

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Ђорђе Д. Стевић

**Уређај за моделска испитивања
линеарних клизних вођица**

Завршни рад

Крагујевац, 2020

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Основне академске студије
Модул: Производно машинство
Предмет: Машине алатке
Број индекса: 40/2016

Ђорђе Д. Стевић

**Уређај за моделска испитивања
линеарних клизнихвођица**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић -ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Производно машинство**

Име и презиме: **Ђорђе Стевић**

Број индекса: 40/2016

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада: **Уређај за моделска испитивања линеарних клизних вођица**

Задатак: У оквиру завршног рада потребно је да кандидат прикупи и изврши систематизацију података о врстама и карактеристикама кретања код машина алатки, материјалима и условима контакта. Потребно је описати клизне вођице за праволинијска кретања код машина алатки. У посебном делу рада извршити пројектовање уређаја за триболошка испитивања у моделским условима линеарних кретања малим брзинама при променљивим оптерећењима.

Завршни рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Основна кретања код машина алатки и системи за вођење,
3. Клизне вођице за праволинијска кретања код машина алатки,
4. Пројектовање уређаја за моделска испитивања.
5. Закључци,
6. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 26.03.2020

САДРЖАЈ

1. УВОД	0
2. ОСНОВНА КРЕТАЊА КОД АЛАТКИ И СИСТЕМА ЗА ВОЂЕЊЕ.....	4
2.1 Класификација вођица.....	4
2.2 Услови и режим рада вођица	5
2.3. Материјал за клизне вођице	10
3. КЛИЗНЕ ВОЂИЦЕ ЗА ПРАВОЛИНИЈСКА КРЕТАЊА КОД МАШИНА АЛАТКИ...	12
3.1. Подмазивање клизних вођица	17
3.2. Провера стабилности вођица	18
4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ УРЕЂАЈА ЗА МОДЕЛСКА ИСПИТИВАЊА	21
4.1 Анализа различитих трибометара	24
4.2 Модел линеарног трибометра.....	29
4.3 Трибометар за линеарна испитивања.....	32
5. ЗАКЉУЧАК	36
6. ЛИТЕРАТУРА.....	37

Abstract

In this thesis the collection and systematization of data was carried out about the development of a device for modelar examination of linear bearings, with an emphasis on linear bearing slides. The way a linear bearing works has been presented with a statical analysis of forces that effect the bearing. Likewise, different types of bearings have been presented based on their shape and based on the way they work. As well as this, all the harmful factors to teh bearing have been analyzed, like friction and methods that reduce this problem have been examined. At the end, a laboratory research has been conducted that examines the characteristics of bearings and provides the ways they could be enhanced.

Keywords:

Bearing, friction, movement, force, analysis

Резиме

У оквиру завршног рада извршено је прикупљање и систематизација података о развоју уређаја за моделска испитивања вођица, акценат је стављен на линеарне клизне вођице. Представљен је начин рада вођица и приказана је статичка анализа сила које се јављају код вођица. Такође су представљени и различити типови вођица по свом облику, али и по начину рада. Такође су анализирана и сва штетна дејства на вођицу као што је трење и представљени су начини да се ово умањи. За крај је урађено лаболаторијско истраживање карактеристика вођица и како би оне могле да се унапреде.

Кључне речи:

Вођица, трење, кретање, сила, анализа.

1. УВОД

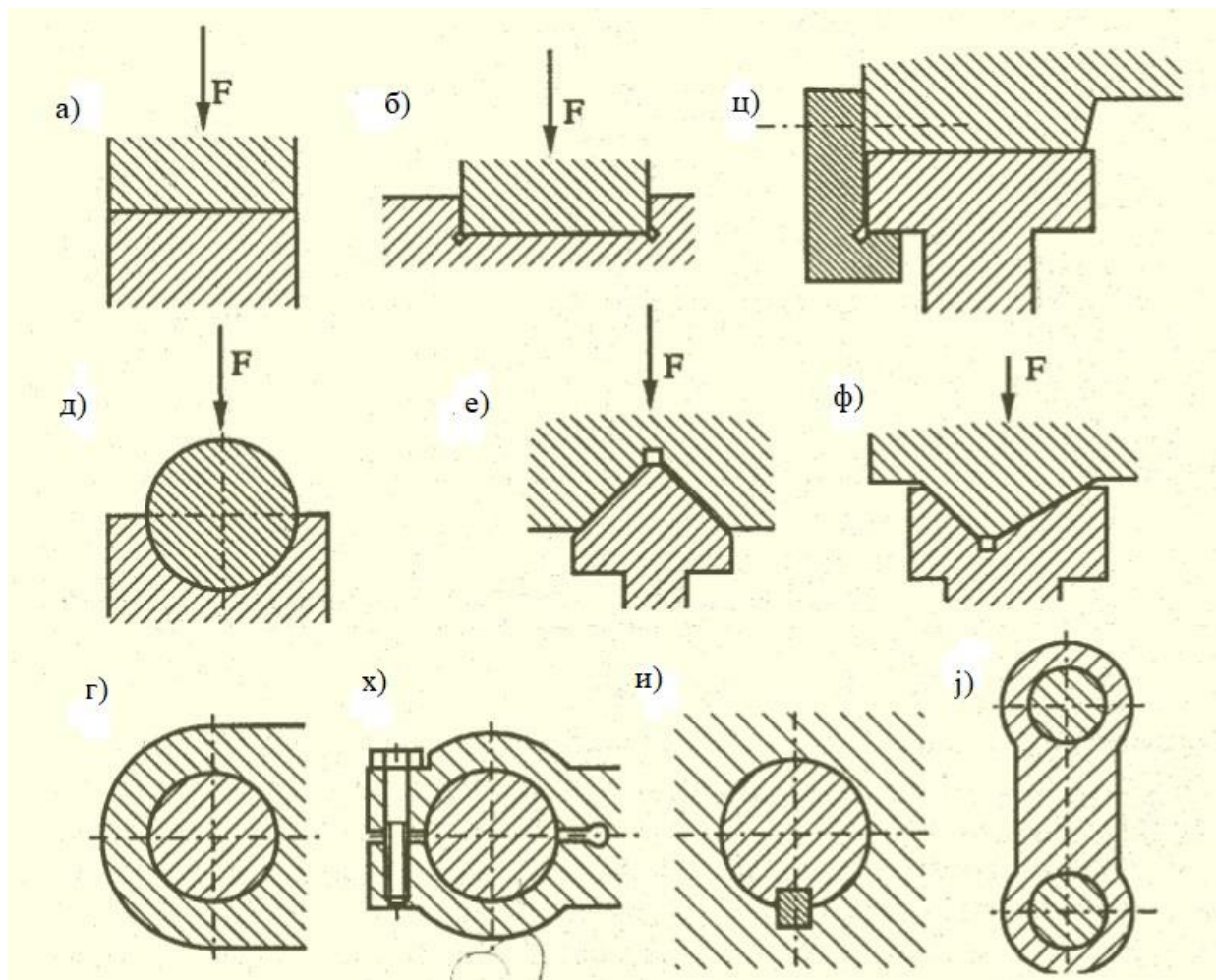
Вођица је машински елемент чији је задатак је да осигура потребни положај обрађиваном делу, као и да обезбеди могућност померања. Вођица представља ослонац за разне извршне органе машине, ово се односи и на покретне делове и за склопове, било да се ради о покретним елементима или склоповима. На слици 1 је приказан изглед вођице.



Слика 1. Приказ примера вођице [1]

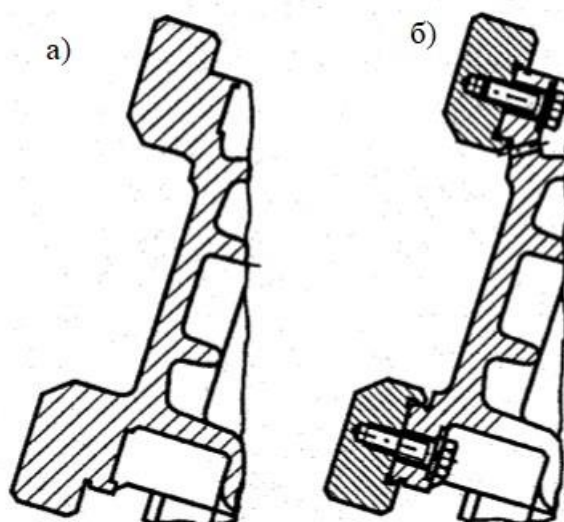
Вођица врши вођењедела, односно врши дефинисање тачне путање кретања покретног дела у односу на непокретне делове машине, вођење се обезбеђује тако што вођица омогућује само једну слободу кретања вођеном елементу или склопу. Искључење осталих слобода се постиже динамичким путем.

На слици 2 приказано је неколико најосновнијих примера ограничавања слободе кретања и то обликом (примери г-ј) или обликом и силом. Облици приказани примерима а-ф и и, и дозвољавају само једну слободу кретања (праволинијску), док остали (г, х, ј), поред транслаторног кретања вођеног елемента дозвољавају се и његово ротирање око осе.



Слика 2. Могуће слободе кретања [2]

Како би се обезбедио почетни потребни зазор или зазор настао у експлоатацији (резултат хабања елемената машина), неопходно је да систем вођења, код којих се ограничавање слободе кретања остварује обликом, имају могућност регулације. Површине клизања су приказане на слици 3, при вођењу (односно вођице) образују се, како непосредно обликом носећих елемената (слика 3а)) тако и монтажом посебних елемената на носеће системе машина (слика 3б)).



Слика 3. Могућност формирања клизних површина – вођица [2]

Тачност облика и димензија предмета обраде условљена је правилним односом резног алата и предмета у сваком тренутку обраде. Како се извршни органи померају по својим вођицама, то значи да и тачност обраде доста зависи од тачности тих вођица. У суштини постоје две врсте вођица [2] :

- За вођење покретних делова (органа) машине
- За померање и фиксирање одређених елемената машине који служе за ослањање или држање предмета обраде или алата

Уколико се ради о вођицама намењеним за померање елемената, оне морају обезбедити правилан положај тог елемента у било којој позицији.

Да би вођице алатних машина могле у потпуности, или бар већим делом, да испуне потребе које се постављају при експлоатацији алатних машина, оне морају да обезбеде одређене услове, од којих су најважнији [2] :

1. Тачност релативног вођења извршног органа машине. Тачност је одређена пре свега тачношћу израде, посебно геометријском тачношћу; уравњеношћу ивица по којим се врши вођење, као и њиховом паралелношћу; високим квалитетом обрађене површине и хомогеношћу површина раних ивица вођица; крутошћу вођица и постоља где су вођице смештене; крутошћу и постојаношћу дебљине уљног филма при подмазивању вођица; величином температурних деформација елемената постоља и самих вођица.
2. Трајност вођица везану за тачност, односно дужина века трајања вођице, која је дефинисана способношћу да вођица одржи првобитну тачност (или да грешка не изађе ван дозвољених толеранција) током предвиђеног века трајања. Условљена је режимом резања, отпорношћу на хабање клизног пара вођица, величином утицаја хабања на тачност обраде, величином

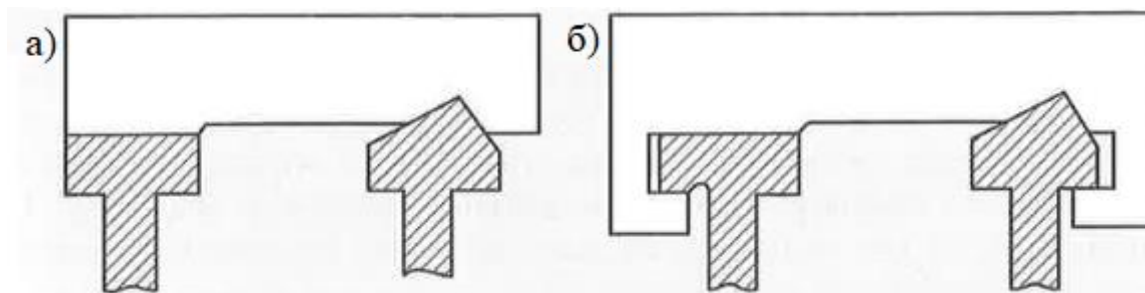
деформације ослоних – носећих елемената услед заосталих напона у постољу и др.

3. Равномерност малих померања и тачног позиционирања склопа који се по вођицама води. Она зависи од режима трења, погонског агрегата и механизма преноса кретања (крутости карактеристичних елемената и кинематскогланца у целини), услова подмазивања вођица и врсте мазива, врсте материјала од којих су израђени елементи клизног пара, конструкције вођица и квалитета њихове израде.
4. Одсуство вибрација у процесу резања одређено је динамичким карактеристикама технолошког система, а с тим и крутошћу и пригушењу у вођицама.
5. Мале силе трења у вођицама, од чега зависи потребна снага и величина погонског мотора и елемената преноса кретања, проводљивости топлоте (одвођене из зоне стварања) и температурне деформације (посебно код водича за главно кретања), силе на ручици при ручном померању извршног органа. Посебно је важна постојаност сила трења, јер промена интензитета ових сила доводи и до погрешног позиционирања.
6. Погодност за одржавање (ремонтовања), која је условљена могућношћу лаке завршне обраде клизних површина код вођица које су израђене изједна са носећом конструкцијом, као и могућношћу замене елемената код вођица које се монтирају на носећу конструкцију, без њихове надкнадне обраде.

2. ОСНОВНА КРЕТАЊА КОД АЛАТКИ И СИСТЕМА ЗА ВОЂЕЊЕ

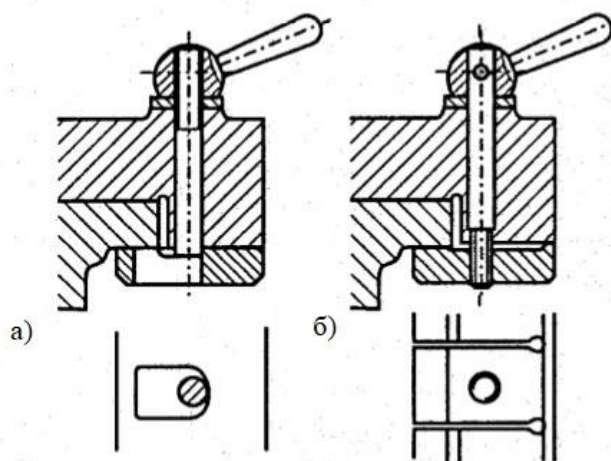
2.1 Класификација вођица

Вођице се могу поделити на основу трећа које се јавља код њих, осим овога, подела вођица може се извршити и према намени, врсти трећа, правцу и путањи вођења, геометријском облику или конструкцији. Такође вођице се могу поделити на отворене и затворене, као што је приказано на слици 4.



Слика 4. Отворене (а) и затворене (б) вођице [3]

Према намени односно начину кретања, вођице се могу поделити на вођице главног кретања, вођице помоћног кретања и на вођице за премештање елемената или подскопова из једне позиције у другу, после чега се они фиксирају посебним елементима што је приказано на слици 5.



