

**Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Основне академске студије
Модул: Машинске конструкције и механизација
Предмет: Машински елементи
Број индекса: 192/2012

Марко С. Петровић
Планетарни навојни преносник
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Зорица Ђорђевић, ванр.проф - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да опише навојне преноснике (особине, принцип рада, примену,...). Посебну пажњу треба да посвети анализи планетарних навојних преносника као представнику новије генерације навојних преносника. Потребно је, користећи домаћу и страну литературу, да опише принцип рада, конструкцију, примену ових преносника и наведе изразе за прорачун основних кинематских величина.

Препоручена литература:

[1] Николић Вера, Машински елементи – теорија, прорачун, примери, Крагујевац, 2004.

[2] Милчић Драган, Банић Милан, Милтеновић Александар, Милчић Миодраг, Машински елементи, Ниш, 2015.

[3] <http://exlar.com/content/uploads/2014/09/Roller-Screw-Basics.pdf>

Крагујевац, 9.9.2016.год.

Ментор:
Др Зорица Ђорђевић, ванр.проф

Резиме:

У оквиру рада представљен је планетарни навојни преносник. Планетарни навојни преносник спада у групу покретних навојних спојева. Покретни навојни спојеви трансформишу кретање, као и механичку енергију па се другачије називају навојни преносници. Покретни навојни спојеви обезбеђују спрегнуто релативно кретање спојених делова, претварање обртног кретања у праволинијско као и претварање обртног момента у аксијалну силу. Планетарни навојни преносник представља унапређену верзију навојног преносника са челичним куглицама. Примењује се у случајевима где се захтева велика прецизност, брзина, оптерећење и дуг век трајања. Највећу употребу налази у производној и аеро индустрији.

Кључне речи: *Навој, навојни спој, покретни навојни преносник, планетарни навојни преносник.*

Abstract:

Within the paper planetary roller screw mechanism is presented. Planetary roller screw belongs to a group of adjustable threaded joints. Adjustable threaded joints transform the movement, as well as mechanical energy so they can be called adjustable threaded actuators. Adjustable threaded joints provide coupled relative movement of connected parts, converting rotary motion into reciprocating and convert torque into axial force. Planetary roller screw represents an improved version of the ball screw mechanism. It is used in cases which requires high precision, speed, load and long life. The greatest use is in the production and aero industry.

Key words: *Thread, threaded joint, adjustable threaded joint, planetary roller screw.*

Садржај

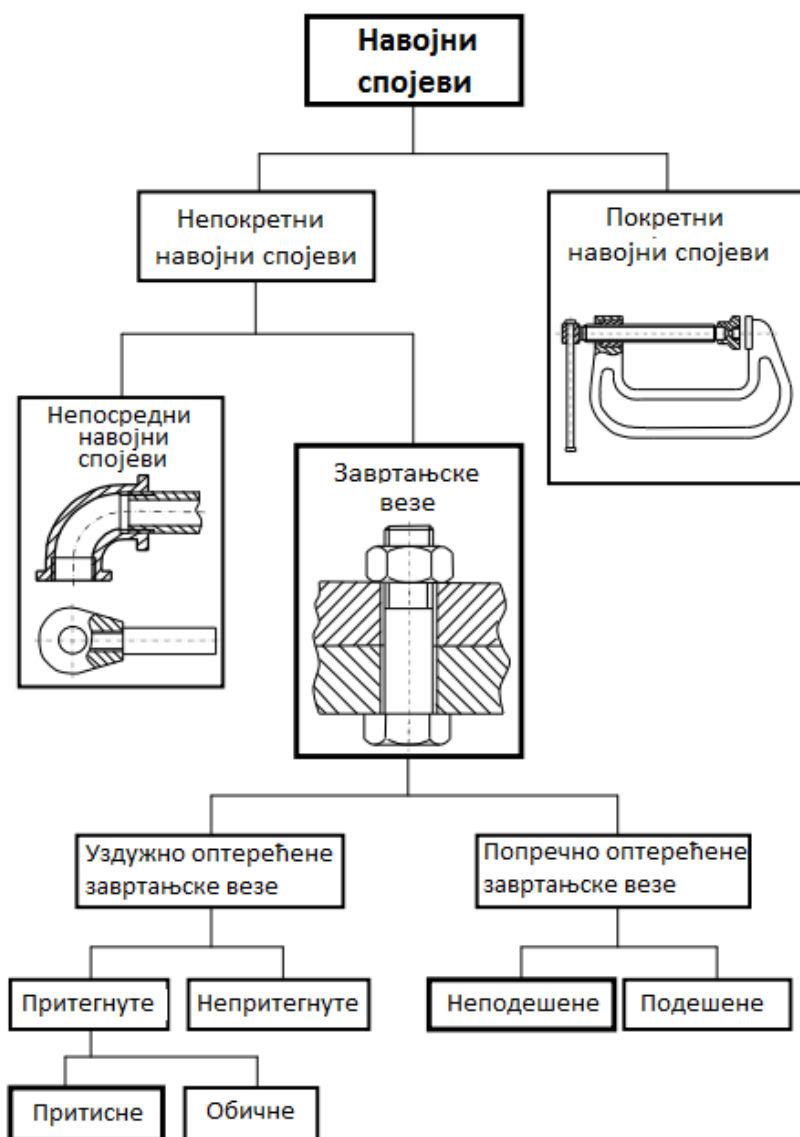
1. Увод	1
2. Навојни спојеви.....	3
3. Покретни навојни спојеви.....	6
3.1 Навојни преносник са челичним куглицама.....	11
3.2 Планетарни навојни преносник.....	14
4. Прорачун основних параметара планетарног навојног преносника.....	18
4.1 Динамичка моћ ношења C	18
4.2 Статичка моћ ношења (C_0) и степен сигурности (S).....	18
4.3 Номинални радни век.....	18
4.4 Еквивалентно оптерећење.....	19
4.5 Преднапрезање.....	20
4.6 Крутост навојног преносника.....	21
4.7 Критична брзина.....	23
4.8 Степен искоришћења.....	24
4.9 Потребан обртни момент.....	25
4.10 Подмазивање.....	26
5. Закључак.....	29
Литература.....	30

1. УВОД

Навојни спојеви се остварују посредством навоја. Навој може бити израђен непосредно на деловима који се спајају – непосредни навојни спојеви или на посебним деловима као што су навојна вретена, завртњи, навртке које се користе за реализацију посредних навојних спојева (слика 1.1).

Делови у споју могу извршавати функцију тачно дефинисаног међусобног кретања или функцију обезбеђивања чврсте везе – споја.

Покретни навојни спојеви осим за трансформацију кретања могу се користити за трансформацију механичке енергије и онда представљају **навојне преноснике**, [1].



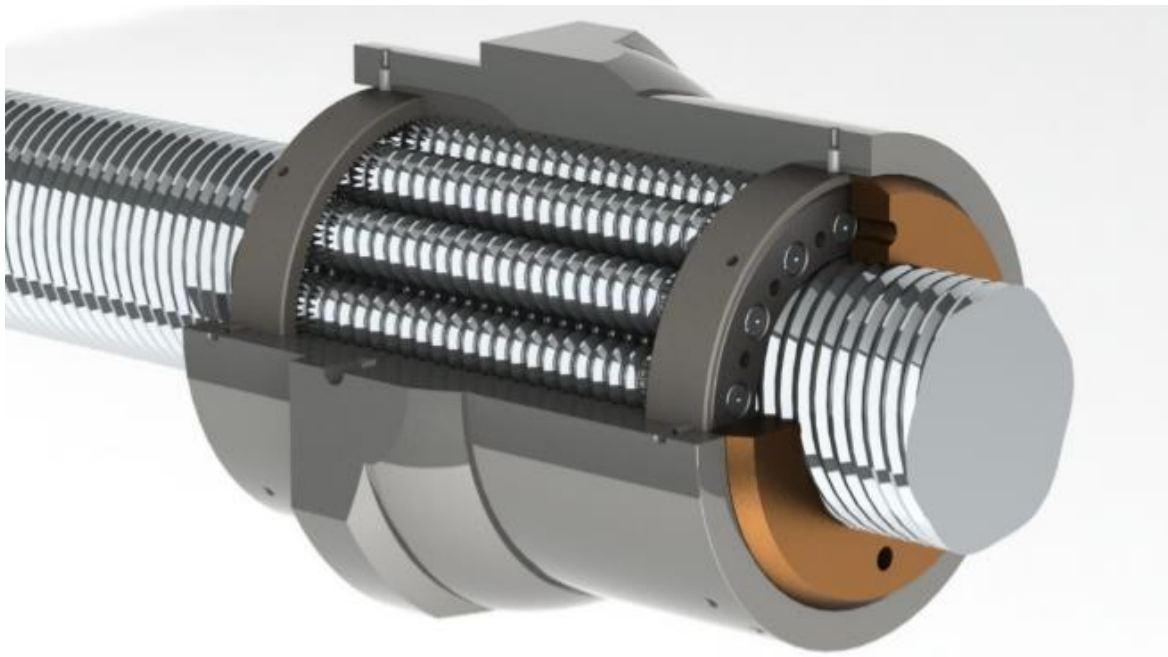
Слика 1.1
Подела навојних спојева

Покретни навојни спојеви обезбеђују спрегнуто релативно кретање спојених делова, претварање обртног кретања у праволинијско као и претварање обртног момента у аксијалну силу. Основни делови покретног навојног споја су део са спољним навојем (навојно вретено) и део са унутрашњим навојем (навртка) са којима су спојени делови између којих се остварује релативно кретање.

