 = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{Z_1 Z_4} \omega_3 \quad (22)$$

У новије време све већу примену налазе различита решења таласних редуктора који показују боље карактеристике у погледу малих маса, великог преносног односа и великог обртног момента у односу на планетарне преноснике.

Бројеви зубаца еластичног и чврстог зупчаника могу се изразити на следећи начин:

$$\begin{aligned} z_1 &= K \cdot i \cdot W \\ z_2 &= z_1 + K \cdot W \end{aligned} \quad (23)$$

Где је:

W- број таласа деформација које се стварају од стране генератора таласа,

K- мултиплицирајући фактор. Може бити K=1,2 или 3; обично се усваја K=1 да би се смањила наглашеност деформација еластичног зупчаника

i - преносни однос.

5. Примена таласних редуктора

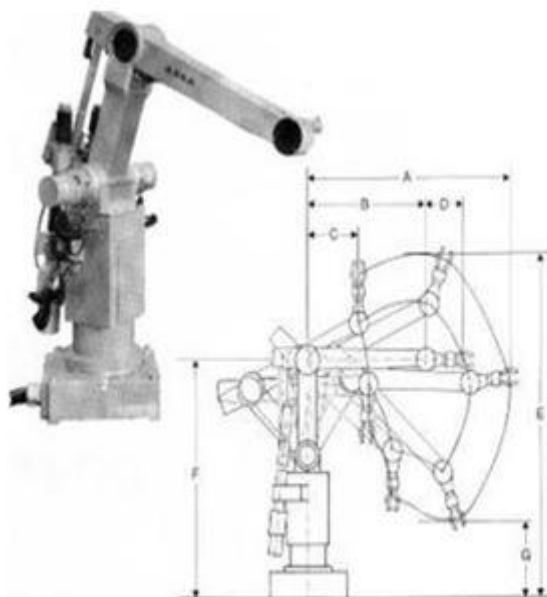
Таласни преносници представљају релативно нов тип преносника који још увек нису довољно нашли широку примену у индустрији у односу на предности које пружају. Теоријске поставке о њиховом функционисању морале су да сачекају технолошка решења за израду еластичног лежаја и зупчаника који ће издржати деформације при спрезању. Зато су првобитни таласни редуктори примењивани у оквиру нових технологија у космичкој индустрији. Касније се њихова примена проширила у област роботике (слика 19) где су захтевани велики преносни односи уз знатна ограничења простора за смештај преносника. Због кинематске тачности и минималног “мртвог хода”, таласни редуктори налазе примену код прецизних алатних машина и у изради мерних инструмената. У медицини налазе примену код вештачких органа, а у апаратима за рендгенско зрачење при позиционирању зрака, и у дијагностичкој опреми. Код радиодетекцијских станица примењују се за прецизно позиционирање антена. У војној индустрији налазе примену у ракетним системима и лансирним рампмама.



Слика 19. Примена таласног преносника као саставног дела роботске руке

Поновљивост таласних редуктора, као њихова важна одлика, дошла је до пуног изражаја код машина за паковање, штампарских преса и у аутомобилској индустрији у потпуно аутоматизованим и роботизованим погонима. Користе се и тамо где се захтевају херметички услови рада.

Таласне преносника срећемо код космичких летилица, сателита као и у области роботике (слика 20).



Слика 20. *Примена у роботизи*

На слици 21 приказан је Lunohod у који су такође били уграђени таласни преносници. Lunohod био је лунарни ровер чији је "тело" било цилиндричног облика, на којем је био велики конвексни поклопац. Ровер је био ослоњен на осам точкова од којих је сваки имао сопствени електромотор за погон. Дужина ровера била је 2,3 метра. Био је опремљен конусним антенном, затим једном спиралном антенном, четири ТВ камере, и наменски конструисаним уређајима за испитивање лунарног земљишта (дужина земљишта и његове механичке карактеристике).



Слика 21. *Примена таласних преносника код Lunohod-а*

6. Закључак

Проналазак таласних зупчастих преносника представља природну последицу технолошког напретка. Познато је да повећањем процењене брзине ротора мотора смањујемо његову величину и тежину. Међутим, машина опремљена мотором са високим бројем обртаја, треба да буде лаган и компактан механизам, са високим преносним односом. Истраживање и тежња ка таквим механизмима довела је до проналаска и открића таласних преносника. Ови преносници полако преузимају примат у односу на традиционалне преносе. Из свега до сада реченог, може се закључити да таласни преносници представљају будућност у области механичког преноса снаге и кретања.

Предности таласних преносника се најбоље уочавају упоређивањем са осталим механичким преносницима и упоредо анализирају њихове карактеристике. Основна одлика је: велики преносни однос који је могуће остварити код таласног преносника по једном степену преноса. Код већине других механичких преносника такав преносни однос је могуће остварити из више степени преноса, а често су губици велики, па је неисплативо. Такође, сваки следећи степен преноса захтева синхронизовање рада, доводи до појаве динамичких сила, увећава број елемената преносника и поскупљује конструкцију. Исти проблем се јавља и код вишестепених таласних преносника. Друга значајна предност таласних преносника су мали габарити. Облик конструкције омогућава додатну уштеду у простору, јер се улазно/излазни елементи могу поставити унутар преносника. Честа је појава да се таласни преносници израђују изједна са погонском јединицом, пошто њихова тежина не утиче значајно на стабилност погонске групе.

Литература

- [1] Б.Биочанин: Конструкција и анализа таласног редуктора специјалне намене-магистарски рад;Машински факултет Крагујевац 1999.
- [2] М. Боторић: Таласни зупчасти преносници-специјалистички рад; Висока школа техничких струковних студија Чачак; 2014.
- [3] В. Николић: МАШИНСКИ ЕЛЕМЕНТИ, Крагујевац, 2004.
- [4] Н.Dong:Dynamic Simulation of Harmonic Gear Drives Considering Tooth Profiles Parameters Optimization;School of mechanical engineering, Dalian University of Technology
- [5] М. Трбојевић, М. Јанковић,...: РЕДУКТОРИ, Научна књига – Београд, 1988.
- [6] Б. Стијановић, М. Благојевић: Механички преносници, Крагујевац, 2015.