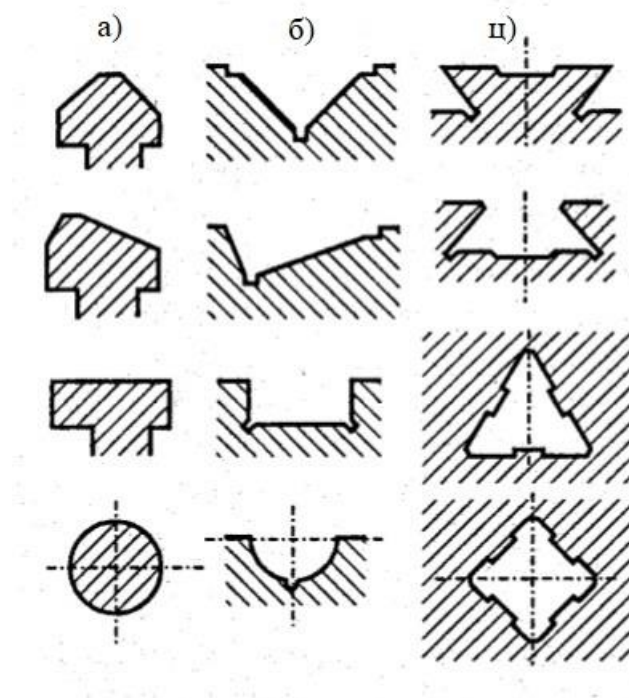
Слика 5. Фиксирање елемената који се води по вођицама за премештање [3]

Код алатних машина са главним обртним кретањем се искључиво срећу вођице које обезбеђују тачно помоћно кретање или премештање, док се код машина са главним праволинијским кретањем у принципу срећу све три врсте вођења. Према правцу

кретања вођеног дела, у односу на осу радног предмета разликују се попречне и уздужне вођице.

По карактеру трења разликују се вођице граничног, мешовитог и течног трења. По путањи по којој се извршни орган машине води могу бити вођице праволинијског и кружног кретања. Према правцу кретања вођеног дела, вођице се могу поделити на хоризонталне, вертикалне и косе.

Приликом конструисања вођица могу се произвести различити геометријски облици што је и приказано на слици 6, од равних, призматичних до цилиндричних и коничних. Њихов попречни пресек може бити отворен (а) и б) на слици 6) или затворен (слика 6ц)). Сви облици вођица могу се израђивати било као обухваћени (слика 6а)), или као обухватајући (слика 6 б) и ц)).



Слика 6. Различити геометријски облици вођица [3]

На крају, према могућности компензирања момената превртања и сила које теже да раздвоје елемент који се води од вођице, постоје отворене и затворене вођице.

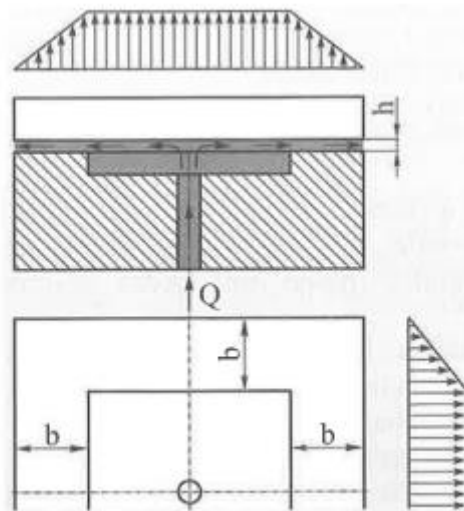
2.2 Услови и режим рада вођица

Код машина алатки се примењују вођице са различитим начином трења: вођице мешовитог трења, вођице течног трења, аеростатичке вођице и вођице са котрљањем. Сваки од ових типова вођица има своје предности, али и мане.

Вођице мешовитог трења се одликују високим и променљивим трењем. Главна негативна карактеристика је врло велика сила трења приликом мировања, у поређењу

са трењем која се јављају при кретању, а којадоста зависе од брзине кретања. Високо трење доводи и до повећаног хабања вођица, а самим тим и до скраћења века њиховог трајања. Добре особине су велика контактна крутост и добра пригушна својства. Осим овога, оне обезбеђују поуздано фиксирање померљивог елемента машине после његовог померања у потребан положај. Зато је и најбоља област примене код прецизних машина са малим оптерећењима и одговарајуће малог хабања радних ивица вођица, а такође и код вођења померљивих склопова машине.

Вођице течног трења се код алатних машина углавном јављају у виду хидростатичких вођица, јер су брзине кретања извршних органа сувише мале да би се постигао ефекат хидродинамичког трења. Чисто вискозно трење код хидростатичких вођица потпуно одстрањује могућност губитка стабилности и појаву стик-слипа при малим брзинама кретања. Осим тога, ове вођице обезбеђују високу осетљивост при позиционирању и остваривању малих померања, неопходних код неких врста обраде. Под овим типом вођица се формирање уљног слоја између контактних површина остварује уз помоћ посебног хидростатичког система чија је намена да се континуално доводи уље под притиском у зону контакта, што је и приказано на слици 7.



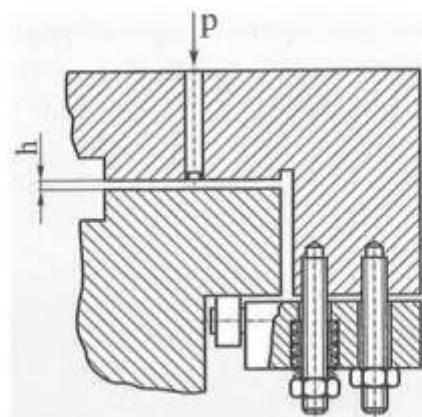
Слика 7. Функционални принцип хидростатичких вођица [3]

Обзиром да не постоји директан контакт између дела који се креће и саме вођице, сведено је на најмању могућу меру трење и хабање, што значи и да је њихов век трајања знатно већи. Добра особина хидростатичких вођица је и високо пригушно својство, што обезбеђује висок квалитет обрађене површине при завршној обради дела.

Недостатак вођица течног трења огледа се пре свега у неопходности сложеног система циркулације, сакупљања и пречишћавања течности за подмазивање, а такође и отежано фиксирање померљивог елемента после његовог померања у жељени положај. Крутост ових вођица је мања него код вођица других типова. Оптимална област примене ових врста вођица је код машина са повишеним захтевима за тачност и квалитет обраде дела.

Аеростатичке вођице имају у поређењу са вођицама течног трења знатно мање трење при кретању, а при престанку довођења ваздуха обезбеђују поуздано фиксирање

вођеног елемента. Поред тога, аеростатичке вођице не захтевају сложени циркулациони систем довода ваздуха. Недостатак им је склоност ка сопственом осциловању, мала носивост и недовољно висока поузданост упоређењу са осталим типовима вођица. Област примене ових вођица је код машина где се захтева тачно позиционирање, мало оптерећених елемената, кодразличитих помоћних померања као и при високим брзинама кретања. Њихов принцип рада је исти као код хидростатичких вођица, разлика је у томе што уместо уљног слоја за раздвајање контактних површина, користи се ваздух под притиском, што је и приказано на слици 8. Ваздух, који има врло малу вискозност и високу стишљивост, ствара између површина врло мали зазор, овај зазор омогућава високе брзинске и динамичке перформансе при линеарном кретању елемената машина алатки.

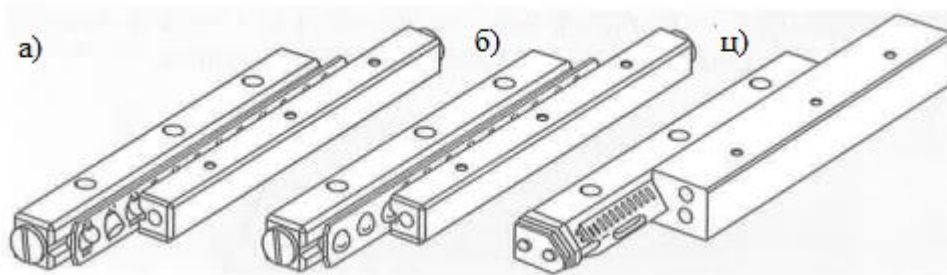


Слика 8. Функционални принцип аеростатичкох вођица [3]

Котрљајуће вођице се одликују малим трењем и хабањем и, при поузданој заштитинечистоћа, обезбеђују дуг век трајања, велику контактну крутост, посебно вођице са цилиндричним котрљајућим елементима са правилно изабраним предоптерећењем. Основни недостатак им је релативно велика дисперзија силе трења услед случајних грешака обраде спрегнутих површина, као и отежано фиксирање вођеног дела. Примењују се код прецизних машина са релативно нижим захтевима за тачност кретања, при великим оптерећењима и већим брзинама кретања и на крају, у свим случајевима где је потребно обезбедити добру циркулацију средства за подмазивање.

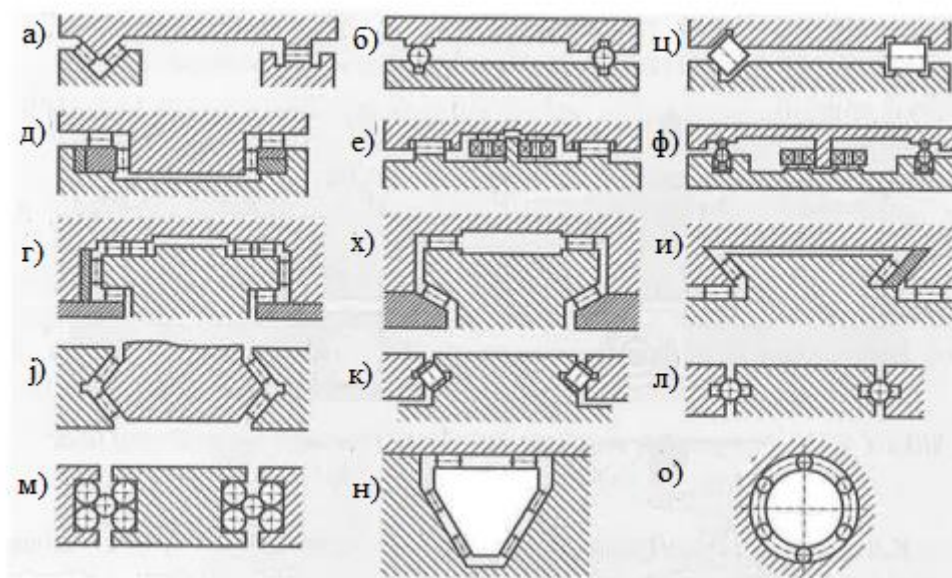
Котрљајуће вођице се могу поделити и према типу котрљајућих тела, што је и приказано на слици 9:

- Кугличне
- Ваљкасте
- Игличaste



Слика 9. Котрљајуће вођице са различитим типовима котрљајућих тела: а) Кугличне, б) Ваљкасте, ц) Игличасте [3]

Конструкциони облици котрљајних вођица су исти као и код клизних вођица. Оне могу бити правоугаоне, трапезоидне, троугласте, цилиндричне и комбиноване, што је и приказано на слици 10.



Слика 10. Конструкциони облици котрљајућих вођица [3]

У табели 1 приказане су упоредне карактеристике претходно описаних типова вођица.

Тип вођица	Крутост	Пригушење	Миран рад	Отпорност према хабању	Без стик-слап ефекта	Опсег брзина	Поузданост	Степен стандард
Хидростатичке	●	●	○	○	◐	◐	●	○
Хидродинамичке	●	●	●	●	●	●	◐	○
Аеростатичке	○	●	●	●	●	●	◐	○
Котрљајне	◐	○	◐	◐	●	●	●	●

Табела 1. Упоредне карактеристике појединих типова вођица [3]

Услови рада вођица одређени су у основи следећим факторима: притисак (а самим тим и његова променљивост); брзина клизања; подмазивање; температура вођица; контаминација - запрањаност вођица или средства за подмазивање продукција обраде; реверзибилност кретања; периодичност кретања. Најважнија карактеристика је режим трења који се при вођењу остварује.

Оптерећење вођица у току рада је код већине алатних машина променљиво. Код вођица праволинијског кретања, где оптерећење од сила резања представља знатан део укупног оптерећења, већи део пута трења се остварује уз мало оптерећење. При овоме, само део радног хода се остварује под великим оптерећењем вођица.

Брзине клизања зависе од намене вођица, док се код вођица за главна кретања срећу брзине од 0,2 m/s, код машина за провлачење, до неколико метара посекуди код каруселстругова, дотле су брзине клизања код вођица за праволинијско кретање у границама од неколико милиметара у минути до неколико метара у минути. По правилу, брзина клизања при позиционирању – брзом померању извршног органа у потребну позицију прелази вредност 1 m/min.

Подмазивање, као један од веома важних фактора за рад вођица, зависи како од врсте и облика вођица, тако и од прибора који се у ту сврху примењују код машине.

Температура, посебно у случају када се ради о вођицама течног трења, не треба да прелази вредност 40-50°C, изузетно до 60°C код кружног водења столова каруселстругова. Код вођица машина са мањим брзинама клизања температура клизних - контактних површина је нешто мало већа од температуре околине.

Могућност загађивања контактних површина металном струготином, песком, абразивом и др., многоструко повећава хабање вођица и код граничног и мешовитог трења повећава губитак енергије.

Периодичност рада вођица може се изразити коефицијентом К, који дефинише односвремена трајања рада вођице одређеног кинематског пара и времена трајања замене изражен у процентима. Код масовне производње, вредност коефицијента К је

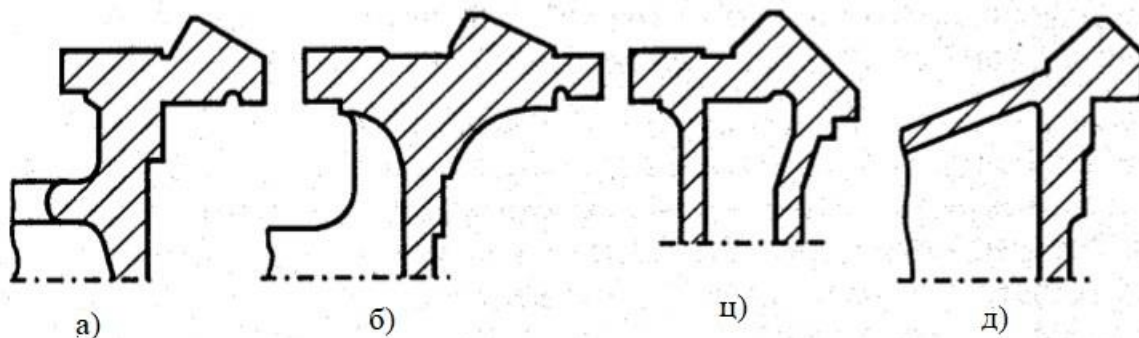
највећа. Што се тиче врсте кретања, код главног кретања је вредност коефицијента K обично већа него код вођица за помоћна кретања. Без улажења у вредности овог фактора за разне машине, рецимо само да се он креће од 1% (код координатних машина за бушење и разбушивање) до преко 60% (код машина за округло брушење у великосеријској и масовној производњи).