Примењују се за дефинисање тачног релативног односа покретних делова код мерних инструмената и машина, за подешавање положаја радних органа код алатних машина и других машина, за трансформацију обртног момента у уздужну силу код дизалица са навојним вretenом, код ручних алата за остваривање трајних и повремених сила (стеге, свлакачи, итд.), [2].

Са развојем технологије дошло је до различитих технолошких решења када су у питању навојни преносници и као представник новије генерације навојних преносника велике тачности издваја се планетарни навојни преносник (слика 1.2).

Планетарни навојни преносник се користи када је потребна велика тачност, висока ефикасност, рад при великим брзинама и дуг радни век.



Слика 1.2
Планетарни навојни преносник

2. НАВОЈНИ СПОЈЕВИ

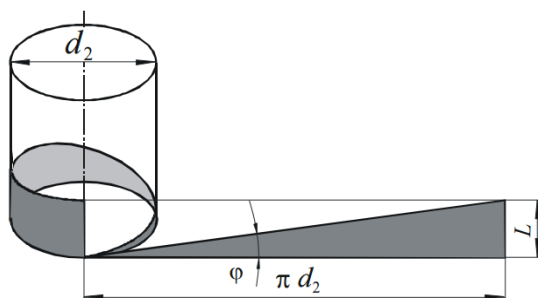
Веза два или више машинских делова остварена посредством навоја представља навојни спој. Навојни спојеви припадају групи раздвојивих машинских спојева (спојени делови се могу раздвојити и поново спојити без оштећења).

Помоћу навојних спојева се обезбеђује жељени положај спојених делова, преношење оптерећења, међусобно притискивање и заптивање машинских делова, прецизно померање и подешавање код мерних уређаја, међусобно релативно кретање спојених делова и претварање обртног кретања у праволинијско кретање, [2].

Навојни спојеви се остварују посредством навоја. Према дефиницији, навој је геометријско тело омеђено површином која настаје при кружном завојном кретању неке геометријске слике која се назива профил навоја.

Завојна линија настаје завојним кретањем правоуглог троугла око цилиндра. Хипотенуза овог троугла оцртава завојницу (завојну линију).

При завојном кретању правоуглог троугла око цилиндра реч је о цилиндричној завојници. Постоји и конична завојница која настаје завојним кретањем правоуглог троугла око конуса.



Слика 2.1
Формирање завојнице

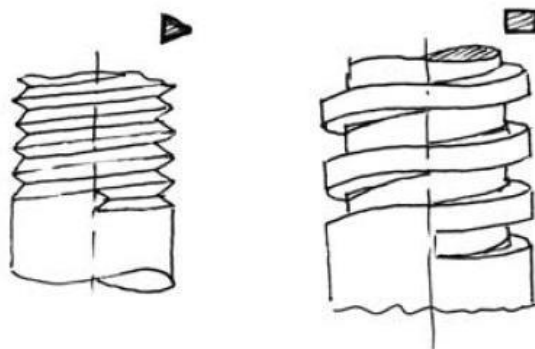
Нагиб завојне линије [1]:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L}{\pi d_2} \quad (2.1)$$

Где су:

d_2 – пречник цилиндра (средњи пречник завојнице),
 L – катета правоуглог троугла (ход завојнице).

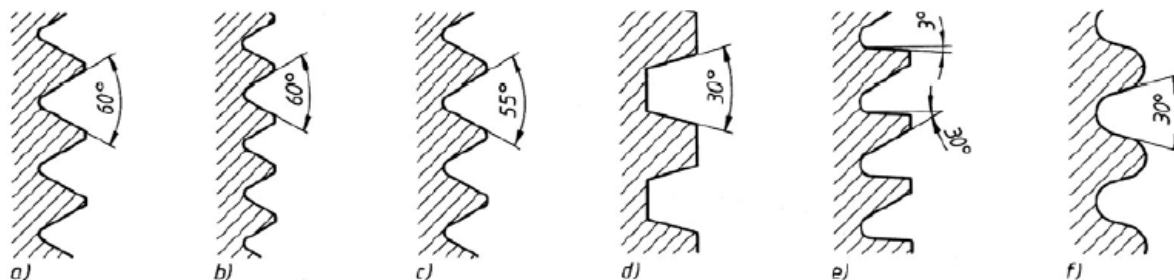
Када се пусти да по добијеној завојници „хода“ одређени профил добија се навој. У зависности од одабраног профила добија се карактеристичан навој.



Слика 2.2

Навој троугластог профила и навој правоуглог профила

Најчешће коришћени профили навоја су , [1]:



Слика 2.3

Најчешће коришћени профили навоја (a – метрички навој, b – фини метрички навој, c – Withworth-ов навој, d – трапезни навој, e – коси навој, f – обли навој.)

Метрички навој: Најчешћи стандардни навој који се користи у подручју са европским мерним јединицама. Профил навоја у овом случају јесте једнакостранични троугао са угловима од по 60° .

Фини метрички навој: Има мању дубину ношења и мањи корак од нормалног метричког навоја.

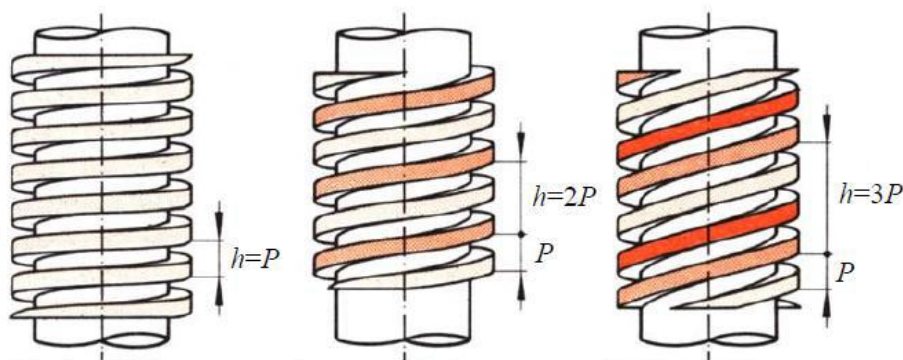
Withworth-ов навој: Традиционални цевни навој из Велике Британије. Профил навоја у овом случају је троугао са два угла од по 55° .

Трапезни навој: Профил навоја је траpez са углом од 30° . Најпогоднији је за вретена на дизалицама због малог коефицијента трења у навојном споју.

Коси навој: Поседује још мање трења него трапезни навој али само у једном смеру. Појачано хабање се дешава у другом смеру (подизање или спуштање).

Обли навој: Користи се за спојнице железничких вагона. Неосетљив на оштећење и прљавштину.

Ако се око ваљка обавију две или више паралелних завојница добија се двоструки (двовојни), троструки (тровојни) и вишеструки (вишевојни) навоји, [1].



Слика 2.4
Једноструки, двоструки и троструки навоји

Корак навоја P представља аксијално растојање било које две карактеристичне тачке суседних навојака.

Ход завојнице L је аксијално растојање крајњих тачака једног завојка.

Навојни пар је спој унутрашњег и спољашњег навоја истог профила, истог номиналног пречника, истог корака, истог смера завојнице и истих средњих пречника.

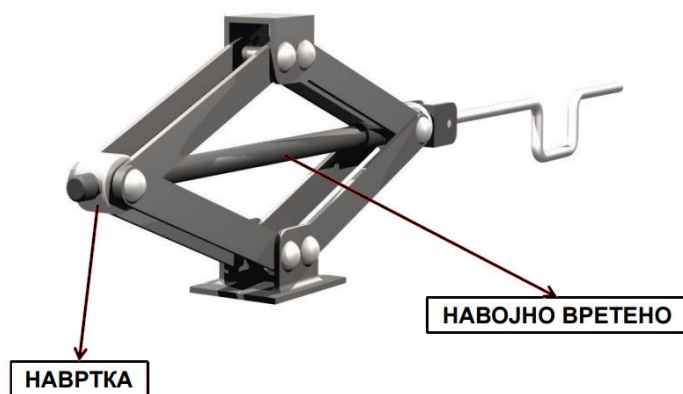
Основна функција навојних спојева је преношење оптерећења са спољашњег на унутрашњи навој и обрнуто.

Основна подела навојних спојева је на непокретне навојне спојеве (чврсти навојни спојеви) и покретне навојне спојеве (навојни преносници), [1], [2].

3. ПОКРЕТНИ НАВОЈНИ СПОЈЕВИ

Покретни навојни спојеви омогућавају релативно кретање спојених делова са дефинисаним односом брзина и међусобног положаја. Осим тога омогућују претварање обртног кретања у праволинијско и претварање обртног момента у аксијалну силу.

Основни делови покретног навојног споја су део са спољним навојем – **навојно вретено** и део са унутрашњим навојем – **навртка** (слика 3.1).



Слика 3.1

Пример покретног навојног споја код ручне дизалице

Са једним од њих спојен је онај део склопа који се креће на један начин (обрће се или креће транслаторно), а са другим навојним делом, део склопа који се креће на други начин.

Покретање се може вршити ручно или помоћу мотора (слика 3.2).



Слика 3.2

Дизалица на моторни погон

При једном обртају вретена или навртке, оствари се аксијални померај за ход навоја L .

Брзина аксијалног кретања навртке у односу на навојно вретено, [2]:

$$v_a = n \cdot L ; L = z \cdot P \quad (3.1)$$

Где је:

n – број обртаја навртке или вретена у јединици времена,

z – број почетака навоја,

P – корак навоја.

Да би се остварило аксијално кретање, потребна је ротација једног од навојних делова угаоном брзином:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (3.2)$$

При том је тангентна брзина на средњем цилиндру пречника d_2 :

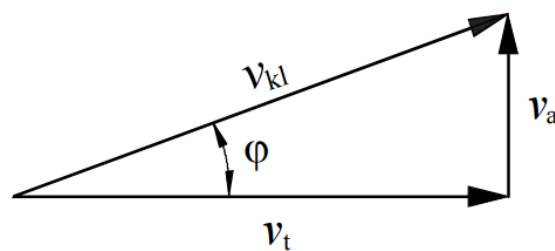
$$v_t = d_2 \cdot \pi \cdot n \quad (3.3)$$

Услед брзине v_t и брзине v_a , у правцу навојака остварује се клизање брзином (слика 3.3):

$$v_{kl} = \sqrt{v_t^2 + v_a^2} \quad (3.4)$$

$$v_{kl} = \frac{v_a}{\sin \varphi} \quad (3.5)$$

$$v_{kl} = \frac{v_t}{\cos \varphi} \quad (3.6)$$



Слика 3.3

Слагање аксијалне и тангентне брзине у брзину клизања

При том се део механичке енергије претвара у топлотну, а степен искоришћења смањује, [2].

Осим тога аксијална сила се на обртни навојни део преноси преко аксијалног лежаја. У овом лежају, такође се део механичке енергије преводи у топлоту, тако да је општи израз за степен искоришћења покретног навојног споја:

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg}(\varphi + \rho_n) + \frac{d_\mu}{d_2} \cdot \mu} \quad (3.7)$$

Где су:

φ – угао завојнице на средњем пречнику,

ρ_n – угао трења у навојном пару,

d_2 – средњи пречник навоја,

μ – коефицијент отпора трења,

d_μ – средњи пречник на коме делује сила трења у аксијалном ослонцу.

Једна од највећих, ако не и највећа, мана навојних преносника јесте у малом степену искоришћења.

Анализом навојних преносника закључено је да се степен искоришћења, у зависности од коришћеног профила навоја, мазива, те параметра завојнице (првенствено угла успона завојнице), креће од 20% до 40% , [2].

Овако низак степен искоришћења је последица појаве трења клизања услед одабраног конструктивног решења површинског додира између профила навоја и навртке. Ово још додатно узрокује интензивно хабање што има негативан утицај и на прецизност рада преносника.

Област примене покретних навојних спојева може се поделити у неколико целина. То су ручни алати, мерни инструменти, механизми за подизање, притискивање, позиционирање итд., [2].

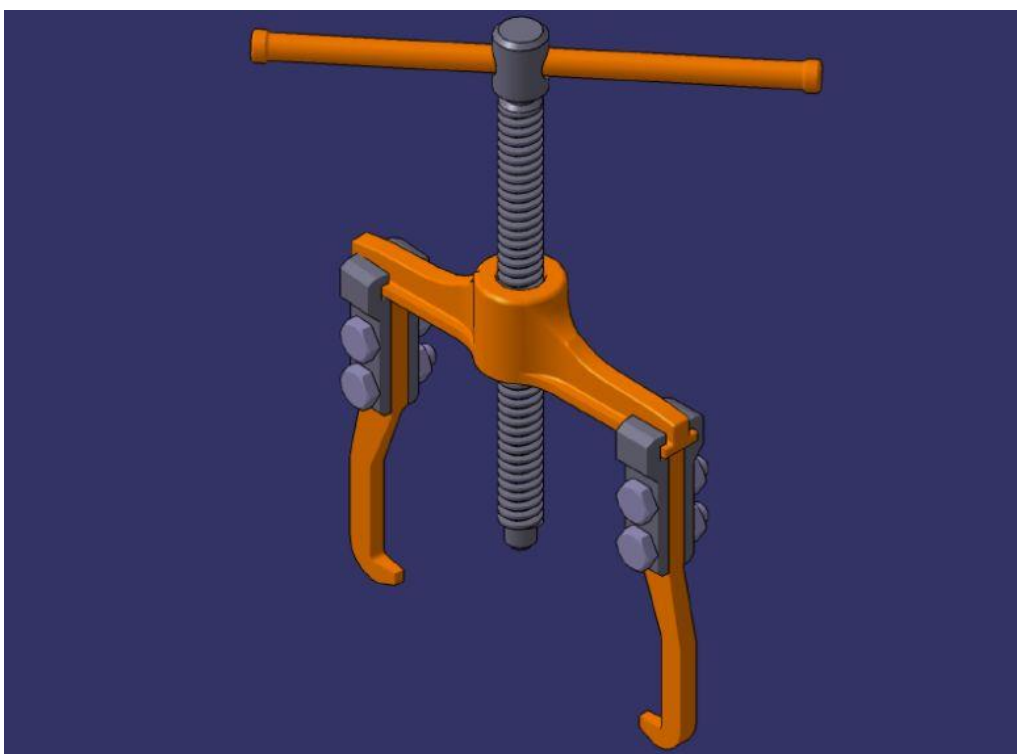
Покретни навојни спој је врло погодан за остваривање функције ручних алата. Омогућавају остваривање великих сила потребних за притезање, пресовање, подизање, истискивање итд.

Покретни навојни спојеви који се користе за савладавање великих радних отпора и трансформацију великог момента у силу, називају се навојним преносницима.

На слици 3.4 приказан је пример употребе покретног навоја.

То је ручни свлакач намењен за раздвајање чврстих налегања односно пресованих спојева. Посредством навојног пара остварује се довољно велика сила потребна за истискивање унутрашњег дела. Спољни се ослања на пипке који су у истом носачу са навртком, [2].

Слично је и са ручним мерним инструментима као што је микрометарски завртањ. За разлику од стезних алата, улога навојног пара код мерног инструмента је успостављање тачног односа између обртног и праволинијског кретања.



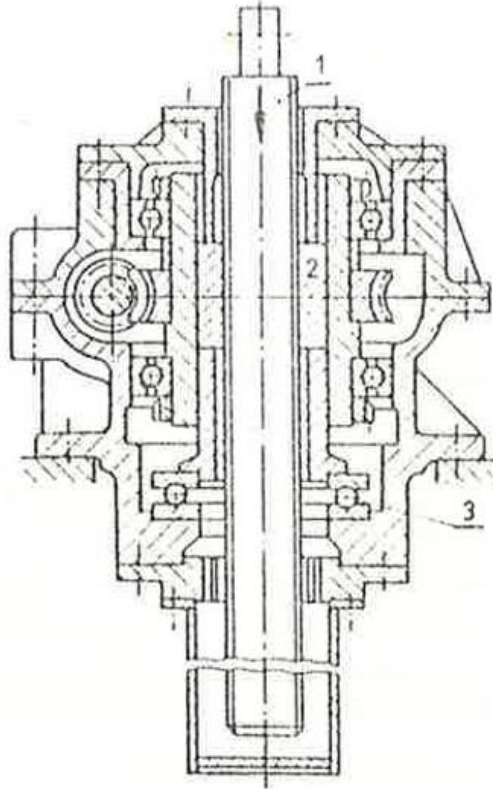
Слика 3.4
3D модел ручног свлакача

Функција позиционирања у машинским системима остварује се најчешће посредством покретног навојног споја. При том је потребно обезбедити тачност положаја тј. тачан однос ротације и транслације, а код неких система треба савладати и значајне отпоре.