2.3 Материјал за клизне вођице

Непосредни контакт спрегнутих површина код вођица са граничним трећем захтева веома одговоран приступ при избору материјала. Лоше изабран материјал доводи до повећаног хабања које, услед неравномерног интензитета по дужини водења, утиче у великој мери на тачност обраде.

Материјал за вођице може бити метални или неметални. Далеко већу примену до сада су имали метални материјали, али се у новије време све више прелази на пластичне. Најједноставније су гвоздене вођице од сивог лива, урађене изједна са носећим делом – постолем, али при интензивном коришћењу не обезбеђују довољно дуг век трајања. Отпорност на хабање вођица од сивог лива знатно се може повећати одговарајућом термичком обрадом. Каљење једне од спрегнутих површина индукционим путем струјом високе учестаности, снижава хабање вођица и до два пута, док индукционо каљење обе контактне површине доводи и до четвороструког смањења хабања у поређењу са некаљеним површинама. Уколико се врши каљење само једне спрегнуте површине, повољније је термички обрадити непокретни део (постолје) по целој дужини вођења јер се конфигурација ових површина при кретању директно преноси на покретни део, па би неравномерно хабање довело и до нетачности обраде.

Додавањем легирајућих елемената ливеном гвожђу од кога се израдују вођице, повећавају отпорност на хабање само уколико се оне окале до високе тврдоће. Међутим, уколико су вођице израђене изједна са основним елементом, није економично да се цео основни елемент уради од легираног ливеног гвожђа, а уколико се раде одвојене вођице, погодније је користити челик. Неколико примера вођица од ливеног гвожђа урађених изједна са постолем, приказано је на слици 11. Највећу крутост обезбеђује облик ц, код кога је вођица повезана са два, приближно нормална зида, за само постолје.



Слика 11. Могући облици вођица израђених изједна са постолем [2]

Отпорност на хабање вођица од сивог лива може бити веома повећана применом специјалних превлака. Хромирањем вођица слојем тврдог хрома дебљине 25-50 μ m обезбеђује се тврдоћа до око 70 HRC, уз одговарајуће повећање века трајања. Уколико се слој хрома равномерно наноси на завршно обрађену површину вођица, може се обезбедити постојана дебљина хромне превлаке од око 2-3 μ m. Поред хромних, код вођица од сивог лива се примењују и молибденске превлаке, као и превлаке од легура које у себи садрже хром. Према неким подацима, наношење превлаке на вођицама повећава њихову отпорност на хабање и до пет пута у поређењу са окаљеним челичним вођицама.

Челичне вођице се израђују као одвојени елементи, који се затим причвршћују за основни део. Код варених челичних постоља се вођице понекад заварују, а код ливених се обично оне завртњима везују за основу. Постоји такође и могућноста да се вођица под притиском убади у претходно израђен жлеб са нешто мањим димензијама, да би се остварио преклоп, али је овај начин неповољан услед своје нетехнолоичности. За израду челичних вођица се обично користе нискоугљенични челици када се, пре завршног брушења вођица, врши цементирање и каљење тако да се оствари висока површинска тврдоћа (до 65 HR) сили се може применити нека друга термичка обрада за површинско отврдњавање. Високоугљенични легирани челици се такође могу користити за израду вођица, али се у том случају препоручује површинско - индукционо каљење.

Веома често се за израду вођица користе и обојене легуре, као што су разне врсте бронзи, које поседују добра антифрикциона својства. У таквим случајевима се обично комбинују вођице од бронзе и челика, иако су карактеристике оваквог клизног пара веома добре, због веће цене обојених метала, чешће се користе челичне водице.

Пластичне масе имају веома добре антифрикционе особине, тако да се при њиховој примени не мора користити подмазивање. Раније су се ове вођице ређе користиле услед мале крутости, али су се у новије време почеле израђивати веома тврде пластичне масе, тако да је њихова примена све чешћа. Постоје углавном два начина који се користе код примене пластичних маса. Код првог се на припремљену површину везује трака од лежишне пластичне масе одређених димензија, дебљина која не прелази неколико милиметара (од 2 до 5). Код другог начина се у претходно припремљен канал на вођици улива пластика, која после отврдњавања има довољно велику тврдоћу. Дебљина нанетог слоја је обично мања него код пластичних трака.

У табели 2 приказане су вредности коефицијента трења за различите материјале вођица

Спрегнути материјал	Коефицијент трења			
	Статички		Кинематички	
	суво	подмазано	суво	подмазано
челик-челик	0.18	0.12	0.10	0.09
челик-сиви лив	0.19	0.10	0.16	0.10
челик-бронза	0.11	0.10	0.10	0.09
челик-турцит	—	—	—	0.04-0.08

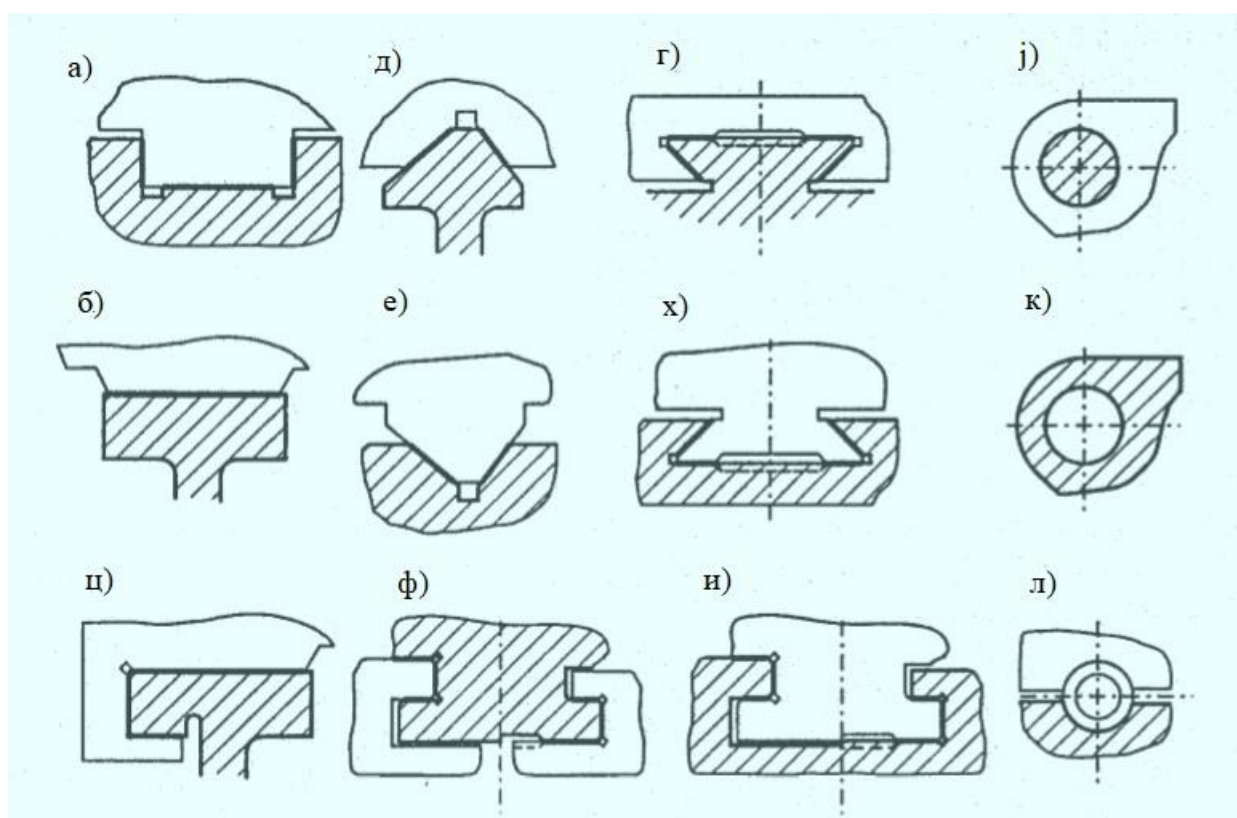
Табела 2. Коефицијент трења различитих материјала клизних парова [3]

3. КЛИЗНЕ ВОЂИЦЕ ЗА ПРАВОЛИНИЈСКА КРЕТАЊА КОД МАШИНА АЛАТКИ

У машинству постоји више облика вођица које врше праволинијско кретање, а то су:

- Правоугаоне (равне вођице)
- Троугласте (клинасте)
- Трапезоидне (ластин реп)
- Цилиндричне
- Комбиноване

Осим ових врста користе се и комбиноване вођице од различитих облика. Неки облици попречног пресека вођица су приказани на слици 12.

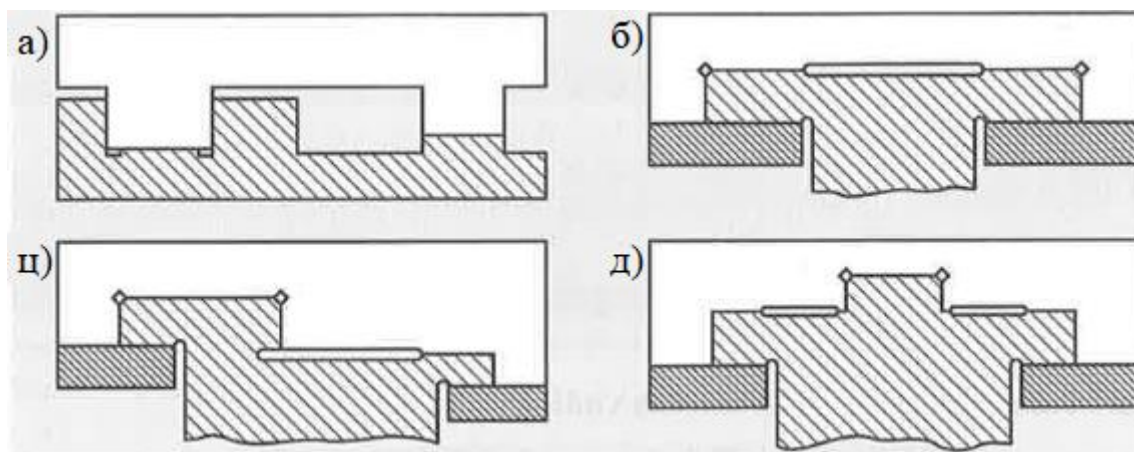


Слика 12. Облици попречног пресека вођица [2]

Сваки претходно поменути пресек може имати обухватни или обухваћени облик. Код оних вођица где постоји могућност доспевања производа обраде између контактних површина препоручује се обухваћени облици (хоризонтална вођица). Ако је обезбеђена добра заштита клизних површина препоручују се обухватајући облици због бољег подмазивања.

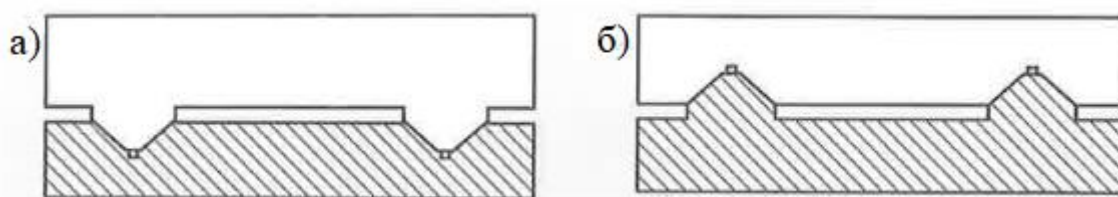
Правоугаоне вођице (а,б,д,ф,ј на слици 12), ове вођице су једноставне за израду и лако им се контролише геометријска тачност. Данас оне налазе све већу примену и код машина са програмским управљањем, због једноставне и поуздане могућности

подешавања зазора. Правоугаоне вођице су, као што им и само име каже, израђене као правоугаони профил, примери ових вођица су приказани на слици 13. Оне добро задржавају средство за подмазивање, али је неопходно заштитити је од нечистоћа.



Слика 13. Конструкциони облици правоугаоних клизних вођица [3]

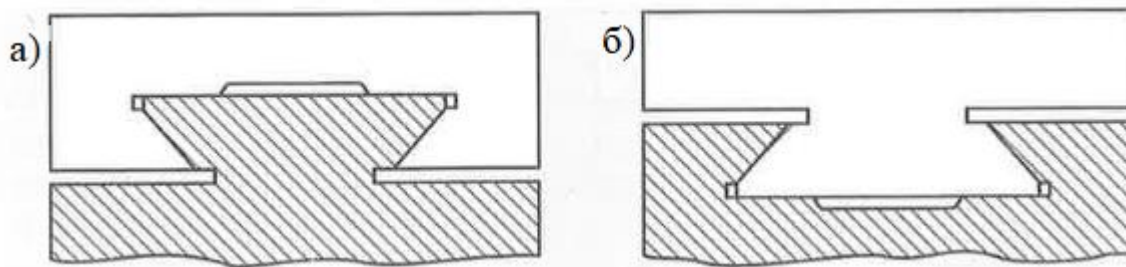
Троугласте вођице (д,е,г,х на слици 12), ова врста вођица има правилно вођење, а код отворених (д,е на слици 12) имају и могућност аутоматског регулисања зазора под дејством тежине дела који води. Негативна страна ових вођица је што угаони положај радних површина отежава њихову контролу и израду. Троугласте вођице могу бити израђене као удубљене или испупчене. Удубљене троугласте вођице одликује карактеристика доброг задржавања уља за подмазивање, ово је добро при малим брзинама кретања (дугоходна рендисаљка или равна бушилица). Испупчене вођице одликује добро одвођење струготине. На слици 14 приказани су конструкциони облици код оба типа троугластих вођица.



Слика 14. Конструкциони облици троугластих клизних вођица [3]

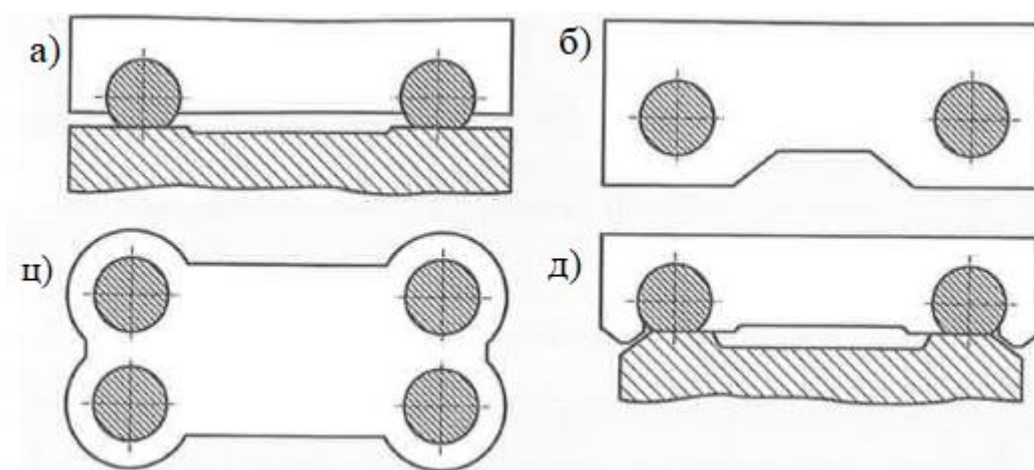
Овај тип вођица се најчешће примењује код стругова, главна предност овог типа вођице је што се трошењем вођица не мења њихов геометријски однос са осом главног вретена.