Код мерних машина отпори су незнатни тако да проблем хабања и смањења тачности није изразит. Код оних мерних машина где су мерне главе веће тежине, и ови отпори могу бити већи.

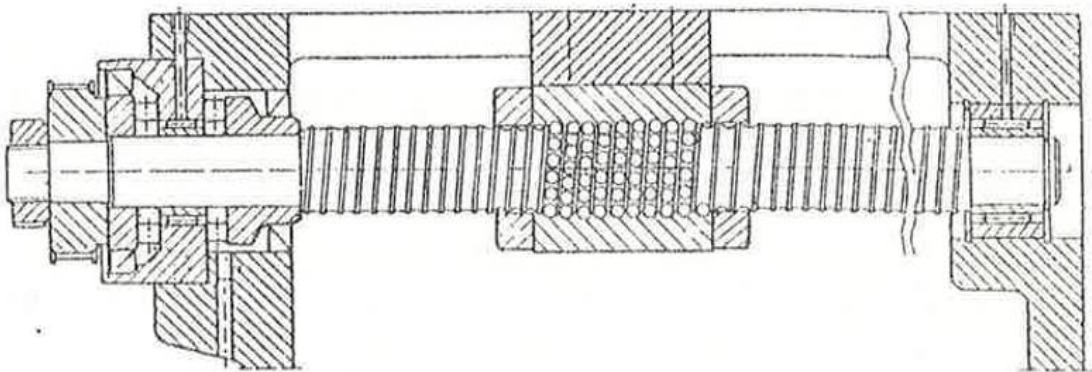
Код алатних машина за обраду метала резањем, позиционира се алат и савлађују отпори резања. Стога су котрљајни навојни парови заузели значајно место у примени баш код ових машинских система. Степен искоришћења је врло велики, хабање отклоњено, а тачност доведена на висок ниво. Ово је врло важно за компјутером управљане машине за обраду и мерење, [2].

На слици 3.5 приказан је механизам за подизање и позиционирање са клизним навојним паром. Покреће се помоћу мотора посредством пужног пара који такође представља клизни спој. Укупни степен искоришћења је релативно низак, а хабањем се тачност смањује, [2].



Слика 3.5
Механизам за подизање и позиционирање

На слици 3.6 приказан је механизам за покретање клизача код алатних машина, изведен помоћу котрљајног навојног пара. Треба да обезбеди високу тачност померања и висок степен искоришћења, [2].



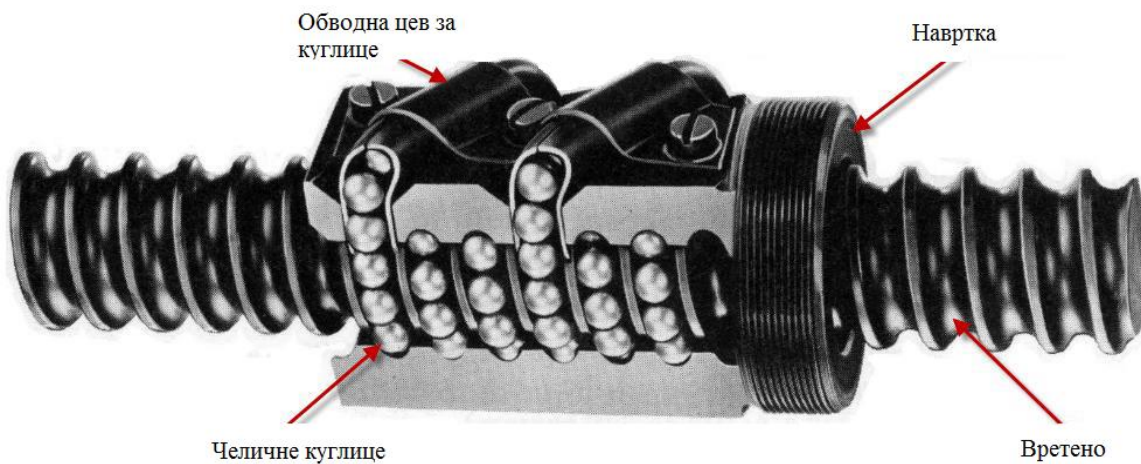
Слика 3.6
Механизам за покретање клизача код алатних машина

3.1. НАВОЈНИ ПРЕНОСНИК СА ЧЕЛИЧНИМ КУГЛИЦАМА

Уназад неколико деценија проблем трења који се јавља у навојним преносницима се решава тако што се пренос обртног кретања са вретена на навртку врши посредством челичних куглица.

На овакав начин се елиминише трење клизања што аутоматски доноси са собом већи степен искоришћења (до 90% и више).

Вретено и навртка добијају тада завојне жлебове, чији су радни бокови међусобно толико размакнути да могу примити каљене челичне куглице. При обртању вретена, куглице се котрљају у завојним жлебовима и тако посредују при преносу кретања са вретена на навртку.



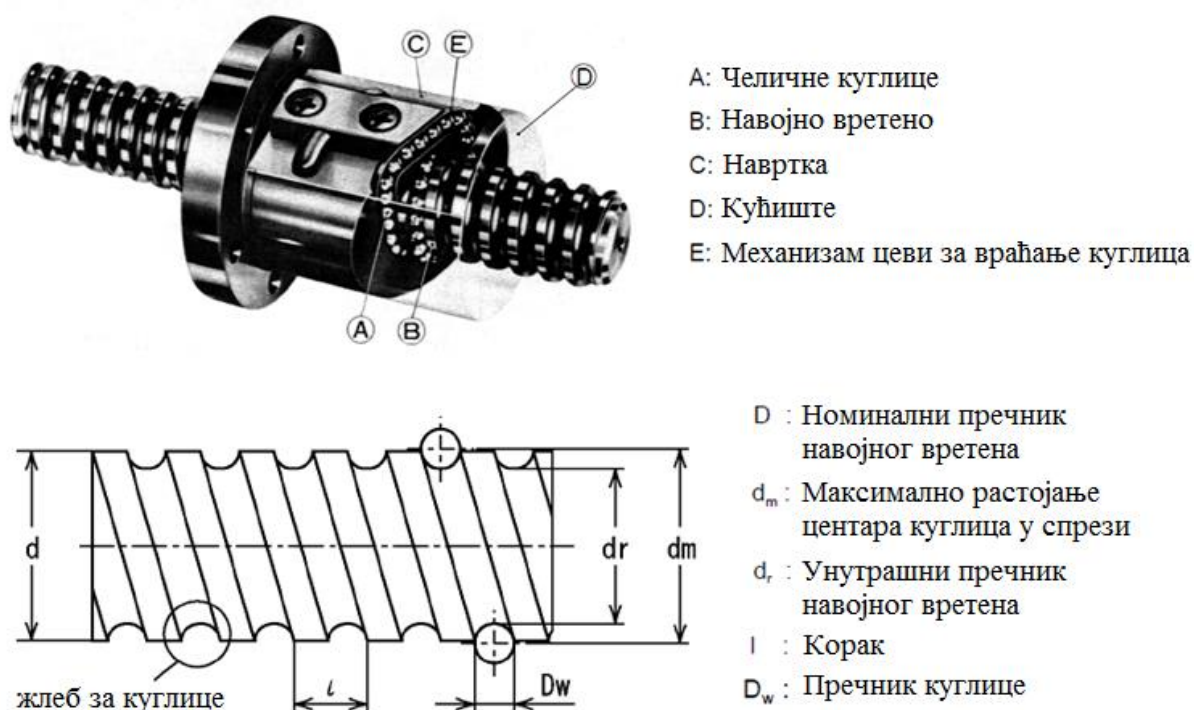
Слика 3.7
Напојни преносник са челичним куглицама

Непрекидно кретање куглица при обртању вретена обезбеђује обводна цев која спаја почетак и крај завојног жлеба у навртци. Куглица која излази из завојног жлеба на теменој страни навртке, враћа се преко обводне цеви према подножју навртке и ту поново улази у завојни жлеб. Оваква вретена се могу користити за пренос вертикалног али и хоризонталног кретања, [2].

Примена овог дизајна на уздужно ожлебљена вретена омогућава померање тешко оптерећених делова струга уз сасвим незнатне отпоре трења. Међутим, треба напоменути да су оваква вретена са челичним куглицама производи високог квалитета што значи да њихова израда није јефтина.

Уназад неколико деценија налазе примену у разним склоповима услед повећаног степена искоришћења, предвидивог радног века у 90% случајева и могућности врло прецизног позиционирања.

Одржавање у виду подмазивања је сведено на минимум, а удари приликом рада су реткост те је постигнута изузетна поузданост у различитим условима рада.