Трапезоидне вођице су још теже за конструисање од троугластих вођица, али обезбеђују компактну конструкцију. Њихови системи регулације зазора су једноставни, али не обезбеђују велику тачност спрезања. На слици 15 приказани су конструкциони облици трапезоидних клизних вођица.



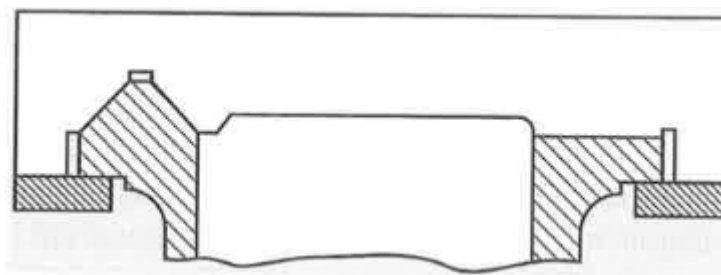
Слика 15. Конструкциони облици трапезоидних клизних вођица [3]

Цилиндричне вођице (ј, к, л на слици 12), оне ако су израђене као обухваћене не обезбеђују довољно велику крутост и примењује се из ових разлога углавном само при мањим дужинама хода. Обухватајућа верзија цилиндричних вођица се одликује сложеном израдом полукружних канала. На слици 16 приказани су конструкциони облици цилиндричних вођица.



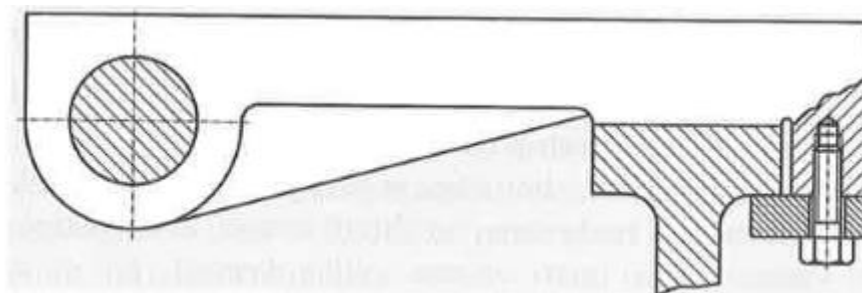
Слика 16. Конструкциони облици цилиндричних клизних вођица [3]

Комбиноване вођице се врло често примењују како би се објединиле добре карактеристике претходно објашњених типова вођица. На пример, како би се избегао бочни зазор и осигурала велика моћ ношења, при том да израда вођице буде јефтина, често се користи комбинација правоугаоне и троугласте вођице, као што је и приказано на слици 17.



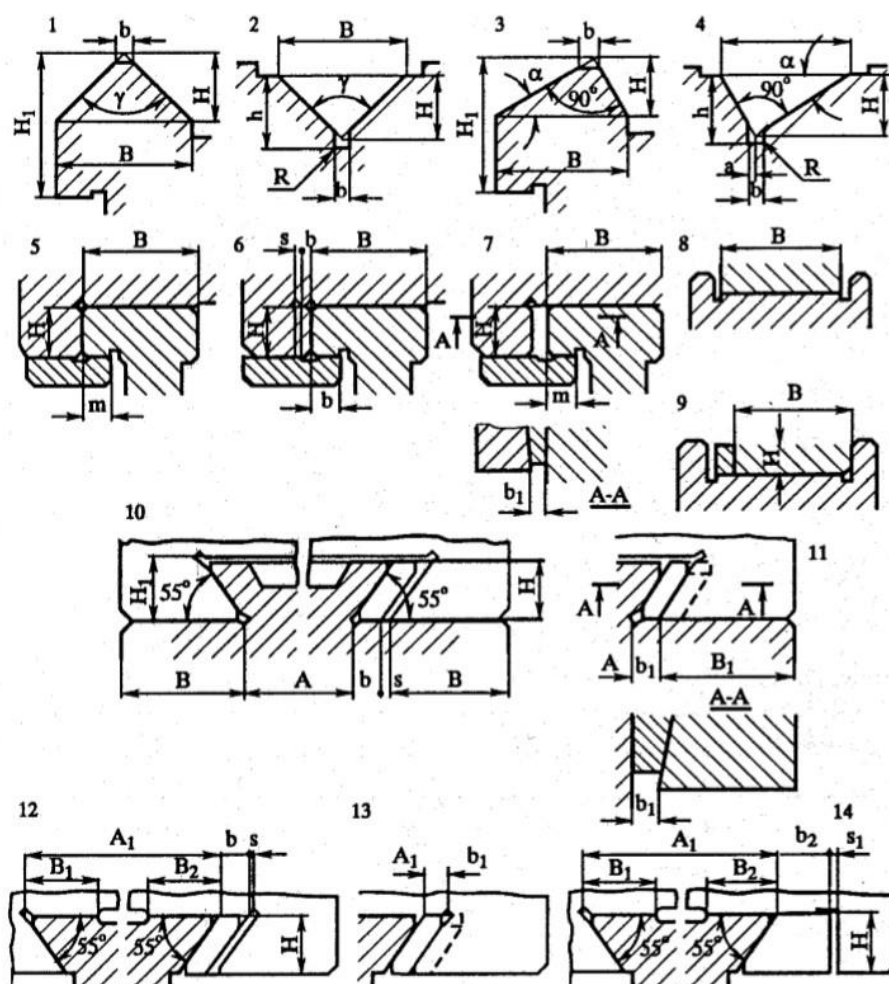
Слика 17. Комбиновање правоугаоних и троугластих вођица [3]

Још један пример комбиноване вођице је комбинација цилиндричне и призматичне вођице, мана ове комбинације је што она има ограничену дужину вођења, пример ове вођице је приказан на слици 18.



Слика 18. Комбиновање цилиндричних и правоугаоних вођица [3]

Основни облици пресека клизних вођица си унифицирани или стандардизовани. Карактеристична димензија вођице је њена висина H . На слици 19 су приказани неки унифицирани попречни пресеци вођица, а у табели 3 су дате препоруке за избор њихових димензија.

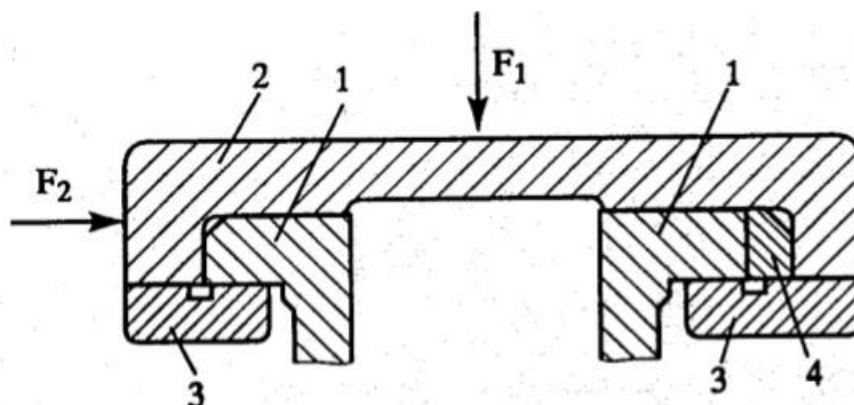


Слика 19. Унифицирани попречни пресеци вођица [2]

Облик вођица	H	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	60	80	100	
Троугласте симетричне и несиметричне	H ₁	≈2H			(2,2÷2,3)H			(2,5÷2,7)H					-		
	b	≈0,2H													
	h	H+1						H+2			H+3		H+4		
	R	0,3		0,5		1		1,5		2	3		4		
Правоугаоне	B	-	≈(1,5÷1,7)H			≈2H		≈2,5H		(3÷3,2)H			≈4H		
	m	≈0,4H						≈0,5H		≈0,6H					
	b	-	≈0,3H						≈0,25H						
	b ₁	-	≈0,3H		≈0,25H		≈0,25H ₀		≈0,2H		≈0,15H				
	s	-	0,5						1						
Трапезоидне "ластин реп"	H ₁	H+0,5					H+1				H+1,5				-
	b	5		6	8	10	12	15		18	18	22	-		
	b ₁	-			3	4	5	6	8	10		12	15		
	b ₂	-					20		25	32		40	45		
	s	0,5						1							
	s ₁	-					1				2				

Табела 3. Димензије попречног пресека вођица приказаних на слици 19 [2]

Како би вођење покретног дела, неопходно је изабрати оптималне зазоре између покретног и непокретног дела. На слици 20 приказан је визуелни пример подешавања зазора. Приликом конструисања вођица неопходно је предвидети и могућност за регулисање зазора. Како би се ово обезбедило користе се летве и клинови призматичног облика (тачка 4 на слици 20), они се постављају између непокретног (тачка 1 на слици 20) и покретног (тачка 2 на слици 20) елемента, ова радња се најчешће врши на покретном делу. Положај овог уметка зависи од смера дејства хоризонталних сила, конкретно, они се постављају на растерећену страну носећег елемента. Код покретних елемената неопходно је предвидети додатне призматичне елементе (тачка 3 на слици 20), зато што се код овог елемента може јавити вертикално оптерећење, односно овиме се спречава одизање елемената. Због ових опасности неопходно је предвидети и могућност за подешавање зазора између елемената и постоља. Подешавање зазора се може свести на хоризонтално или аксијално померање уметака, у неким случајевима неопходно је и да се накнадно пребруси поједини елемент.



Слика 20. Принцип подешавања зазора [3]

3.1 Подмазивање клизних вођица

Подмазивање клизних вођица се може извршити на два начина, први начин је ручно уз помоћ уљних мазалица, а други преко аутоматског система за централно подмазивање. У општем случају због малих брзина кретања праволинијских покретних елемената, подскопова или склопова, код алатних машина се не може остварити хидродинамички ефекат подмазивања, па због тога се не може ни применити хидродинамичка вођица, овде је од пресудног значаја избор материјала оних елемената који су у контакту, квалитет обраде клизних површина и њихово одржавање. Препоручују се да се примене материјали различитих тврдоћа за клизне парове.

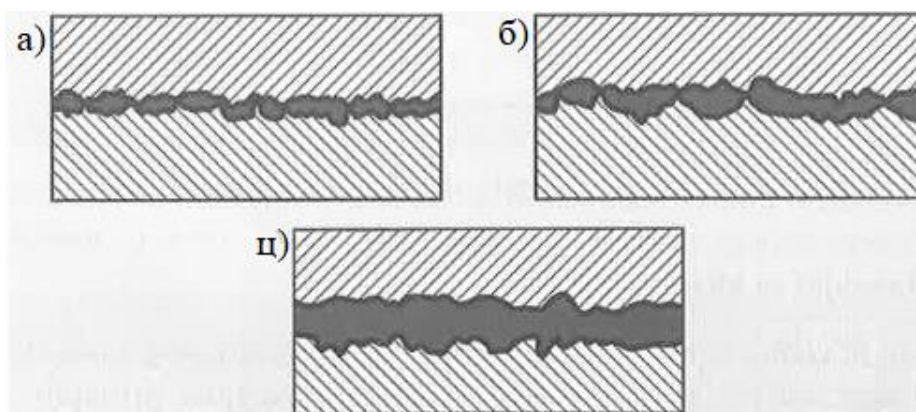
Код клизних вођица, површина вођеног и оног који се води елемена су у контакту па се између њих може поставити врло танак слој мазива, који има различите чврстоће и носивост. У зависности од услова рада и подмазивања, на слици су приказани облици трења који се могу јавити као [2] :

- Гранично трење
- Мешовито трење
- Течно трење

Гранично трење(слика 21 а)), ово трење се јавља у условима где су брзине кретања врло мале, такође се јављају при релативно великом оптерећењу. Код овог трења функција мазива не долази до свог изражаја зато што при релативно малим брзинама кретања не формира се довољно велики потребан слој мазива, који би раздвојио контакт између површина.

Мешовито трење (слика 21 б)), ово трење се јавља када се тарне површине не додирују директно, него оне клизе преко својих граничних слојева, зато што врхови неравних тарних површина раздваја врло танки слој мазива. Ово трење је карактеристично за област уобичајених брзина кретања код извршних алата машина алатки. Због једноставне конструкције и ниске цене израде, овај тип вођица је најчешће примењен код скоро свих типова машина алатки.

Течно трење (слика 21 ц)), овај тип трења се јавља тамо где се тарне површине не додирују јер су површине раздвојене континуираним слојем мазива.

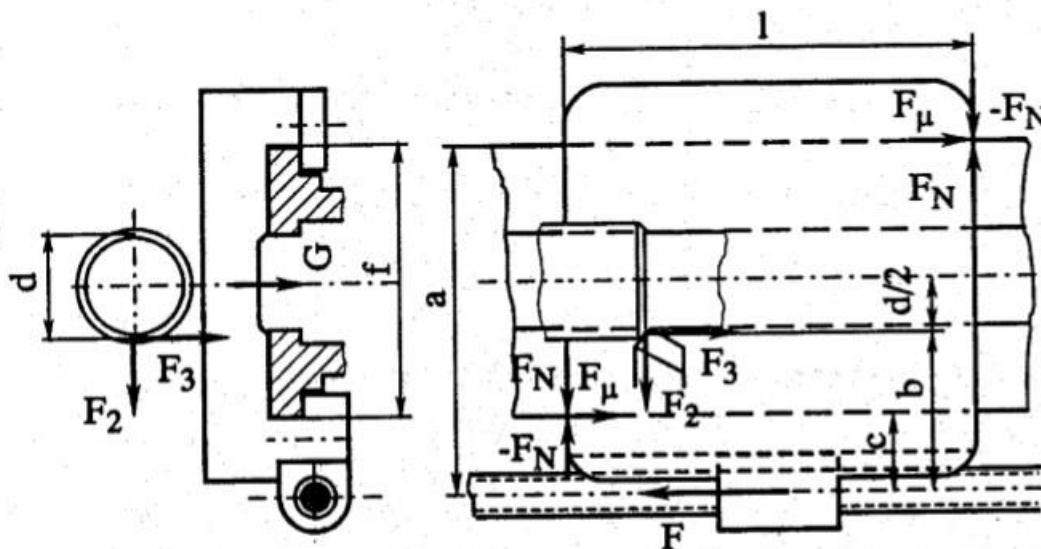


Слика 21. Различите врсте трења у зависности од подмазивања: а) Гранично, б) Мешовито, ц) Течно [3]

3.2 Провера стабилности вођица

Провера стабилности вођица се може извршити тако што се испита вредност стварног притиска, а поред тога се може проверити и њихова стабилност кретања и положаја (разликује се провера отворених и затворених вођица).