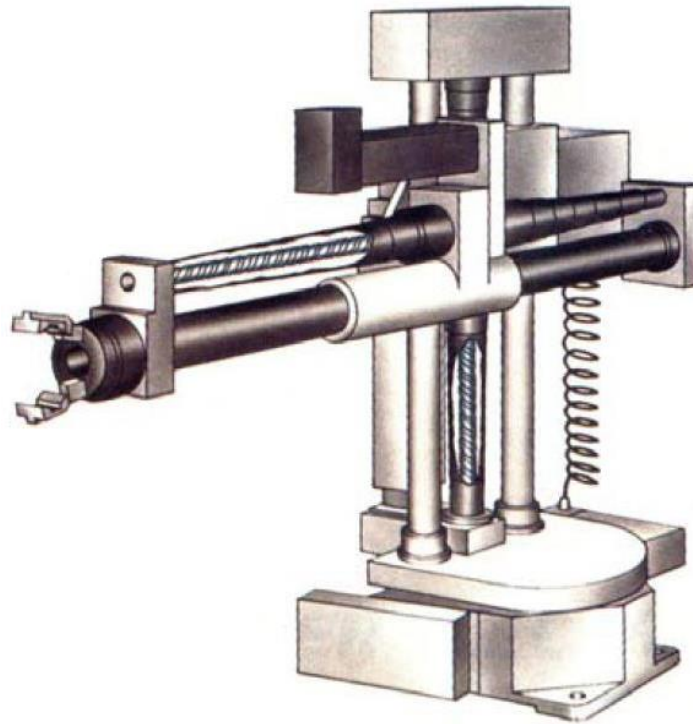


Слика 3.8

Делови навојног преносника са челичним куглицама и приказ основних димензија навојног вретена

Пример употребе навојних преносника са челичним куглицама при позиционирању роботске руке приказан је на слици 3.9.

Једно вретено служи за хоризонтално, а друго за вертикално позиционирање роботске руке.



Слика 3.9

*Употреба навојног преносника са челичним куглицама
при позиционирању роботске руке*

3.2. ПЛАНЕТАРНИ НАВОЈНИ ПРЕНОСНИК

Како технологија напредује, научници су отишли корак даље и развили механизам који се зове планетарни навојни преносник. Планетарни навојни преносник (слика 3.10) представља унапређену верзију навојног преносника са челичним куглицама. Обзиром на свој комплексни дизајн, планетарни навојни преносник је релативно скупљи од свог претходника са челичним куглицама.

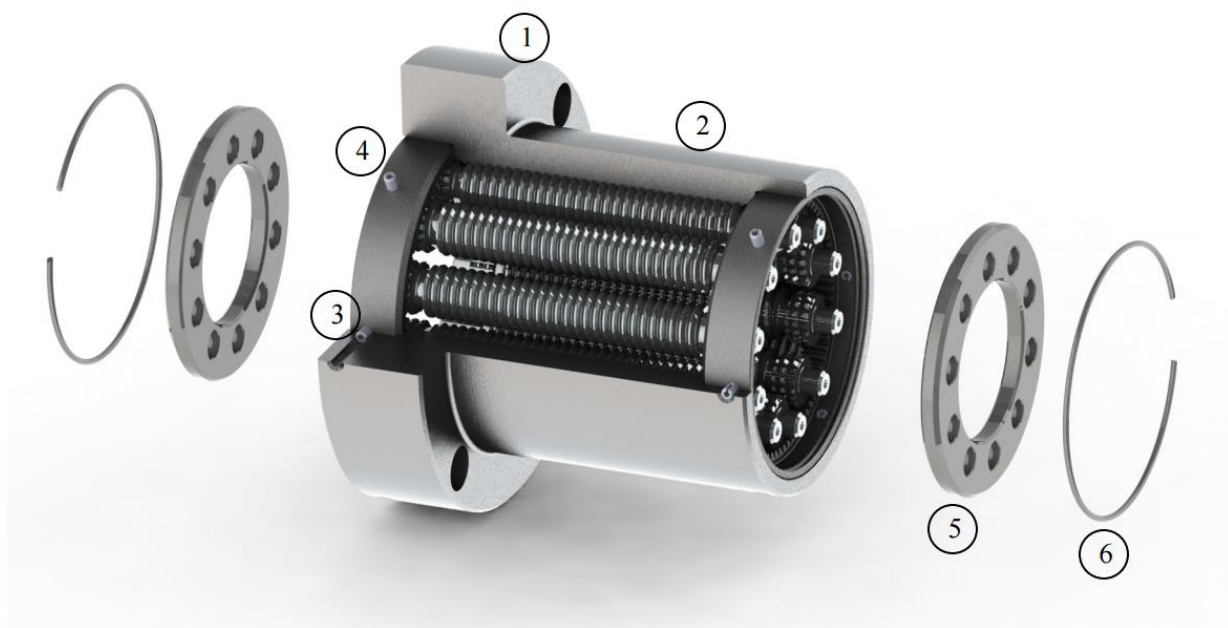


Слика 3.10

Планетарни навојни преносник

Примењује се у случајевима где се захтева велика прецизност, брзина, оптерећење и дуг век трајања. Највећу употребу налази у производној и аеро индустрији.

Конструкција планетарног навојног преносника (слика 3.11) се састоји од сложене навртке, која је сама по себи подсклоп. Навртка се састоји од унутрашње озубљених прстенова који су у спрези са планетарним зупчаницима који су распоређени по ободу. На тим зупчаницима се налазе мања навојна вретена која су у додиру са главним навојним вретеном, [3].



Слика 3.11

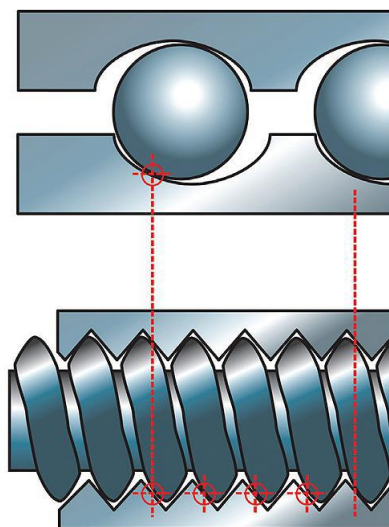
Планетарни навојни преносник

(1. Кућиште навртке; 2. Навојна вретена; 3. Отвори за подмазивање; 4. Озубљен прстен са планетарним зупчаницама; 5. Поклопац кућишта; 6. Осигурач)

Суштинска разлика у односу на навојни преносник са челичним куглицама јесте у броју контаката која остварују посредна тела са главним навојним вretenом. Посредна тела у случају навојног преносника са челичним куглицама су биле куглице, док је код планетарног навојног преносника реч о мањим навојним вретенима, [3].

Код навојних преносника са челичним куглицама је број додирних тачака са главним навојним вretenом ограничен величином (пречником) саме куглице, док је коришћењем мањих навојних вретена тај број знатно повећан што значи знатно више тачака на којим се може пренети снага у виду обртног кретања.

На слици 3.12 је дат приказ вретена са куглицама и са мањим навојним вретенима. Са слике се види да на истом аксијалном растојању планетарни навојни преносник има знатно више додирних тачака што значи да може пренети већу снагу, а тиме и брзину покрета при високом степену искоришћења од чак 90%. На овај начин се остварују многе друге предности од којих ће неке бити наведене касније, [4].



Слика 3.12

*Поређење додирних тачака код навојног преносника
са челичним куглицама и планетарног навојног преносника*

И поред многих других проблема који се јављају са планетарним видом дизајна овај преносник омогућава предности чак и над хидрауличким и пнеуматским преносницима (табела 3.1), нарочито оним који су укључени у пренос великих маса са високим брзинама.

Једна од предности су и димензије планетарног навојног преносника, механизам је смештен у кућишту навртке, тако на пример нема комплексних система вентила, пумпи, филтера и сензора који карактеришу хидрауличке и пнеуматске системе.

Друге предности су дуг радни век, мали захтеви оперативног одржавања као и мања бука у односу на хидрауличке и пнеуматске системе.

Табела 3.1 – Карактеристике планетарног навојног преносника у односу на навојни преносник са челичним куглицама, хидрауличке цилиндри и пнеуматске цилиндри, [5].