Код затворених вођица обезбеђено је кроз саму конструкцију да не може доћи до исклизавања покретног дела машине, па је самим тим провера за ову врсту стабилности је непотребна. Код ове врсте вођица се под одређеним условима, који се односи на конструкцију, али и на коришћење машине, може доћи до отежаног кретања или у крајњем случају може доћи и до блокирања покретног дела. Као пример ове врсте провере узет је супорт универзалног струга који је приказан на слици 22, он се води помоћу две равне вођице, а погон се врши преко завојног пара. Погонска сила која се јавља на навртки (F), мора да савлада свако оптерећење које се појављује у супорту (спољашње силе и силе у самом систему).



Слика 22. Провера затворених вођица на самокочење [2]

- F_1, F_2, F_3 - Компоненте силе резања
- G - Укупна тежина супорта
- F_N - Нормална сила
- F_μ - Сила трења

$$F = F_3 + 2 \cdot F_\mu = F_3 + 2 \cdot \mu \cdot F_N$$

$$F_\mu \cdot c + F_\mu \cdot a = F_N \cdot l - F_3 \cdot b$$

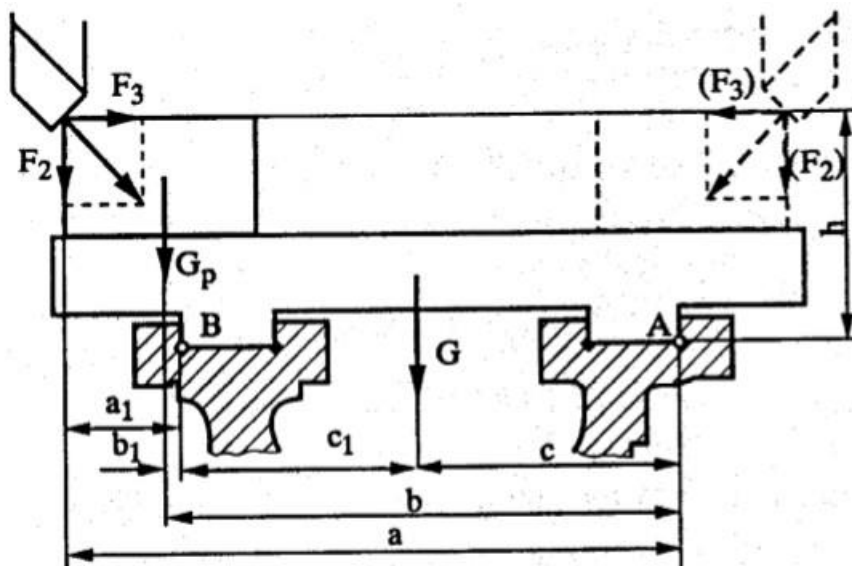
$$F_N \cdot [l - \mu \cdot (c + a)] = F_3 \cdot b$$

$$F_N = F_3 \cdot \frac{b}{l - \mu \cdot (c + a)}$$

$$F = F_3 \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot \mu \cdot b}{l - \mu \cdot (c + a)} \right]$$

Као што је приказано претходним формулама, величина неопходне погонске силе је већа од силе помоћног кретања F_3 . Ова сила доста зависи од коефицијента трења и геометријских величина самог супорта.

Код отворених вођица, а ово се пре свега односи на вођице ранијих столова, дугоходних рендисаљки, глодалица и сл. Провера се код ових вођица своди на могућност исклизнућа радног стола са вођица, уколико ово није спречено додатном конструкцијом. Провера радног стола код дугоходне рендисаљке приказано је на слици 23.



Слика 23. Провера отворених вођица на претурање [2]

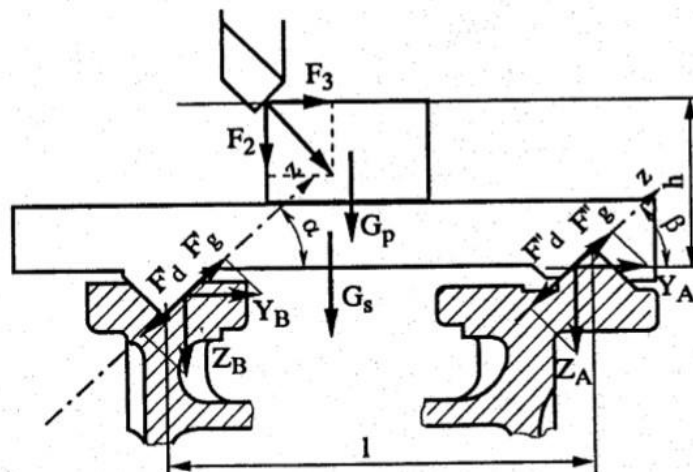
- F_1, F_2, F_3 - Силе резања
- G - Укупна тежина супорта

Оптерећење чине силе резања и силе тежине радног стола, као и сам предмет обраде (ове силе не могу бити занемарене због своје величине). Код ове врсте провере се може закључити да за сваки положај нападне тачке морају важити следећи услови:

$$G \cdot c_1 + F_3 \cdot h > F_2 \cdot a_1 + G_p \cdot b_1$$

$$G \cdot c + F_2 \cdot a + G_p \cdot b > F_3 \cdot h$$

Провера могућности исклизнућа је приказана на слици 24.



Слика 24. Провера отворених вођица на исклизнуће [2]

Како би ова провера била успешна неопходно је да се испуни услов да су силе на површини клинасте вођице F_a и F_b увек веће од 0 тј. да увек делују ка самој вођици. На примеру који је представљен који се води уз помоћ две клинасте вођице, ова провера може да се сведе на један једноставан услов да резултујућа сила у равни мора деловати ка вођици, што је представљено и формулом:

$$\sum F_z' < 0 \text{ и } \sum F_z'' < 0$$

4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ УРЕЂАЈА ЗА МОДЕЛСКА ИСПИТИВАЊА

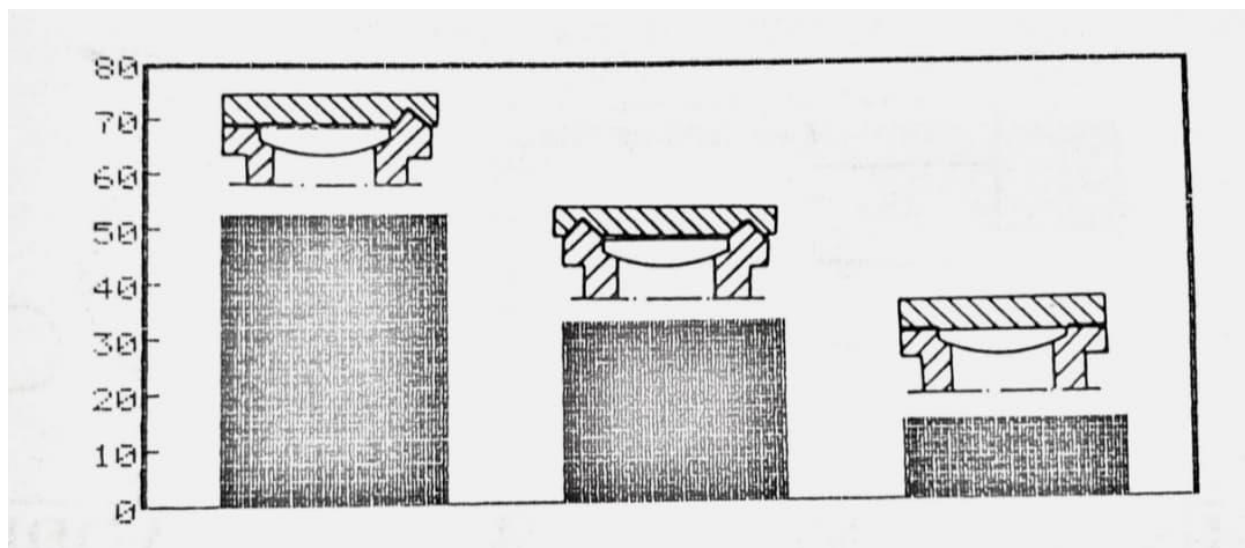
У циљу спровођења испитивања линеарних клизних вођица и како се тај систем за дијагностику може практично искористити, развијен је посебан уређај који би испитао функционалност и трајност вођица, а уређај који репликује ту силу је трибометар.

Како би се извршила адекватна анализа услова за остваривање контакта у трибомеханичком систему вођице, прикупљени су податци великог броја алатних машина и узели су се у обзир процеси који се изводе са њима.

Ова анализа се односи на:

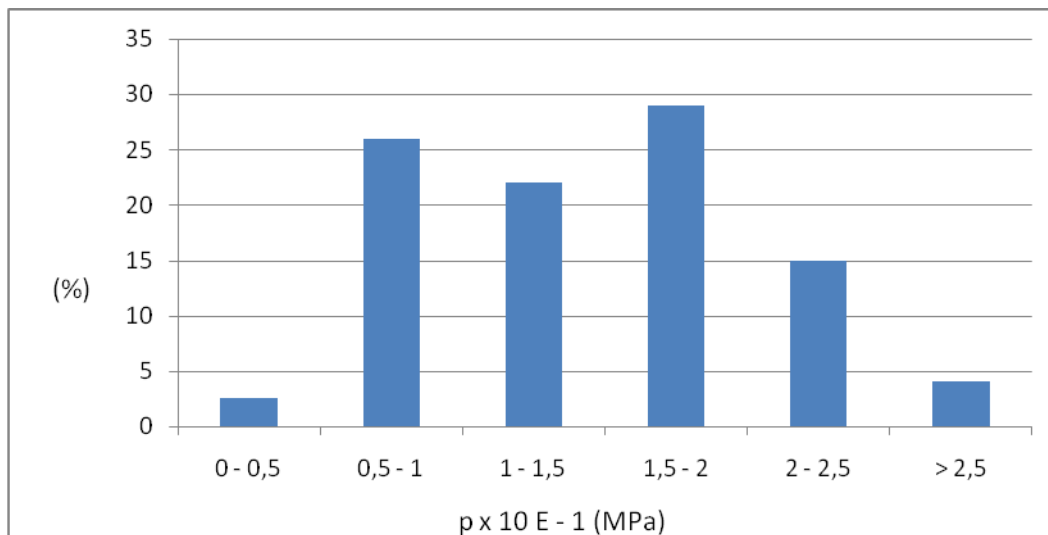
- Номинлна оптерећења
- Брзина клизања
- Материјале контактних елемената
- Топографију контактних површина
- Врсте мазива и услове подмазивања

Анализа геометрије контактних елемената трибомеханичког система вођица је извршена на великом броју стругова, обрађени резултати су приказани на слици 25.



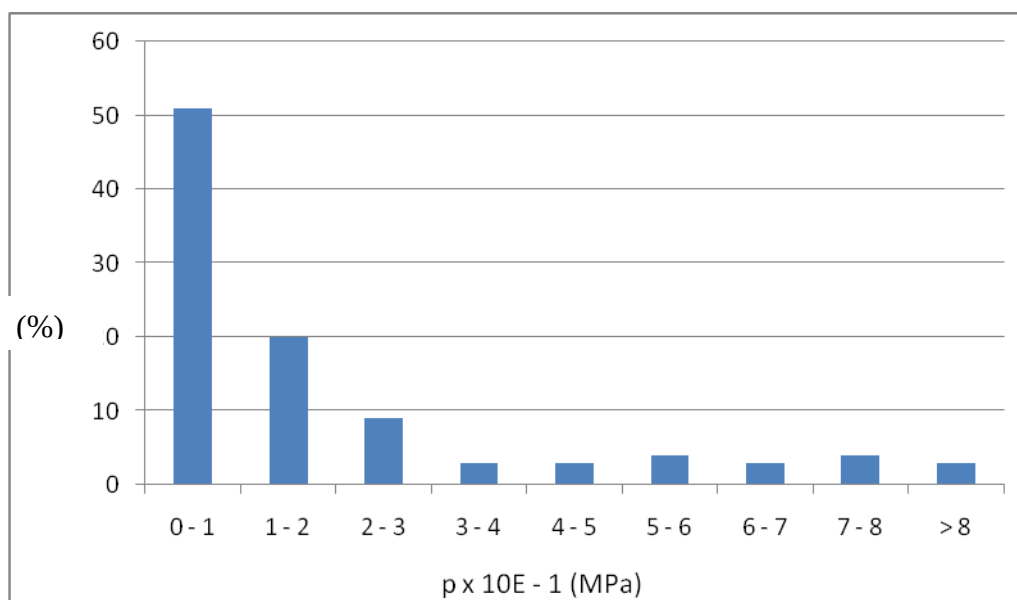
Слика 25. Учестаност примене одређене геометрије контактних елемената трибомеханичког система клизач/вођица код стругова [4]

Анализа великог броја различитих производних операција добијен је довољно велики узорак, за који је учестаност појављивања појединих номиналних притисака приказана на слици 26.