	Планетарни навојни преносник	Навојни преносник са челичним куглицама	Хидраулички цилиндри	Пнеуматски цилиндри
Носивост	Веома висока	Висока	Веома висока	Висока
Радни век	Веома дуг радни век	Средњи радни век	Дуг радни век уз правилно одржавање	Дуг радни век уз правилно одржавање
Брзина	Веома висока	Средња	Средња	Веома висока
Убрзање	Веома високо	Средња вредност	Веома високо	Веома високо
Електронско управљање	Веома лако	Веома лако	Тешко	Веома тешко
Чврстоћа	Веома висока	Средња	Веома висока	Веома ниска
Релативне димензије	Мале димензије	Средње димензије	Велике димензије	Велике димензије
Трење	Ниско	Ниско	Високо	Средње
Ефикасност	>90%	>90%	<50%	<50%
Монтирање	Компатибилни са стандардним серво електронским системима	Компатибилни са стандардним серво електронским системима	Комплексна уградња, захтева серво вентиле, висок притисак, филтрирајућу пумпу, линеарно позиционирање, сензоре	Комплексна уградња, захтева серво вентиле, висок притисак, филтрирајућу пумпу, линеарно позиционирање, сензоре
Одржавање	Нема много одржавања	Средње	Потребно је стално одржавање	Потребно је стално одржавање
Утицај на околину	Незнатан	Незнатан	Цурење уља	Бучан рад

Висока статичка и динамичка носивост

Пренос оптерећења са навртке на навојно вретено омогућен је преко планетарног механизма. Број контактних тачака је већи, тако да је носивост планетарног навојног преносника знатно већа од преносника са челичним куглицама.

4. ПРОРАЧУН ОСНОВНИХ ПАРАМЕТАРА ПЛАНЕТАРНОГ НАВОЈНОГ ПРЕНОСНИКА

4.1 Динамичка моћ ношења C

Вредност динамичке моћи ношења се користи за израчунавање замора планетарног навојног преносника. Динамичка моћ ношења се дефинише као оптерећење, константе вредности и правца, при ком 90% идентичних планетарних навојних преносника достиже 10^6 обртаја (L_{10}) без појаве оштећења.

4.2 Статичка моћ ношења (C_0) и степен сигурности (S)

Статичка моћ ношења (C_0) представља оптерећење услед кога би дошло до пластичне деформације најоптерећенијег дела додирне површине која је једнака хиљадитом делу пречника закривљења котрљајућег елемента. Да би се спречиле деформације које могу да доведу до неправилног функционисања склопа и да би се спречила бука који производи планетарни навојни преносник, степен сигурности (S) би се требао користити приликом одабира навојних вретена у односу на његово статичко оптерећење.

Вредност степена сигурности (S) не би требало бити мања од 3.

За операције код којих се јављају квази-статичка оптерећења (пресе) где се оптерећење приликом хода подједнако појављује, препоручљиво је користити већи степен сигурности.

4.3 Номинални радни век

Теоретска вредност радног века L_{10} и L_h представља вредност коју достигне 90% планетарних навојних преносника који раде у истим условима. Номинална вредност радног века се рачуна као [5]:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{F} \right)^3 \quad (4.1)$$

Уколико је потребна већа поузданост од 90%, потребно је прилагодити образац за прорачун радног века коришћењем фактора поузданости (a_n) који се бира из табеле 3.2.

$$L_n = L_{10} \cdot a_n \quad (4.2)$$

Табела 3.2 – Фактор поузданости

Поузданост (%)	-a ₀
90	1
95	0.62
96	0.53
97	0.44
98	0.33
99	0.21

4.4 Еквивалентно оптерећење

Радна оптерећења се могу дефинисати физичким карактеристикама (масом, инерцијом, итд.). За системе који раде у променљивим условима, као што су промене вредности оптерећења, трајања оптерећења као и промене брзине, није могуће користити једноставан прорачун, већ је потребно израчунати еквивалентно оптерећење.

Еквивалентно средње оптерећење се користи за одређивање радног века и зависи од врсте оптерећења.

Еквивалентно оптерећење се може израчунати помоћу формуле, [5].:

$$F = \sqrt[3]{\frac{t_1 \cdot n_1 \cdot F_{ax_1}^3 + t_2 \cdot n_2 \cdot F_{ax_2}^3 + \dots + t_n \cdot n_n \cdot F_{ax_n}^3}{t_1 \cdot n_1 + t_2 \cdot n_2 + \dots + t_n \cdot n_n}} \quad (4.3)$$

Где је:

$F_{ax(1,2,n)}$ — примењено оптерећење у одређеним временским интервалима,

$n_{(1,2,n)}$ — број обртаја навоја у одређеним временским интервалима,

$t_{(1,2,n)}$ — временски интервал у процентима.

4.5 Преднапрезање

Преднапрезање навртке се користе да би се елиминисали удари услед аксијалног оптерећења и да би се повећала крутост механизма. Преднапрезање може утицати на радни век механизма због чега је потребно бити опрезан приликом одређивања његове вредности.

Вредност силе преднапрезања је потребно користити приликом прорачуна еквивалентног оптерећења да се не би занемарио његов утицај на радни век система.

Вредност преднапрезања се рачуна као функција радних услова. У случају да се одређени услови не могу једноставно одредити, вредност силе преднапрезања се може израчунати као, [5].:

$$F_p = \frac{F_{max}}{2.83} \quad (4.4)$$

Резултујуће оптерећење (укључујући преднапрезање и радно оптерећење) се може израчунати као:

За оптерећену навртку:

$$F = F_p - 0.65 \cdot F_{ax} \text{ (за } F_{ax} < 2.83 \cdot F_p)(N) \quad (4.5)$$

$$F = 0 \text{ (за } F_{ax} \geq 2.83 \cdot F_p)(N) \quad (4.6)$$

За растерећену навртку:

$$F = F_p - 0.35 \cdot F_{ax} \text{ (за } F_{ax} < 2.83 \cdot F_p)(N) \quad (4.7)$$

$$F = 0 \text{ (за } F_{ax} \geq 2.83 \cdot F_p)(N) \quad (4.8)$$

Где је:

F – резултујуће еквивалентно оптерећење (N),

F_p – вредност силе преднапрезања (N),

F_{ax} – примењено оптерећење (N).

4.6 Крутост навојног преносника

Крутост склопа навојног преносника представља функцију неколико параметара, као што су: крутост навртке, крутост лежаја, крутост осовине, крутост кућишта као и организације елемената у кућишту. Уколико су сви параметри познати, користи се формула, [4].:

$$c_{\delta t} = \left(\frac{1}{c_{\delta s}} + \frac{1}{c_{\delta n}} + \frac{1}{c_{\delta b}} + \frac{1}{c_{\delta h}} \right)^{-1} \quad (4.9)$$

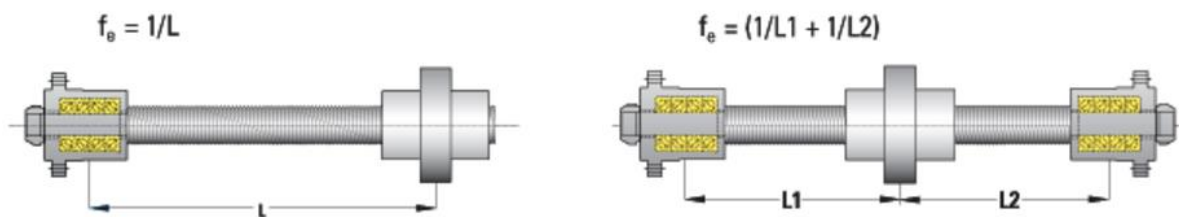
Где су:

- $c_{\delta t}$ – крутост целог склопа,
- $c_{\delta s}$ – крутост навојног вретена,
- $c_{\delta n}$ – крутост навртке,
- $c_{\delta b}$ – крутост лежајева,
- $c_{\delta h}$ – крутост кућишта.

Док се крутост навојног вретена рачуна на следећи начин:

$$c_{\delta s} = 165 \cdot d^2 \cdot f_e \quad (4.10)$$

Где f_e представља фактор који зависи од начина ослањања, и његова вредност се узима са слике 4.1:



Слика 4.1
Вредности фактора f_e

Ако је навојно вретено оптерећено притисним силама, дозвољена сила се рачуна помоћу образаца:

$$F_{axdoz} = \frac{f_{sc} \cdot d^4 \cdot 10^4}{L^2} \quad (4.11)$$

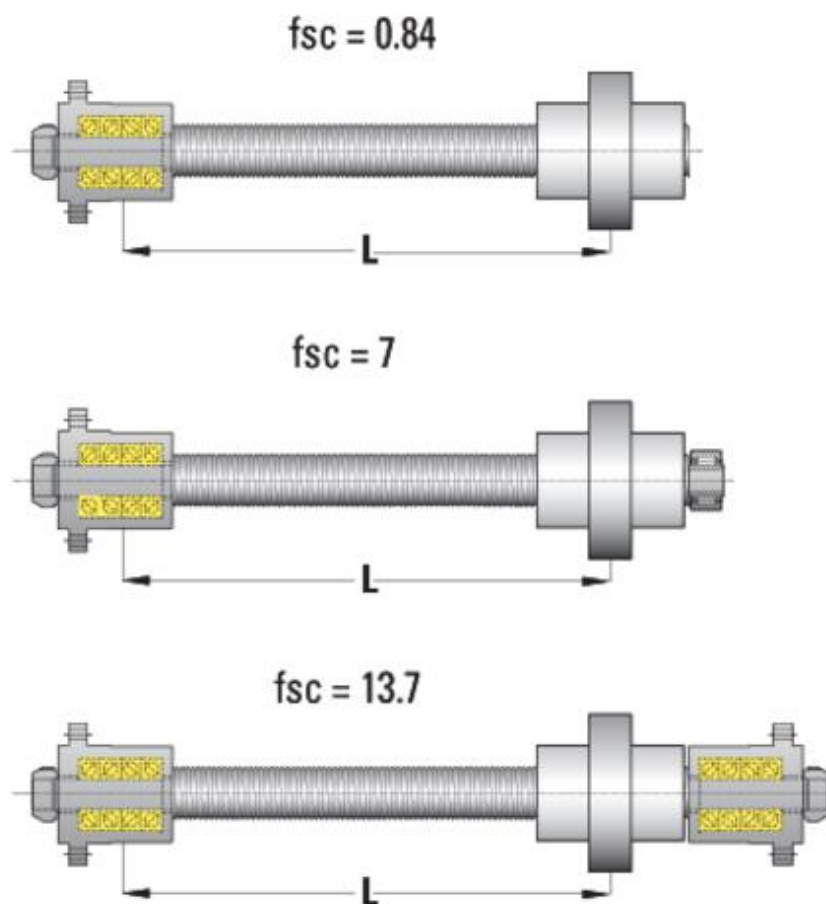
Где су:

F_{ax} – притисна сила (N),

f_{sc} – фактор који зависи од начина ослањања (слика 4.2),

d – номинални пречник навојног вретена (mm),

L – слободна дужина навојног вретена (mm).



Слика 4.2

Вредности фактора који зависи од начина ослањања навојног вретена

4.7 Критична брзина

Максимална брзина обртања коју може достићи планетарни навојни преносник зависи од следећих параметара, [5]:

- Брзине обртања навртке (и планетарног прстена),
- Пречника и слободне дужине навојног вретена,
- Начина ослањања навојног вретена.

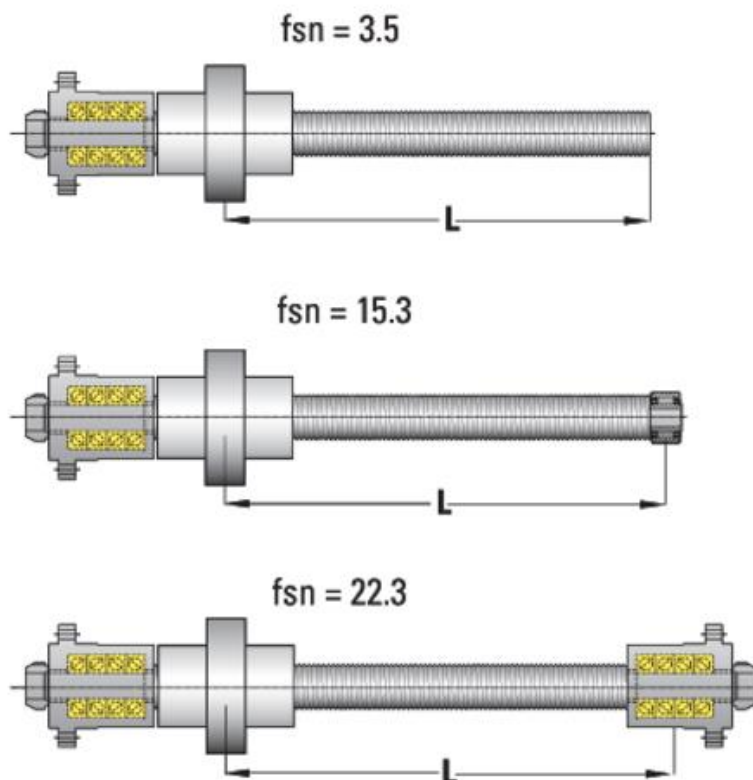
Брзина обртања навртке се може лако израчунати и она зависи од фактора максималног броја обртаја (пречник планетарног прстена помножен са брзином обртања n).

Критични број обртаја навојног вретена се рачуна помоћу образаца 4.12 и он представља вредност при којој се јавља резонанца (првог реда), [6].

$$n_{max} = \frac{f_{sn} \cdot d \cdot 10^7}{L^2} \quad (4.12)$$

Где су:

- n_{max} — максимални број обртаја навојног вретена,
- f_{sn} — фактор који зависи од начина ослањања (слика 4.3),
- d — номинални пречник навојног вретена (mm),
- L — слободна дужина навојног вретена (mm).



Слика 4.3

Вредности фактора који зависи од начина ослањања навојног вретена

4.8 Степен искоришћења

Ефикасност планетарног навојног преносника зависи од његових радних параметара.

Трење које се јавља у систему варира и зависи од променљивих фактора који се не могу лако сумирати, [7].

Да би се поједноставио избор димензија навојног вретена користе се следеће упрошћене формуле:

За претварање обртног кретања у транслаторно кретање:

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\mu \cdot \frac{d}{P} \right)} \quad (4.13)$$

За претварање транслаторног кретања у обртно кретање:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 - \left(\mu \cdot \frac{d}{P} \right)} \quad (4.14)$$

Где су:

μ – коефицијент трења,

P – погонска снага вратила.

4.9 Потребни обртни момент

Да би се снага константно преносила, у навојном вретену мора да се јави обртни момент чија се величина рачуна као, [7]:

$$T = \frac{F_{ax} \cdot P \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (4.15)$$

У супротном, да би се кретање зауставило, потребан је кочиони механизам при чему се кочиони момент рачуна као:

$$T = \frac{F_{ax} \cdot P \cdot \eta_1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \quad (4.16)$$

4.10 Подмазивање

Генерално, иста мазива се користе за планетарни навојни преносник као и за лежајеве. Користе се мазива на бази масти и на бази уља у зависности од потребних радних карактеристика и услова одржавања.

Правилно подмазивање је од великог значаја за правилно функционисање планетарног навојног преносника. Кључни моменат је иницијално подмазивање навртке да би се остале компоненте адекватно подмазале. Уколико није назначено другачије, планетарни навојни преносници се достављају “суви”, тј. само премазани заштитним слојем, а корисник мора извршити правилно подмазивање пре употребе, [5].

Запремина, ширење и учестаност подмазивања мора се правилно одабрати уз адекватно праћење процеса подмазивања. При раду са великим брзинама јављају се велике центрифугалне силе услед којих долази до бацања мазива, тако да се и та појава мора пратити и узети је у обзир приликом одабира мазива.

Праћењем температуре која се постиже у контакту навртке долази се до података на основу којих се одређује учестаност подмазивања.

Подмазивање уљем:

Централни систем подмазивања уљем је оптимално решење услед могућности константног дотока филтрираног уља контролисане температуре у прописаним интервалима, [5].

Док такви системи представљају оптимално решење, они нису увек практични због цене или услед ограничења због димензија. Алтернативна решења постоје и помоћу њих се добијају жељени резултати.

Одабир уља:

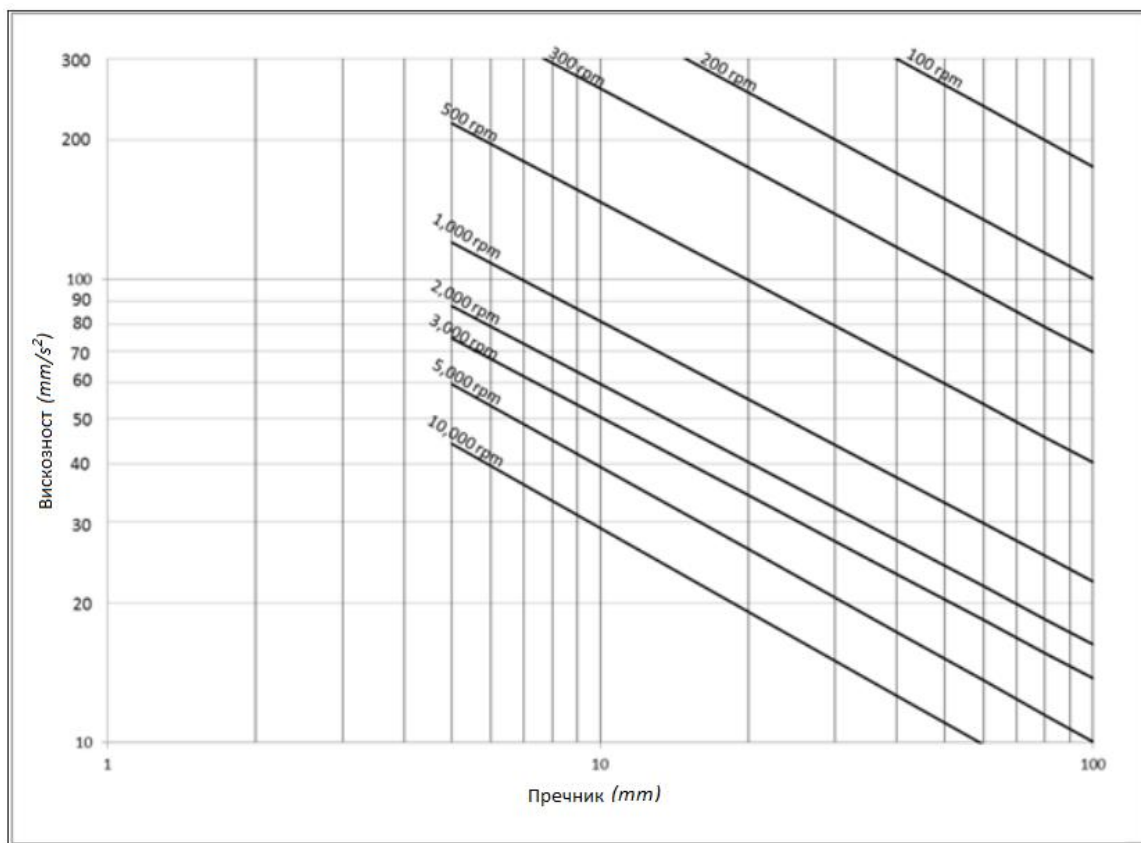
Проточна минерална уља са ЕР адитивима која повећавају радни век и спречавају корозију, у складу са стандардом DIN 51517, су посебно погодна за подмазивање планетарних навојних преносника. Радна брзина, температура окружења и радна температура су најбитнији фактори приликом одређивања потребне вискозности мазива.