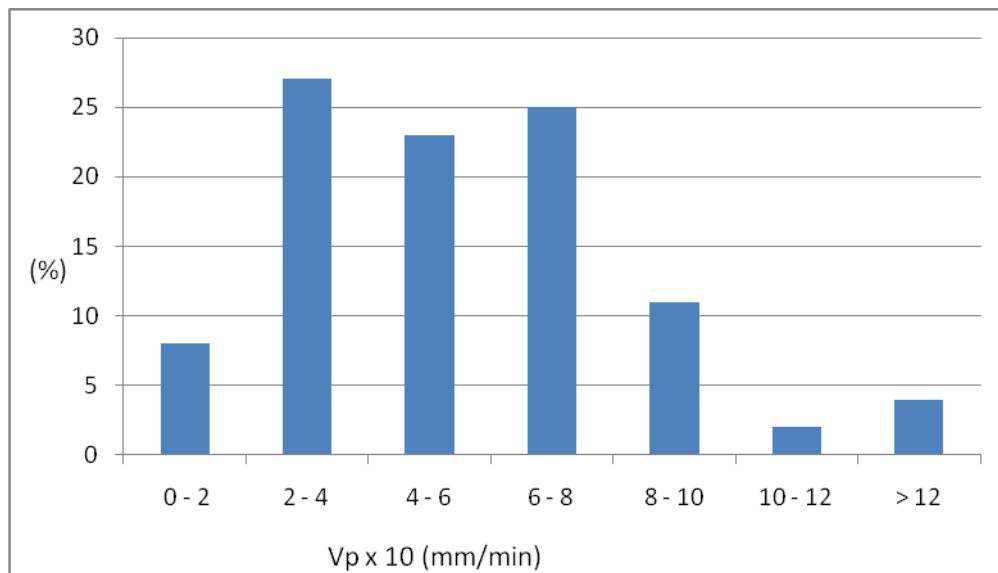
Слика 26. Учестаност појављивања одређеног номиналног притиска у трибомеханичком систему клизач/вођица код струга [4]

Учестаност појављивања одређеног нормалног оптерећења трибомеханичког система вођица вертикалне глодалице, за узорак је узет велики број анализираних производних операција, резултати су приказани на слици 27



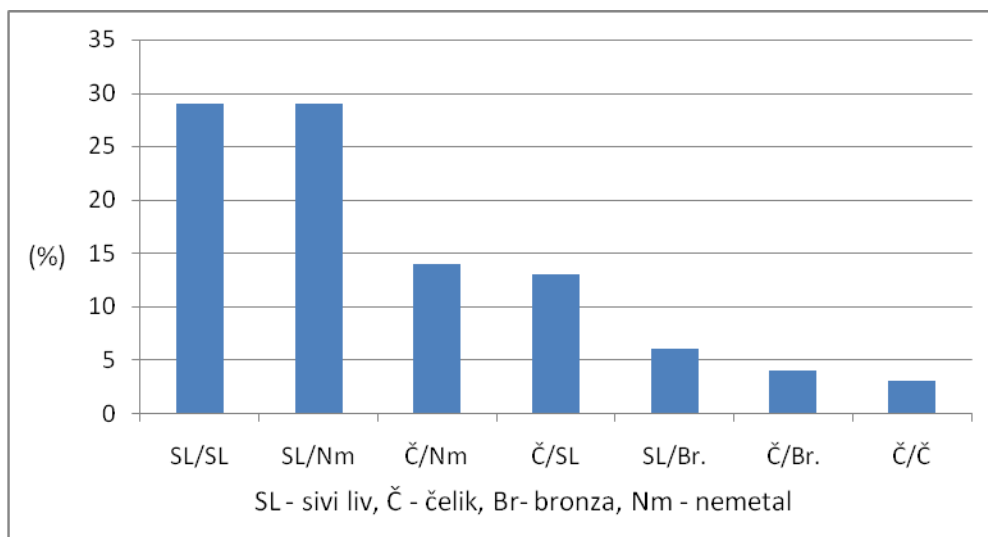
Слика 27. Учестаност појављивања одређеног нормалног притиска у трибомеханичком систему клизач/вођица код вертикалне глодалице [4]

Резултати анализе коришћених брзина помоћног кретања приказани су на слици 28. Анализиране производне операције су изведене у производној целини са широким спектром различитих материјала предмета обраде. Брзине помоћног кретања код производних операција се крећу максимално до 300 mm/min и веће су у односу брзине код глодања.



Слика 28. Учестаност примене одређене брзине помоћног кретања при обради на хоризонталним глодалицама [4]

Учестаност примене појединих материјала за контактне елементе трибомеханичког система вођице су добијени из узорка са великим бројем примера и приказани су на слици 29.

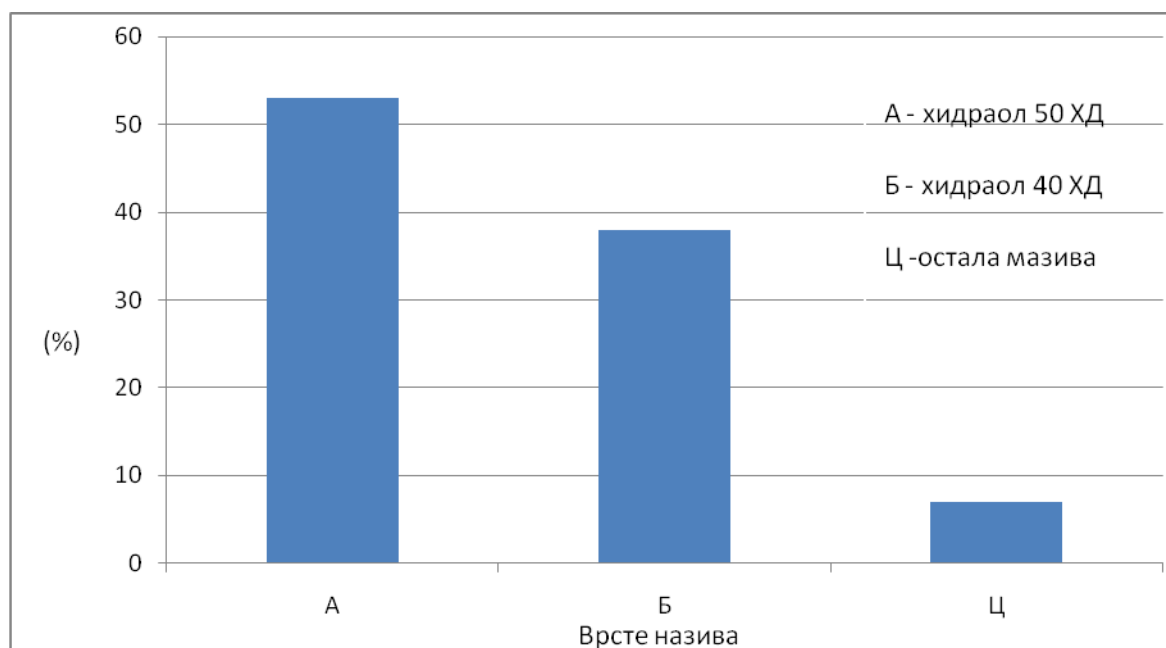


Слика 29. Учестаност примене појединих материјала за контактне елементе трибомеханичког система клизач/вођица [4]

Контактна површина вођице се обрађије брушењем, а клизача туширањем, а ово се ради због специфичности које се пре свега односе на високу тачност налагања, мале брзине клизања, честог заустављања и промене смера кретања. Основни параметри квалитета су [4] :

- Туширања: 12-16 otisaka/in²
- Брушења: N5-N6

На анализираном узорку од великог броја машина у једној фабрици утврђено је да се као мазиво примењују хидраулична уља у 94% случајева. Ова уља се користе код хидрауличних система за пренос снаге, подмазивање вретена и лежајева итд, међутим не препоручује се као мазиво за трибомеханички систем клизача или вођица. Учестаност примене врста уља приказано је на слици 30.



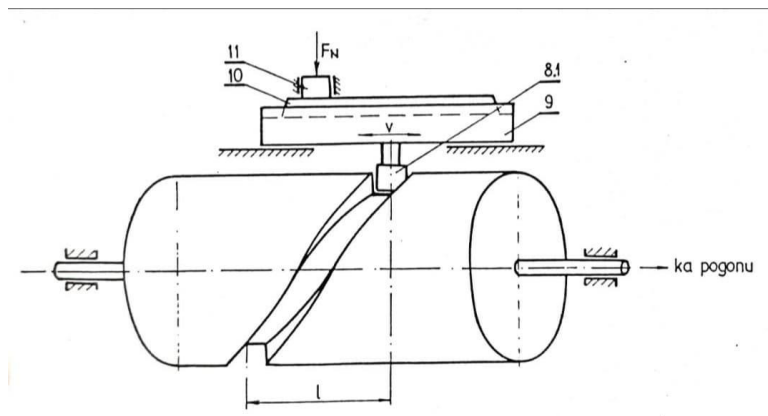
Слика 30. Учестаност примене одређених врста мазива у трибомеханичком систему клизач/вођица [4]

4.1 Анализа различитих трибометара

На слици 31 су приказани неки основни елементи кинематике трибометра за претварање обртног у реверзибилно кретање.

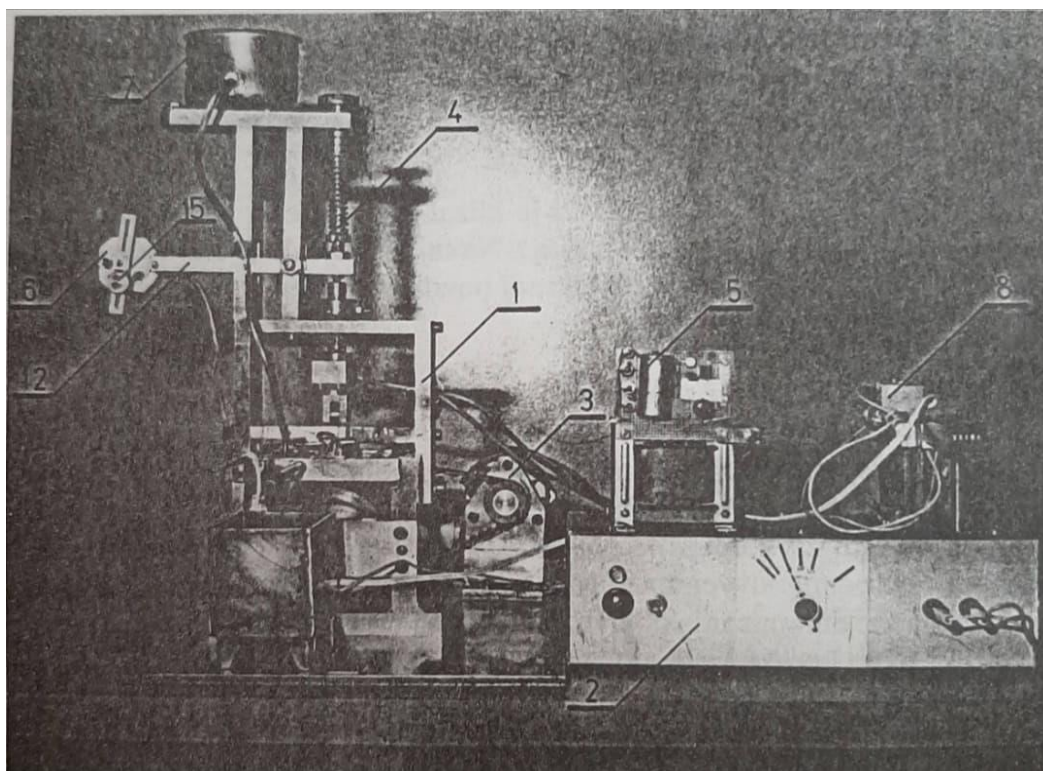
Основне намене трибометра су:

- Континуално регулисање сваке улазне величине која утиче на структуру система
- Стабилност свих улазних параметара код дуготрајних динамичких испитивања
- Лако постављање и скидање испитиваних контактних елемената, уз добро одржавање геометрије
- Једноставна и брза калибрација уграђених динамометара



Слика 31. Елементи кинематике трибометра за претварање обртног у реверзибилно кретање [4]

На основу дефинисаних услова испитивања, у лабораторији за обраду метала и трибологију на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, пројектован је и направљен трибометар који је приказан на слици 32 и намењен је за спровођење експерименталних истраживања.



Слика 32. Трибометар за испитивања утицаја динамичких оптерећења на триболошке процесе [4]

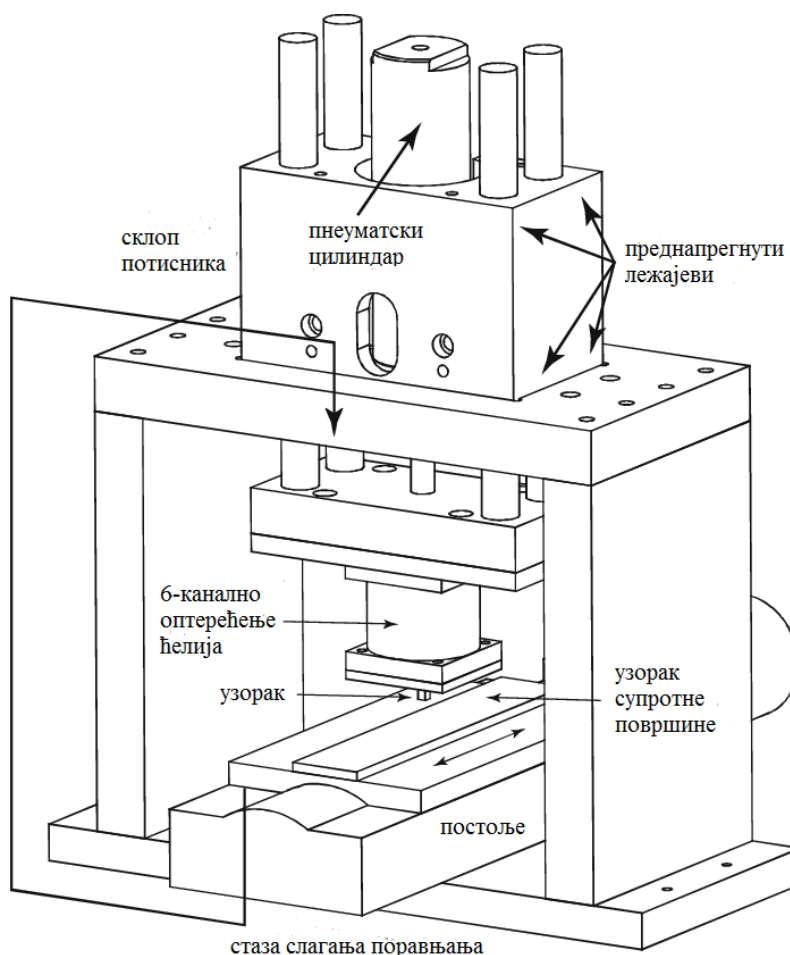
Трибометар се састоји из: 1-нисућа структура, 2-електронски блок за напајање погонског електромотора и регулисање брзине клизања, 3-погонски систем са мотором једносмерне струје, 4-систем за статичко оптерећивање, 5-електронски блок за напајање и регулацију електромеханичког побуђивача, 6-електромеханички побуђивач за обезбеђивање жељеног динамичког оптерећења контактних елемената, 7-систем за

подмазивање контактних површина, 8-електронски систем за мерење броја дуплих ходова.

На сликама 33, 34, 35 и 36 приказани су трибометри који служе за испитивање дозвољених сила које делују на вођицу, на сликама 33 и 34 су приказани трибометри са слип-слап ефектом и њихово померање је омогућено преко корачних мотора док је на слици 36 приказана промена кретања која претвара кружно кретање у праволинијско.

Трибометар приказан на слици 33 је коришћен како би се испитало слагање поравњања и испитање ефекта сторнирања. Машинске толеранције су минимизирани како би се максимално смањила одступања. Приликом теста су дали фрикцију приликом гурања од $\mu_f' = 0,1036 \pm 0,0016$, а приликом вуче трење је износило $\mu_f = 0,1045 \pm 0,0015$ (рађено је 1000 мерења). На основу прорачуна израчунато је да је угаоно непоравњање између $0,21^\circ$ и $0,033^\circ$. Овај трибометар је такође направљен за мале несигурности мерења 6-канално оптерећење ћелија је монтирано директно на узорак и оно даје једину силу према земљи.

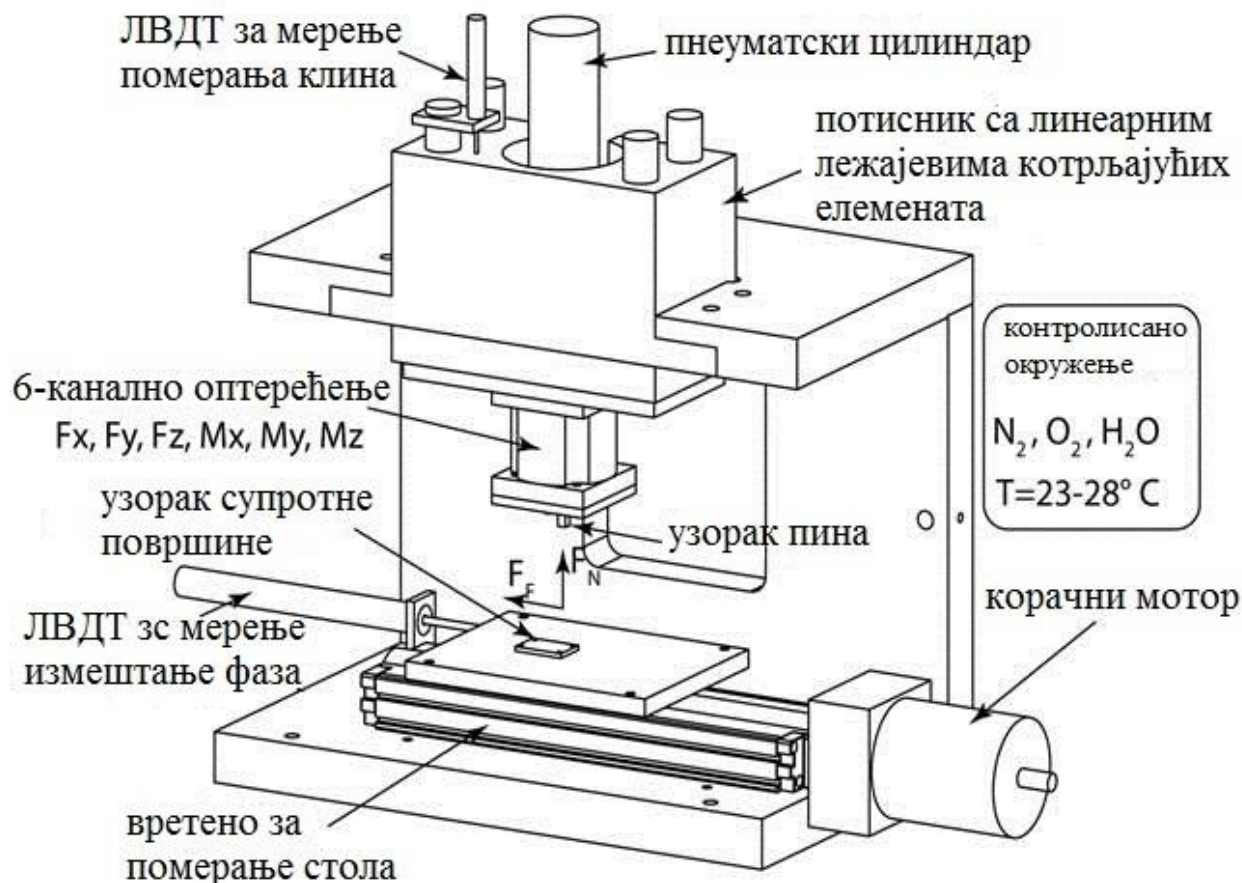
Силе које се јављају у узорку су: $F_y=0,7\text{N}$ и $F_x=0,3\text{N}$.



Слика 33. Линеарни ротациони трибометар [5]

Линеарни ротациони трибометар сличан претходно објашњеном је приказан на слици 34, је конструисан и израђен у прегради са контролисаном окружењем. Преграда може да буде регулисана и до врло ниског нивоа кисеоника, до 0,5% влажности ваздуха. Поред овога може бити извршено тестирање у различитим климатским условима. Осим подешавања климатског подешавања сви други параметри се могу рестирати на овом трибометру као и на претходном.

Силе које се јављају у узорку су: $F_y=0,7\text{N}$ и $F_x=0,3\text{N}$.



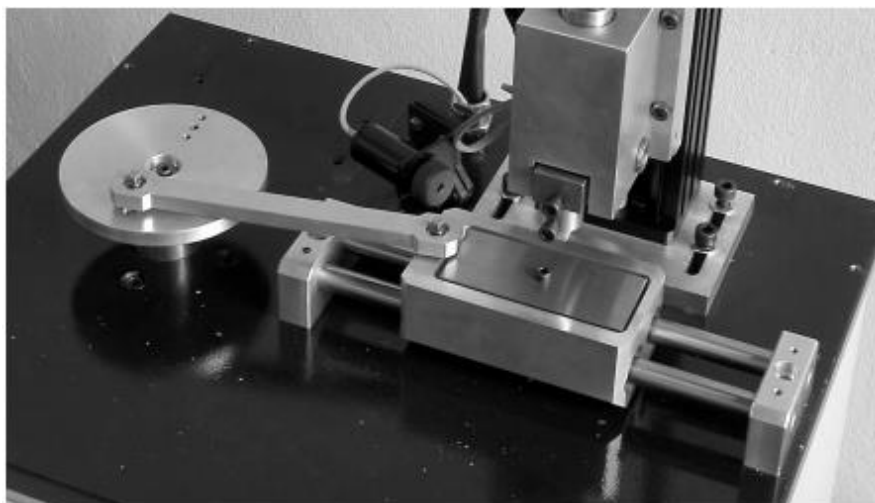
Слика 34. Линеарни ротациони трибометар[6]

Испитивање се може извршити на два различита начина, у зависности од врсте теста. Први тест је за пин на диску и кружно осцилаторно кретање где је тестирани узорак постављен са леве стране основног диска, а други је за линеарно ротационо кретање са десне стране. Уређај који задаје нормалну силу је приказан на слици 34.



Слика 35. Универзални трибометар са кружним кретањем[7]

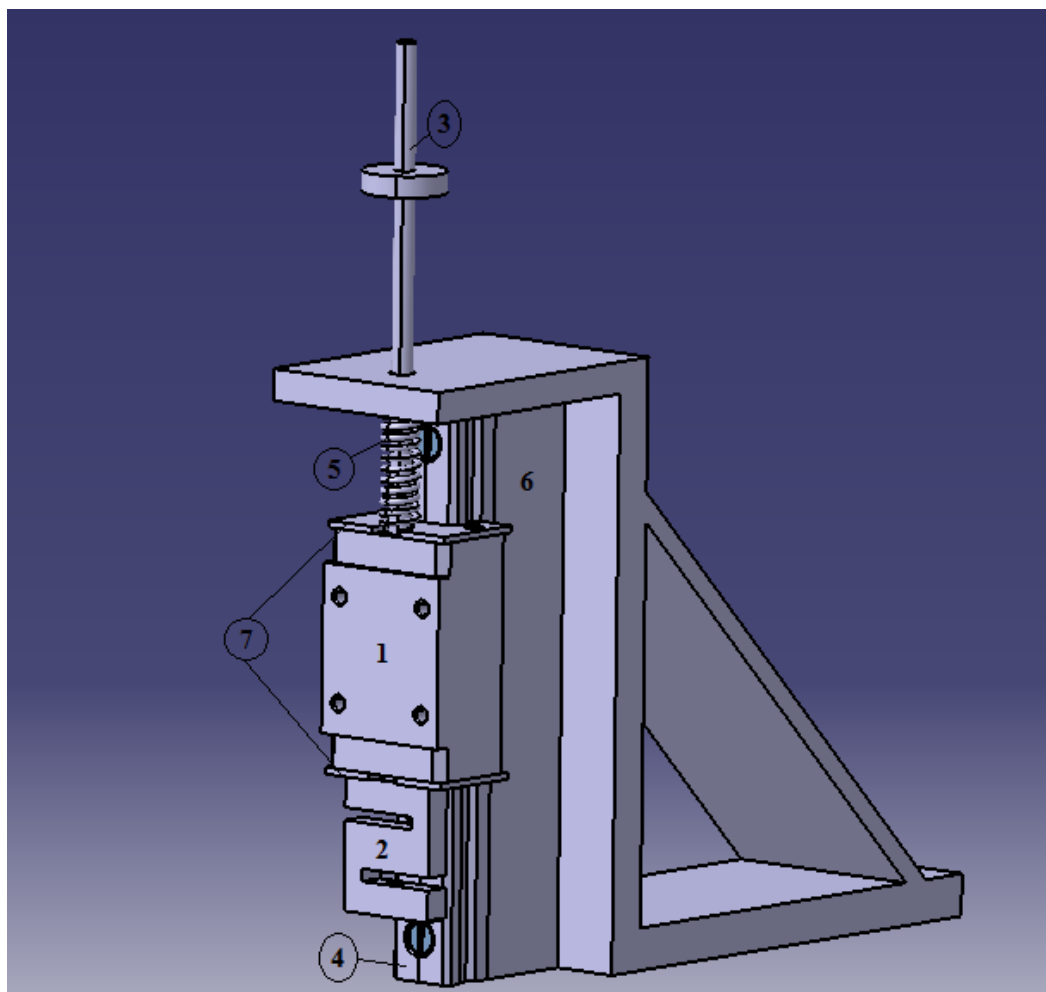
За линеарно кружно кретање специјалног диска, користи се осовина која је повезана за диск. Преко диска се задаје сила која се преко осовине преноси на вођицу која је монтирана измеђи два лежиста и монтирана између две шипе, са занемарљиво малим трењем. Дужина кретања зависи од пречника диска који може бити израђен са пречником од 50, 60, 70, 80, 90 и 100 mm. Пример овог уређаја је приказан на слици 35. Саме карактеристике испитиваног дела се мере помоћу трибометра који је управан на саму вођицу.



Слика 36. Универзални трибометар са ротационим кретањем [7]

4.2 Модел линеарног трибометра

На слици 37 приказан је модел линеарног трибометра са "S" типом сензора за мерење нормалне силе.

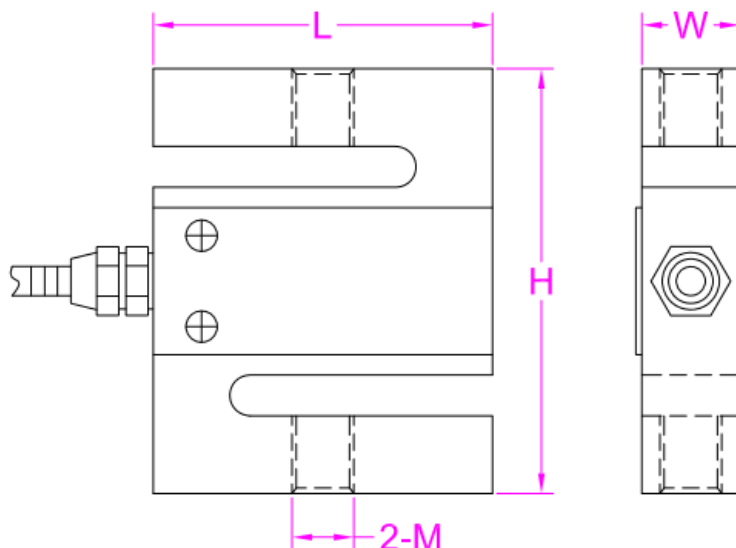


Слика 37. Модел линеарног вертикалног трибометра

Уређај се састоји из следећих елемената:

- 1-клизач
- 2-"S" сензор
- 3-постоље за задавање оптерећења
- 4-вођоца
- 5-опруга
- 6-носач (тело трибометра)
- 7-плочица

На слици 38 је приказан "S" тип сензора са димензијама и дозвољеним оптерећењима које може задати.



Капацитет (kg)	L	W	H	M
5/10/20/30/50	50.8	12.7	63.5	M8*1.25
100/200/300	50.8	19	76.2	M12*1.75

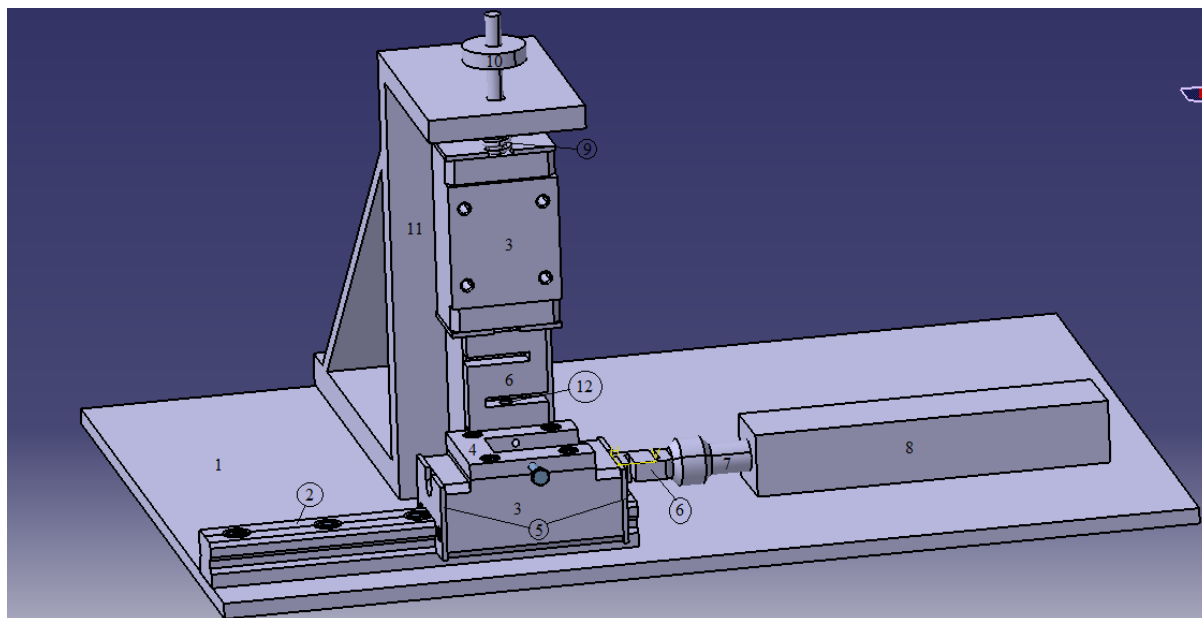
Слика 38. "S" типом сензора за мерење оптерећења [9]

У табели 4 су приказане неке од спецификација "S" типа сензора.

Сигурно преоптерећење	Максимално преоптерећење	Улазни отпор	Излазни отпор	Материјал
150% препорученог оптерећења	200% препорученог оптерећења	$385 \pm 50 \Omega$	$350 \pm 5 \Omega$	Легуре челика

Табела 4. Основне спецификације "S" сензора [9]

Осим претходно наведеног вертикалног трибометра којим се врши мерење нормалне силе, користити се и хоризонтални трибометар који служи за мерење силе трења. Модел овог трибометра приказан је на слици 39.