Потребна запремина уља зависи од пречника зупчаника, броја навојних вретена и количине потребног расипања температуре.

Приликом подмазивања количина уља треба да буде довољна да навојно вретено које се налази најниже у основи буде потпуно потопљено у уљу. Количина уља и промена интензитета подмазивања зависи од напонских стања у систему и његове конфигурације, [5].

На слици 4.4 приказан је дијаграм вискозности ν_k , потребне за правилан рад услед одабране брзине у зависности од пречника навојног вретена.

Вискозност ν_k , приказана на дијаграму 4.4, обезбеђује довољно подмазивање да би се постигла номинална вредност радног века, узимајући у обзир правилно филтрирање и одржавање. Средње вредности се могу одредити интерполацијом између крива на дијаграму.



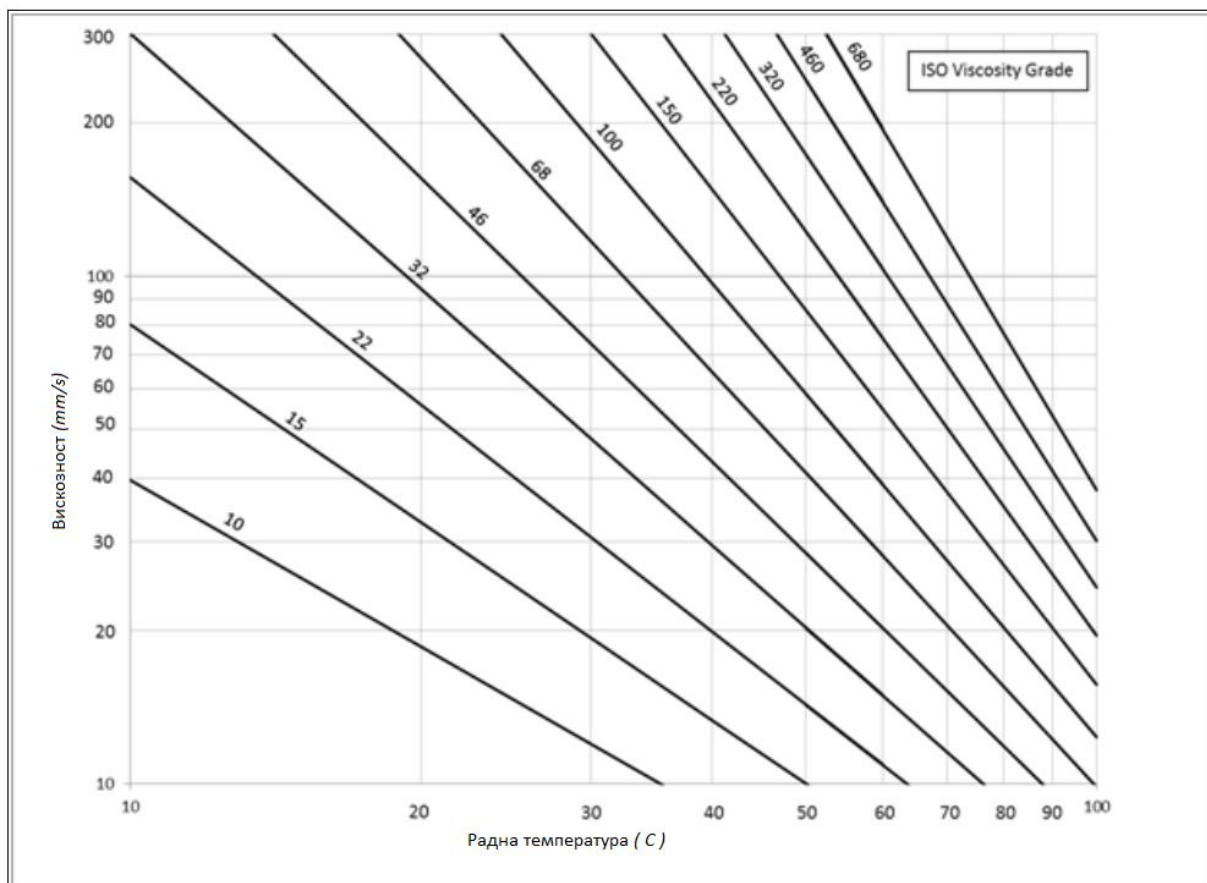
Слика 4.4
Дијаграм вискозности ν_k

Номинална вредност вискозности мазива се може израчунати на основу потребне вискозности ν_k , радне температуре и температуре при стању мировања навојног вретена коришћењем дијаграма приказаног на слици 4.5.

Номинална вискозност је вискозност мазива на температури од 40 °C.

Класе вискозности у складу са стандардом ISO VG (DIN 51517), приказане су на дијаграму (слика 4.5), [6].

Радна температура планетарног навојног преносника мора бити позната или процењена да би се израчунала потребна номинална вискозност коришћењем ове технике.



Слика 4.5

Дијаграм зависности вискозности v_k од температуре

Подмазивање машћу:

Коришћење мазива на бази масти је најчешће решење приликом подмазивања планетарног навојног преносника.

Процес одабира мазива на бази масти је исти као и код мазива на бази уља.

5. ЗАКЉУЧАК

Покретни навојни спојеви омогућавају релативно кретање спојених делова са дефинисаним односом брзина и међусобног положаја. Осим тога омогућују претварање обртног кретања у праволинијско и претварање обртног момента у аксијалну силу.

Са развојем технологије јавила се потреба за производом високе прецизности и као решење наметнуо се планетарни навојни преносник.

Планетарни навојни преносник представља производ високог квалитета који поред високе прецизности карактеришу дуг радни век и велика поузданост. Услед велике поузданости налази велику примену у аероиндустрији.

Пренос оптерећења са навртке на навојно вретено омогућен је преко планетарног механизма. Број контактних тачака је већи, тако да је носивост планетарног навојног преносника знатно већа од носивости осталих навојних преносника.

Поред велике носивости мали степен трења, који доприноси великој ефикасности, представља један од главних разлога зашто планетарни навојни преносник налази све већу примену. Услед високе прецизности планетарни навојни преносник се све чешће користи у роботици и компјутерски управљаним системима.

И поред својих предности, израда планетарног навојног преносника захтева велику прецизност и његова израда је изузетно скупа. Због високе цене планетарни навојни преносник није увек идеалан избор. Са напретком технологије може се очекивати смањење трошкова израде што ће свакако планетарни навојни преносник учинити доступнијим решењем.

Литература:

- [1] Николић Вера, Машински елементи – теорија, прорачун, примери, Крагујевац 2004.
- [2] Огњановић Милосав, Милтеновић Војислав, Машински спојеви, Београд 1993.
- [3] <http://www.nookindustries.com/Product/ProductLine/Planetary-Roller-Screw-Products>, preuzeto 13.08.2016.
- [4] <http://www.olsenactuation.com/product-brochures/PRS-PRR-Roller-Screw-Brochure.pdf>, preuzeto 24.08.2016.
- [5] <http://exlar.com/content/uploads/2014/09/Roller-Screw-Basics.pdf>, preuzeto 13.08.2016.
- [6] http://www.bsahome.org/tools/pdfs/Roller_Screws_web.pdf, preuzeto 16.08.2016.
- [7] Милчић Драган, Банић Милан, Милтеновић Александар, Милчић Миодраг, Машински елементи, Ниш, 2015.