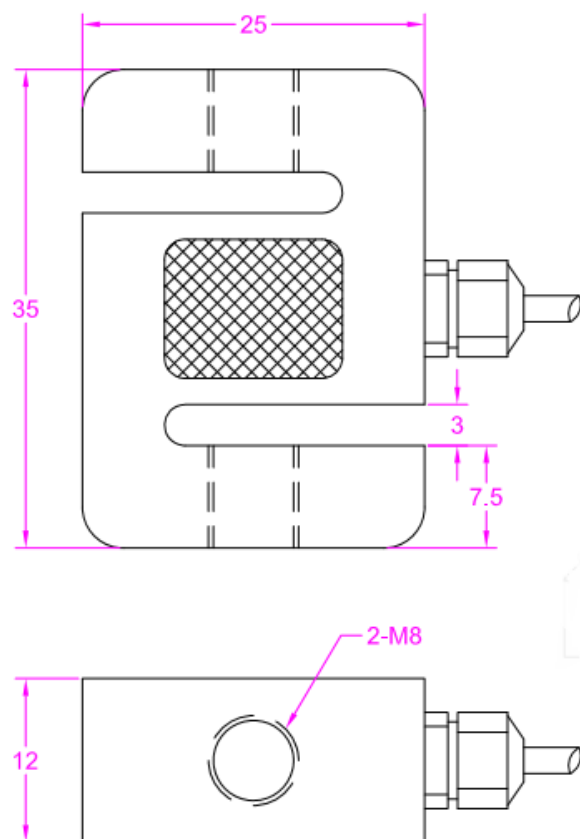


Слика 39. Модел линеарног хоризонталног трибометра

Уређај се састоји из следећих елемената:

- 1-постоље
- 2-вођица
- 3-клизач
- 4-лежиште
- 5-плочице
- 6-"S" сензор
- 7-клипњача
- 8-клип
- 9-опруга
- 10-постоље за задавање оптерећења
- 11- носач (тело трибометра)
- 12-пин

На слици 40 је приказан "S" тип сензора са димензијама и дозвољеним оптерећењима које може задати.



Слика 40. "S" типом сензора за мерење оптерећења [10]

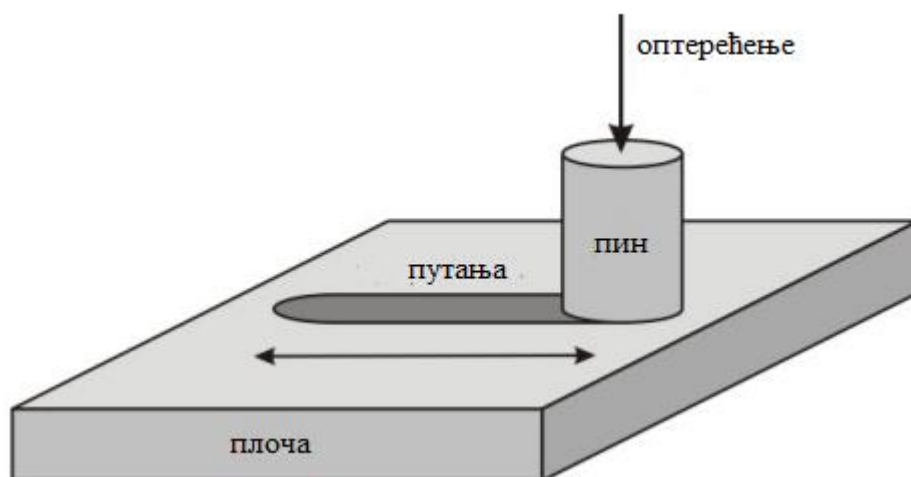
У табели 5 су приказане неке од спецификација "S" типа сензора.

Сигурно преоптерећење	Максимално преоптерећење	Улазни отпор	Излазни отпор	Материјал
150% препорученог оптерећења	200% препорученог оптерећења	$380 \pm 30 \Omega$	$350 \pm 5 \Omega$	Нерђајући челик

Табела 5. Основне спецификације "S" сензора [10]

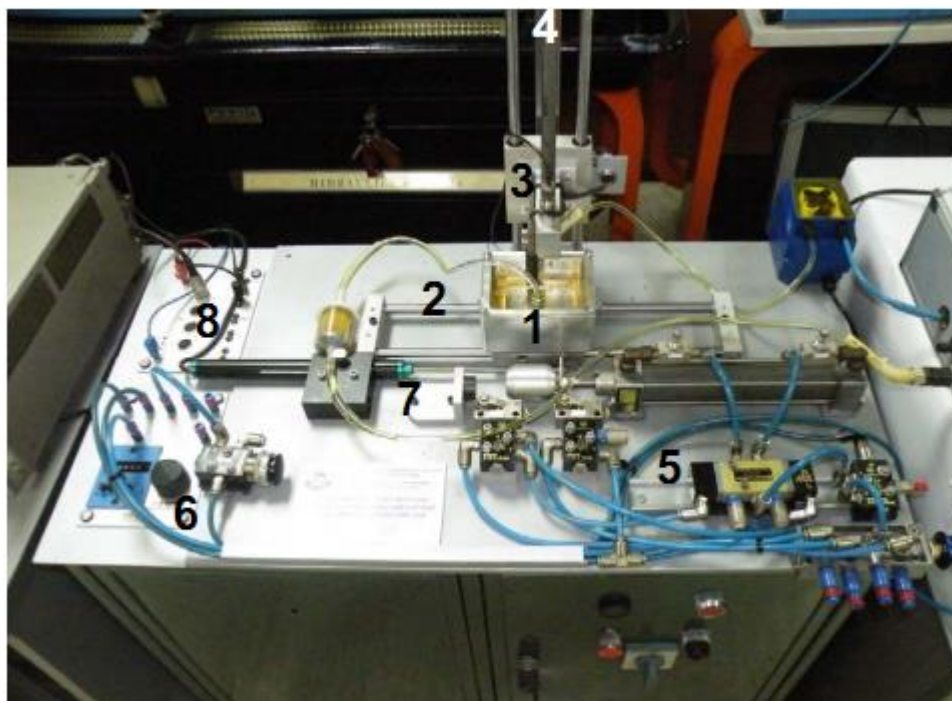
4.3 Трибометар за линеарна испитивања

Пин на плочу трибометар је одабран јер се пин вуче по плочи (сферни облик, линеарно се креће) која је намазана уљем. Овај облик кретања је најчешћи код хидрауличних елемената и карактеристике абразивног трошења је најбитније. Овај трибометар омогућава дефинисање и контролу основних параметара триболошких испитивања, изглед овог дијаграма је приказан на слици 41.



Слика 41. Основни принципи пин на плочу трибометара [8]

На слици 42 приказана је практична примена претходно објашњеног принципа у лабораторијским условима.



Слика 42. Трибометар пин на плочу са линеарним реципроцитетним кретањем [8]

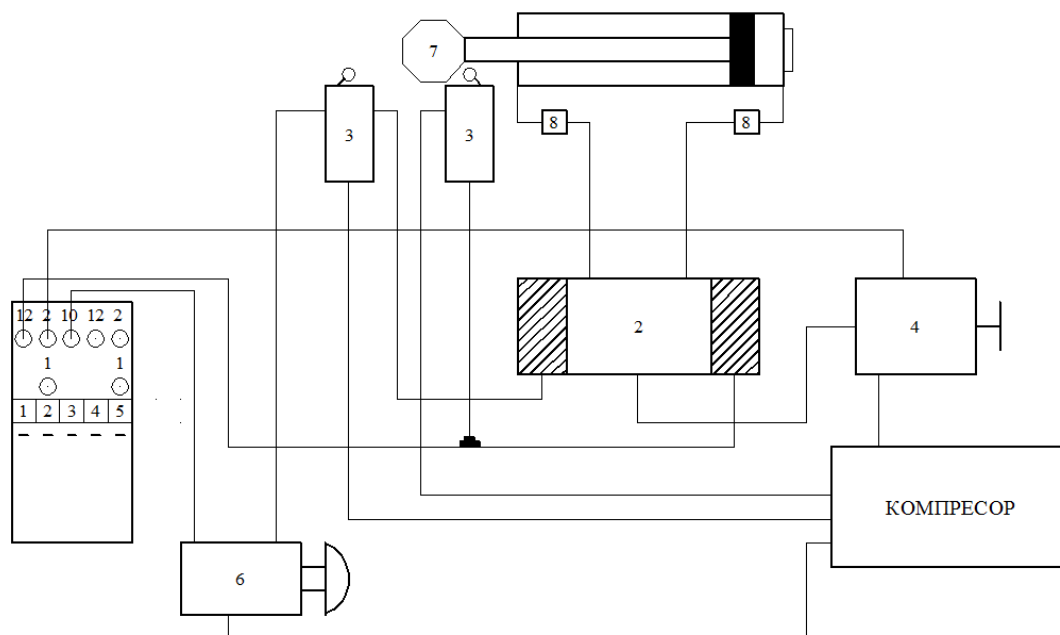
Лабораторијска опрема се састоји из 1-посуда са уљем и плочом, 2-хоризонталне линеарне вођице, које се крећу док је пин стационаран, 3-носач пина, 4-вертикалне линеарне вођице, 5-пнеуматски систем погона, 6-динамички бројач циклуса, 7-фиксирана водилја, 8-панел са конекцијама. У нашем испитивању није било потребно користити уређај 1-посуда са уљем и плочом, а остали делови су модификовани по потреби, на тачку 3 је постављен сензор и додат је уређај за задавање оптерећења.

Пнеуматски систем погона трибометра системом је приказан на слици 43, он се састоји од пнеуматског цилиндра (1), вентил који врши дистрибуцију сила помоћу ваздуха 5/2 (2), два пнеуматски ограничена прекидача (3), пнеуматски логички вентил 3/2 (4), пнеуматски бројач циклуса са ресет дугметом (6). Ограничавајући прекидачи ограничавају ударац клипа који је фиксиран на склоп. Прекидачи су фиксирани и дужина хода клипа је одређена дужином крајњег дела цилиндра (7) који активирају ограничење прекидача.



Слика 43. Пнеуматски систем погона [8]

Пнеуматска шема система за испитивање омогућава симулацију различитих реалних услова у којима вођице обављају своју функцију. Циљ овог испитивања је да се одреди примена вођица у реалним условима код машина (струг, глодалица, дугоходних рендисаљки и равних бушилица). На слици 44 је приказана пнеуматска шема уређаја на ком се вршила испитивања вођица.



Слика 44. Пнеуматска шема система за испитивање

Овај уређај за испитивање линеарних клизних вођица се састоји из пнеуматског цилиндра (1), пнеуматски управљаног разводног вентила (5/2 (2)), два пнеуматска крајња прекидача (3), пнеуматског логичког вентила (3/2 (4)), пнеуматског бројача циклуса (5) и тастера за ресетовање (6). Крајњи прекидачи ограничавају ход клипњаче цилиндра које је причвршћена за посуду са плочом. Прекидачи су фиксирани, а дужина хода се одређује преко варирања дужине цилиндричног наставка клипњаче којом се врши активирање крајњих прекидача. На оба командна вода којим се доводи компримовани ваздух до цилиндра постављени су пригушни вентили који регулишу брзину кретања клипњаче и у једном и у другом правцу. Преко бројача циклуса (5) може се задати потребан број циклуса. Приликом достизања постављеног броја циклуса бројач даје сигнал којим се преко логичког вентила (4) зауставља кретање цилиндра. Пнеуматским тастером (6) се ресетује број циклуса.[8]

5. ЗАКЉУЧАК

У раду је представљена основна функција вођица, систем рада и област примене. Анализиране су различите врсте вођица у зависности од свог облика, као и у зависности од начина рада и представљене су области примене и карактеристике тих вођица. Размотрене су механичке карактеристике вођица, односно силе које се јављају у њој као и нежељене силе отпора.

Размотрене су све негативне појаве као што је трење и представљена су решења за те проблеме. Приликом анализирања размотрени су сви материјали који се користе за израду самих вођица као и материјали за израду њихових клизача. Приказани су попречни пресеци клизача и вођица како би се визуелно представили геометријски облици и начин њиховог рада.

Размотрена је практична примена вођица и учестаност примене типова, мазива и облика, на основу великог броја узорака из фабрика и дати су графички резултати истраживања рада вођица, истраживање је спроведено на великом броју узорка, дакле са сигурношћу се може рећи да су резултати истраживања поуздани и сигурни за дати тренутак.

За крај је одрађено експериментално испитивање у лабораторији где су се у скоро идеалном и у реалним условима испитивале карактеристике вођица, представљени су начини унапређења тих вођица. Детаљно је дефинисана опрема која је коришћена при експериментисању и представљени су различити начини за испитивање вођица уз помоћ различитих трибометара. Представљена је и сва опрема која је била коришћена у лабораторији уз графички приказ. Објашњен је и рад трибометара и која је њихова намена, објашњена је теорија иза уређаја, али су и дате карактеристике различитих трибометара уз праксе заједно са неким спецификацијама.

Одрађени су и модели испитивања вођица и представљени су преко програма за израду делова "САТИА", дато је и објашњење склопа, односно објашњено је из којих се све делова склоп састоји.

Може се закључити да вођице имају врло практичну примену у области производње или израде полупроизвода, њихова употреба ће идаље бити неопходна у машинству. Како напредује наука тако напредују и материјали израде, односно повећава се њихова тачност израде што доводи и до веће прецизности рада.

Осим овога, мазива се све више унапређују па се самим тим и негативне појаве код вођица такође смањују. Уља која се користе такође постају све чистија са малим бројем нечистоћа. Сва ова споредна унапређења додатно унапређују целокупну функционалност и употребљивост вођице у практичном раду.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] IVTAAG linear guide, <https://www.pbcllinear.com/Products/Integral-V-Technology/IVTAAG-Linear-Guide>, приступљено 15.06.2020.
- [2] Светислав Захар, Машине алатке 2, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац 1997. година
- [3] Ђорђе Чича, Машине алатке, Универзитет у Бања Луци Машински факултет, Бања Лука 2016. година
- [4] Бранислав Јеремић, Триболошки процеси при динамичком оптерећењу, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац 1997. година
- [5] Linear reciprocating tribometer, https://www.researchgate.net/figure/Linear-reciprocating-tribometer-used-for-experimental-investigation-of-transducer_fig2_225859873, приступљено 21.06.2020.
- [6] Linear reciprocating tribometer, <https://www.lehigh.edu/~intribos/environment.html>, приступљено 22.06.2020.
- [7] Design of Modern Concept Tribometer with Circular and Reciprocating Movement, <http://www.tribology.fink.rs/journals/2006/3-4/1.pdf>, приступљено 22.06.2020.
- [8] Иван Мачужић, Проактивни приступ у стратегији одржавања хидрауличких система, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет, Крагујевац 2011. Година
- [9] S type load cell, http://www.forsentek.com/prodetail_35.html, приступљено 14.07.2020.
- [10] Tension compression force transducer, http://www.forsentek.com/prodetail_324.html, приступљено 14.07.2020.